

Evaluación de Interferencias en Escenarios Urbanos Interiores en Bandas Inferiores a 6 GHz

Interference Assessment in Indoor Urban Scenario in sub-6GHz bands

Eduardo Chancay¹ <https://orcid.org/0000-0002-8102-1537>,
Manuel Montaña¹ <https://orcid.org/0000-0001-6816-0439>, María Antonieta Alvarez¹
<https://orcid.org/0000-0002-4017-2718>, Francisco Novillo¹ <https://orcid.org/0000-0003-4278-2867>

¹*Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador*
edulchan@espol.edu.ec, mamontan@espol.edu.ec,
aalvare@espol.edu.ec, fnovillo@espol.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2024/05/28

Aceptado: 2024/06/27

Publicado: 2024/06/30

Resumen

En un mundo cada vez más interconectado, las bandas de frecuencia no licenciadas de 2.4 y 5 GHz han sido fundamentales para el desarrollo de aplicaciones inalámbricas como Wi-Fi (dispositivos IoT), domótica, streaming de medios, entre otras. Sin embargo, en entornos urbanos altamente poblados, como la ciudad de Guayaquil-Ecuador, la administración eficiente de estas franjas de espectro es un desafío crítico que permite el desarrollo de ciudades inteligentes y sostenibles. La falta de estudios exhaustivos sobre interferencias en estas bandas en ambientes interiores densos hace que exista deterioro en la confiabilidad de las redes, limitando la capacidad de utilizar esquemas de modulación (MCS) más elevados, esenciales para aplicaciones que requieren mayores velocidades de conexión. Este estudio se enfoca en la recolección precisa de mediciones del espectro radioeléctrico en el centro de la ciudad de Guayaquil, específicamente en las bandas de 2.4 y 5 GHz, con el propósito de evaluar los niveles de interferencia y la disponibilidad de canales en estos entornos urbanos densamente poblados. Los resultados revelan una saturación más acentuada en la banda de 2.4 GHz, subrayando la urgente necesidad de una gestión más efectiva del espectro en áreas urbanas densamente pobladas para garantizar una conectividad sólida.

Palabras clave: Modelado de interferencias, detección de espectro, banda sin licencia, ciudades inteligentes, capacidad del canal.

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones.

Como citar: Chancay, E., Montaña, M., Alvarez, M. A. & Novillo, F. (2024). Evaluación de Interferencias en Escenarios Urbanos Interiores en Bandas Inferiores a 6 GHz. *Revista Tecnológica - Espol*, 36(1), 44-56. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1178>

Abstract

In an increasingly interconnected world, the unlicensed 2.4 and 5 GHz frequency bands have been essential for developing wireless applications such as Wi-Fi (IoT devices), home automation, and media streaming, among others. However, in highly populated urban environments, such as Guayaquil, Ecuador, the efficient administration of these spectrum swaths is a critical challenge that allows the development of smart and sustainable cities. The lack of comprehensive studies on interference in these bands in dense indoor environments causes a deterioration in network reliability, limiting the ability to use higher modulation schemes (MCS) which are essential for applications that require higher connection speeds. This study focuses on the precise collection of radio spectrum measurements in Guayaquil, specifically in the 2.4 and 5 GHz bands, to evaluate interference levels and channel availability in these densely urban environments. The results reveal more pronounced saturation in the 2.4 GHz band, underscoring the urgent need for more effective spectrum management in densely populated urban areas to ensure robust connectivity.

Keywords: Interference Modeling, Spectrum Sensing, Unlicensed Band, Smart Cities, Channel Capacity.

Introducción

En una sociedad moderna donde el acceso a la red inalámbrica móvil es un recurso de uso cotidiano, ha provocado la congestión en el acceso al espectro radioeléctrico, siendo este un recurso que permite la conectividad en gran parte de las actividades del día a día. En particular, las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz desempeñan un papel crucial en la transmisión de datos, respaldando una amplia variedad de servicios esenciales. Estas incluyen las redes Wi-Fi tradicionales, la comunicación con vehículos no tripulados (UAV) (Zang et al., 2022), redes de sensores industriales (Wang et al., 2023; O'Brien et al., 2023), y la realidad extendida (XR) (Lopez-Perez et al., 2019). Sin embargo, en entornos urbanos densamente poblados, con proyecciones de crecimiento alto como la ciudad de Guayaquil-Ecuador, la gestión eficaz de estas bandas de espectro se convierte en un desafío que cobra más importancia en la actualidad.

El acceso a internet en la ciudad de Guayaquil se da mayormente por medios inalámbricos, como lo reflejan los datos estadísticos de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, donde un 62.35% de cuentas Internet por cada 100 habitantes, utilizan medios móviles (ARCOTEL, 2024), debido a este rápido crecimiento de la demanda de acceso a internet móvil, las ciudades enfrentan una presión creciente para la mejora en la infraestructura de telecomunicación. La proliferación de dispositivos conectados y aplicaciones que requieren de una red densa que permita una alta capacidad y baja latencia, como los servicios de realidad aumentada (AR) y virtual (VR), está llevando las bandas de 2.4 y 5 GHz a sus límites. Esto ha generado una necesidad urgente de explorar nuevas soluciones y tecnologías que puedan ofrecer un rendimiento superior y una mejor gestión del espectro.

Existen varias investigaciones que analizan las interferencias en diferentes entornos, el trabajo de (Chounos et al., 2022) se centra en la predicción de niveles de interferencia en redes basadas en el estándar IEEE 802.11, subrayando la importancia de comprender y gestionar la interferencia en redes inalámbricas. Este estudio respalda la necesidad de medir y evaluar las interferencias en entornos urbanos densos para asegurar la eficiencia y confiabilidad de las redes. Los trabajos de Su et al., 2023; Wang et al., 2023 analizan estadísticas de interferencia en bandas con y sin licencia, resaltando la relevancia de medir la interferencia en diferentes bandas y contextos. Estos estudios están en sintonía con la presente investigación enfocada en las bandas de 2.4 y 5 GHz. Además, Hou et al., 2021 utiliza mediciones del espectro para

estudiar la duración de estados ocupados e inactivos, proporcionando perspectivas valiosas sobre cómo las interferencias afectan la conectividad en redes inalámbricas. Por último, el trabajo de Shiba et al., 2022 presenta un monitor de espectro compacto para IoT inalámbrico, subrayando la importancia de contar con herramientas de medición adecuadas en diversos entornos inalámbricos. En conjunto, estos trabajos relacionados respaldan y contextualizan la investigación en la creciente demanda de conectividad en diferentes entornos, como los urbanos densos.

En esta investigación se evalúa el estado de la red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.11ac. Para ello, se recopilieron mediciones exhaustivas del espectro radioeléctrico en ambientes interiores de zonas urbanas densas, lo que permite comprender en detalle el comportamiento de las interferencias presentes en las bandas de 2.4 y 5 GHz. Estas mediciones no solo proporcionan una comprensión detallada de las condiciones actuales de la red, sino que también sirven como base para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en algoritmos de predicción que minimicen el censado del espectro. De tal manera que los dispositivos optimicen el acceso a la red y se disminuya el consumo de energía en dispositivos móviles, y a su vez se pueda garantizar la conectividad y una baja latencia en entornos urbanos densos que contribuye a la mejora de la capacidad y el acceso a las redes inalámbricas en escenarios futuros. Un entorno urbano denso es un área con alta concentración de usuarios y dispositivos, mayor interferencia, y desafíos significativos para mantener una cobertura y calidad de servicio óptimas debido a la complejidad del entorno físico y la alta demanda de capacidad de red. Kamel et al., 2016 define el entorno urbano denso cuando el número de puntos de acceso es mayor que el número de usuarios activos.

El despliegue de Wi-Fi 7, también conocido como IEEE 802.11be, presenta una solución innovadora para estos problemas. Wi-Fi 7 introduce características avanzadas como la operación en la banda de 6 GHz, ofrece grandes tasas de datos que pueden llegar a alcanzar los 30 Gbps, entre otras características avanzadas como la conexión multiusuario (MU-MIMO) por medio de técnicas beamforming, mayor ancho de banda por canal, y técnicas de modulación más eficientes (ANRITSU, 2022). Estas mejoras no solo aumentan la velocidad y capacidad de la red, sino que también reducen la interferencia con otros dispositivos, facilitando una conectividad más estable y robusta en entornos urbanos saturados. En este estudio, no se analizan las características técnicas de Wi-Fi 7 dado que en Ecuador la banda de 6 GHz esta designada para sistemas de red fija por satélite acorde al plan nacional de frecuencias, pero se estudia la disponibilidad del espectro que ya se ha asignado en otras partes del mundo (ARCOTEL, 2021).

A medida que las ciudades como Guayaquil continúan creciendo y evolucionando hacia entornos más inteligentes y conectados, es esencial que las infraestructuras de comunicación se mantengan a la par. Las tecnologías emergentes, como Wi-Fi 7, ofrecen un camino prometedor para superar los desafíos actuales y futuros, asegurando que las redes inalámbricas puedan soportar las demandas de una sociedad digital en constante expansión. La investigación y el desarrollo continuos en este campo son cruciales para proporcionar soluciones sostenibles y eficientes.

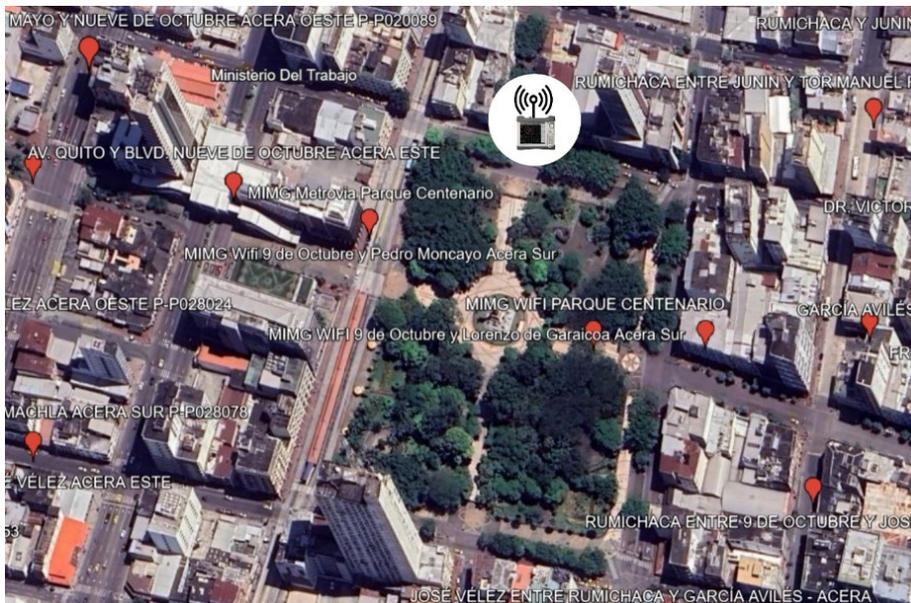
El artículo está organizado como sigue. Sección 2 presenta en detalle el lugar y franja horaria de medición, el montaje de las antenas, y configuración del equipo analizador espectral. En la Sección 3 se procesa la data y se modela estadísticamente la interferencia para las bandas y sus canales. Finalmente, con el modelo de la relación señal-ruido de interferencia, se concluye acerca del estado de la red en la Sección 4.

Materiales y Métodos

Para llevar a cabo la campaña de medición, se seleccionó un departamento en el segundo piso de un edificio situado en el centro de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Esta área urbana se caracteriza por edificios altos y las estructuras densamente agrupadas, también por una alta densidad de puntos de acceso inalámbricos, tanto públicos, provistos por el Municipio de Guayaquil, como privados, pertenecientes a comercios y residencias. Los puntos de acceso distribuidos en la zona de medición operan en las bandas de 2.4 y 5 GHz, proporcionando acceso a internet. La elección de este entorno permite analizar el caso de mayor congestión por condiciones de tráfico e interferencia en redes inalámbricas en un contexto urbano denso, como se muestra en la Figura 1. La gran mayoría de estos puntos de acceso operan bajo el estándar IEEE 802.11ac, que permiten el acceso a la banda de 2.4 o 5 GHz de manera no concurrente, acorde a las características especificadas por el fabricante para el modelo de los equipos que se detectan operativos durante la medición, tanto al interior como en el exterior del edificio.

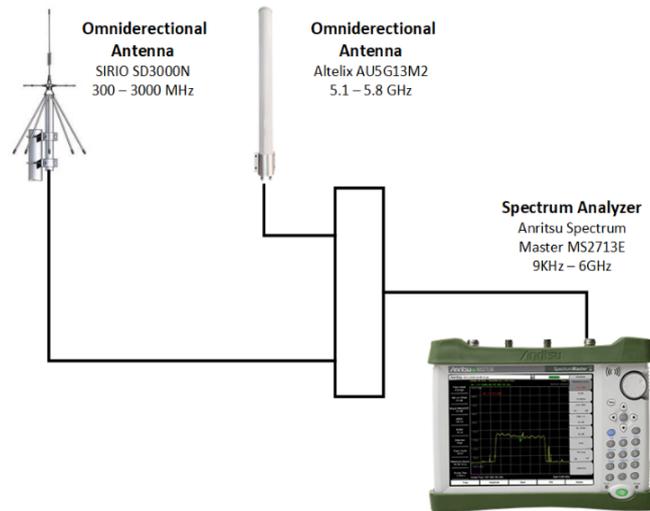
Figura 1

Mapa del sitio de medición



Nota: Los puntos rojos indican la ubicación de los diferentes puntos de acceso que actúan como interferencia en el receptor. Para más información: <https://www.telconet.net/holdingtelconet/wifi>

Para la medición se utilizó un equipo analizador espectral ANRITSU modelo MS2713E, al que se le conectó una antena SIRIO 3000 con una ganancia de 0 dB para realizar mediciones en la banda de 2.4 GHz, y una antena ALTELIX AU5G13M2 con una ganancia de 2.5 dBi para las mediciones en la banda de 5 GHz. Ambas antenas se conectaron al analizador espectral a través de un cable coaxial con una pérdida promedio de 3dB/100 m., asegurando la precisión en la captura de datos (ver Figura 2). Estos equipos se dispusieron en un trípode cerca de la ventana de uno de los departamentos seleccionados para la medición, permitiendo una buena recepción de las señales y minimizando posibles obstrucciones.

Figura 2*Configuración del equipo de medición en el edificio*

Nota: Configuración de las conexiones las antenas con el equipo analizador espectral. La antena SIRIO 3000 es utilizada para realizar las mediciones en la banda de 2.4 GHz, y la antena ALTELIX AU5G13M2 para las mediciones en la banda de 5 GHz.

Se estableció un nivel de referencia a -30 dBm para poder observar las ráfagas de información en la banda de medición con claridad. Esta configuración fue crucial para detectar señales débiles y asegurar la captura de todas las transmisiones relevantes en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz. Además, se calibró el nivel de corriente continua (DC) del dispositivo, que permite una operación estable y precisa del equipo. La resolución de ancho de banda (RBW) se ajustó a 300 KHz, lo que permite obtener más muestras por barrido y, en consecuencia, observar el tráfico de alta velocidad con mayor detalle. Esta configuración específica facilitó la detección de todas las ráfagas de subida y bajada de la red, capturando tanto las señales de transmisión como las de recepción, como se describe en detalle en la Tabla 1.

Tabla 1*Parámetro de configuración del equipo de medición*

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia de inicio 2.4 GHz	$f_{st,2.4G}$	2401 MHz
Frecuencia de parada 2.4 GHz	$f_{sp,2.4G}$	2473 MHz
Frecuencia de inicio 5 GHz	$f_{st,5G}$	5000 MHz
Frecuencia de parada 5 GHz	$f_{sp,5G}$	6000 MHz
Ancho de banda IF	IF_{BW}	300 kHz
Resolución del ancho de banda	RBW	300 kHz
Ancho de banda de video	VBW	300 kHz
Altura Tx/Rx	h_{Tx}, h_{Rx}	1.6 m
Nivel de referencia	Ref_{lvl}	-30 dBm

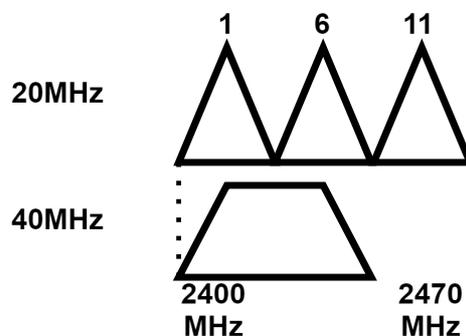
Durante un mes se realizó la campaña de medición en la banda de 2.4 GHz y 5 GHz, se tomaron mediciones desde de 0:00 hasta las 23:59 en el centro de Guayaquil, con estas mediciones se determinó que las horas de mayor tráfico se encontraban entre las 12:00 – 13:00 en el día y entre las 19:00 – 23:00 en la noche. Debido a limitaciones técnicas, se optó por medir el nivel de potencia durante una de las franjas horarias de mayor tráfico en la red, comprendido entre las 12:00 a 13:00 horas. Con lo que se pretende modelar el peor escenario

de interferencia, se destinaron 30 min. para la recolección en la banda de 2.4 GHz y otros 30 min. en la banda de 5 GHz. Para ambos casos, la frecuencia de muestreo es $f_s = 4200$ muestras/s., durante una semana.

Para las mediciones realizadas en la banda Wi-Fi de 2.4 GHz, se consideró su operación desde 2.412 MHz (canal 1) hasta 2.472 MHz (canal 13). Lo que implica tener un canal cada 5 MHz, distribuidos en aproximadamente 70 MHz asignados por regulación del espectro, debido a esto existe solapamiento entre los canales. Otra consideración que se debe tener presente es el hecho de que se puede hacer uso de anchos de canal entre 20 MHz o 40 MHz, como se ve en la Tabla 2, un solo usuario VR avanzado requiere de una tasa de datos de 400 Mbps y una latencia de 20 ms para garantizar la buena experiencia de los usuarios. Por esta razón, se optó analizar únicamente los canales no solapados con anchos de 20 MHz (1, 6, 11) y un canal de 40 MHz (Figura 3).

Figura 3

Distribución de los canales para la banda de 2.4 GHz en el estándar IEEE 802.11ac



Nota: Distribución de los canales no solapados en la banda de 2.4 GHz, con anchos de 20 MHz (1, 6, 11) y canal de 40 MHz.

En cuanto a la banda de 5 GHz, hay 21 canales de 20 MHz que no se encuentran solapados, a diferencia de lo que sucede en la banda de 2.4 GHz, lo que disminuye la interferencia entre canales adyacentes. Esta disposición de canales permite una mayor eficiencia y menor interferencia en la transmisión de datos. Además, esta banda ofrece la posibilidad de utilizar canales extendidos con anchos de banda de 40 MHz, 80 MHz y hasta 160 MHz (Figura 4). Al emplear estos canales más amplios, la diferencia en el rendimiento es notable. Usando el doble o hasta cuatro veces el ancho de banda estándar, se logra hasta una mejora del 50% en la tasa de datos percibida. Esta capacidad de transmisión aumentada es particularmente beneficiosa para aplicaciones que requieren altas velocidades de datos, como la transmisión de video en alta definición y el gaming en línea.

Tabla 2

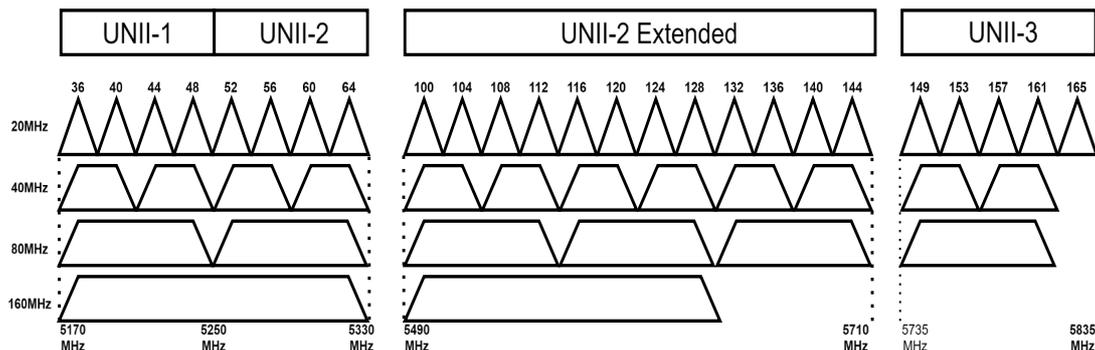
Requerimientos de ancho de banda y latencia para sistemas VR (Wong et al., 2022)

Realidad Virtual	Resolución	Resolución equivalente de TV	Ancho de banda	Latencia
VR Inicial	1K x 1K @ visual field 2D 30fps 8bit 4K	240p	25 Mbps	40 ms
VR Estable	2K x 2K @ visual field 2D 30fps 8bit 8K	SD	100 Mbps	30 ms
VR Avanzado	4K x 4K @ visual field 2D 60fps 10bit 12K	HD	400 Mbps	20 ms
VR Futuro	8K x 8K @ visual field 3D 120fps 12bit 24K	4K	2.35 Gbps	10 ms

Sin embargo, una de las desventajas de la banda de 5 GHz es que presenta áreas de cobertura más pequeñas en comparación con la banda de 2.4 GHz. Esto se debe a la mayor atenuación por propagación en la frecuencia de operación de la banda, lo que implica que las señales se debilitan más rápidamente con la distancia. Como resultado, los dispositivos que operan en esta banda pueden necesitar más puntos de acceso para cubrir la misma área que cubriría un solo punto de acceso en la banda de 2.4 GHz. Esta limitación debe ser considerada al planificar y desplegar redes inalámbricas, especialmente en entornos grandes o con múltiples obstáculos físicos.

Figura 4

Distribución de los canales para la banda de 5 GHz en el estándar IEEE 802.11ac



Nota: Distribución de los canales extendidos en la banda de 5 GHz, con anchos de banda de 40 MHz, 80 MHz, y hasta 160 MHz.

Resultados y Discusión

Para el análisis de los resultados, se procesaron los datos para cada banda aplicando las asignaciones de canales conforme al estándar IEEE 802.11ac en 2.4 GHz y 5 GHz, para los diferentes anchos de canal (20, 40, 80 y 160 MHz) disponibles en la banda. La medición de la banda se realizó de forma concurrente con un analizador de espectro (como se detalla en la Sección Materiales y Métodos) y, posteriormente, se procedió al procesamiento de los datos para los diferentes anchos de canal.

Dado que la variable de interferencia es aleatoria se hace uso de la distribución Kernel (no paramétrica) de la función de densidad de probabilidad (PDF) de una variable aleatoria para poder describir adecuadamente los datos y evitar realizar suposiciones acerca de su distribución.

La distribución Kernel se define mediante una función de suavizado y un valor de ancho de banda, que controlan la suavidad de la curva de densidad resultante (Bowman, 1997). El estimador de densidad del Kernel es la función de probabilidad estimada de una variable aleatoria. Para cualquier valor real de x , la fórmula del está dada por:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (1)$$

Donde x_1, x_2, \dots, x_n son muestras aleatorias de una distribución desconocida, n es el tamaño de la muestra, $K(\cdot)$ es el suavizador Kernel y h es el ancho de banda. El estimador Kernel para la función de distribución acumulada (CDF), para cualquier valor real de x está dada por:

$$\hat{F}_h(x) = \int_{-\infty}^x \hat{f}_h(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (2)$$

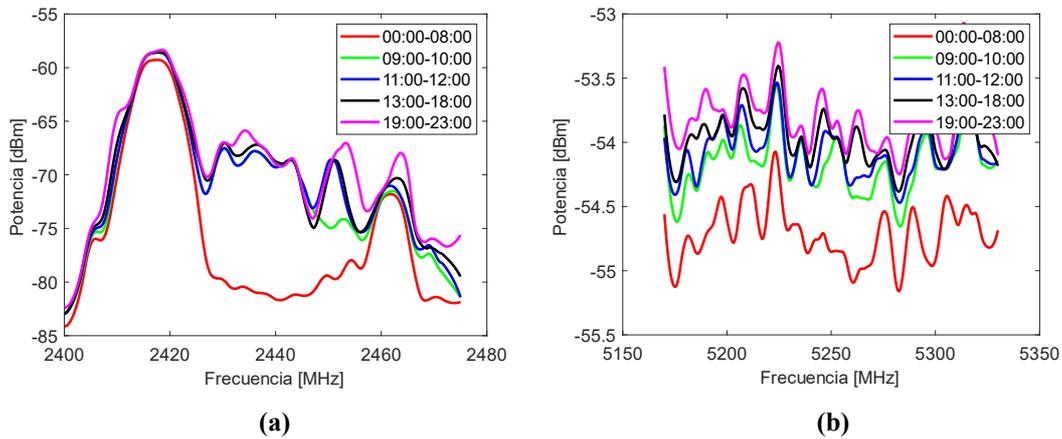
Donde

$$G(x) = \int_{-\infty}^x K(t) dt. \quad (3)$$

Para determinar el comportamiento de uso de la banda de 2.4 GHz en un periodo de 24 horas, se realizó mediciones del tráfico de la red. En la Figura 5 se observa que el mayor congestionamiento sucede en la mañana y el pico máximo se encuentra situado entre las 12h00 y 13h00 del día en cuestión. Con este valor obtenido se puede decir que la banda tiene un nivel de interferencia de -80 dBm mayormente concentrado en el canal 1.

Figura 5

Espectro del promedio de interferencia por horas



Nota: Medición del tráfico de la red por hora en la banda de (a) 2.4 GHz y (b) 5GHz.

Para comprobar que la red de corto alcance opere de tal forma que el usuario no experimente desconexiones o una alta latencia en el enlace físico se modela la interferencia haciendo uso del Kernel en la ec. (1), donde se puede observar los niveles de interferencias presentes en las bandas y la congestión que tienen los canales. Para modelar la relación señal a interferencia más ruido (SINR), se debe calcular la potencia que captaría el dispositivo a una distancia D dentro de un ambiente interior para el caso de línea de vista (LOS) (ec. (4)), y para el caso de que no haya línea de vista (NLOS) (ec. (6)), para ello se hace uso del modelo 3GPP (Merias, 2022) que considera una propagación con consideraciones tridimensionales y los parámetros de distribución para ambiente interiores:

$$PL_{LOS} = 32.4 + 17.3 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c), \quad (3)$$

$$PL_{NLOS} = \max(PL_{LOS}, \overline{PL}_{NLOS}) \quad (4)$$

$$PL_{NLOS} = 38.3 \log_{10}(d_{3D}) + 17.3 + 24.9 \log_{10}(f_c), \quad (6)$$

Donde PL_{LOS} denota la pérdida de trayectoria en la línea de vista de comunicación directa entre el transmisor y el receptor, d_{3D} representa la distancia tridimensional (en metros) entre el transmisor y el receptor de 1 a 150 m., f_c es la frecuencia portadora del equipo transmisor (AP) con un valor de 20 dBm, PL_{NLOS} representa la pérdida de trayectoria sin línea de vista debido a obstáculos en ambientes interiores. El presupuesto del enlace se calcula como se muestra en la ec. (7) para determinar la potencia que recibiría el dispositivo (P_{Rx}) dentro de un área de cobertura en un ambiente interior:

$$P_{Rx} = P_{AP} + G_{Tx} - PL_{indoor} + G_{Rx}, \quad (7)$$

P_{AP} es la potencia de transmisión del AP, G_{Tx} y G_{Rx} son la ganancia de transmisión del AP y la ganancia de recepción del dispositivo receptor, respectivamente, y PL_{indoor} puede ser la pérdida de ruta definida en (4) y (6).

Teniendo en cuenta los niveles de interferencia modelados, y de esta forma haciendo uso de una distribución normal para la potencia que genera el AP, se puede comparar con la distribución de la interferencia y obtener una distribución aproximada del SINR (ec. (8)), que se modela:

$$SINR = \frac{P_{Rx}}{N + \sum_{i=0}^n I_i}, \quad (8)$$

N es el ruido del ambiente, n son las muestras tomadas en la campaña de medición, I_i es la i -ésima interferencia detectada en los puntos de medición. Es crucial identificar las áreas donde las redes inalámbricas pueden sufrir degradación y ofrecer un enlace de baja calidad. basándonos en el análisis del SINR. Como resultado, se puede determinar si las tasas de modulación se ven comprometidas, produciendo que la velocidad de los datos se vea limitada por la interferencia. La Tabla 3 muestra la tasa de datos para diferentes modulaciones y codificación que se puede ofrecer en un entorno con interferencias.

Tabla 3

Tasa de datos por nivel de modulación para el estándar IEEE 802.11ac (WirelessLAN, P., 2023)

MCS	Modulación	Codificación	20 MHz		40 MHz (Mbps)		80MHz (Mbps)		160 MHz (Mbps)	
			Rate (Mbps)	SNR (dB)	Rate (Mbps)	SNR (dB)	Rate (Mbps)	SNR (dB)	Rate (Mbps)	SNR (dB)
0	BPSK	1/2	7.2	2	15	5	32.5	8	65	11
1	QPSK	1/2	14.4	5	30	88	65	11	130	14
2	QPSK	3/4	21.7	9	45	12	97.5	15	195	18
3	16-QAM	1/2	28.9	11	60	14	130	17	260	20
4	16-QAM	3/4	43.3	15	90	18	195	21	390	24
5	64-QAM	2/3	57.8	18	120	21	260	24	520	27
6	64-QAM	3/4	65	20	135	23	292.2	26	585	29
7	64-QAM	5/6	72.2	25	150	28	325	31	650	34
8	256-QAM	3/4	86.7	29	180	32	390	35	780	38
9	256-QAM	5/6	NA	31	200	34	433	37	866.7	40

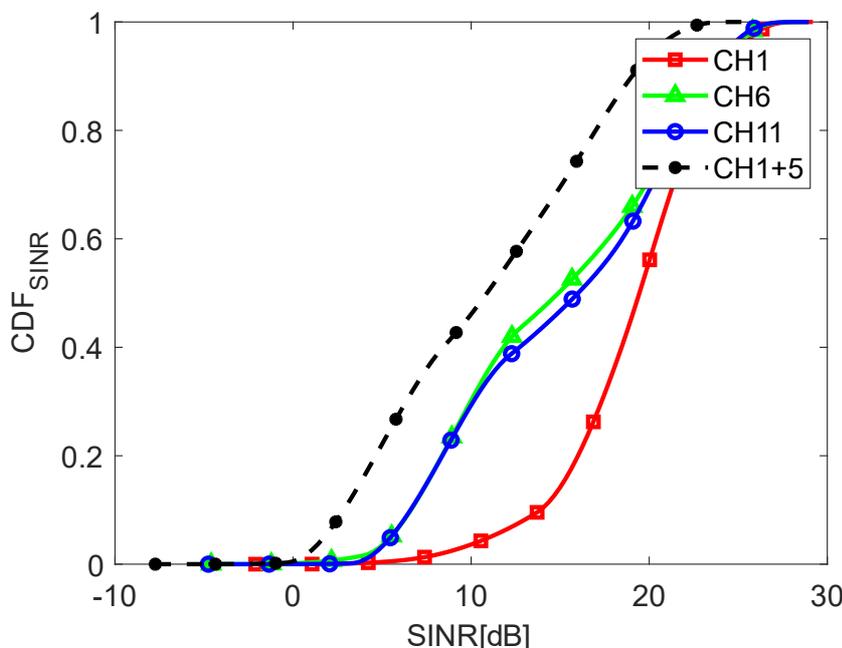
Resultado de las mediciones en 2.4 GHz

En las mediciones realizadas durante el lapso de una semana (lunes a viernes), en las horas de mayor tráfico comprendida entre las 12h00 – 13h00 del día en cuestión, se realizó la captura y modelamiento de la red para toda la banda de 2.4 GHz. En la Figura 6 se muestra la función de distribuciones acumulada (CDF) para la banda de 2.4 GHz, para dos anchos de canal: i) 20 MHz distribuidos desde el canal 1 hasta el 11 (2401 - 2473 MHz), que son los canales disponibles para América Latina; y ii) canales extendidos de 40 MHz. Contrario a lo que se puede apreciar en el estudio del espectro por horas, temporalmente la CDF demuestra que los canales 6 y 11 tiene menos disponibilidad, donde los niveles de relación señal interferencia se encuentran cerca de 10 dB, con un canal de 40 MHz la máxima tasa de datos ofrecida es de 45 Mbps, con una probabilidad de ocurrencia del 50%. Son niveles significativos que degradan la calidad del enlace y reducen las tasas de datos. Para el canal 1 se puede apreciar que la banda se encuentra con niveles alrededor de los 20 dB, con lo cual se alcanzarían tasas de datos de 120 Mbps, que son niveles más manejables para el sistema sin comprometer la experiencia del usuario esperada.

Para el caso de canales extendidos de 40 MHz, se muestra un nivel de relación señal interferencia alrededor de 10 dB para una probabilidad del 40%. Esto limita el canal en los niveles de modulación que puede ofrecer el enlace, lo que presenta que en la banda de 2.4 GHz es muy limitado en capacidad de canal y tasa de datos, por lo que no es una elección para sistema de nueva generación que requieran altas velocidades de transmisión, donde los requerimientos superan los 2 Gbps, para los sistemas de realidad aumentada AR/VR (ver Tabla 2) que están tomando relevancia, no solo en la industria de los video juegos, sino también en aplicaciones relacionadas con la quinta revolución industrial (Profesional, 2023).

Figura 6

Distribución de probabilidad acumulada del SINR en la banda 2.4 GHz



Nota: Función de distribución acumulada del SINR en la banda de 2.4 GHz para los anchos de canal de 20 MHz distribuidos desde el canal 1 hasta el 11, y canales extendidos de 40 MHz.

Resultados de las mediciones en 5 GHz

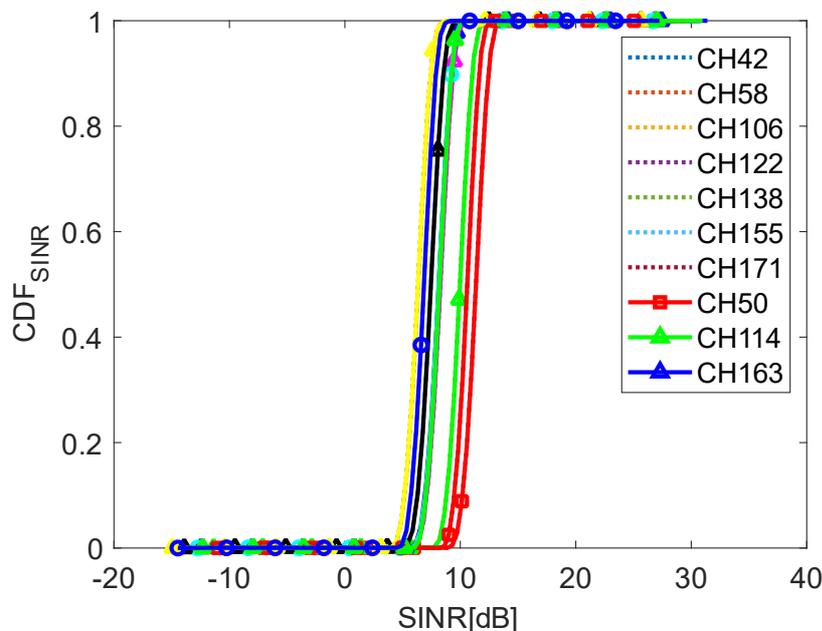
En el caso de la banda de 5 GHz, a diferencia de la banda de 2.4 GHz, los canales de 20 MHz no se superponen y se dividen en tres bandas denominadas como Unlicensed National Information Infrastructure UNII-(1,2,3) (ver Figura 4). Para los canales de 20 y 40 MHz la disponibilidad está sometida a alto niveles de interferencia superiores a los -50 dBm. Es por ello, que analizaremos los canales de 80 MHz y 160 MHz (Figura 7), que al tener más disponibilidad de espectro el efecto de la interferencia se distribuye en todo el ancho de banda.

Para el caso de los canales con ancho de banda de 80 y 160 MHz, se muestra un nivel de relación señal interferencia de 10 dB con lo que un canal de 160MHz podría alcanzar una tasa de datos de 65 Mbps, con una probabilidad acumulada del 60%, lo que ocasiona un aumento en la latencia del sistema debido a la colisión de los usuarios por los tiempos de acceso más cortos que provoca que no puedan acceder al canal, en consecuencia, la calidad de servicio que se experimenta en la banda no satisface a los requerimientos de los usuarios modernos. Entre los cuales se puede ejemplificar el video en alta definición, streaming, y juegos en línea, que generan una demanda creciente de ancho de banda. Esto lleva a una mayor utilización de los canales más amplios, como los son de 80 y 160 MHz, con el fin de satisfacer estas necesidades de rendimiento, aunque es mínimo debido a los altos niveles de interferencia.

Esto evidencia que, en áreas urbanas densamente pobladas, como lo es el centro de la ciudad de Guayaquil, la densidad de redes Wi-Fi es significativamente alta. La falta de canales disponibles lleva a que múltiples redes compartan los mismos canales, dando lugar a una competencia por el espectro de frecuencia y, como resultado, a una interferencia co-canal. En última instancia, la saturación de los canales se traduce en latencia elevada y conexiones inestables. Los usuarios pueden experimentar conexiones más lentas y dificultades para mantener una comunicación con su propio AP.

Figura 7

Distribución de probabilidad acumulada del SINR en la banda 5 GHz



Nota: Función de distribución acumulada del SINR en la banda de 5 GHz para diferentes canales con ancho de banda de 80 y 160 MHz.

Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas en las bandas de 2.4 y 5 GHz indican una marcada diferencia en cuanto a la disponibilidad de canales y la congestión del espectro que no se podría extrapolar a escenarios fuera de Guayaquil dada la escasa cantidad de puntos de medición ejecutados. La banda de 2.4 GHz presenta un alto tráfico debido a que muchos dispositivos activos no disponen de receptores para la banda de 5 GHz. Esta banda, a menudo saturada, es utilizada por dispositivos de baja a media capacidad, como cámaras de seguridad, routers domésticos, y electrodomésticos inteligentes. Además, los dispositivos que utilizan esta banda suelen emplearse en aplicaciones de alta velocidad, como el Cloud Gaming y la transmisión de video en alta resolución, lo cual incrementa aún más la congestión y reduce la tasa de datos a una velocidad de 120Mbps, debido a los niveles de interferencia.

Por otro lado, como se vio en la Figura 7, la banda de 5 GHz muestra una congestión notable en todos sus canales, lo cual puede atribuirse a la creciente demanda de dispositivos que soportan el estándar IEEE 802.11ac. Esta banda es crucial para aplicaciones que requieren un alto ancho de banda y menor latencia, como videoconferencias en alta definición, streaming 4K, y entornos de trabajo colaborativo en línea dado que en condiciones ideales no podría ofrecer un enlace de 866.7 Mbps, pero debido a la alta interferencia solo se puede aprovechar una mínima tasa de datos de 65 Mbps. A medida que más dispositivos adopten el estándar 802.11ac, la necesidad del uso de nuevas tecnologías como el IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), se espera que esta banda enfrente una mayor demanda, lo que da paso al desarrollo de algoritmos de radio cognitiva que aprovechen mejor el uso del espectro para evitar futuros problemas de congestión a través de una gestión dinámica del espectro.

Uno de los aspectos más relevantes a futuro de esta investigación es su potencial impacto en la viabilidad de servicios AR/VR en entornos interiores, dado que estos sistemas estarán presentes en aplicaciones industriales, vehiculares y de ocio como una herramienta para la expansión a las limitaciones físicas que tienen las pantallas. Con los datos recopilados, se podrá modelar la capacidad del canal y determinar si es factible ofrecer servicios de calidad bajo estas condiciones. La realidad aumentada y virtual requiere una conexión de alta velocidad y baja latencia para proporcionar una experiencia de usuario satisfactoria. Este modelamiento permitirá estimar los requisitos necesarios para brindar un servicio AR/VR confiable y sentará las bases para futuras investigaciones en este campo. Además, se podrán desarrollar estrategias de minimización de interferencias por medio de modelos de Machine Learning que permita predecir la disponibilidad de los canales sin tener que censarlos previamente, de tal manera que se asegure la calidad de los servicios AR/VR en entornos urbanos densos, marcando un avance significativo hacia la conectividad del futuro.

Reconocimientos

Los autores agradecen a la Escuela Superior Politécnica del Litoral y al Departamento de Investigación por el apoyo a través del proyecto de investigación denominado " Análisis de los niveles de ruido e interferencia en la banda ISM y evaluación de desempeño para sistemas de telecomunicaciones de corto y largo alcance, en zonas rurales y urbanas para la aplicabilidad de la banda no licenciada de 6GHz en Ecuador".

Referencias

ARCOTEL, Cuentas-internet-fijos-y-moviles_Mar-2024, Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones: <https://www.arcotel.gob.ec/abonados-y-usuarios/>

- Bowman, A. W. (1997). *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations. Oxford Statistical Science Series*, Oxford University Press, USA.
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=b965cb23260018d7d1fa99bc9d87035d>
- Chounos, K., Karamichailidis, P., Makris, N., Korakis, T. (2022). Unlicensed spectrum forecasting: An interference umbrella based on channel analysis and machine learning. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 9(5), 3421–3436. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2022.3180171>
- Hou, Y., Webber, J., Yano, K., Kawasaki, S., Denno, S., Suzuki, Y. (2021). Modeling and predictability analysis on channel spectrum status over heavy wireless lan traffic environment. *IEEE Access* 9, 85795–85812. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088123>
- Kanellopoulos, D., Sharma, V.K., Panagiotakopoulos, T., Kameas, A. (2023). Networking architectures and protocols for IoT applications in smart cities: Recent developments and perspectives. *Electronics* 12(11). <https://doi.org/10.3390/electronics12112490>
- Lopez-Perez, D., Garcia-Rodriguez, A., Galati-Giordano, L., Kasslin, M., Doppler, K. (2019). IEEE 802.11be extremely high throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax. *IEEE Communications Magazine* 57(9), 113–119. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>
- M. Kamel, W. Hamouda and A. Youssef, "Ultra-Dense Networks: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2522-2545, Fourthquarter 2016, <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2571730>.
- Merias, P. (2022). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. *Tech. rep.*, 3GPP.
- O'Brien, W., Penica, M., Hayes, M., O'Connell, E. (2023). Capacity analysis: The potential of the wireless factory of the future. *34th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. pp. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ISSC59246.2023.10162059>
- Shiba, T., Furuichi, T., Akimoto, K., Motoyoshi, M., Kameda, S., Suematsu, N. (2022). Real-time wideband spectrum monitor using multiple sampling frequency direct RF undersampling for wireless IoT. *51st European Microwave Conference (EuMC)*. pp. 725–728.
<https://doi.org/10.23919/EuMC50147.2022.9784290>
- Su, Z., Pahlavan, K., Islam, B. (2023). An empirical study of interference features in licensed and unlicensed bands for intelligent spectrum management. *IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. pp. 252–260.
<https://doi.org/10.1109/WoWMoM57956.2023.00040>
- Wang, J., Zhong, X., Zhou, S. (2023). Channel allocation algorithm of Wi-Fi. *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. pp. 677–682.
<https://doi.org/10.1109/ICNC57223.2023.10074461>
- Wang, X., Huang, J., Shi, B., Ou, Z., Luo, G., Kong, L., Zhang, D., Xu, C. (2023). RF-sifter: Sifting signals at layer-0.5 to mitigate wideband cross-technology interference for IoT. *Proceedings of the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. MobiCom '23*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3570361.3592513>
- WirelessLAN, P. (2023). MCS Table and How to use it. *WirelessLAN Professional*.
- Wong ES, Wahab NHA, Saeed F, Alharbi N. 360-Degree Video Bandwidth Reduction: Technique and Approaches Comprehensive Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(15):7581.
<https://doi.org/10.3390/app12157581>
- Zhang, L., Wei, Z., Wang, L., Yuan, X., Wu, H., Xu, W. (2023). Spectrum sharing in the sky and space: A survey. *Sensors* 23(1). <https://doi.org/10.3390/s23010342>