

Medición y análisis de los niveles de señal de la televisión digital terrestre en ciudad de Panamá utilizando un UAV

Measurement and analysis of digital terrestrial television signal levels in Panama City using an unmanned aerial vehicle UAV

Fermín A. Póvaz J.

Universidad de Panamá, Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación

Departamento de Electrónica y Comunicación.

Laboratorio de Electrónica y Comunicación 205

fermin.povaz@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0001-7657-9408>

Jenny I. Ríos Z.

Universidad de Panamá, Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación

Departamento de Informática.

jenny.rios@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-1134-7945>

Recepción: 06/04/2025

Aprobación: 06/06/2025

DOI <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v35n2.a7704>

Resumen

Este estudio presenta la viabilidad del uso de un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) equipado con una tarjeta Raspberry Pi 3 como capturadora de señales de RF, mediante el uso de un receptor definido por software (SDR), unidad GPS y una antena de recepción, para medir los niveles de señales de los canales de Televisión Digital Terrestre (TDT) en la Ciudad de Panamá. Se implementa un plan de vuelo programado automáticamente para el drone, y se realizan mediciones en 10 ubicaciones distintas utilizando el método de cuatro puntos fijos. La evaluación compara este enfoque con el procedimiento convencional recomendado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) que emplea una unidad capturadora y antena sintonizada a la frecuencia de los canales TDT. Se enfoca en la eficacia relativa, evaluada en función del tiempo de medición. Este estudio aporta conocimientos sobre la utilidad del uso de drones para la medición de señales TDT en entornos urbanos como el de la Ciudad de Panamá. Se destaca que entre el método desarrollado de medición se establece un ahorro de tiempo de aproximadamente 11.74 horas comparado con el método convencional.

Palabras claves: DVB-T, SDR, MPEG, QPSK, COFDM, Densidad de potencia, intensidad de campo eléctrico, propagación, multirayecto.



Abstract

This study explores the feasibility of using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipped with a Raspberry Pi 3 board as an RF signal capture platform. The setup integrates a software-defined radio (SDR), a GPS unit, and a receiving antenna to measure signal levels of Digital Terrestrial Television (DTT) channels in Panama City. An automatically programmed flight plan is implemented for the drone, and measurements are conducted at 10 distinct locations using the four-fixed-points method. The evaluation compares this approach to the conventional procedure recommended by the International Telecommunication Union (ITU), which utilizes a capture unit and an antenna tuned to the frequencies of DTT channels. The focus is on relative efficiency, assessed in terms of measurement time. This study provides insights into the utility of UAVs for measuring DTT signals in urban environments such as Panama City. Notably, the developed measurement method achieves time savings of approximately 11.74 hours compared to the conventional method.

Keywords: DVB-T, SDR, MPEG, QPSK, COFDM, Power density, Electric field strength, Propagation, Multipath.

Introducción

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la cobertura de señales de televisión digital terrestre (TDT) en la banda UHF, utilizando un vehículo aéreo no tripulado (UAV), el cual está equipado con una Raspberry Pi 3, un receptor SDR-RTL, y una antena omnidireccional de dipolo cruzado. Este proyecto aborda una técnica moderna de medición sin las pérdidas típicas que producen los cables largos, al elevar el UAV a 10 metros del suelo. El enfoque propuesto es innovador, ya que integra tecnologías avanzadas y proporciona mediciones de campo eléctrico en tiempo real para señales de DVB-T2 (Tonchev, Mihovska, y Poulkov, 2022).

Diversos estudios recientes han demostrado el potencial del uso de UAVs como plataformas móviles para medición de cobertura (Li et al., 2019; Wei et al., 2022). Su aplicabilidad en entornos urbanos complejos también ha sido destacada por otros trabajos (Nasir et al., 2019; Mozaffari et al., 2016).

La Recomendación ITU-R SM.1875 establece los umbrales mínimos de intensidad de campo necesarios para garantizar una recepción adecuada en los sistemas DVB-T2. En áreas urbanas, la intensidad de campo debe situarse entre 56 y 75 dB μ V/m, mientras que, en áreas rurales, un mínimo de 48 dB μ V/m es suficiente para garantizar una buena recepción (ITU, 2020). Estos niveles aseguran que la señal recibida tenga la potencia suficiente para evitar interrupciones en la calidad del servicio, especialmente en condiciones de propagación adversa.



El uso de SDR (Fanan et al., 2015) ha demostrado ser una herramienta clave en la recepción y análisis de señales de televisión digital, ya que permite capturar y procesar datos en tiempo real en un amplio rango de frecuencias. A diferencia de los receptores convencionales, los SDR pueden sintonizar diferentes canales y ajustar dinámicamente sus parámetros para adaptarse a las condiciones de señal del entorno. En este estudio, el SDR-RTL se utilizó para recibir señales DVB-T2, que posteriormente fueron procesadas por la Raspberry Pi 3, proporcionando una plataforma de procesamiento ligera y eficiente. Además, la antena de dipolo cruzado configurada como omnidireccional permitió captar la señal de manera uniforme desde todas las direcciones, optimizando la precisión de las mediciones" (Moses et al., 2020).

La cobertura en los sistemas de televisión digital, como DVB-T2, es fundamental para garantizar una calidad de servicio adecuada y la recepción estable de señales. Según un estudio sobre la correlación de señales de radiofrecuencia en sistemas DVB-T2, los datos recopilados muestran que la calidad de la recepción no depende solo de la potencia de la señal recibida, sino también de parámetros como la tasa de error de modulación (MER), que afectan directamente la estabilidad de la señal y su resistencia a las fluctuaciones ambientales. Estas mediciones destacan la importancia de una planificación precisa de la cobertura para minimizar interferencias y asegurar una transmisión continua en diferentes tipos de terreno y condiciones de propagación (Kamo, Agastra, y Cakaj, 2020).

Los estudios de campo son fundamentales para evaluar la cobertura real en sistemas de televisión digital y permiten realizar ajustes en las ubicaciones de antenas transmisoras y en las potencias de emisión para maximizar la cobertura, minimizando áreas con señales débiles o nulas. Estos estudios suelen incluir mediciones de la intensidad de campo en diversos puntos geográficos y a diferentes alturas, lo que proporciona una representación precisa de la cobertura efectiva del sistema. Además, los análisis de la propagación de la señal, teniendo en cuenta el terreno y las condiciones atmosféricas, son esenciales para optimizar la red y

mejorar la calidad del servicio (OTA DTV, 2023).

Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo en la Ciudad de Panamá, específicamente en parte de los corregimientos de Bethania, dentro del cuadrante delimitado por las siguientes coordenadas geográficas: 9° 2' 29.25" N, 79° 32' 51.25" O; 9° 2' 33.11" N, 79° 31' 3.18" O; 9° 0' 45.85" N, 79° 30' 57.79" O; y 9° 0' 47.68" N, 79° 32' 13.68" O. (Figura 1).

Figura 1

Área de Estudio para la realización de las mediciones de intensidad de campo



El área total de la zona de estudio es de 9.17 km², con un perímetro de aproximadamente 12.3 km. Esta región corresponde a una parte del área urbana de la Ciudad de Panamá. El terreno es en su mayoría uniforme, con altitudes que varían entre los 42 y 54 metros sobre el nivel del mar, y alcanzando una altura máxima de 83 metros en el sector de Villa de las Fuentes. En algunas áreas del sitio de estudio se observa una densa vegetación, especialmente en zonas con mayor concentración de árboles.



Obtención de los Datos

Para la medición de la intensidad de campo eléctrico de las señales de televisión digital en formato DVB-T/T2, se emplearon dos métodos. El primero, siguiendo la recomendación UIT-R SM.1875-4 (ITU, 2020), en donde se utilizó la técnica convencional con una antena omnidireccional conectada a un sistema de medición mediante un cable coaxial y soporte. El segundo método involucró el uso de un dron equipado con instrumentos de medición, permitiendo una mayor movilidad y alcance en áreas de difícil acceso.

El proceso de captura de las mediciones en el campo se iniciará con el procedimiento convencional en la cual se utilizará una raspberry pi 3 con el código de inicialización de captura de mediciones, un receptor SDR-RTL, un GPS, una unidad de abastecimiento de energía, 11 metros de cable coaxial RG-6, una antena quadrifilar tipo omnidireccional para operar en UHF, un mástil de 10m, una brújula y cinta métrica. Una vez elegido el punto de recepción, se establecía el cuadrante en el suelo y en cada punto de medición se ejecutaba la herramienta de medición para realizar la captura de datos correspondientes a las intensidades de campo eléctrico, en un tiempo establecido por 3 min. La herramienta establece el promedio de estas intensidades de campo eléctrico y se completa el cuadro con el siguiente canal de televisión digital.

Se realiza la técnica de medición mediante el uso de un dron tipo DJI phantom 4 equipado con una antena omnidireccional, una raspberry pi 3, un sensor GPS, un receptor SDR-RTL. En la raspberry pi 3 se encuentra cargado un código en Python que establece el posicionamiento del GPS, tanto en el cuadrante de medición por 4 puntos cuya referencia sería con orientación a norte, sur, este y oeste separados a 5 longitudes de onda, de acuerdo con el valor de la frecuencia del canal de televisión digital en formato DVB-T/T2. Se han elegido 10 puntos de recepción de acuerdo al cuadro de los lugares de los sitios de recepción, el dron se posiciona, establece por geolocalización los cuatro puntos de referencia de



acuerdo con el cuadrante y establece una serie de mediciones a una altura específica de 10 metros sobre el nivel del suelo, se procede a capturar las intensidades de campo por 3 minutos, el número de muestras estará limitada por la estabilidad del drone, ya que dependerá tanto de las presiones del viento. Los datos capturados se almacenarán en una memoria SD en el DRONE, cuando finalice la medición, el código establece el cambio al siguiente canal de televisión digital y completando el ciclo, el código llevará el registro de almacenaje de energía y una vez cumplida la descarga se procede a reemplazar la batería del drone.

Unidades de medidas

En radiocomunicaciones, particularmente en radiofrecuencia, la intensidad de la señal (también conocida como intensidad de campo) se refiere a la salida de potencia del transmisor recibida por una antena de referencia a una distancia de la antena transmisora. Las transmisiones de alta potencia, como las que se utilizan en la transmisión, se expresan en dBmilivoltios por metro (dBmV/m). Para sistemas de muy baja potencia, como los teléfonos móviles y en televisión la intensidad de la señal generalmente se expresa en dBmicrovoltios por metro (dB μ V/m) o en decibelios por encima de un nivel de referencia de un milivatio (dBm). En terminología de transmisión, 1 mV/m es 1000 μ V/m o 60 dB μ (a menudo escrito dBu).

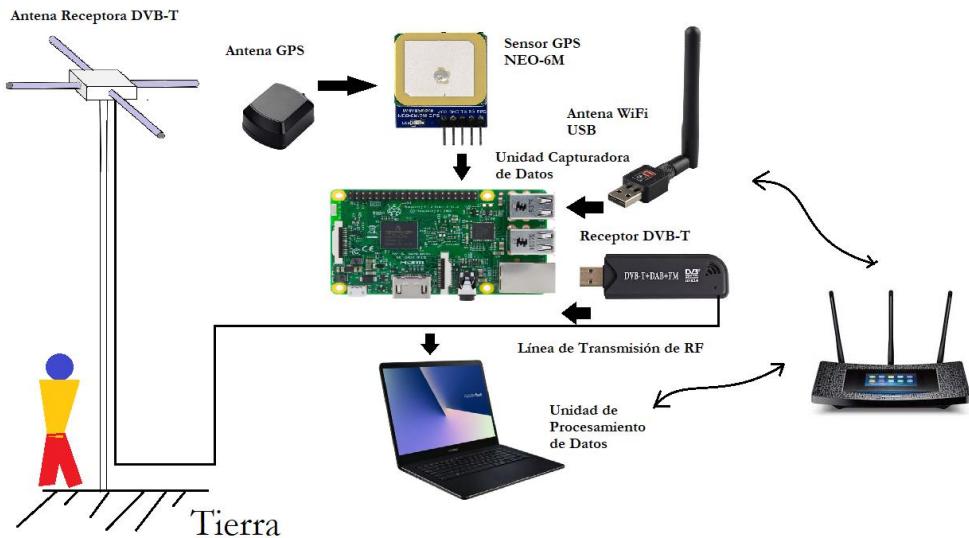
Equipos Utilizados

Para la realización de las mediciones de intensidad de campo se utilizó como la unidad de recepción un radio basado en SDR(por sus siglas en inglés Software Defined Radio, radio definida por software (Ježek et al., 2019)) para captura la señal de la banda correspondiente a DVB-T, una unidad capturadora de datos basada en una tarjeta Raspberry Pi 3, una antena cuadrifilar tipo omnidireccional de 3.14dBi de directividad operando en la banda de UHF, una antena de GPS, una unidad

sensor de GPS NEO 6M-001 para capturar las coordenadas de los puntos de captura de la medición. (Figura2).

Figura 2

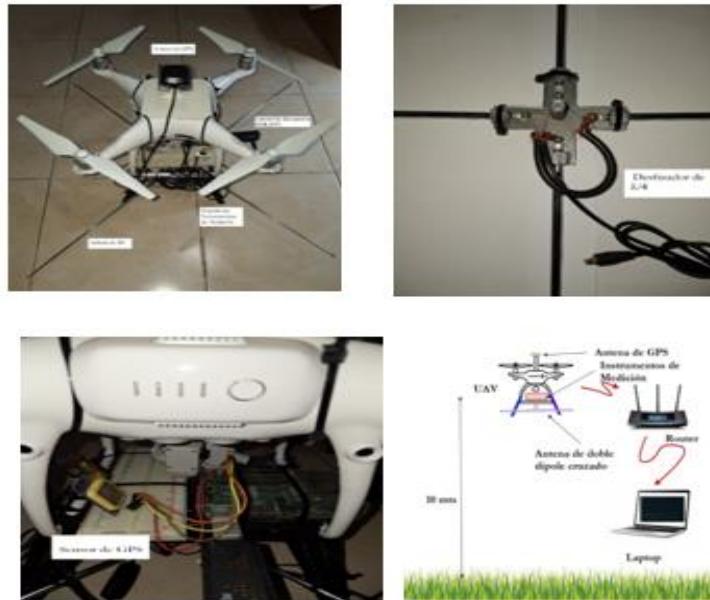
Distribución de equipos para la medición convencional.



Se le incorpora al dron DJI Phantom 4 con la misma instrumentación para la medición, con el respectivo código de medición de señales y un código de traslado o desplazamiento de acuerdo a las coordenadas de los sitios de medición (Figura 3), eligiendo 4 puntos separados 5λ y a una altura de 10m (ITU, 2005) sobre el suelo.

Figura 3

Ubicación de los equipos en el drone DJI Phanthom 4.



Las mediciones se realizaron utilizando la técnica de los 4 puntos fijos y se obtiene el promedio de las 4 mediciones por un período de 3 minutos en cada punto. La figura 4 muestra el procedimiento de medición convencional y la figura 5 la que se efectúo con el drone.

Figura 4

Procedimiento de medición convencional.

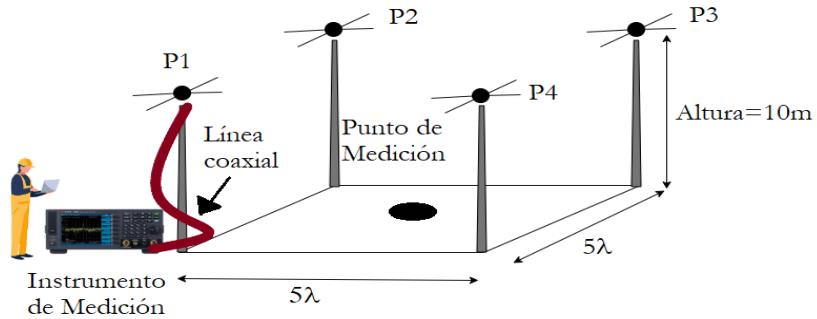
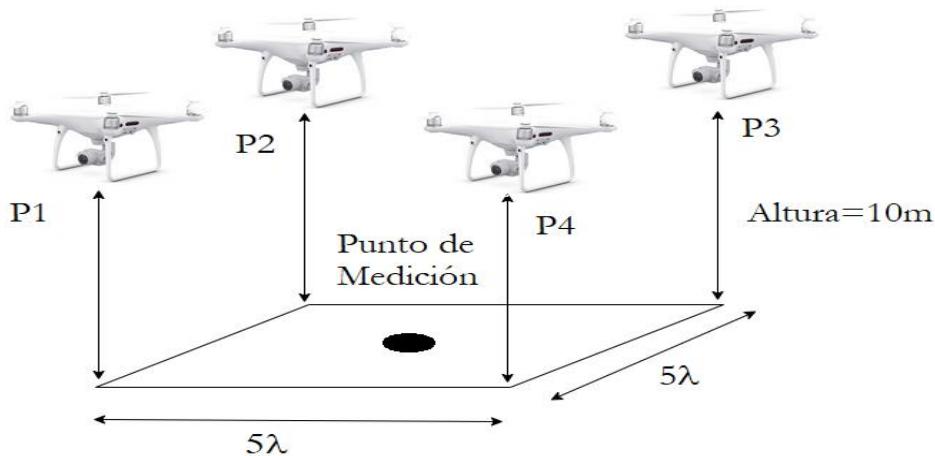


Figura 5

Procedimiento de medición utilizando el drone



La Tabla 1 se representa los parámetros de los sitios de transmisión de las señales de televisión en formato digital DVB-T (ASEP, 2023). La figura 6 es una representación en Google Earth de la ubicación de los puntos de transmisión de las diferentes estaciones de televisión en formato DVB-T.

Tabla 1

Sitios de Transmisión DVB-T

Estación de Transmisión	Coordenadas		Altura(m)
	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	
La Nueva Exitosa	9° 9' 25.27"	79° 24' 14.85"	594.3
Televisión Istmeña	9° 9' 21.9"	79° 24' 15.1"	592.9
TV Móvil Panamá	9° 1' 31.95"	79° 29' 27.22"	30.7
Empresa Televisora Panameña	9° 2' 57.93"	79° 31' 7.11"	174.2
Asamblea Nacional	9° 2' 58.85"	79° 31' 7.318"	186.1
SERTV	9° 2' 58.85"	79° 31' 7.318"	97.3
Corporación MEDCOM	9° 5' 17"	79° 33' 10"	404
Televisora Nacional S.A.	9° 9' 46.169"	79° 25' 2.148"	670
Fundación FETV	9° 9' 40"	79° 25' 17"	655.7
Concesionaria Digital Tel Com	9° 9' 50.45"	79° 25' 1.07"	682.9
Autoridad del Canal de Panamá (ACP)	8° 57' 25"	79° 32' 58"	162
Empresa Televisora Panameña	9° 3' 1"	79° 31' 5"	186.7
TV Panamá	9° 10' 3.99"	79° 24' 31"	673.2
Visión Río Pisón S.A.	9° 9' 35"	79° 24' 56"	628

Fuente: Autoridad de los Servicios Públicos (ASEP) (2023).

Figura 6
Ubicación de los sitios de transmisión en formato DVB-T.


La Tabla 2 presenta las coordenadas de los puntos de medición obtenidas mediante dos métodos: el uso de un dron y el procedimiento convencional con instrumentos topográficos. En cada uno de estos puntos se realizaron mediciones de las señales de televisión bajo el estándar DVB-T.

Tabla 2
Coordenadas de los Sitios de Recepción para la realización de las mediciones.

Sitios de Recepción		Coordenadas		Altura(m)
Denominación	Lugar	Latitud(N)	Longitud(O)	
RX1	Parque Centennial	9° 1' 57.53"	79° 31' 59.85"	59
RX2	Entrada Est. Rod Carew	9° 2' 23.57"	79° 32' 46.58"	67
RX3	Caja de Peaje de Colón	9° 2' 27.94"	79° 32' 6.15"	49
RX4	Entrada Condado del Rey	9° 1' 37.82"	79° 31' 26.87"	51
RX5	Entrada de Linda Vista	9° 1' 55.27"	79° 31' 2.02"	33
RX6	Iglesia de San Antonio de Padua	9° 1' 18.98"	79° 31' 11.65"	50
RX7	Escuela Inst. América	9° 1' 1.20"	79° 31' 27.30"	50
RX8	Parada de Buses de Sta. María	9° 1' 16.85"	79° 31' 42.36"	57
RX9	Villa de la Fuentes 2	9° 0' 56.09"	79° 31' 52.78"	59

RX10	Sector Detrás de la USMA	9° 1' 51.13"	79° 31' 20.96"	50
------	--------------------------	--------------	----------------	----

Por su parte, la figura 7 ilustra la distribución geográfica de los 10 puntos de medición sobre una representación en Google Earth, facilitando una visualización precisa de su ubicación espacial y su relación con el entorno. Esta representación permite comprender mejor la disposición de los puntos y su relevancia en el análisis de la cobertura de las señales de televisión en el área estudiada.

Figura 7

Ubicación de los sitios de recepción para la realización de las mediciones.



La Tabla 3 presenta información detallada sobre las estaciones de televisión que operan bajo el formato DVB-T. Los datos incluyen parámetros técnicos relevantes como la potencia de transmisión en watts, la ganancia de las antenas, la frecuencia de operación, el proveedor del servicio de televisión abierta, la altura de las antenas y su ubicación sobre el nivel del suelo (SNS). Además, se especifican

la pérdida de la línea de transmisión y la orientación o azimut de los sistemas radiantes.

Tabla 3

Parámetros de las Estaciones de Transmisión DVB-T

Estación	Canal	Frecuencia (MHz)	Potencia de Tx(W, rms)	Azimut	Ganancia de Antena (dBd)	Pérdida de Línea (dB)	Altura de Antena (m, SNS)
ACP	26	537.25	1000	45°	14.13	1.82	30
La Nueva Exitosa	28	557	2400	219°	19.88	1	50
Televisión Istmeña	30	569	1200	245°	22.14	1.44	70
TV Móvil Panamá	31	575	6000	215°	15.56	1.6	80
Empresa Televisora Panameña	34	597.25	10000	190°	17.37	1.9	30
	36	605	2400	110°	16.37	1.63	65
Asamblea Nacional	40	629	4000	180°	15.6	1.9	87.5
SERTV	41	635	4000	190°	20.38	1.9	80
Corporación MEDCOM	42	641	6000	127°	16.85	1.10	37
	43	647	6000	140°	16.85	1.10	37
	44	653	6000	122°	16.85	1.10	37
Televisora Nacional S.A.	45	659	6100	220°	20.38	1.8	101
Visión Río Pisón	47	671	2000	200°	18.02	1.925	41
FETV	48	677	1700	220	16.33	1.925	30
Concesionaria Digital de Televisión y Comunicación	49	683	6000	210°	20.38	2.6	65
	50	689	6000	210°	20.38	2.6	65
TV Panamá	51	695	250	211°	18.81	2.5	80

Fuente: Autoridad de los Servicios Públicos (ASEP) (2023).

Toda esta información ha sido recopilada de la base de datos proporcionada por la Autoridad de los Servicios Públicos (ASEP), lo que garantiza la confiabilidad y precisión de los datos utilizados para este estudio.

Mediciones de Intensidad de Campo Eléctrico y Simulaciones

El siguiente análisis presenta los valores promedios de intensidad de campo eléctrico correspondientes a diferentes canales de televisión digital terrestre (DVB-



T) en la banda UHF, obtenidos mediante tres metodologías: medición directa con vehículo aéreo no tripulado (UAV), medición convencional desde el suelo, y simulación computacional a través del software Radio Mobile.

Cada canal fue evaluado en diez sitios de recepción distribuidos estratégicamente en la Ciudad de Panamá, con el objetivo de caracterizar la cobertura y calidad de la señal recibida bajo condiciones reales y modeladas. Las mediciones con UAV se realizaron a una altura constante de 10 metros, empleando un receptor SDR-RTL acoplado a una Raspberry Pi y una antena omnidireccional. Las mediciones convencionales siguieron el mismo protocolo instrumental, con la antena instalada sobre un mástil de 2.5 metros. En paralelo, se ejecutaron simulaciones utilizando parámetros locales de propagación y topografía, integrados en el modelo predictivo de Radio Mobile.

La Tabla 4 representa los valores promedio de intensidad de campo eléctrico, expresados en decibelios microvoltio por metro (dB μ V/m), correspondientes a los canales DVB-T considerados en este estudio. Este conjunto de datos permite observar las tendencias generales en la propagación de la señal, evaluar la consistencia de los métodos de medición, y determinar el grado de concordancia o discrepancia con los valores estimados mediante simulación.

Tabla 4

Mediciones Resultantes del UAV, Método Convencional y por Simulación

Canal DVB-T	Promedio UAV (dB μ V/m)	Promedio Convencional (dB μ V/m)	Promedio Simulación (dB μ V/m)
Canal 26	96	95	90
Canal 27	97	96	91
Canal 28	98	93	85
Canal 29	99	94	86
Canal 30	95	95	87
Canal 31	96	92	88

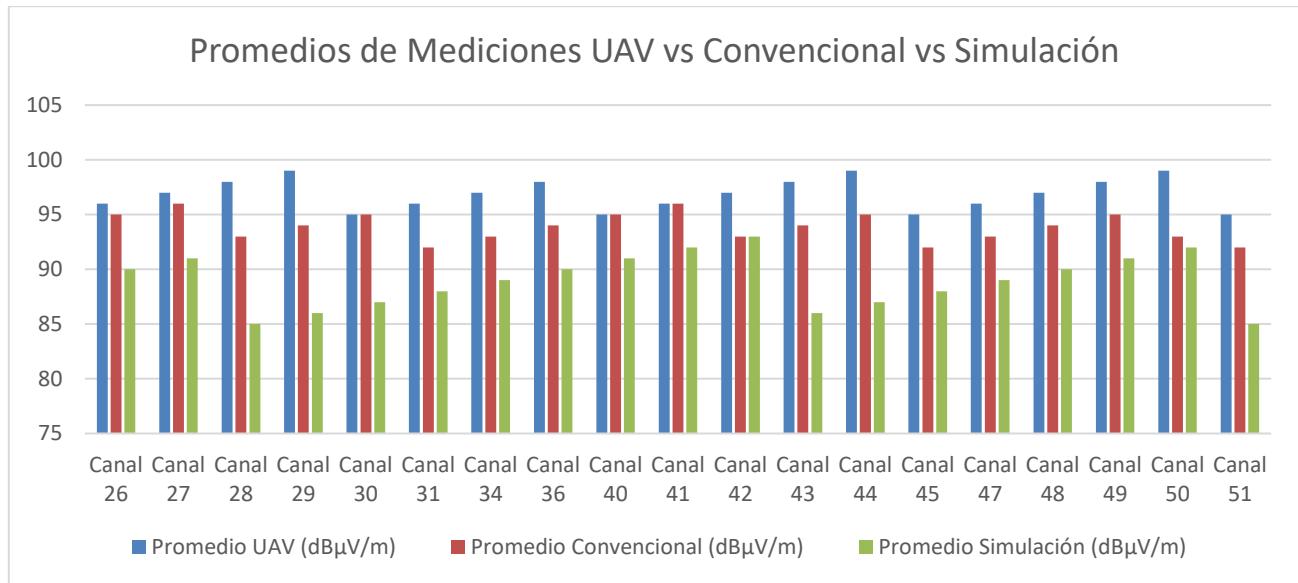


Canal 34	97	93	89
Canal 36	98	94	90
Canal 40	95	95	91
Canal 41	96	96	92
Canal 42	97	93	93
Canal 43	98	94	86
Canal 44	99	95	87
Canal 45	95	92	88
Canal 47	96	93	89
Canal 48	97	94	90
Canal 49	98	95	91
Canal 50	99	93	92
Canal 51	95	92	85

Por otro lado, la figura 8 ilustra una comparación gráfica entre las mediciones efectuadas mediante la técnica convencional, las realizadas con el dron y los niveles simulados a través de *RadioMobile*. Estas comparaciones permiten evaluar la precisión de las mediciones y la concordancia entre los métodos empleados, proporcionando una visualización clara de las diferencias o similitudes entre los resultados.

Figura 8

Comparaciones de las Mediciones Efectuadas y la Simulación



Tiempos Promedios de las Mediciones Realizadas por el Drone

La Tabla 5, presenta los tiempos promedio de las mediciones realizadas por el dron en los 10 sitios de medición para los 17 canales de televisión digital transmitidos en formato DVB-T. El proceso de medición implica que el dron se posicione en 4 puntos fijos separados por 5 longitudes de onda (λ), realizando mediciones en intervalos de 3 minutos por cada sitio.

Durante cada intervalo de 3 minutos, se realizan mediciones cada 5 segundos. Este proceso se repite en cada punto de medición antes de que el dron se desplace al siguiente punto fijo. Es importante destacar que las condiciones ambientales, tales como la presión del viento, pueden influir en el posicionamiento del UAV, afectando así la estabilidad de las mediciones.

Una vez que el dron se estabiliza a una altura superior a 10 metros sobre el nivel del suelo, se procede a efectuar la medición. El tiempo requerido para estabilizarse antes de comenzar la medición, junto con otros factores como el tiempo de desplazamiento entre puntos, contribuyen al tiempo total de medición registrado en cada sitio.

Tabla 5

Tiempos promedios efectuados por el UAV en cada sitio de medición.

Tiempo Promedio de Medición en cada punto Procedimiento con DRONE, (Minutos)											
CANAL	RX1	RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7	RX8	RX9	RX10	Tiempo Promedio
26	12.52	12.03	12.51	12.17	12.22	12.20	12.23	12.03	12.24	12.39	12.26
28	12.42	12.44	12.30	12.17	12.07	12.14	12.16	12.33	12.03	12.06	12.21
30	12.43	12.25	12.56	12.52	12.06	12.21	12.09	12.38	12.13	12.25	12.29
31	12.51	12.40	12.24	12.27	12.35	12.15	12.04	12.02	12.51	12.26	12.28
34	12.10	12.52	12.40	12.12	12.29	12.03	12.40	12.06	12.42	12.39	12.27
36	12.28	12.45	12.55	12.30	12.28	12.34	12.56	12.22	12.28	12.19	12.34
40	12.41	12.07	12.20	12.24	12.07	12.10	12.23	12.14	12.45	12.12	12.20
41	12.03	12.53	12.02	12.16	12.16	12.52	12.01	12.26	12.32	12.29	12.23
42	12.04	12.23	12.24	12.27	12.05	12.55	12.45	12.13	12.01	12.39	12.24
43	12.35	12.27	12.22	12.50	12.04	12.16	12.05	12.06	12.47	12.15	12.23
44	12.21	12.38	12.58	12.27	12.24	12.28	12.36	12.20	12.56	12.24	12.33
45	12.43	12.49	12.11	12.42	12.20	12.23	12.58	12.12	12.13	12.09	12.28
47	12.10	12.53	12.37	12.56	12.59	12.44	12.07	12.47	12.13	12.29	12.36
48	12.58	12.40	12.52	12.04	12.36	12.37	12.26	12.08	12.16	12.29	12.31
49	12.46	12.51	12.57	12.19	12.14	12.52	12.19	12.56	12.02	12.58	12.37
50	12.08	12.58	12.58	12.40	12.52	12.25	12.32	12.43	12.51	12.50	12.42
51	12.35	12.09	12.52	12.10	12.53	12.49	12.16	12.39	12.22	12.37	12.32
Tiempo promedio Total=											12.29

Tiempos Promedios de las Mediciones Utilizando la Técnica Convencional

Los tiempos promedio de las mediciones realizadas mediante la técnica convencional están presentados en la Tabla 6. Esta técnica utiliza un soporte de 10 metros de altura, un sistema de antena omnidireccional, una extensión de línea coaxial de aproximadamente 10 metros, y los mismos instrumentos empleados en las mediciones realizadas con el dron (UAV).

Para la realización de las mediciones, se debió ubicar manualmente el equipo en 4 puntos fijos, utilizando un GPS y una brújula para determinar la orientación de los 4 puntos cardinales y establecer el cuadrante, con una separación de 5 longitudes de onda entre cada punto. Un aspecto particular de este procedimiento es que el soporte de 10 metros debe estar aislado del suelo para garantizar la seguridad de los operadores, evitando que entre en contacto con la tierra.

Una vez establecidos los 4 puntos fijos, el soporte y la antena se posicionan

y se realiza la medición, asegurando la mayor perpendicularidad posible con el suelo. Después de cada medición, todo el equipo se traslada al siguiente punto de medición. Este procedimiento se repite hasta completar todos los puntos fijos y canales establecidos en el estudio.

Tabla 6

Tiempos promedios entre mediciones método convencional en cada punto por canal.

Tiempo Promedio de Medición en cada punto Procedimiento Convencional, (Minutos)											
CANAL	RX1	RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7	RX8	RX9	RX10	Tiempo Promedio
26	17.05	17.89	17.13	17.37	16.71	17.89	15.19	15.75	17.52	15.58	16.81
28	17.82	16.54	15.34	16.57	16.89	15.41	16.29	15.80	15.31	17.05	16.30
30	15.77	15.26	17.01	15.02	15.57	17.33	15.48	15.37	16.73	16.95	16.05
31	16.99	15.82	15.62	17.77	15.04	15.62	17.47	16.17	16.87	17.19	16.45
34	17.11	15.84	15.88	17.50	16.52	15.25	17.04	16.37	16.60	15.62	16.37
36	15.52	17.61	16.65	16.90	17.77	17.99	17.78	15.62	15.56	17.07	16.85
40	16.68	15.96	17.54	15.52	15.50	15.69	15.46	16.46	16.71	17.89	16.34
41	15.05	15.04	15.22	15.26	15.50	16.01	17.14	17.42	17.19	15.07	15.89
42	17.97	16.39	17.04	17.81	15.90	15.41	16.31	17.89	17.65	15.20	16.76
43	16.66	15.60	17.76	15.07	16.71	15.64	17.87	15.09	17.34	17.75	16.55
44	16.64	16.53	15.39	15.44	16.86	16.32	17.08	16.01	17.76	15.18	16.32
45	17.52	17.03	15.38	16.46	15.03	17.50	17.02	16.03	17.59	16.70	16.62
47	17.14	15.17	15.53	16.71	15.37	17.61	17.74	15.47	16.95	15.03	16.27
48	17.74	15.43	16.90	17.91	17.15	15.54	16.05	16.04	16.55	17.97	16.73
49	16.95	15.36	15.12	16.08	16.00	16.31	16.74	16.73	16.49	16.92	16.27
50	17.13	15.69	18.02	15.47	15.24	15.06	16.89	16.50	17.34	17.11	16.44
51	16.19	17.16	15.02	17.65	15.26	15.29	17.57	16.50	16.41	16.31	16.34
Tiempo promedio Total=											16.44

Diferencias entre los Tiempos de Mediciones: Método Convencional vs. UAV

La Tabla 7 presenta un análisis detallado de las diferencias en los tiempos de medición obtenidos mediante la técnica convencional en comparación con la técnica empleada utilizando el dron (UAV). En este cuadro se destacan las variaciones de tiempo que surgieron en cada uno de los sitios de medición, en función de los

métodos empleados.

Tabla 7

Valores de tiempos medidos entre el método convencional comparado con el UAV.

Diferencias de Tiempo entre procedimientos de medición (Con Drone y Convencional), minutos											
CANAL	RX1	RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7	RX8	RX9	Tiempo Acumulado	
26	4.53	5.86	4.62	5.20	4.49	5.69	2.96	3.72	5.28	3.19	45.54
28	5.40	4.10	3.04	4.40	4.82	3.27	4.13	3.47	3.28	4.99	40.90
30	3.34	3.01	4.45	2.50	3.51	5.12	3.39	2.99	4.60	4.70	37.61
31	4.48	3.42	3.38	5.50	2.69	3.47	5.43	4.15	4.36	4.93	41.81
34	5.01	3.32	3.48	5.38	4.23	3.22	4.64	4.31	4.18	3.23	41.00
36	3.24	5.16	4.10	4.60	5.49	5.65	5.22	3.40	3.28	4.88	45.02
40	4.27	3.89	5.34	3.28	3.43	3.59	3.23	4.32	4.26	5.77	41.38
41	3.02	2.51	3.20	3.10	3.34	3.49	5.13	5.16	4.87	2.78	36.60
42	5.93	4.16	4.80	5.54	3.85	2.86	3.86	5.76	5.64	2.81	45.21
43	4.31	3.33	5.54	2.57	4.67	3.48	5.82	3.03	4.87	5.60	43.22
44	4.43	4.15	2.81	3.17	4.62	4.04	4.72	3.81	5.20	2.94	39.89
45	5.09	4.54	3.27	4.04	2.83	5.27	4.44	3.91	5.46	4.61	43.46
47	5.04	2.64	3.16	4.15	2.78	5.17	5.67	3.00	4.82	2.74	39.17
48	5.16	3.03	4.38	5.87	4.79	3.17	3.79	3.96	4.39	5.68	44.22
49	4.49	2.85	2.55	3.89	3.86	3.79	4.55	4.17	4.47	4.34	38.96
50	5.05	3.11	5.44	3.07	2.72	2.81	4.57	4.07	4.83	4.61	40.28
51	3.84	5.07	2.50	5.55	2.73	2.80	5.41	4.11	4.19	3.94	40.14
Total de Tiempo=										704.41	

Perfil del Trayecto de la Estación La Nueva Exitosa - Canal 28

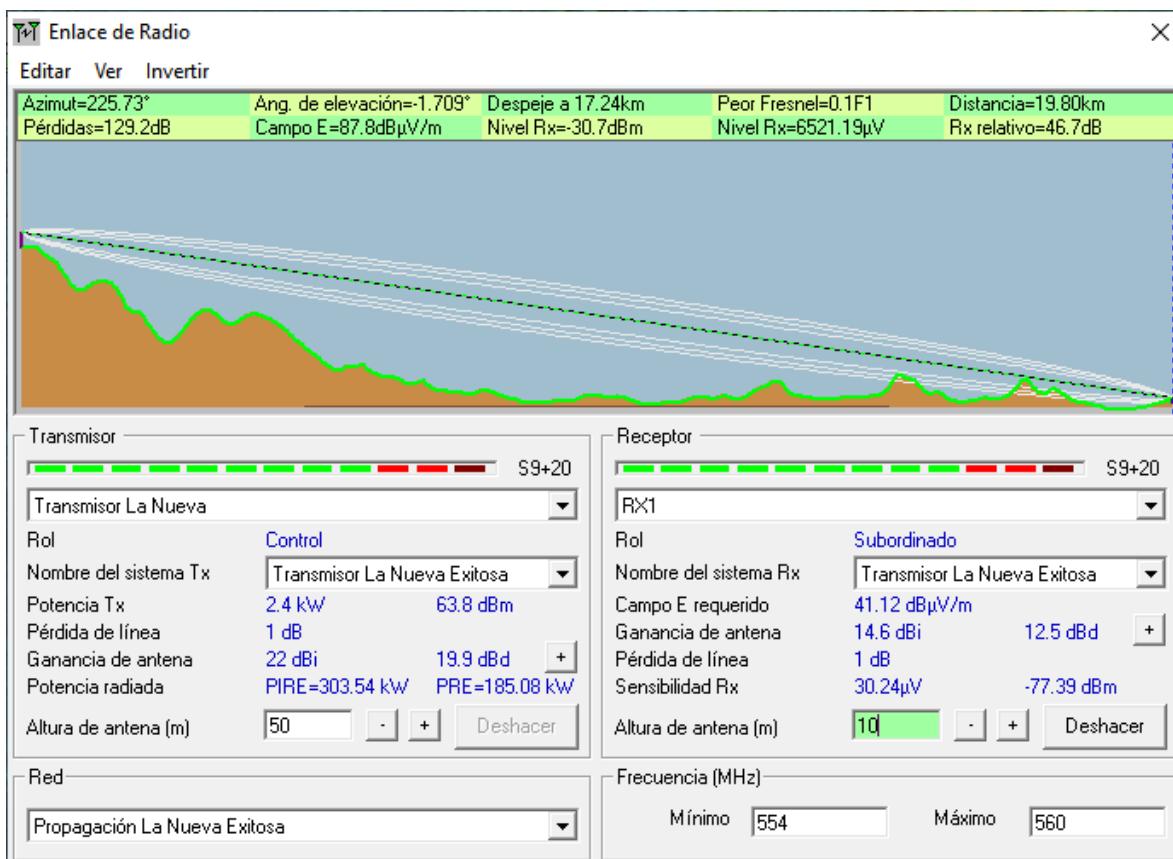
La figura 9 muestra el perfil del trayecto de la estación La Nueva Exitosa, correspondiente al canal 28, incluyendo todos los parámetros de transmisión relevantes. Esta simulación fue realizada utilizando la herramienta de simulación RadioMobile, la cual permite modelar y analizar la propagación de señales de radiofrecuencia en diferentes entornos (Al-Hourani et al., 2014; Yaliniz et al., 2016).

El análisis se llevó a cabo entre el sitio de transmisión del canal 28, ubicado en Cerro Azul, y el sitio de recepción RX1, en el Parque Centennial. La simulación permitió obtener una representación detallada del trayecto de la señal, considerando factores como la altitud, la distancia, y las características del terreno

en la ruta de transmisión. Este perfil es fundamental para entender cómo se comporta la señal a lo largo del trayecto y para evaluar la calidad de la recepción en el sitio destino.

Figura 9

*Estudio de la Cobertura del Transmisor La Nueva Exitosa (Canal 28)
Utilizando el Software de Simulación RadioMobile en el Sitio RX1.*



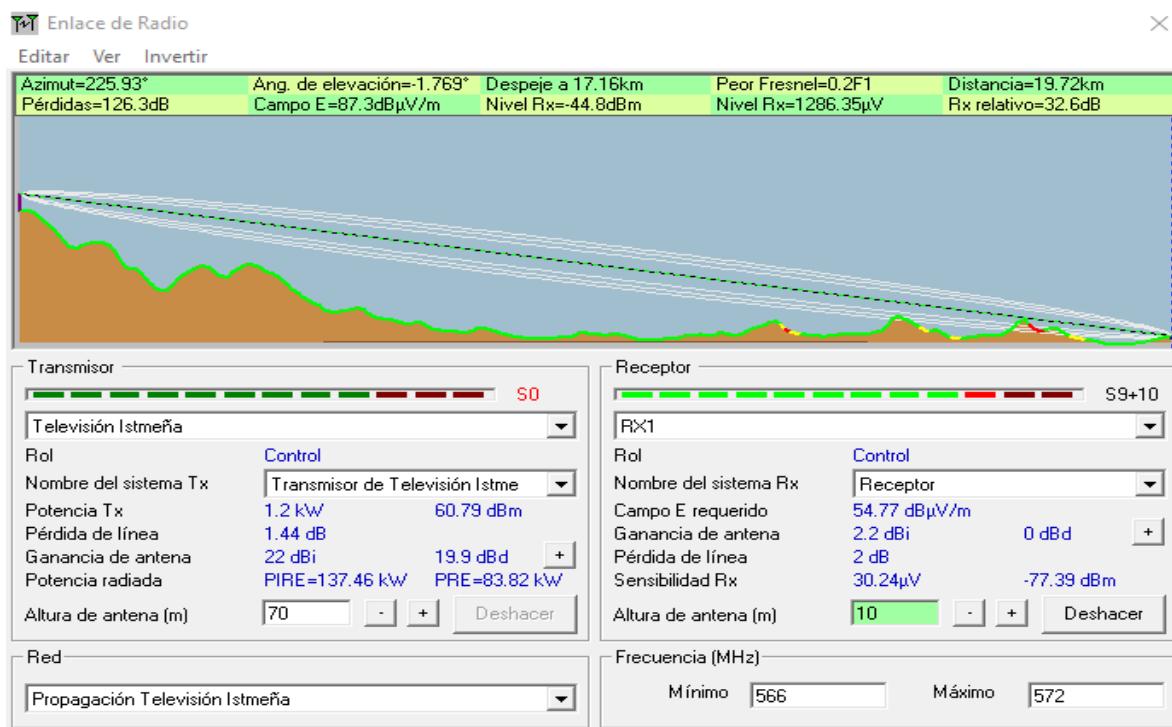
Perfil del Trayecto entre la Estación Istmeña y RX1 - Canal 30

La figura 10 presenta el perfil del trayecto entre el sitio de la Estación Istmeña, ubicada en Cerro Azul, y el sitio de recepción RX1 en el Parque Centennial, para el canal 30. Este perfil fue generado utilizando la herramienta de simulación RadioMobile, que permite modelar la propagación de señales de radiofrecuencia a lo largo del trayecto.

El análisis realizado muestra cómo se comporta la señal de transmisión en función de las características geográficas y la topografía del terreno entre ambos puntos. Este perfil es crucial para entender las variaciones en la señal y cómo factores como la distancia y las altitudes de ambos sitios impactan la calidad de la recepción en el sitio de destino.

Figura 10

Estudio de la Cobertura del Transmisor Televisora Istmeña (Canal 30) Utilizando el Software de Simulación RadioMobile en el Sitio RX1.



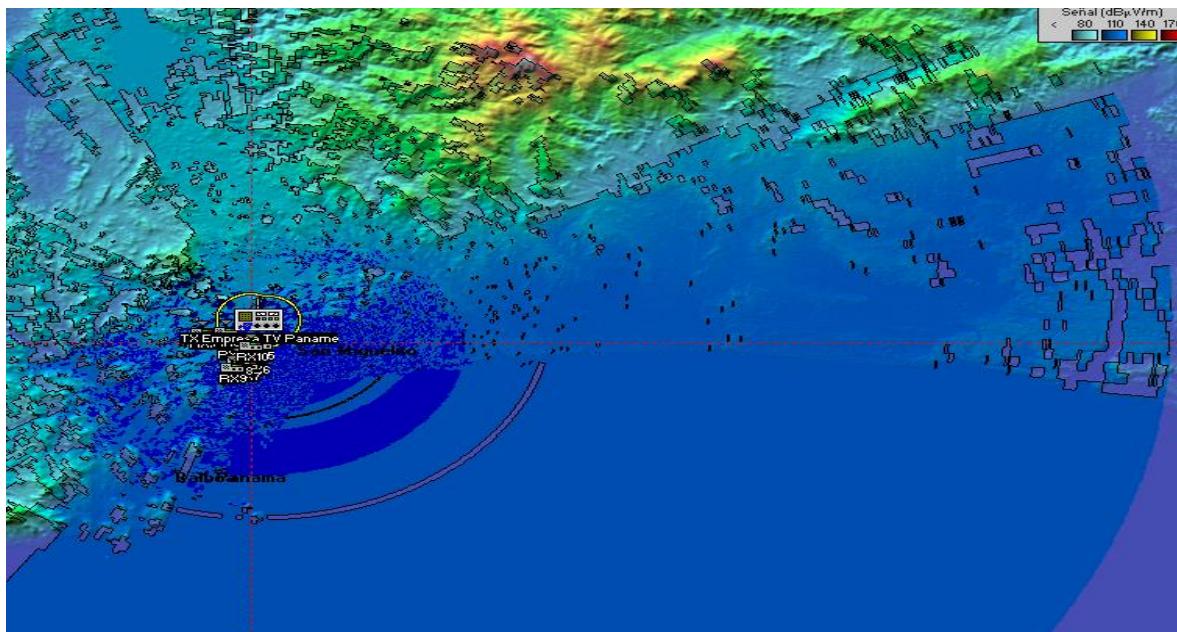
Patrón de Cobertura de la Estación de Transmisión Istmeña - Canal 30

La figura 11 ilustra el patrón de cobertura de la Estación de Transmisión Istmeña para el canal 30, mostrando una cobertura aproximada que se extiende hasta la Ciudad de Panamá. El área de cobertura abarca un radio de aproximadamente 20 km, con contornos de intensidad de campo eléctrico de aproximadamente 110 dBμV/m. Este patrón de cobertura es fundamental para comprender el alcance de la señal y la calidad de la recepción en la zona

circundante, proporcionando información clave sobre la distribución de la señal en función de la distancia y la intensidad de esta.

Figura 11

Análisis de Cobertura de La Televisora Istmeña mediante el Software RadioMobile.

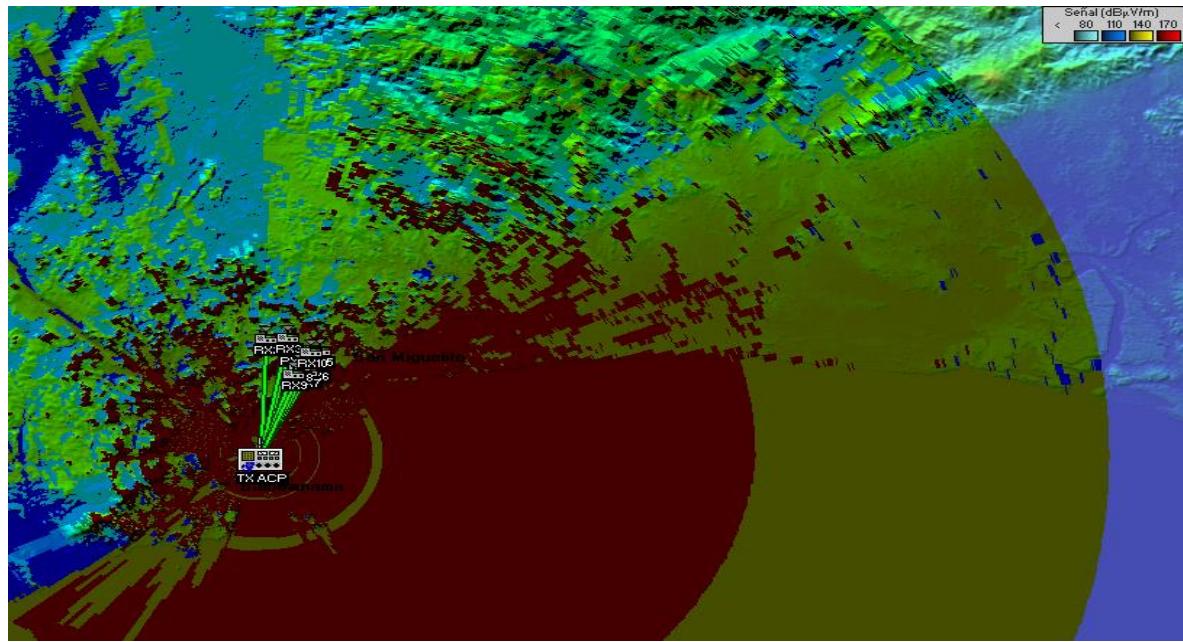


Análisis de Cobertura de la Estación de Transmisión ACP - Canal 26

La figura 12 presenta el análisis de cobertura para la Estación de Transmisión de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), ubicada en Cerro Ancón, para el canal 26. Este análisis considera un contorno de intensidad de campo eléctrico de aproximadamente 170 dB μ V/m, con un rango de cobertura de hasta 20 km. La representación de la cobertura permite evaluar la propagación de la señal a lo largo de esta distancia, proporcionando información clave sobre el alcance y la calidad de la señal en función de la intensidad medida en diferentes puntos dentro del área de cobertura.

Figura 12

Estudio de la Cobertura de la Estación Transmisora ACP.



Resultados

La Autoridad de Servicios Públicos de Panamá (ASEP, 2009) recomienda el uso de receptores DVB-T con un umbral de recepción de -93.6 dBm, operando en un rango de frecuencias de 512 MHz a 806 MHz. Este umbral permite un nivel de recepción que varía entre 37.79 dB μ V/m y 41.66 dB μ V/m. Para realizar las estimaciones de cobertura en el rango de frecuencias de operación de las estaciones de transmisión DVB-T, se utilizará la recomendación UIT REC-BT.2036-4, que establece el valor de referencia para una disponibilidad de cobertura del 95% en la Banda IV y Banda V. Este rango abarca frecuencias desde 470 MHz hasta 862 MHz, donde el nivel mínimo requerido para un ancho de banda de 6 MHz es de 29.7 dB μ V. Para las estimaciones de los niveles de cobertura entre los puntos de transmisión y los sitios de recepción, se tomará como referencia un valor de 47 dB μ V/m.

Análisis del Porcentaje de Cobertura según los Métodos de Medición

La Tabla 8 resume el porcentaje de cobertura obtenido mediante los tres métodos de medición analizados: UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado), método convencional y simulación con Radio Mobile, basándose en los resultados



detallados en los Cuadros 4 al 20 correspondientes a los canales 26, 28, 30, 31, 34, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50 y 51 en formato DVB-T. Según estos resultados, tanto el método UAV como el convencional muestran una cobertura del 100% en todos los canales evaluados, lo que confirma su consistencia y fiabilidad en la medición de la intensidad de señal. En contraste, el método de simulación presenta coberturas menores en varios canales, como los canales 28, 30, 43, 44, 47, 48, 49 y 50 con un 90%, y el canal 51, donde la cobertura desciende al 80%.

Durante la campaña de evaluación de señales DVB-T, se registraron diferencias notables en los tiempos de ejecución entre el método convencional y el método basado en vehículo aéreo no tripulado (UAV). Ambos métodos hicieron uso del mismo conjunto instrumental: receptor SDR-RTL, computadora Raspberry Pi 3 para captura y control, y antena instalada a una altura fija de 10 metros sobre el plano de medición.

Los datos obtenidos muestran que la implementación del UAV permitió un ahorro total de 704.41 minutos, equivalente a aproximadamente 11 horas y 44 minutos de operación. Este ahorro se traduce en una mejora significativa de la eficiencia del proceso, sin comprometer la calidad ni la consistencia de los datos recolectados.

En términos individuales por canal, el tiempo promedio ahorrado varió entre 36.60 minutos y 45.54 minutos, dependiendo de la ubicación y de la logística requerida en cada punto de medición. Esta diferencia temporal refleja no solo la agilidad operativa del UAV, sino también su capacidad para minimizar tareas repetitivas, desplazamientos físicos y configuraciones manuales, que suelen consumir una porción considerable del tiempo en métodos convencionales.

Los resultados confirman que el empleo de UAV representa una estrategia eficiente para la ejecución de campañas de medición en campo, optimizando

recursos y permitiendo la cobertura de múltiples puntos geográficos en menor tiempo. Esta característica lo posiciona como una solución ventajosa para estudios técnicos que requieren simultaneidad, precisión y rapidez en entornos urbanos o de difícil acceso.

Tabla 8

Porcentaje de Cobertura de acuerdo al Método Utilizado en el estudio

Canal de Transmisión en formato DVB-T	Porcentaje de Cobertura Según Método de Medición con UAV (%)	Porcentaje de Cobertura Según Método de Medición Convencional (%)	Porcentaje de Cobertura Según Valores de la Simulación con Radio Mobile (%)
26	100	100	100
28	100	100	90
30	100	100	90
31	100	100	100
34	100	100	100
36	100	100	100
40	100	100	100
41	100	100	100
42	100	100	100
43	100	100	90
44	100	100	90
45	100	100	100
47	100	100	90
48	100	100	90
49	100	100	90
50	100	100	90
51	100	100	80

Discusión

El método de simulación, aunque útil como herramienta teórica inicial, refleja una mayor sensibilidad a las condiciones específicas del terreno y la topografía, factores que no parecen haber sido modelados adecuadamente. Por ejemplo, los resultados del canal 51 muestran una discrepancia considerable en comparación con los métodos UAV y convencional. Este comportamiento sugiere que la herramienta Radio Mobile requiere ajustes en su configuración para incorporar

mejor las características ambientales y de propagación locales. Por el contrario, los métodos UAV y convencional destacan por su estabilidad y confiabilidad en la medición de señal, superando consistentemente el umbral de recepción de 45.5 dB μ V/m en todos los puntos y canales evaluados.

En términos de consistencia, el UAV sobresale al minimizar la interferencia humana y automatizar el posicionamiento y la captura de datos, lo que reduce los tiempos requeridos en comparación con el método convencional. Este resultado es particularmente relevante en estudios de campo con múltiples puntos de medición, donde la velocidad y precisión son factores cruciales.

Métodos Estadísticos para Validación de Niveles de Cobertura

Para validar la calidad de la cobertura y los niveles de intensidad del campo eléctrico, se empleó un Análisis de Varianza (ANOVA) (Gravetter, 2020). Este método permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de cobertura entre las distintas ubicaciones estudiadas.

Análisis Estadístico mediante ANOVA

La prueba ANOVA se aplicó a los tres métodos de medición: UAV, Convencional y Simulación. Los resultados arrojaron un F-Statistic de 9.32 y un p-valor de 0.0018, lo que permite rechazar la hipótesis nula y confirmar que existen diferencias significativas entre los métodos. El UAV mostró los promedios más altos (96.54 dB μ V/m) y una dispersión mínima (0.69 dB μ V/m), consolidándose como el más preciso. La Simulación tuvo la mayor variabilidad (12.82 dB μ V/m), evidenciando la necesidad de ajustes. El método Convencional mostró un desempeño consistente, con promedios cercanos al UAV (94.51 dB μ V/m) y desviación estándar de 0.67 dB μ V/m.

Análisis de Sitios con Valores Promedio Más Alto y Más Bajo

Se identificaron diferencias significativas entre los puntos de medición. RX5 (Entrada del Sector de Linda Vista) presentó el valor más alto (97.39 dB μ V/m), indicando condiciones ideales para la recepción. En cambio, RX9 (Sector de Villa de Las Fuentes No. 2) mostró el valor más bajo (93.11 dB μ V/m), posiblemente



debido a interferencias o factores topográficos. Estas observaciones fueron consistentes en las mediciones y simulaciones, resaltando la capacidad del método UAV para identificar con precisión la variabilidad espacial de la señal.

Conclusiones

En primer lugar, el método UAV demostró ser el más eficiente en términos de tiempo de operación, logrando un ahorro acumulado de 704.41 minutos, equivalente a aproximadamente 11 horas y 44 minutos, en comparación con el método convencional. Este ahorro se atribuye a la automatización y rapidez del UAV para realizar mediciones en puntos previamente definidos, eliminando interferencias humanas y reduciendo el tiempo requerido para ajustes manuales. Esta ventaja hace del UAV una herramienta ideal para estudios de campo que requieren optimización del tiempo sin comprometer la calidad de las mediciones.

En cuanto a la cobertura de señal, el método UAV y el convencional garantizaron un porcentaje del 100% en todos los canales evaluados, mientras que la simulación presentó variaciones significativas. En algunos canales, como el 51, la cobertura simulada disminuyó al 80%, evidenciando inconsistencias en las predicciones de la herramienta Radio Mobile. Este resultado subraya la superioridad de los métodos prácticos, especialmente del UAV, que no solo alcanzó la cobertura total, sino que también demostró mayor precisión y adaptabilidad a condiciones del terreno.

El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó que existen diferencias significativas entre los tres métodos de medición ($p=0.0018$). El UAV se posicionó como el método más efectivo, al presentar los promedios más altos de intensidad de señal (96.54 dB μ V/m) y la menor dispersión (0.69 dB μ V/m). Por el contrario, la simulación mostró la mayor variabilidad (12.82 dB μ V/m), lo que indica la necesidad de ajustes en esta herramienta para mejorar su precisión. Este análisis estadístico resalta la importancia de emplear métodos prácticos como el UAV, que ofrecen



resultados más consistentes y confiables.

Finalmente, en el análisis de los puntos de recepción, el sitio RX5 presentó el promedio más alto de intensidad de señal (97.39 dB μ V/m), lo que sugiere condiciones óptimas de recepción en este punto. Por el contrario, el sitio RX9 mostró el promedio más bajo (93.11 dB μ V/m), evidenciando problemas de propagación en esta ubicación, probablemente debido a interferencias locales o características topográficas desfavorables. Estas observaciones refuerzan la utilidad del UAV para identificar con precisión las variaciones locales y generar un mapeo detallado de la cobertura de señal.

Además, se concluye que el uso de UAVs en este tipo de estudios es plenamente viable desde una perspectiva operativa y técnica. Esta tecnología no solo reduce los tiempos de medición, sino que también disminuye los riesgos operacionales y permite un acceso más flexible a zonas con limitaciones geográficas, todo esto sin comprometer la calidad del dato medido. Los resultados de este estudio destacan la eficacia del método UAV en términos de ahorro de tiempo, precisión en las mediciones y cobertura de señal. Este enfoque no solo supera a los métodos convencionales y de simulación, sino que también proporciona un análisis más robusto y adaptable a diversas condiciones del terreno. La implementación de esta tecnología es, sin duda, un avance significativo en la evaluación y mejora de la calidad de señal en formatos DVB-T.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación contó con el invaluable apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá, cuya colaboración y compromiso fueron fundamentales para su realización. Agradecemos especialmente a la Dirección de Investigación por su respaldo continuo y por proporcionar las herramientas necesarias para el desarrollo de este estudio.

Expresamos nuestra gratitud al Departamento de Compras y a todo el



personal involucrado en estas unidades, quienes, con su dedicación y esfuerzo, hicieron posible la ejecución de este proyecto. Su apoyo en cada etapa del proceso fue esencial para superar los desafíos y garantizar el éxito de esta investigación. Este trabajo es un reflejo del esfuerzo conjunto y la dedicación al avance del conocimiento en el ámbito académico y tecnológico.

Referencias Bibliográficas

- Al-Hourani, A., Kandeepan, S., y Lardner, S. (2014). Optimal LAP altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6), 569–572. <http://dx.doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>
- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2009). Recomendaciones técnicas para la recepción de señales de televisión digital terrestre (DVB-T) en Panamá. ASEP. <https://www.asep.gob.pa/>
- Autoridad de los Servicios Públicos (ASEP). (2023). Base de datos de frecuencias operativas de transmisión de señales de televisión digital DVB-T. ASEP. <https://asep.gob.pa/direcciones/telecomunicaciones/radio-y-television-digital/>
- Fanan, A., Riley, N., Mehdawi, M., Ammar, M., y Zolfaghari, M. (2016, January 8). Comparison of spectrum occupancy measurements using software defined radio RTL-SDR with a conventional spectrum analyzer approach. 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), 200–203. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2015.7377447>
- Gravetter, F. J., y Wallnau, L. B. (2020). Statistics for the Behavioral Sciences (10th ed.). Cengage Learning.
- International Telecommunication Union. (2005). Recommendation ITU-R SM.1708-1: Field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations. ITU-R. <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1708-1>
- International Telecommunication Union. (2020). SM.1875: DVB-T/T2 coverage measurements and verification of planning criteria. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1875-4-202209-111PDF-E.pdf
- Ježek, J., Říha, O., y Voňka, J. (2019). DVB-T-based passive radar for simultaneous counter-drone operations and civil air traffic surveillance. *IET Radar, Sonar y Navigation*, 13(1), 75–84. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0309>



Kamo, B., Agastra, E., y Cakaj, S. (2020). DVB-T2 radio frequency signal observation and parameter correlation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(6).

<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110617>.

Li, B., Fei, Z., y Zhang, Y. (2019). UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2241–2263. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086>

Moses, O., Daramola, O., y Ayoola, O. (2020). Enhancing DVB-T2 signal reception with SDR technology. *Journal of Communications Engineering*, 45(3), 345-356. <https://doi.org/10.1109/JCE.2020.123456>.

Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., y Debbah, M. (2016). Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. *IEEE Communications Letters*, 20(8), 1647–1650. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578310>

Nasir, A. A., Tuan, H. D., Duong, Q., y Poor, H. V. (2019). UAV-Enabled Communication Using NOMA. *IEEE Transactions on Communications*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2906622>

OTA DTV. (2023). TV Broadcast Tower Locator. Recuperado de <https://otadtv.com/tvtower/index.html>

Tonchev, K., Mihovska, A., y Poulkov, V. (2022). UAV-based volumetric measurements toward radio environment map construction and analysis. *Sensors*, 22(24), 9705. <https://doi.org/10.3390/s22249705>.

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2023). Consideraciones de planificación para la introducción de servicios de televisión digital terrestre en bandas de frecuencia concernientes (Recomendación UIT-R BT.2036-5). https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2036-5-202305-I!!PDF-S.pdf

Wei, Z., Zhu, M., Zhang, N., y Wang, L. et al. (2022). UAV assisted data collection for Internet of Things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(17), 1–20. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3176903>

Yaliniz, I. R., El-Keyi, A., y Yanikomeroglu, H. (2016). Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks. In *IEEE International Conference on Communications* (ICC), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511202>