

EMPLEO DE LA RED MÓVIL EN LA DETECCIÓN DE CONDUCTOS TROPOSFÉRICOS

Ana Julia Marine López, Lányer Pérez Garlobo, Yoandri Marín González,
José Rafael Sandianes Gálvez

¹Ministerio de Comunicaciones, ^{2,3}Instituto Técnico Militar “José Martí, La Habana,

⁴Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana,

¹e-mail: ana.marine@mincom.gob.cu, ²e-mail: lanyer1978@gmail.com, ³e-mail: yoandri.marin@uic.cu

⁴e-mail: sandianes@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los sistemas de radiocomunicaciones están afectados por condiciones de propagación refractivas anómalas, las cuales causan afectaciones a su disponibilidad. La regularidad de aparición de dichos fenómenos en nuestra área climática es bastante alta y su incidencia en la degradación de servicios de comunicaciones móviles es elevada. El objetivo del trabajo se fundamenta en la posibilidad del empleo de los datos del indicador clave de desempeño de la red móvil RTWP (Receive Total Wide Band Power, por sus siglas en inglés), para la detección de anomalías del gradiente del índice de refracción de la troposfera. El análisis se sustenta en un estudio estadístico de correlación entre los valores máximos diarios de nivel de interferencia de las estaciones base (RTWP), reportados por celdas de tecnología UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), y los datos de ocurrencia de conductos troposféricos procedentes de dos fuentes de datos climáticos. En el primer caso se emplean los reportes de la estación de sondeo de Cayo Hueso (Key West) y como segunda fuente se hace uso de los datos de reanálisis del sistema ERA5. De igual forma se correlacionan estos resultados con los reportes de detección de operadores externos compilados por el Centro Nacional de Control del Espectro. Los resultados de los análisis obtenidos por comparación de las señales de interferencia recibidas y la presencia de conductos troposféricos (ductos) detectados son satisfactorios, lo que demuestra que la red móvil es capaz de reflejar el fenómeno bajo investigación.

PALABRAS CLAVES: servicios de radio, detección de conductos troposféricos, disponibilidad, interferencias por conductos, correlación de eventos.

USING THE MOBILE NETWORK FOR TROPOSPHERIC DUCTING DETECTION

ABSTRACT

The radio communications systems are affected by anomalous refractive conditions of propagation, which cause affectations to their availability. The regularity of appearance of the previously mentioned phenomena in our climatic area is very high, as well as the incidence of the degradation of services of mobile communications. The objective of the present work consists of the possibility of detecting anomalies in the gradient of the refractive index of the troposphere using RTWP (Receive Total Wide Band Power) data is founded. The analysis is based on a statistical correlation study between the maximum daily level of interferences in RTWP base stations, reported by UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) technology cells, and two sources of tropospheric duct parameters. In the first case, Key West's sounding station reports are used; in the second place, the data of re-analyses ERA5 system. In the same way, these results correlate with the reports of the detection of external operator's signals compiled by the National Center of Spectrum Control. The results of the comparison of interference signals received, and tropospheric ducting detection is satisfactory and prove the capacity of the network to reflect the phenomenon under investigation.

INDEX TERMS: radio services, duct detection, availability, ducting interference, events correlation.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de radiocomunicaciones están afectados por condiciones de propagación anómalas presentes en la atmósfera las que influyen en la disponibilidad de los servicios. En esta categoría tenemos fenómenos tales como: los conductos troposféricos y las variantes de superrefracción del gradiente del coíndice de refracción “N” de la tropósfera. Por efecto de estas anomalías, ocurre el efecto de guiado de las ondas, en el caso de los conductos, y una marcada curvatura de los rayos en la segunda, lo que da lugar a que se extiendan los alcances mucho más allá de los límites planificados. Gracias a ello pueden ocurrir interferencias no intencionadas en sistemas que comparten la misma banda de frecuencia.

La regularidad de aparición de dichos fenómenos en nuestra área climática es bastante alta y su influencia en la degradación del servicio en sistemas de radioenlace de microondas y de radar, ha sido constatada regularmente. En la actualidad, debido al incremento de la informatización, de los servicios de telefonía móvil, de televisión digital, y de transmisión de datos y como, además, el número de usuarios ha aumentado considerablemente, se ha posibilitado que las afectaciones a los sistemas de radiocomunicaciones, debido a anomalías y fenómenos atmosféricos, sean más frecuentes. Un ejemplo de esto fue la aparición de afectaciones por interferencias a los servicios de telefonía celular en una extensa área del territorio nacional durante los meses de marzo y abril del año 2021 las cuales, se presume, ocurrieron durante conductos troposféricos, o por superrefracción.

Sin embargo, no todas las afectaciones de la red móvil pueden atribuirse a causas climáticas, pues existen otras que generan afectaciones dentro de la propia red. Por lo tanto, se necesita discernir si las interferencias constatadas pueden ser imputadas a señales procedentes de operadores externos y valorar, el grado de correlación entre el fenómeno y las afectaciones. Esto permite evaluar la capacidad de la red como instrumento de censado de la anomalía troposférica, lo cual constituye el objetivo primordial del presente trabajo.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONTEXTUAL

De acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, en su número 1.166, se define el término interferencia como: el “efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones sobre la recepción en un sistema de radiocomunicaciones (SRC). La misma se manifiesta por la degradación de la calidad y el falseamiento o pérdida de la información que se podría obtener en su ausencia”. En el mismo reglamento se definen los tipos de interferencia por el nivel de afectación que provocan sobre los sistemas en: admisible, aceptable y perjudicial, y por su naturaleza espectral en: interferencia co-canal y de canal adyacente. Se refiere, en el primer caso, a la coincidencia total en banda entre la señal interferente y la deseada, mientras que en el otro se refiere a la superposición de solo una porción de la banda ocupada por ambas señales. Las interferencias pueden ser, además, intencionadas o no intencionadas. Dentro de esta última clasificación se comprenden las provocadas por fenómenos relativos al entorno de propagación.

En la recomendación P-452-16 de la UIT [1] se describen los mecanismos (modos) permanentes con afectación a largo plazo y los modos a corto plazo, que en nuestro caso son los de mayor interés, porque se deben a comportamientos anómalos de la propagación de la interferencia. A la vez, en la recomendación se señala que la propagación por conductos y la reflexión en capas elevadas (superrefracción), son los fenómenos de propagación de corta duración más importantes porque pueden causar interferencias sobre el agua o en zonas de tierras costeras planas. En el primer caso se pueden obtener niveles elevados de señal en distancias largas, superiores a 500 km sobre el mar, mientras que, en el segundo, hasta 250 y 300 km.

Para el análisis del fenómeno que nos ocupa, -las interferencias provocadas por emisiones no deseadas-, resulta necesario realizar el estudio sobre la base de factores ambientales anómalos que propician esas interferencias. No obstante, se debe considerar, además, todos aquellos aspectos energéticos y frecuenciales vinculados a los sistemas radiotécnicos.

Propagación de las interferencias en presencia de conductos o superrefracción

Es conocido que la troposfera es un dieléctrico heterogéneo compuesto por una mezcla de aire seco y vapor acuoso. El índice de refracción en ella varía con la altura al variar los niveles de presión “P” en hectopascales (hPa), su

temperatura “T” en Kelvin (°K), y su humedad “H” expresada comúnmente en unidades porcentuales. Resulta frecuente emplear, en lugar del índice de refracción “n”, el coíndice de refracción “N” (expresión del índice multiplicado por 10^6). Si se considera, entonces, una atmósfera con un gradiente vertical constante, la trayectoria del rayo parte del transmisor en dirección al receptor y su curvatura depende únicamente del gradiente de “N” (dN / dh).

Según los valores del gradiente “ dN/dh ”, se clasifica la troposfera en [2]:

1. Subrefractiva: $dN/dh > -40 \text{ N / km}$
2. Estándar.o normal: $dN/dh = -40 \text{ N / km}$
3. Superrefractiva: $dN/dh < -40 \text{ N / km}$
4. Conductiva: $dN/dh < -157 \text{ N / km}$. (Caso particular de superrefracción)

Cuando el gradiente se hace más negativo, con valores de “ dN / dh ” menores que -40 N / km , la troposfera se define como superrefractiva, lo que favorece de forma marcada el aumento del alcance de la radiocomunicación. En esta misma condición, cuando el gradiente vertical del coíndice decrece a una altura determinada, y está por debajo de -157 N / km (umbral crítico), en dependencia de la frecuencia utilizada y del ángulo de ingreso del rayo en la atmósfera, puede ocurrir el denominado fenómeno de “conducto troposférico”. En la Fig. 1 se aprecia la influencia del gradiente sobre la trayectoria de los rayos, para tres casos representativos del gradiente de M y de N. M es el denominado “coíndice modificado”; “M” y “N” se relacionan por: $M = N + 157$.

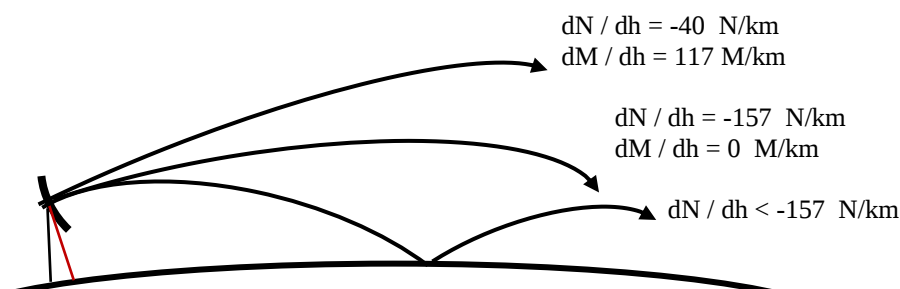


Figura 1: Curvatura de los rayos con distintos gradientes de los coíndices N y M [3].

En un conducto troposférico la onda queda atrapada en una especie de guía natural (que se asemeja a una guía de onda dieléctrica) entre la superficie terrestre y la capa en la que se excede el umbral crítico –ya señalado–, o entre dos capas con igual condición refractiva. Debido a esto, la onda se propaga a saltos dentro de la guía (ver Fig. 1), con alcances de comunicación que pueden llegar a cientos de kilómetros.

Los conductos troposféricos pueden ocasionar desvanecimientos profundos lentos, o un gran mejoramiento de la señal. En enlaces terrenales de visibilidad directa, provocar el denominado desvanecimiento por trayectos múltiples entre la onda directa y la del conducto. Tanto los conductos como la superrefracción pueden causar interferencias considerables en los trayectos más allá del horizonte [2, 4]. En nuestro territorio estos fenómenos resultan comunes durante el verano y los meses de otoño, como resultado del cambio brusco de temperatura **T** y humedad **e**, en los límites entre masas de aire de diferente refractividad. Ocurre la denominada “inversión del gradiente de temperatura (dT/dh) y/o humedad (de / dh)”.

La aparición de conductos puede ser detectada principalmente a partir de mediciones con globos sonda. En [5] se ha realizado un estudio a largo plazo de este fenómeno en Cuba, a partir de datos de las estaciones de sondeo de Cienfuegos, Camagüey y La Habana. En [6] se presentan los resultados analizados durante 38 años de la refractividad, y en [7] para un período de cinco años, ambos sobre el mar, en el estrecho de La Florida, a partir de la estación de sondeo en Cayo Hueso. En el último caso se analiza con detalle la ocurrencia de conductos en esa región y se ratifica su presencia en un porcentaje elevado de días cerca de nuestra costa norte, en especial en meses de verano y primavera (febrero – junio). En la Fig 2, se muestran [4] las diferentes variantes de conductos clasificados en: de superficie, superficie-elevados y elevados, así como sus parámetros principales los que son: los espesores S_s y E_s , medidos en

metros, y las intensidades, S_m y E_m , medidos en unidades M. En los conductos elevados se describen otros dos parámetros, E_b y E_r .

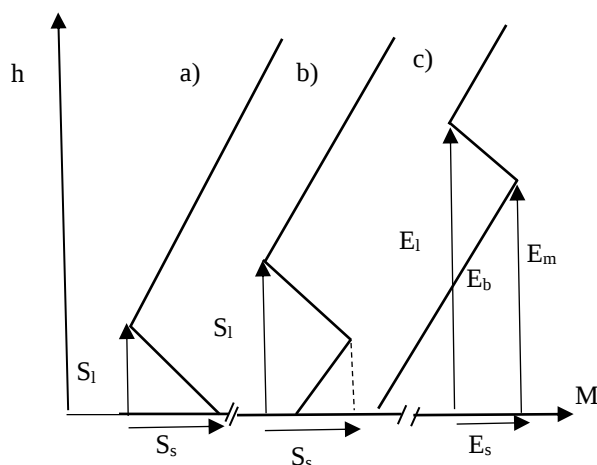


Figura 2: Modelos de ductos troposféricos y parámetros asociados [4].

3. INTERFERENCIA POR CONDUCTOS EN SISTEMAS MÓVILES CELULARES

En toda red móvil hay interferencia. El reúso de frecuencias unitario usado en redes UMTS/LTE/5G implica que múltiples celdas y móviles transmiten sobre el mismo ancho de banda, lo que puede dar lugar a “interferencias internas. El sistema se diseña para tolerar y manejar la misma, y sólo cuando tenemos escenarios severos (muy alto tráfico, solapamiento de celdas o polución de pilotos) se observa una degradación significativa en la experiencia del usuario.

El escenario cambia cuando la fuente de interferencia no proviene de la misma red móvil o usuarios, sino que es de origen externo. La interferencia externa puede afectar cualquier porción de espectro, pero en redes celulares con esquemas dúplex del tipo FDD (Frequency Division Duplex, en inglés), sus efectos suelen ser más trascendentes en el enlace de subida (*uplink*, *UL*). Esto se debe a las limitaciones inherentes a este enlace porque la potencia de transmisión máxima típica de un móvil es de 24dBm. Aún cuando las estaciones radio base cuentan con receptores de alta sensibilidad, la presencia de señales interferentes impacta la capacidad de la estación para decodificar las transmisiones de sus usuarios. Como se aprecia en la Fig. 3 [8], existe un segmento del espectro del enlace de bajada (*downlink*, *DL*) de la estación base interferidora (ENB2 en la figura), que se superpone con una porción del espectro del enlace de subida (*uplink*, de la estación local (ENB1 en la figura), lo que causa la interferencia.

Existen indicadores claves de desempeño de la red celular, conocidos por KPI's, por sus siglas en inglés [9], algunos de los cuales son capaces de reflejar la existencia de dicha interferencia en la red. Estos parámetros son medidos a partir del nivel de acceso de la red hasta el núcleo (*core*). Existen indicadores característicos para cada tecnología. Para el caso de GSM (Global System for Mobile), es común emplear la denominada interferencia de nivel 4 y 5 %, mientras que en el caso de UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) se emplea el denominado *RTWP* [10].

4. FUENTES DE DATOS Y MÉTODO DE ANÁLISIS

Para el estudio resulta necesario contar con las fuentes de datos que reflejen el fenómeno de la propagación, -datos de KPI's de la red móvil-, y un procesamiento estadístico que permita validar la correlación entre ambas manifestaciones. De igual forma resulta necesario contar con un instrumento de contrastación a partir de la identificación de señales de operadores externos.

Datos de KPI's de la red móvil celular

Primero es necesario especificar que tipo de KPI's son los requeridos. El núcleo de la red móvil celular compila las estadísticas de los KPI's y se brinda la información en valores máximos y medios en una página para usuarios y especialistas de ETECSA con acceso a su red corporativa.

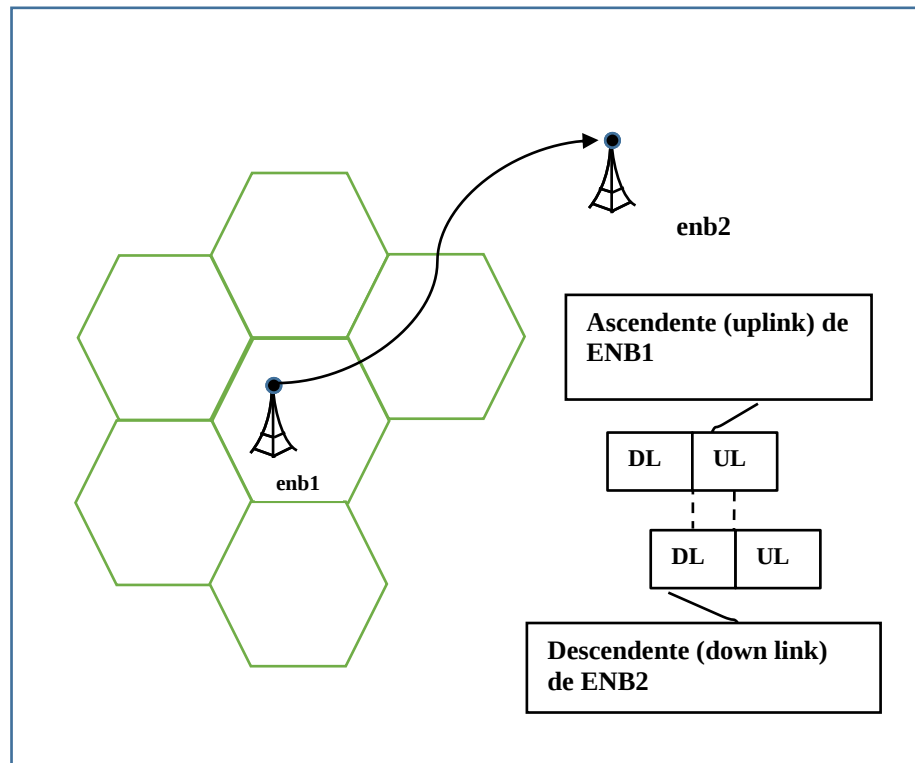


Figura 3: Escenario de ocurrencia de interferencia externa en una red móvil celular [8].

La página brinda la información tabulada a partir de consultas y es, además, perfilada en mapas con representación de sectores y celdas. Esta información se almacena a largo plazo en valores medios y máximos diarios con una retención de solo un año. Sin embargo, de acuerdo con [10], los KPI's de las interferencias con mayor representación son: la RTWP para UMTS y la interferencia de nivel 4 y 5, en GSM.

En aras de homogenizar el procesamiento, y como el fenómeno afecta indistintamente a ambas tecnologías, se decide emplear solo el indicador RTWP máximo y no el promedio diario. La elección se fundamenta en que el valor promedio diario enmascara a los eventos de duración diaria relativamente corta. Una serie temporal de RTWP máxima de una de las celdas escogidas en el estudio se muestra en la Fig 4. En ella se aprecian picos de interferencia respecto a un valor de nivel “piso” de interferencias relativamente constante. Se eligen, a la vez, las estaciones localizadas en la zona costera norte debido a que nuestro objetivo está enfocado a la detección de interferencias de redes celulares que arriban a nuestro país procedentes de esa dirección; los sectores de estas estaciones deben tener su orientación cercana al azimut de cero grados.

Compilación de las estadísticas de detección de señales de operadores externos mediante el análisis técnico de la señal 3GPP

Con el objetivo de determinar las fuentes de interferencia externa a la red, es empleado un sistema de censado ubicado en la costa norte de La Habana. Este sirve, además, como instrumento de monitoreo y control de la interferencia lo que permite validar, en esta etapa, eventos detectados por la red. La detección de señales de operadores externos permite el proceso de identificación de las características técnicas de la señal y la decodificación de los parámetros

presentes en su trama. Estos parámetros se rigen por el estándar de comunicaciones móviles 3GPP (3rd Generation Partnership Project), establecido por la UIT [11].

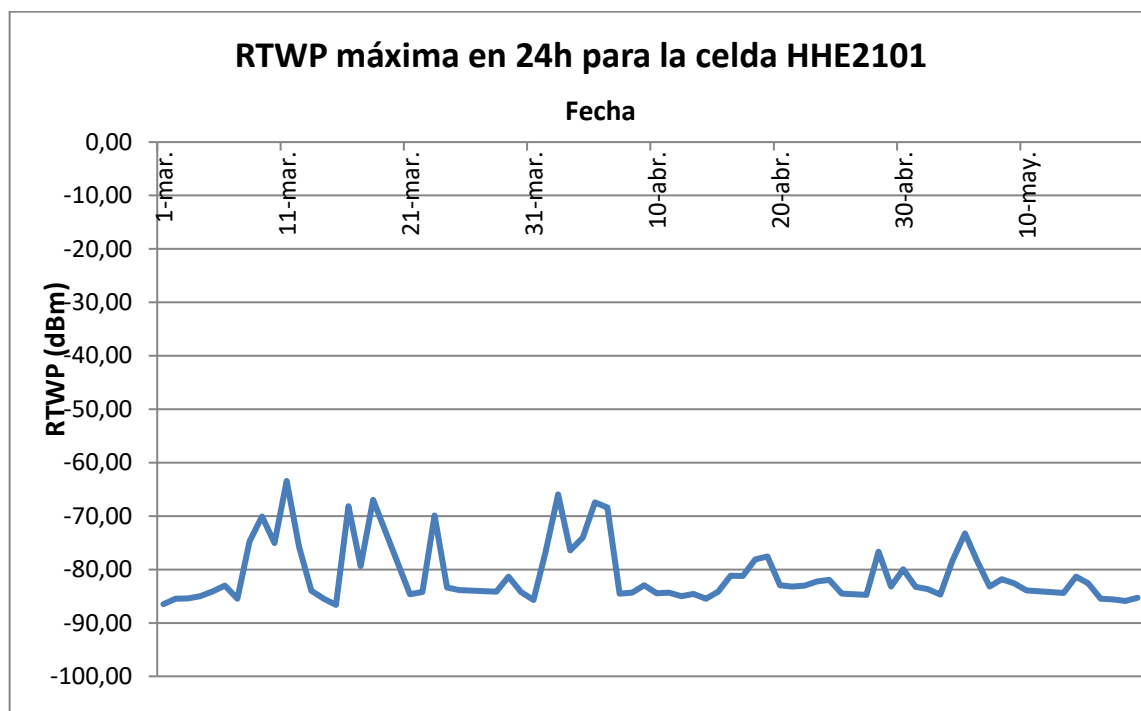


Figura 4: Ejemplo de serie temporal de RTWP máxima en los meses de marzo, abril y mayo del año 2022.

En la Fig. 5 se representa la ubicación de las fuentes de datos que serán empleados en el estudio con la estación de sondeo de Key West. Además, se muestra el punto de referencia seleccionado en el estrecho de La Florida para el análisis con los datos del sistema ERA5 que se describe a continuación.

Mediante el empleo de sistemas receptores SDR (Software Defined Radio) de banda ancha y con el uso de software libres que permiten la decodificación del estándar 3GPP para las tecnologías UMTS y GSM, es posible el monitoreo y la recolección de datos. Entre los datos podemos encontrar: los códigos de operador: MCC, MNC, LAC, CID, la frecuencia, los niveles de señal y otros. A partir de ellos puede determinarse la localización de la estación base detectada para lo cual se hace uso de bases de datos internacionales públicas.

En [12] se presenta la compilación por parte del MINCOM de los datos de detección de operadores externos. Como se ha expresado; en la Fig. 5 se muestra la ubicación de las estaciones base interferidoras detectadas y las trayectorias de propagación hacia el sensor, ubicado en el territorio nacional. Como puede apreciarse, la mayor concentración de estaciones se localiza en Key West, a distancias de 165 y 180 km, pero existen reportes que reflejan estaciones mucho más distantes ubicadas en Tampa, a una distancia de hasta 485 km.

Debido a la resolución temporal de la información primaria (señal) a correlacionar y reportada por la red celular, resulta necesario integrar la misma en un mismo intervalo. Para esto se toma por día un único valor, en este caso el máximo, el cual está presente en el reporte de detección. A esta limitante hay que agregar el hecho de que en ese momento los procesos no están automatizados en su conjunto y el monitoreo requiere de un operador. En la Tabla 1 se muestran, como ejemplo de reporte, datos compilados en dBu (dB por microvolt / metro). Como puede apreciarse, la serie con que se cuenta es corta, pero aun así, debe corresponderse con el resto de los datos de análisis si la causa de origen es común.

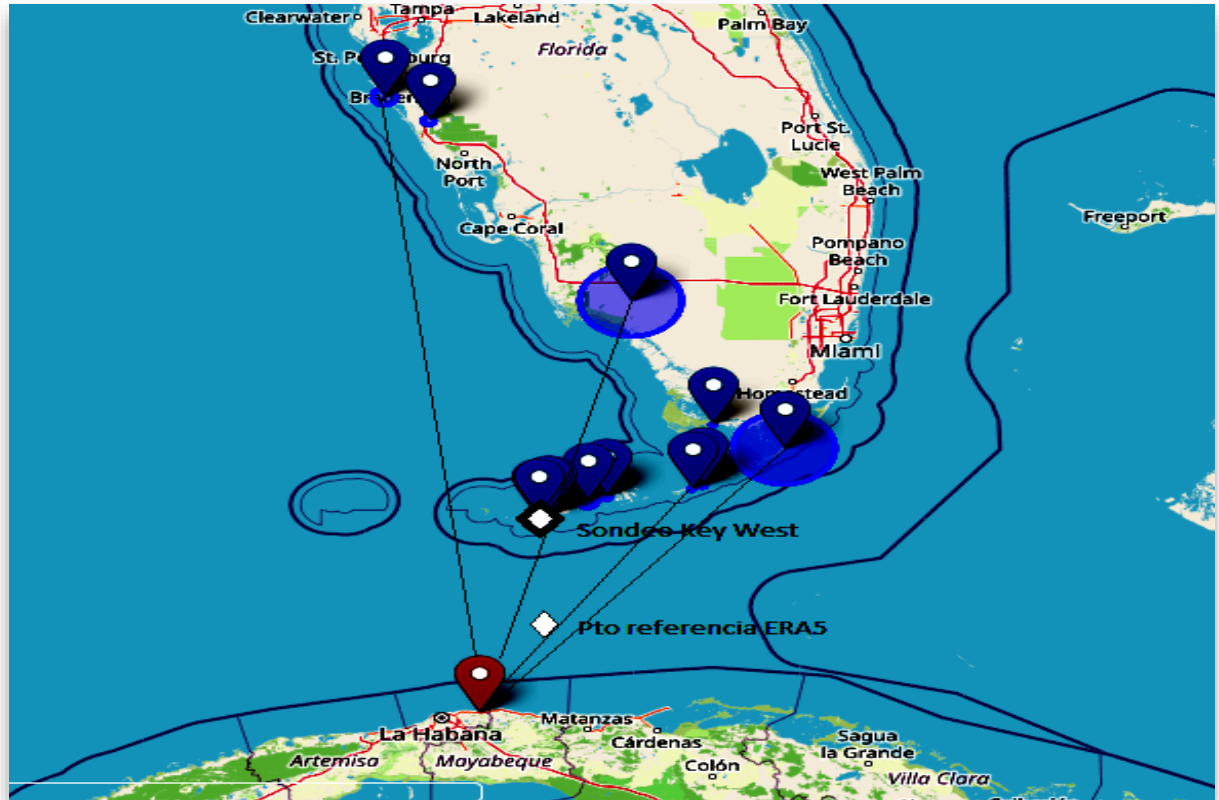


Figura 5: Localización de interferidores y sus trayectorias hasta el sensor [12].

Tabla 1: Reporte de evento máximo obtenido cada día.

Año	Mes	Día	Nivel (dBU)
2022	3	11	29
2022	3	19	13
2022	3	23	23
2022	4	5	29
2022	4	19	16
2022	4	29	22
2022	5	5	29
2022	5	6	17

Compilación de la data de ocurrencia de conductos y sus parámetros a partir de sondeos aerológicos y datos de reanálisis de ERA5.

Para lograr establecer la correspondencia de los eventos medidos por los sensores descritos previamente, con la aparición de anomalías troposféricas por conductos, se debe emplear una fuente de datos de sondeo aerológico representativa de la región de análisis [2]. Una de las bases de datos de sondeo mundialmente empleada es la que se brinda en el sitio web de la universidad de Wyoming [13]. En esta estación aerológica se reportan datos, dos veces al día, a las 00z y 12z (las 7:00 y 19:00 horas de Cuba, respectivamente), con perfiles verticales de variables climáticas. En el sitio web se brindan, además, los indicativos de las estaciones de sondeo en el área del Caribe. Estos se pueden corroborar en las tablas de parámetros meteorológicos también publicadas en [13], para Cayo Hueso este es EYW.

Se aprecia que la estación más cercana al centro de la trayectoria probable de propagación es la estación aerológica de Cayo Hueso en Estados Unidos, cuyo código es 7812 e indicativo EYW. Con los valores obtenidos de niveles de la: temperatura, presión y humedad relativa, se calcula el perfil vertical del coíndice de refracción N. Este perfil se procesa en una herramienta de software [5] desarrollada a estos efectos, lo que posibilita la detección de los eventos de conductos y se determinan sus parámetros.

Por otro lado en la Tabla 2 se muestra un ejemplo parcial de los datos de parámetros de conductos compilados para las 00z (7 PM hora local), por ser este el horario donde se reportan las mayores incidencias por el Centro Nacional de Control de Espectro [12]. Esta tabla ha sido depurada al eliminar de ella conductos de poca intensidad, o aquellos elevados a alturas que no permiten la recepción de señales en tierra por efecto del guiado (más de 500 m).

Tabla 2: Compilación de parámetros de conductos obtenidos en Cayo Hueso (Marzo y Abril, 7 pm) [12].

Año	Mes	Día	Alt. Base(m)	Alt. Capa (m)	Alt. Tope (m)	Espesor(m)	Intensidad (U/M)
22	2	28	401.01	443.00	551.00	149.99	5.84
22	3	8	260.57	399.00	572.00	311.43	17.75
22	3	9	162.21	260.00	422.00	259.79	13.31
22	3	11	0.00	0.00	106.00	106.00	7.94
22	3	16	22.74	145.0	243.00	220.26	16.37
22	3	18	149.36	454.00	609.00	459.64	33.88
22	3	19	0.00	141.00	247.00	247.00	10.79
22	3	23	25.81	200.00	379.00	353.19	11.38
22	3	27	503.88	564.00	682.00	178.12	8.02
22	3	28	132.27	217.00	261.00	128.73	8.51
22	4	2	0.00	184.00	283.00	283.00	26.06
22	4	4	39.09	160.00	241.00	201.91	11.47
22	4	5	130.29	205.00	260.00	129.71	8.56
22	4	15	330.51	449.00	505.00	174.49	9.09

Como una segunda fuente de datos de conductos puede emplearse los del sistema de análisis ERA-5 [14]. Este sistema proporciona estimaciones globales de las variables atmosféricas, cada una hora, y que están realizadas con una resolución horizontal de 31 km y 137 niveles verticales híbridos, desde la superficie hasta 0.01 hPa. ERA-5 ha sido creado utilizando el método de asimilación de datos 4DVar, en el Sistema de Pronóstico Integrado (IFS, siglas en inglés) del Centro Europeo para Predicción a Plazo Medio (ECMWF, siglas en inglés). En la actualidad están disponibles datos desde 1979 hasta el presente, aunque se propone, próximamente, su extensión desde 1950. Estos resultados brindan una amplia información del estado de la atmósfera y de variables en superficie, las que fueron logradas utilizando una amplia variedad de observaciones meteorológicas.

ERA-5 presenta actualizaciones diarias, aproximadamente, cada 5 días, después del tiempo real de medición; y además, actualizaciones medias mensuales, 5 días después del final del mes. Dentro de las variables reportadas se encuentran: **dndzn**, que es el gradiente mínimo de índice de refracción n en la capa del conducto; **dndza**, que es el gradiente medio dentro de la capa del conducto; **dctb**, la altura de la base del conducto; **tplb**, es la altura de la capa del conducto y **tplt**, la altura del tope del ducto, las tres últimas todas en metros.

Los datos se solicitan al sitio web de ERA al elegir la región y las variables de interés. En nuestro caso se ha seleccionado una pequeña zona ubicada en el estrecho de La Florida y se han obtenido los ficheros correspondientes en formato NETCDF. Estos ficheros han sido procesados en un “script” de lenguaje Python a modo de obtener series temporales de las variables previamente mencionadas. Para ello es necesario realizar una interpolación temporal bilineal en un punto representativo del área, el cual se asume como centro de las trayectorias de propagación de las ondas de radio, ubicado en las coordenadas -81.75 W; 23.75 N. Los datos se muestran en la Tabla 3 los que también han sido depurados hasta los 500 m.

Tabla 3: Parámetros de conductos obtenidos a partir de datos de ERA5 (solo mes de marzo).

Fecha	dndzn (m)	dndza(m)	dctb(m)	tplb(m)	tplt(m)
20220308	-0.380	-0.382	162	183	225
20220309	0.033	0.001	138	199	278
20220310	0.149	0.116	140	212	290
20220311	0.388	0.320	109	245	336
20220312	-0.073	-0.115	103	183	267
20220316	-0.107	-0.118	205	244	307
20220317	-0.221	-0.236	135	177	235
20220318	0.420	0.335	142	334	468
20220319	0.400	0.317	174	346	469
20220320	0.248	0.218	366	463	574
20220323	-0.032	-0.045	249	298	376

Correlación estadística de los datos de series temporales de RTWP y los de eventos de ductos

Para el análisis se cuenta con 4 variables compiladas a partir de fuentes de diferentes naturalezas y continuidad temporal. La variable (RWTP), se puede definir como una serie temporal $SRWTP_i$ compuesta por: muestras diarias de la aparición de ductos y señales interferentes que por su naturaleza temporal aperiódica se clasifican como eventos, los que se designan: $EERA_k$, $Educt_j$, y $E3GPP_l$, respectivamente. La definición de estas variables es explicada posteriormente. Primeramente, para el caso de los datos de ERA5, la variable a emplear (dndzn) es el gradiente mínimo del índice de refracción en la capa, evaluado en el instante k, o sea: $EERA_k = dndz_n(k)$, pues este parámetro resulta el de mayor relación con la intensidad del conducto (variable que no es reportada por ERA5).

Con el objetivo de poder evaluar la posible relación entre: los eventos de los conductos, las señales registradas por la red celular y las mediciones del sistema de control técnico, resulta necesario obtener un indicador estadístico del nivel de correlación entre ellas. Uno de los métodos más extendidos para el análisis de la correlación de datos es el coeficiente de correlación de Pearson. Sin embargo, este es aplicable a series temporales de igual longitud.

Para correlacionar series temporales con eventos es necesario convertir los eventos distribuidos en series temporales de acuerdo con [15] por medio de:

$$S_i^E = \begin{cases} 1 \rightarrow T_{si} = T_{ek} \\ 0 \rightarrow \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

donde: T_{si} es el i-ésimo instante de tiempo de la serie considerada, y
 T_{ek} es el k-ésimo instante de tiempo del evento e .

Bajo este enfoque la nueva serie S_i^E tiene las mismas dimensiones que la serie S_i . Se puede, entonces, definir las series para cada correlación por: (S_i^{Educt}) , (S_i^{ERA}) , (S_i^{E3GPP}) , $(SRWTP_i)$. Todas estas series están referidas al i-ésimo instante de tiempo de la serie temporal $(SRWTP_i)$. Como se puede apreciar se tiene una sola serie realmente temporal y tres variables dicotómicas modificadas de acuerdo con (1). Este es un caso especial del coeficiente de correlación de Pearson denominado: Coeficiente de correlación biserial puntual (CCBP), que puede determinarse según [16] como:

$$R_{BS} = \frac{\bar{y}_p - \bar{y}_q}{\sigma_y} \sqrt{p \cdot q} \quad (2)$$

donde: x: Variable de carácter dicotómica natural o genuina,

- y: Variable de carácter continua,
- $\bar{Y}_p$: Media de la muestra de respuestas del primer grupo (unos),
- $\bar{Y}_q$: Media de la muestra de respuestas del segundo grupo (ceros),
- $\bar{y}$: Media de los puntajes en la variable “y”,
- σ_y : Desviación estándar de los puntajes totales perteneciente a la muestra con los valores de la variable continua “y”,
- p: Magnitud parcial de la proporción de casos/respuestas del primer grupo,
- q: Magnitud parcial de la proporción de casos/respuestas del segundo grupo.

Una de las premisas que se le exige a la serie temporal es su comportamiento estacionario, por lo que resulta necesario realizar una prueba de estacionaridad a las series, antes del cálculo de la correlación. Una de las pruebas mayormente aceptadas a este efecto es la denominada prueba de KPSS [16], en la cual se evalúa la hipótesis nula de que una serie univaluada tiene tendencia estacionaria, contra la hipótesis alternativa de que es un proceso no estacionario de raíz unitaria.

Tabla 4: KPSS determinados de la serie temporal de RTWP máxima de las celdas bajo análisis.

CELDA	Prueba de KPSS (h)	P-valor	CELDA	Prueba de KPSS (h)	P-valor
HHE2711	VERDADERO	0.010	HHE2091	FALSO	0.100
HHE2715	FALSO	0.100	HHE2095	FALSO	0.088
HHE271I	FALSO	0.100	HHE209I	FALSO	0.095
HHE2183	FALSO	0.100	HHE2281	VERDADERO	0.010
HHE2187	FALSO	0.100	HHE2285	FALSO	0.100
HHE218K	FALSO	0.100	HHE228I	FALSO	0.100
HHE2563	FALSO	0.100	HHE2101	FALSO	0.100
HHE2567	FALSO	0.100	HHE2105	FALSO	0.100
HHE256K	FALSO	0.100	HHE210I	FALSO	0.100

Con este fin se utiliza como asistente matemático el MATLAB [17] cuya función: $h = kpsstest(y)$ retorna el valor lógico (h), la que nos da un nivel de decisión del rechazo en la prueba de: Kwiatkowski, Phillips, Schmidt, and Shin (de ahí se denomina KPSS [18]). El objetivo del empleo del KPSS es probar la existencia de una raíz unitaria invariante de la serie “y”. En la misma se define como hipótesis HO para la que la serie se considera estacionaria, y H1 como no estacionaria, lo que implica la existencia de una raíz univaluada. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la prueba KPSS en las series bajo estudio.

Las celdas con resultado “FALSO”, son por fallo de rechazo de la hipótesis nula, por lo que son series que pueden considerarse como HO, probablemente estacionarias sin raíz unitaria, con un 95% de confianza. Los p-valores, en este ejemplo, son mayores o iguales que 0.1 para el FALSO. El análisis nos permite desechar aquellas celdas de series que no cumplen con el test. Para lo cual, como se muestra en la Tabla 4, se opta por un cumplimiento más riguroso al aceptar solo valores de p cercanos a: $p \geq 0.1$, series no sombreadas.

5. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE CORRELACIÓN Y SU ANÁLISIS

A continuación, se muestran los resultados de correlación y simultaneidad entre los eventos indicados.

Análisis de la correlación entre las interferencias en la red local y la presencia de conductos

El coeficiente de correlación biserial puntual (CCBP) se calcula entre la serie $SRWTP_i$ y la serie dicotómica S_i^{Educt} tomada del sondeo de Key West en el mismo período de tiempo. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en la serie y se aprecia una correlación positiva débil, pues en ningún caso se supera el 50% (0.5), lo cual impide

Tabla 5: CCBP entre las series $SRWTP_i$ y S_i^{Educt} .

CELDA	CCBP	CELDA	CCBP
HHE2715	0.48	HHE256K	0.37
HHE271I	0.51	HHE2091	0.36
HHE2183	0.43	HHE2285	0.06
HHE2187	0.39	HHE228I	0.29
HHE218K	0.42	HHE2101	0.40
HHE2563	0.37	HHE2105	0.35
HHE2567	0.35	HHE210I	0.39

demostrar estadísticamente la existencia de una relación entre la interferencia recibida y la manifestación del fenómeno conducto. Esto puede ser explicado por la distribución espacial de las condiciones de conductos y la posición del punto de sondeo empleado.

Un análisis seriado de mapas de eventos anómalos en el área del Caribe muestra que, si bien los datos de esta estación (Cayo Hueso) reflejan, a nivel general, la simultaneidad del fenómeno, los mismos no describen un comportamiento fiable debido al perfil vertical de índice de refracción dentro del trayecto de propagación. Esto puede comprobarse en la Fig. 6 - en esta figura los tonos rojos son los de anomalías más intensas-. Esta figura muestra, -como ejemplo-, un caso en el que existen fuertes condiciones de conductos en el estrecho de La Florida y que produjeron reportes de interferencia por el Centro Nacional de Control de Espectro. Sin embargo, no existen reportes de conducto para ese día al emplear el sondeo de Cayo Hueso (Key West) -ver Tabla 2-. El punto de sondeo se encontraba bajo condiciones climáticas de inestabilidad atmosférica.

Un análisis del gradiente vertical de N en puntos de confluencia de las trayectorias de propagación (ver Fig. 5), puede reflejar, de una forma más clara, el fenómeno bajo análisis. Al considerar esta región y seguir la línea de pensamiento, se calcula el coeficiente de correlación biserial puntual entre la serie $SRWTP_i$ y la serie S_i^{ERA} .

Los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 6. Se observa ahora una elevada correlación entre la casi totalidad de las series con las anomalías que se reportan con el ERA5, lo que demuestra la estrecha relación que existe entre los niveles de interferencia presentes en la red y los eventos conductos. Este novedoso resultado permite afirmar que la red móvil constituye un valioso instrumento de detección de anomalías por conductos troposféricos. Resulta interesante advertir que sólo la serie perteneciente a la celda HHE2285 de la Tabla 6 presenta una baja correlación, lo que se debe a que muestra valores de interferencia elevados que impiden reflejar la presencia del evento.

Tabla 6: CCBP entre las series $SRWTP_i$ y S_i^{ERA} .

CELDA	CCBP	CELDA	CCBP
HHE2715	0.83	HHE2563	0.87
HHE271I	0.73	HHE2567	0.87
HHE2183	0.79	HHE256K	0.87
HHE2187	0.85	HHE2091	0.85
HHE218K	0.83	HHE2285	0.17
HHE228I	0.57	HHE2105	0.83
HHE2101	0.80	HHE210I	0.85

Simultaneidad entre las interferencias en la red local, la detección de señales interferentes de operadores externos y las condiciones climáticas de conductos

El análisis de simultaneidad se realiza a partir de graficar en un eje común la serie temporal RTWP máxima, los eventos de ductos obtenidos de la serie ERA y las detecciones 3GPP. Los eventos de conductos se grafican a partir de los datos de la serie S_i^{ERA} , para los instantes en que la misma toma el valor 1. Igual, se representan los eventos 3GPP, a partir de la serie S_i^{3GPP} . Se agrega, además, el gráfico de la variable temporal (dndzn), la cual constituye la fuente a partir de la cual se genera la serie S_i^{ERA} . El objetivo principal de este gráfico es mostrar la correspondencia temporal entre los eventos de interferencia reportados por la red móvil y el valor del gradiente mínimo dentro de la capa del conducto [20]. El valor de -85dB -(línea punteada en la Fig. 7)- se corresponde con elevados valores de interferencia.

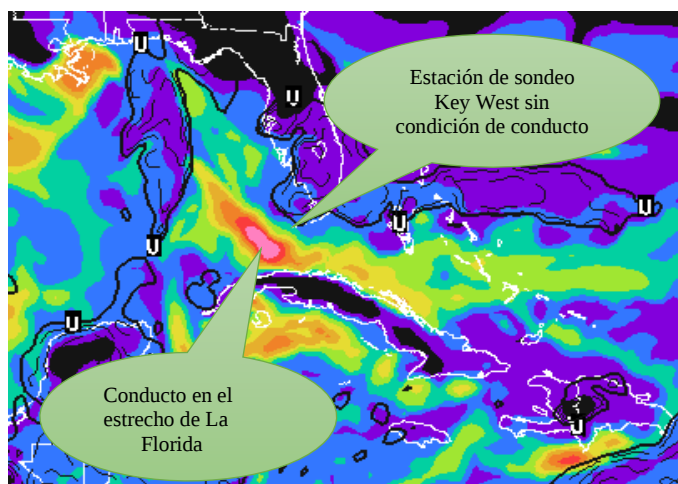


Figura 6: Condiciones de propagación anómalas día 29 de abril, 20:00 horas [19].

En la Fig. 7 se muestra, como ejemplo, los resultados del análisis para la celda HHE2715. Un comportamiento muy similar se manifiesta en el resto de las series procesadas. Observe la coincidencia temporal entre los picos de interferencia y los valores mínimos de la variable dndzn, lo que permite reafirmar la hipótesis de la posibilidad de empleo de la red estaciones base de telefonía móvil, como sensor remoto para la detección de ductos troposféricos o para predecir el desempeño de los sistemas de radio y de radar bajo el efecto de conductos troposféricos.

CONCLUSIONES

El procedimiento instrumentado a partir de la correlación estadística de eventos procedentes desde diversas fuentes, ha permitido cumplir los objetivos propuestos en el trabajo y constituye, a nuestro entender, un aporte novedoso a la identificación de las interferencias externas a nuestros sistemas de radio. Sobre la base del análisis de los resultados obtenidos se demuestra que la red móvil celular refleja, con el KPI: RTWP máximo, la ocurrencia de interferencias por anomalías del gradiente de N en la troposfera.

La baja correlación de las series temporales de RTWP con los datos de sondeo de Key West, demuestran que esta fuente no siempre refleja el comportamiento del perfil vertical de N en el trayecto de propagación, por lo que su empleo en simulaciones u otro tipo de análisis debe tratarse con cautela. Desde el punto de vista práctico, el presente trabajo permite identificar las estaciones y celdas que se puedan emplear como sensores de un sistema de detección de interferencias debido a conductos en tiempo real. El sistema permite aislar los eventos de interferencia creados por la propia red móvil de aquellos eventos externos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al licenciado en meteorología Adrián Luis Ferrer Hernández del Departamento de Física de la Atmósfera del INSMET por el procesamiento de los datos de ERA5; a los especialistas del MINCOM, Ing. Alain

León Ruiz e Ing. Jesús Ferreiro Brito, y de ETECSA, Ing. Onelio Michel Delgado Domínguez por su aporte en la obtención de los datos relativos a los KPI's de la red móvil. diferentes instituciones ramales y nacionales del país. Ha sido miembro de: los Consejos Científicos del ITM y del MINFAR en diferentes períodos y de la Comisión de Grados Científicos y los Tribunales de Categorías Docente Principales en el ITM. En el año 2000 se le confirió la "Distinción Especial del Ministro de Educación Superior a los Profesores Destacados en las Investigaciones Científicas". Ha participado y expuesto trabajos en varios eventos nacionales e internacionales como: Foros de Ciencia y Técnica Nacionales y Ramales, donde ha obtenido diversos premios relevantes y destacados; Informática 2005 y varias ediciones de CITTEL. Obtuvo el Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba en 1999. Participa en el proyecto sectorial citado y en otros proyectos del Departamento de Telecomunicaciones de la UTH. ORCID: 0000- 0003-1391-1236.

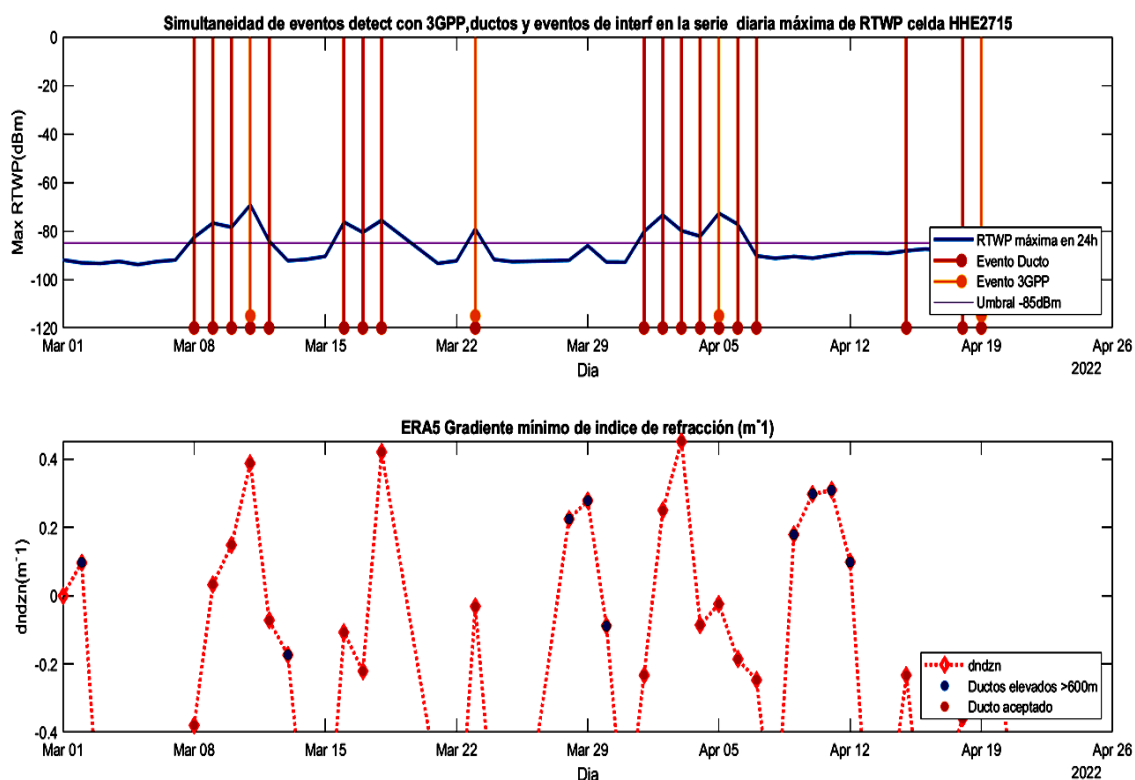


Figura 7: Gráfico de simultaneidad para la celda HHE2715.

REFERENCIAS

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Publicaciones electrónicas, <<Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz >>, Recomendación P 452-2, Génova, (02/2016).
- [2] J. M. Hernando Rábanos, <<Transmisión por Radio, Sexta Edición, Edit. Centro de Estudio Ramón Areces S. A>>, marzo 2008, ISBN-13:978-84-8004- 856-9.
- [3] "Propagation effects on radar systems", http://www.atcourses.com/propagation_effects_radar.htm, Disponible: 10 de abril, 2021.
- [4] UIT, Publicaciones electrónicas. <<Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la Refractividad>>, Recomendación P453-14, 2019, Ginebra, Suiza.
- [5] L. Pérez Garlobo, <<Caracterización de los parámetros radiometeorológicos de la troposfera en Cuba>>. Tesis

Manuscrito recibido: 22-12-2022, aceptado: 14-02-2023

Sitio web: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>

- de Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Técnico Militar “José Martí”, La Habana, 2009.
- [6] A. Douglas, <<Análisis del comportamiento de la refractividad y el campo transhorizonte en el estrecho de La Florida>>. Tesis de Master en Cs, ISPJAE, La Habana, 2012.
 - [7] J. R. Sandianes, L. Pérez, M. Morejón, A. López, <<Caracterización de la refractividad y la ocurrencia de conductos en la troposfera en el estrecho de La Florida, Monografía – Reporte, Universidad Tecnológica de La Habana (UTH)>>. ISBN-978-959-261-616-5, Diciembre, 2022.
 - [8] H. Zhu, L. Peng. "Method and device for identifying source of interference propagated via atmospheric duct", Patent, H04W24/00 (2009.01), WO 2016/192590 A1, China, December, 2016.
 - [9] J. P. Rodríguez, F. Peña Belalcázar, Francisco, <<Detección de Fallas que Afectan el Desempeño de la Red Móvil en la Zona de 93 Mediante el Análisis de KPI>>, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2001.
 - [10] D. James, R. Menom, J. Yun, E. Gormley, <<Detecting tropospheric ducting interference in cellular networks, US patent, US2020/0336228 A1>>, October, 2020.
 - [11] UIT, Publicaciones electrónicas, Recomendación UIT-R M.1224-1, Ginebra, (03/2012).
 - [12] A. León, J. Ferreiro, <<Compilación de estadísticas de alcances incrementados e interferencias por conductos troposféricos en señales de TV, telefonía móvil y otros servicios de radiocomunicaciones>>. Reporte del Proyecto PS161LH 002-001: Sistema para la predicción y alerta de interrupción a las comunicaciones por anomalías en las condiciones de propagación>>, La Habana, junio 2022.
 - [13] <<Atmospheric sounding data>>, Sitio Web de la Universidad de Wyoming, 14 de julio del 2022, Disponible en <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
 - [14] H. Hersbach, B. Bell, H. Berrisford, S. Hiraharai, <<The ERA5 global reanalysis>>, Q J R Meteorology Society, 146:1999–2049, July 2020, DOI: 0.1002/qj.3803.
 - [15] C. Luo Jilin, J-G. Lou, O. Lou, Q. FU, R. Ding, D. Zhang, Z. Zhe Wang, <<Correlating Events with Time Series for Incident Diagnosis>> m, Conference: 20th ACM Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (SigKDD). New York, 5 julio, 2022, USA, doi.org/10.1145/2623330.2623374.
 - [16] J. León, S. Calzadilla, R. Castro, M. Chouhebar, E. Somoza, H. Velásquez, <<Coeficiente de correlación Biserial puntual>>, Reporte, Universidad Central de Venezuela, junio, 2018.
 - [17] Compendio de documentación de Matlab, versión R, 2018.
 - [18] D. Kwiatkowski, P. Phillips; P. Schmidt, Y. Shin, <<Testing the Null Hypothesis of Stationarity against the Alternative of a Unit Root>>, Journal of Econometrics, vol. 54, pp.159–178, 1992.
 - [19] <<Tropospheric ducting forecast maps>>. 14 de julio del 2022, Disponible en: <https://www.dxinfocentre.com>.
 - [20] F. Liu, J. Pan, X. Zhou, Y. L. Geoffrey, <<Atmospheric Ducting Effect in Wireless Communications: Challenges and Opportunities>>, Journal of Communications and Information Networks, vol.6, no.2, June, 2021.

SOBRE LOS AUTORES

- **Ana Julia Marine López:** Graduada de Ingeniera en Telecomunicaciones en la CUJAE en 1988. Master en Sistemas de Telecomunicaciones en 2010. Vice Ministra de Comunicaciones. Participa en el proyecto sectorial “Sistema para la predicción y alerta de interrupción a las comunicaciones por anomalías en las condiciones de propagación”. ORCID: 0000-0001-6037-319X.
- **Lányer Pérez Garlobo:** Graduado como Ingeniero Radioelectrónico en Comunicaciones en el año 2002, y de Doctor en Ciencias Técnicas en el Instituto Técnico Militar “José Martí (ITM) en el 2010. Profesor Titular desde el 2016 y Profesor e Investigador del ITM, Miembro de su Consejo Científico y de la Comisión de Grados Científicos. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica y la Radiopropagación, y, en particular, en el desarrollo de herramientas de software para empleo en esta rama. Ha presentado trabajos en eventos nacionales e internacionales. Ha obtenido premios a nivel nacional por resultados de investigaciones aplicadas a la rama de la radiopropagación. Dirige la línea de esta rama y de las comunicaciones inalámbricas en el ITM. Actualmente dirige el proyecto sectorial “Sistema para la predicción y alerta de interrupción a las comunicaciones por anomalías en las condiciones de propagación”. ORCID: 0000-0001-7911-7807.

- **Yoandri Marín González:** Graduado de Ingeniero Informático en el Instituto Técnico Militar “José Martí (ITM) en el 2004. Alcanzó el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas en el año 2010. Profesor Titular desde el 2016 y Profesor e Investigador del ITM. Perteneció a la Comisión de Grados Científicos del ITM, Comité de doctorado de Electrociencias Aplicadas; Comité académico de ingeniería informática. Se desenvuelve en la rama de la Inteligencia Artificial y automatización de procesos. Ha presentado trabajos en eventos nacionales e internacionales. Ha obtenido premios a nivel nacional por resultados de investigaciones aplicadas a la rama de la radiopropagación. Fue joven asociado a la Academia de Ciencias de Cuba. ORCID: 0000-0001-8781-6843.

José R. Sandianes Galvez: Graduado de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de La Habana en 1969 y de Doctor en Ciencias Técnicas en el Instituto Técnico Militar “José Martí” (ITM) en 1985. Profesor Titular en el ITM desde 1982 y, en el presente, en la UTH. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica, la Radiopropagación y las Antenas; ha dirigido estas disciplinas en diferentes centros. Ha contribuido con diferentes trabajos en proyectos y análisis en estas ramas.

El procedimiento instrumentado a partir de la correlación estadística de eventos procedentes desde diversas fuentes, ha permitido cumplir los objetivos propuestos en el trabajo y constituye, a nuestro entender, un aporte novedoso a la identificación de las interferencias externas a nuestros sistemas de radio. Sobre la base del análisis de los resultados obtenidos se demuestra que la red móvil celular refleja, con el KPI: RTWP máximo, la ocurrencia de interferencias por anomalías del gradiente de N en la troposfera.

La baja correlación de las series temporales de RTWP con los datos de sondeo de Key West, demuestran que esta fuente no siempre refleja el comportamiento del perfil vertical de N en el trayecto de propagación, por lo que su empleo en simulaciones u otro tipo de análisis debe tratarse con cautela. Desde el punto de vista práctico, el presente trabajo permite identificar las estaciones y celdas que se puedan emplear como sensores de un sistema de detección de interferencias debido a conductos en tiempo real. El sistema permite aislar los eventos de interferencia creados por la propia red móvil de aquellos eventos externos.

CONFLICTO DE INTERESES: No existe conflicto de intereses entre los autores, con ninguna institución a la que cada uno está afiliado u otra institución. Las opiniones expresadas son únicamente responsabilidad de los autores.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES:

Ana Julia Marine López: Su contribución radica en la obtención, procesamiento y análisis de la data de los Kpis de la red móvil de ETECSA así como el análisis estadístico de la correlación de datos.

Lámyer Pérez Garlobo: Su principal contribución radica en la conceptualización e idea del artículo, la preparación de los programas y datos empírico-experimentales más actualizados que sirvieron de base para su elaboración, la participación en la preparación y escritura, la revisión crítica de cada una de las versiones del borrador y la contribución a la conformación de la versión final a publicar después de su análisis con los otros autores.

Yoandri Marín González: Su contribución radica en el trabajo con el lenguaje Python y Matlab para la obtención de los datos de las series y el análisis de la correlación con la existencia de los conductos.

José R. Sandianes Galvez: Su principal contribución consiste en: la ayuda a la conceptualización e idea del artículo, su preparación, escritura y revisión crítica de cada una de las versiones del borrador, así como la conformación de la versión final a publicar.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

