

Análisis teórico-práctico de compatibilidad electromagnética entre servicios LTE y fijo por satélite en la banda 3.4 – 3.6 GHz.

1. Objetivo

Realizar el análisis teórico-práctico de compatibilidad electromagnética entre una estación base del servicio móvil (con tecnología LTE) y una estación terrena (ET) del servicio fijo por satélite en la banda de 3.4 - 3.6 GHz.

El presente análisis se realizó tomando en consideración los parámetros técnicos de las estaciones de cada servicio, las cuales fueron utilizadas durante pruebas de campo llevadas a cabo en el mes de agosto de 2017 en la ciudad de Hermosillo, Sonora; así como en el resultado de las mismas. Lo anterior, con la finalidad de identificar los criterios y condiciones necesarias para permitir la convivencia entre los dos servicios antes mencionados.

2. Antecedentes

En México, diversos bloques de la banda de frecuencias de 3.4 – 3.6 GHz se encuentran asignados para prestar servicios de acceso inalámbrico fijo y móvil, al amparo de concesiones para el uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico otorgadas en el año 1998 (Figura 1) de acuerdo a la siguiente tabla:

Rango de Frecuencias (GHz)	Concesionario
3.425-3.450/3.525-3.550	Axtel
3.450-3.475/3.550-3.575	Telmex
3.475-3.500/3.575-3.600	Nextel (Hoy AT&T)

Tabla 1 Tenencia de espectro radioeléctrico del servicio de acceso inalámbrico fijo o móvil.



Figura 1 Gráfica de tenencia actual del espectro radioeléctrico del servicio de acceso inalámbrico fijo o móvil.

Por otra parte, en agosto de 2014, el Instituto Federal de Telecomunicaciones otorgó a Telecomunicaciones de México (Telecomm) una asignación para ocupar la posición orbital geostacionaria 114.9° Longitud Oeste asignada al país, con las bandas de frecuencias asociadas que se describen en la tabla siguiente:

Satélite	Posición Orbital	Segmentos (GHz)		Servicio
		espacio - Tierra	Tierra - espacio	
Bicentenario	114.9° O	11.450 - 11700	13.750 - 14.000	Fijo por satélite
		3.400 - 3.700	6.425 - 6.725	

Tabla 2 Asignación de Telecomunicaciones de México en la posición orbital geostacionaria 114.9°.

Debido a la existencia de concesiones para la operación de diferentes tipos de servicios dentro de la misma banda de frecuencias, para llevar a cabo operaciones en cualquier punto dentro del Territorio Nacional, se desprende la necesidad de identificar los criterios de convivencia entre ambos servicios para a la compartición de la banda de frecuencias de 3.4 - 3.6 GHz.

3. Análisis

3.1 Pruebas de campo

3.1.1 Parámetros

Para la realización de las pruebas en la ciudad de Hermosillo, Sonora, se desplegó una estación COLT (*Cell On Light Truck*) LTE en la cercanía de una ET existente. Las pruebas se llevaron a cabo durante tres días, en donde cada uno de ellos representó ubicaciones y por ende, distancias y azimuts diferentes respecto a la ET.

El rango de frecuencias de transmisión de la estación LTE fue de 3451-3461 MHz., con una portadora de ancho de banda de 10 MHz. Respecto a la potencia de transmisión, se realizaron variaciones cada 3 dBm a partir de -6.8 dBm y hasta 14.2 dBm, potencia máxima soportada por la COLT.

En la Tabla 3 se muestran los parámetros de la ET y en la Tabla 4 los parámetros de la COLT:

Parámetro	Día 1	Día 2	Día 3	Observaciones
Satélite	BICENTENARIO			
PO (° W)	114.9			
Datos de la Estación Terrena (ET)				
ET Lat DMS	Información reservada			
ET Lon DMS	Información reservada			
Azimut ET-SAT (°)	187.97			Valores calculados y verificados con el software ICS Telecom de ATDI ¹ .
Ang. de Elev (°)	55.79			

¹ ICS Telecom© es un software que se utiliza para el análisis de sistemas de telecomunicaciones. Entre otras funciones, es útil para calcular la compatibilidad electromagnética entre sistemas que comparten una banda de frecuencias.

Parámetro	Día 1	Día 2	Día 3	Observaciones
				A lo largo de la República Mexicana el ángulo de elevación promedio de una ET para la posición de 114.9° W va de 50 a 61 grados.
Azimuth ET-Base (°)	153.48	41.75	187.26	Estos valores no consideran la curvatura de la tierra, por lo que se deben corregir por un factor que depende del lugar donde se encuentran las coordenadas de los puntos en estudio. No obstante, la aproximación es bastante adecuada para los cálculos que en este análisis se realizan.
Ganancia Rx (dBi)	-10.00	-10.00	-10.00	Tomando en cuenta la nota anterior respecto al ángulo de elevación de una ET dentro de la República Mexicana, el valor estándar del patrón de radiación de una estación terrena será de -10 dB, conforme a las recomendaciones UIT-R S.465-5 y UIT-R S.580-6.

Tabla 3 Parámetros técnicos de la Estación Terrena.

Datos de la COLT	Día 1	Día 2	Día 3	Observaciones
Base Lat DMS	Reservada	Reservada	Reservada	Mediciones en campo
Base Lon DMS	Reservada	Reservada	Reservada	Mediciones en campo
d=Distancia Base-ET (Km)	3.18	2.12	2.28	Los valores pueden variar un poco respecto a los resultados de ICS Telecom debido a la curvatura de la tierra, sin embargo es mínima la diferencia.
Azimuth Base- ET (°)	Reservado	Reservado	Reservado	Estos valores no consideran la curvatura de la tierra, por lo que se deben corregir por un factor que depende del lugar donde se encuentran las coordenadas de los puntos en estudio. No obstante, la aproximación es bastante adecuada para los cálculos que en este análisis se realizan.
Bandas Tx (MHz)	3400 - 3600			La COLT operó dentro del rango de 3451-3461 MHz. El rango de operación del satélite Bicentenario es de 3400 - 3700 MHz.
Frecuencia Tx (MHz)	3400			Para fines de cálculo se utilizó la frecuencia extrema inferior, por ser más crítica dentro del cálculo de la pérdida en el espacio libre. La diferencia en el resultado de la pérdida considerando el extremo superior (3600 MHz) es de 0.73 dB.
Ancho de banda (kHz)	10000			Ancho de banda de la portadora LTE.
Potencia (W)	18.49			Valores de potencia calculados a partir de la PIRE (RS Power 14.2 / Carga al 70%) y la ganancia provistos en las pruebas en Hermosillo, Son.
Potencia (dBm)	42.67			
Ganancia Tx (dBi)	17			Valores máximos, provistos por el fabricante de la radio-base utilizada en las pruebas en Hermosillo, Son.
PIRE (dBm)	59.67			
dPIRE (dBm/Hz)	-10.33			Por ser una señal digital se puede distribuir la PIRE en cada Hz del ancho de banda.

Tabla 4 Parámetros técnicos COLT (LTE).

Adicionalmente, en la Tabla 5 se mencionan los parámetros generales del sistema LTE proporcionados por el fabricante de estos equipos.

Datos Generales del Sistema LTE	Valores	Observaciones
Cobertura típica, radio de la celda (m)	400	Datos provistos por fabricante de radio-bases
Número de celdas por base	3	
Número de usuarios por celda	200 – 600	
Número de usuarios por base	600 – 1800	
Potencia del equipo del usuario (dBm)	23	
Potencia del equipo del usuario (W)	0.2	
Ganancia del equipo de usuario (dBi)	0	
Pire de los móviles (dBm/5 MHz)	23	
Agregado en potencia de las unidades de los usuarios (dBm)	No existe	

Tabla 5 Parámetros Generales del Sistema (LTE).

Se consideró en todos los casos el mismo tipo de polarización, tanto para la ET como para la base LTE, a fin de que no existiera en los cálculos ningún aislamiento por polarización.

En la tabla 6 se mencionan las diferentes potencias y porcentajes de carga de tráfico con las que se configuró la radio base LTE.

#	RS Power (dBm)	Max Pw/Ant (dBm)	Ant	G (dB)	l (dB)	PIRE/Tráfico 70% (dBm)	PIRE/Tráfico 50% (dBm)	PIRE/Tráfico 0% (dBm)
1	14.2	39	4	17	0.8	59.67	58.21	54.23
2	11.2	36	4	17	0.8	56.67	55.21	51.23
3	8.2	33	4	17	0.8	53.67	52.21	48.23
4	5.2	30	4	17	0.8	50.67	49.21	45.23
5	2.2	27	4	17	0.8	47.67	46.21	42.23
6	-0.8	24	4	17	0.8	44.67	43.21	39.23
7	-3.8	21	4	17	0.8	41.67	40.21	36.23
8	-6.8	18	4	17	0.8	38.67	37.21	33.23

Tabla 6 Valores de PIRE y porcentaje de carga en la COLT.

Además, es importante puntualizar que:

- La orientación de las antenas de la radio-base móvil estuvieron dirigidas con un ángulo de inclinación con respecto al horizonte, por lo que las potencias máximas no se encontrarían hacia la dirección de la ET; no obstante, para el cálculo se consideró como si así fuera.
- El valor de la ganancia en recepción en la antena de la ET en sus lóbulos laterales cumple con los estándares de diseño conforme a las recomendaciones UIT-R S.465-5 y UIT-R S.580-6, por lo que considerando que el ángulo de elevación promedio a lo largo de la República Mexicana va de 50° a 61°, la ganancia será normalmente de -10 dB (Figura 2).
- Se debe tener en cuenta que en caso de que la altura de la estación LTE sea mayor al de la ET, el ángulo φ también variará y por lo tanto la ganancia no

necesariamente deberá ser -10 dB y puede aumentar; esto se ejemplifica en el esquema siguiente:

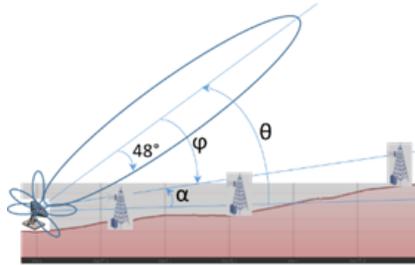


Figura 2 Ángulo antena de ET.

$$\varphi = \theta - \alpha$$

De esto, se puede concluir que la antena de una radio base deberá estar muy cercana o muy alta para situarse dentro del lóbulo principal de la antena de la ET.

3.1.2 Reporte fotográfico

A continuación, se muestran los perfiles orográficos y un cuadro fotográfico de cada emplazamiento acorde al día de pruebas.

Día 1

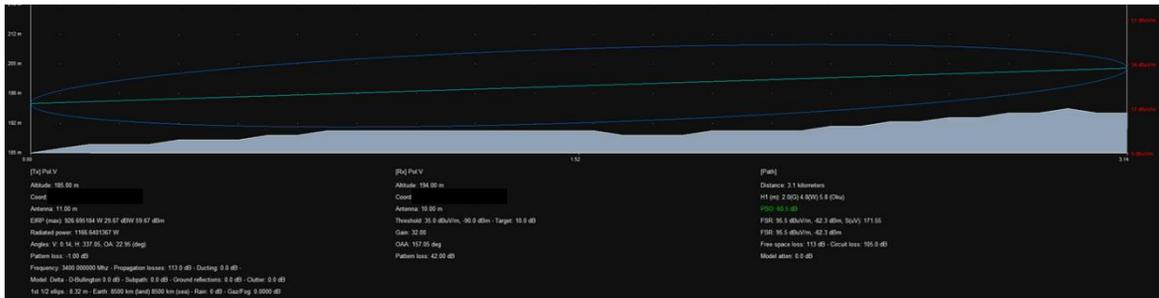


Figura 3 Día 1 - Perfil orográfico.



Figura 4 Día 1- Línea de Vista COLT-ET/Línea de Vista ET-COLT/ Zoom Línea de Vista ET-COLT.

Día 2

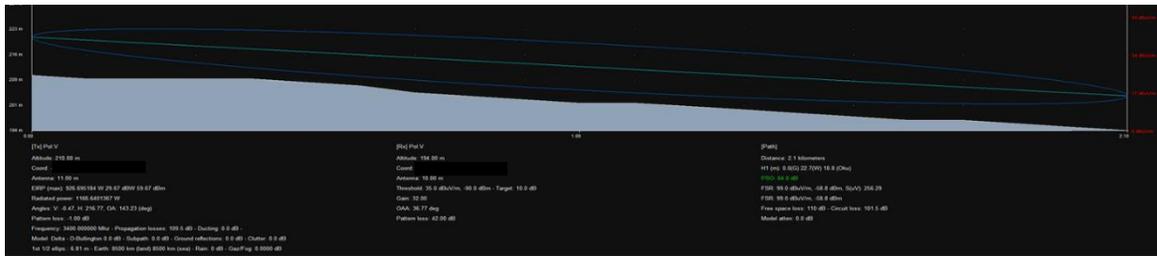


Figura 5 Día 2 - Perfil orográfico.



Figura 6 Día 2-Línea de Vista COLT-ET/ Línea de Vista ET-COLT/ Zoom Línea de Vista ET-COLT.

Día 3

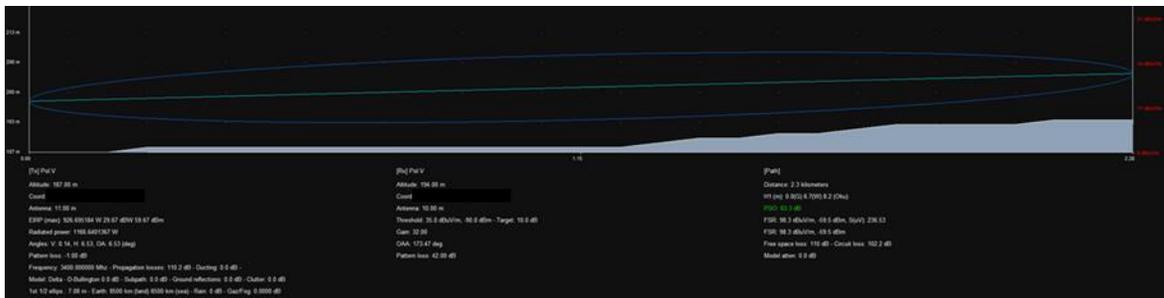


Figura 7 Día 3 - Perfil orográfico.



Figura 8 Día 3-Línea de Vista COLT-ET/ Línea de Vista ET-COLT/ Zoom Línea de Vista ET-COLT.

3.1.3 Resultados en campo

En las figuras 9 y 10 se pueden observar las gráficas obtenidas con el analizador de espectro ubicado en la estación terrena de Hermosillo durante el primer día de pruebas. En ellas, se pueden observar las portadoras de prueba "a" y "b" provenientes del satélite, la portadora proveniente de la radio base LTE (2.2 dBm a la entrada de la antena, 50% de tráfico simulado y PIRE de 46.21 dBm/10 MHz) y una señal ajena a las pruebas con características WiMAX ubicada muy cercana al punto de medición.

Para este caso particular, se consideró que la señal LTE no afectaba a las señales de prueba recibidas del satélite, ya que como se muestra en la Figura 9, no se observa ninguna señal adicional a las portadoras "a", "b" y WiMAX.

Como referencia, se puede indicar que la línea de color azul marino es la señal instantánea de la señal recibida del satélite; las líneas de color rosa y azul claro representan el umbral máximo y mínimo (*Max Hold*, *Min Hold*), respectivamente, que alcanzó la señal en el periodo de tiempo medido.

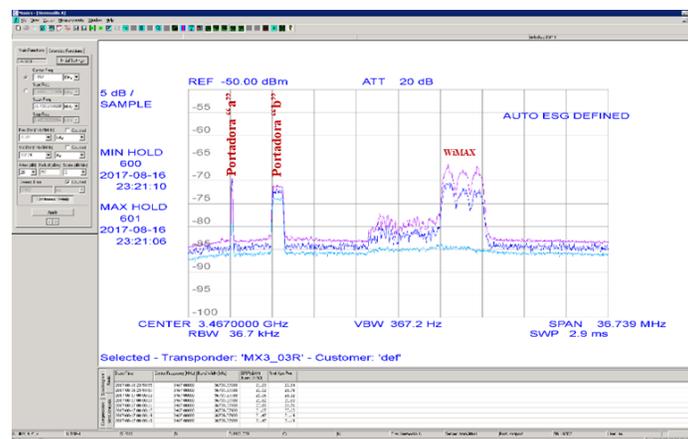


Figura 9 Analizador de espectro en ET Hermosillo, Sonora.

La portadora "a" tiene un ancho de banda aproximado de 300 kHz y la portadora "b" tiene un ancho de banda aproximado de 1.4 MHz, las cuales se muestran de forma individual a continuación:

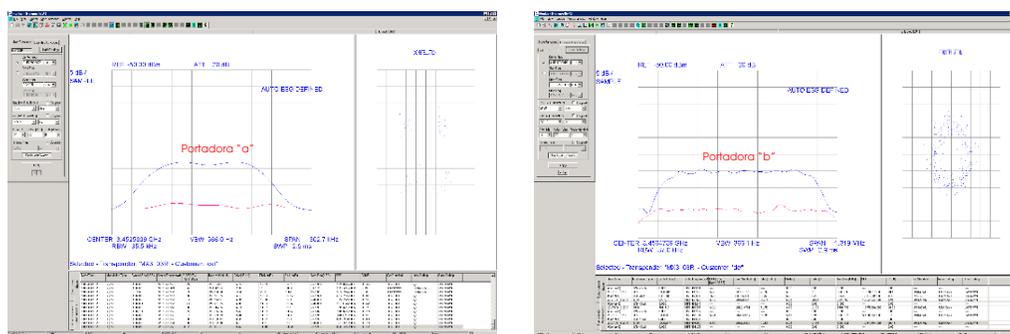


Figura 10 Analizador de espectro Portadora "a" y "b", Día 1.

En la parte inferior del analizador de espectro se muestran las lecturas de los parámetros para cada portadora y sus relaciones con otros rubros como lo son C/No, Eb/No, BER, C/I,

etc. La toma de las muestras se realizó cada cuatro segundos y algunas de ellas se muestran a continuación:

Modulation Type	Symbol Rate (KBS)	Center Frequency (MHZ)	EIRP (dBW) [Nom: 26.53]	Band Width (kHz)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Es/No (dB)	Data Rate (KBS)	BER	C/I (dB)
QPSK	158.835	3452.493343	0.79	220.14111	66.77	12.33	14.76	277.961	2.261092e-008'	13.45
QPSK	158.883	3452.493421	0.76	224.42374	62.9	7.88	10.89	317.765	2.288668e-004'	9.49
QPSK	88.932	3452.493354	0.63	217.583	54.51	2.01	5.02	177.863	3.728367e-002'	3.28
QPSK	158.642	3452.493344	0.8	222.94025	66.48	12.04	14.47	288.974	6.125282e-008'	13.04
QPSK	158.886	3452.493354	0.94	218.96411	66.94	12.5	14.93	278.051	1.222224e-008'	13.54
QPSK	158.894	3452.493354	0.74	218.61835	66.08	11.64	14.07	278.064	2.191127e-007'	12.62
QPSK	158.653	3452.493364	0.8	220.46255	66.11	11.67	14.1	277.993	1.967646e-007'	12.84
QPSK	158.784	3452.493355	0.95	222.26056	65.68	11.24	13.67	277.872	7.044689e-007'	12.29
QPSK	158.826	3452.493356	0.87	220.39599	65.81	11.37	13.8	277.946	4.817740e-007'	12.51
QPSK	158.815	3452.493358	0.88	221.10044	66.36	11.92	14.35	277.926	8.935911e-008'	13.00
QPSK	158.886	3452.493351	0.98	221.12278	66.15	11.71	14.14	278.051	1.783540e-007'	12.73
QPSK	158.84	3452.493369	1.02	220.07691	65.62	11.18	13.61	277.969	8.368305e-007'	12.22

Tabla 7 Día 1 - LTE a 50% de carga con 2.2 de RS (Carrier a).

Modulation Type	Symbol Rate (KBS)	Center Frequency (MHZ)	EIRP(dBW) [Nom: 26.53]	Band Width (kHz)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Es/No (dB)	Data Rate (KBS)	BER	C/I (dB)
UNKNOWN	0.00		----	----	----	0.00	0	0.00	----	0
8PSK	1000.012	3456.495034	6.7	1095.43775	71.32	6.55	11.32	3000.035	1.323131e-003'	10.19
UNKNOWN	535.181	3456.493356	-5.94	802.5696	63.5	6.22	6.22	535.181	1.911230e-003'	4.46
8PSK	999.919	3456.450004	6.49	1085.07097	70.15	5.38	10.15	2999.757	4.302493e-003'	8.98
UNKNOWN	0.00	3456.437472	----	----	----	0.00	0	0.00	----	0
8PSK	999.913	3456.488249	6.61	1092.14782	71.5	6.73	11.5	2999.738	1.075669e-003'	10.38
UNKNOWN	0.00	3456.493357	----	----	----	0.00	0	0.00	----	0
8PSK	1000.091	3456.493357	6.74	1078.54047	69.94	5.17	9.94	3000.274	5.160386e-003'	8.78
UNKNOWN	0.00	3456.464101	----	----	----	0.00	0	0.00	----	0
8PSK	1000.077	3456.493359	6.59	1082.33329	71.53	6.76	11.53	3000.231	1.034089e-003'	10.43
UNKNOWN	0.00	3456.501172	----	----	----	0.00	0	0.00	----	0

Tabla 8 Día 2 - LTE a 50% de carga con 2.2 de RS (Carrier b).

De los resultados obtenidos el primer día, considerando una portadora interferente de bajo nivel (2.2 dBm) con 50% de carga, y de la gráfica de la Figura 9 se puede obtener el valor de Ruido referido a un Hz (No):

- El valor promedio de la cresta de las portadoras "a" y "b" es $C_{av} = -71$ dBm
- Como $C/No = 66.94$ dB-Hz y 71.5 dB-Hz (Tablas 7 y 8), portadoras "a" "b", respectivamente, por lo tanto²:
 - Portadora "a" $C/No = 66.94$ dB-Hz, por lo tanto, $No = -137.94$ dBm/Hz
 - Portadora "b" $C/No = 71.50$ dB-Hz, por lo tanto, $No = -142.50$ dBm/Hz

² C/No indica la diferencia en dB que existe entre la portadora y el piso de ruido; por lo tanto, de la gráfica de la figura 9 se obtiene el valor máximo alcanzado por las portadoras "a" y "b" y la diferencia es el valor de "No". Es importante destacar que "No" es el ruido total del enlace descendente.

Siendo así el valor de la portadora "b" el más crítico.

Una vez obtenido el valor de ruido total descendente, se calcularon los siguientes valores:

$C/I = 13.54 \text{ dB}$	$C/I = 10.38 \text{ dB}$
$C/No = 66.94 \text{ dB-Hz}$	$C/No = 71.5 \text{ dB-Hz}$
$No = -137.94 \text{ dBm/Hz}$	$No = -142.5 \text{ dBm/Hz}$
$AB = 218.96411 \text{ kHz}$	$AB = 1092.14782 \text{ kHz}$
$AB = 53.40 \text{ dB-Hz}$	$AB = 60.38 \text{ dB-Hz}$
$C/I = 66.94 \text{ dB en } 218.96411 \text{ kHz}$	$C/I = 70.76 \text{ dB en } 1092.14782 \text{ kHz}$
$I/N = 0 \text{ dB}$	$I/N = 0.74 \text{ dB}$

Nota: Para comparar la relación C/I con C/N, deben estar ambas en un mismo ancho de banda.

Cabe mencionar que el valor de C/No se considera que fue medido después del amplificador de bajo ruido o LNA por sus siglas en inglés; si se desea conocer el valor a la entrada del receptor, se deberá restar el valor de ganancia del LNA. Un LNA para el tipo de ET de Hermosillo tiene una ganancia aproximada de 20 dB, por lo que el valor de "No" a la entrada del receptor sería -162.5 dBm/Hz. No obstante, de la figura 9 se observa que el piso de ruido es en promedio de -85 dBm/Hz.

Ahora bien, si consideramos que el piso de ruido a la salida del LNA es $No = -85 \text{ dBm/Hz}$, esto implica que a la entrada sería de -105 dBm/Hz. Por otro lado, si se toma en cuenta que $C/I \geq C/N + 12.2$ como se expone en la Rec. UIT-R S.741-2, implica que $I = -117.2 \text{ dBm/Hz}$ a la entrada del LNA, suponiendo que las pérdidas entre la salida de la antena y la entrada del LNA son mínimas, en promedio 0.5 dB, se puede considerar el valor de "I" a la salida de la antena como se indica en este mismo párrafo.

Por otra parte, al realizar el cálculo de la energía que recibe la ET en primer día con una potencia de la señal interferente de 2.2 dBm en un porcentaje de ocupación de 50%, equivalente a una PIRE de $46.21 \text{ dBm} \cdot 10 \text{ MHz}$ ($-23.79 \text{ dBm} \cdot \text{Hz}$), todo esto para obtener el valor teórico que recibe la ET a partir de los valores de la radio base LTE. En este sentido, si se considera sólo la pérdida en el espacio libre, ganancia de la antena de la ET de -10 dB y la distancia entre la ET y la base LTE a 3.18 km, se tiene que:

- La densidad de potencia a la salida de la antena es de -146.91 dBm/Hz ($I = \text{PIRE} - L_s + G_{Rx} = -23.79 - 113.12 - 10$). Con este valor se concluyó, por los integrantes en el primer día de pruebas, que no se producía ningún problema de interferencia a las señales de prueba.

Ahora bien, si se observan los resultados de las mediciones con una señal interferente de 2.2 dBm y porcentaje de ocupación del 70%, esto es equivalente a una PIRE de 47.67 dBm/Hz , considerando la pérdida en el espacio libre, una ganancia de la antena de la ET de -10 dB y la distancia entre la ET y la base LTE a 3.18 km, se tiene que: la densidad de potencia a la salida de la antena es de -145.45 dBm/Hz . En este caso las mediciones son similares al caso anterior.

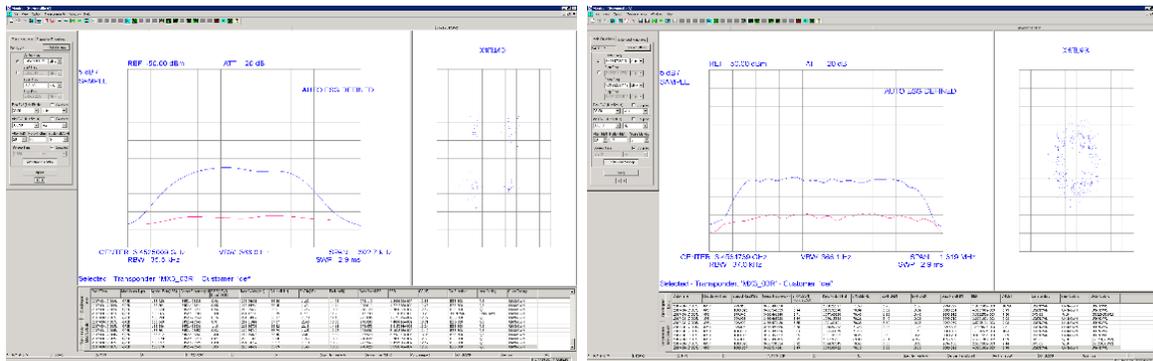


Figura 11 Señales de prueba con señal interferente de 2.2 dBm al 70%.

En la Figura 12 se pueden observar la señal compuesta entre las portadora LTE a 14.2 dBm con una carga de tráfico de 70% y las señales satelitales durante el tercer día de pruebas. Subsecuentemente, en la Figura 13 se muestra la traza de la señal medida durante la realización de las pruebas a nivel aire desde el emplazamiento de la COLT.

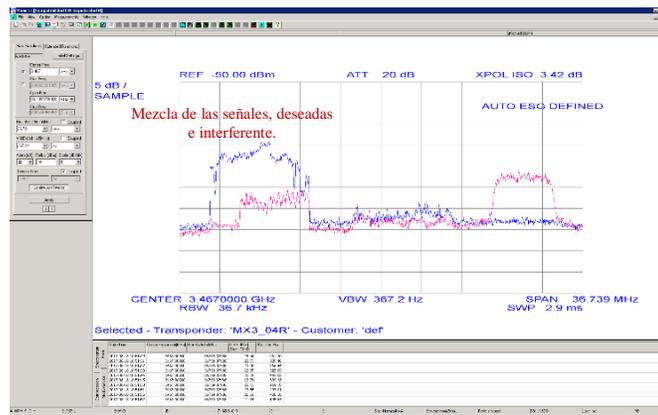


Figura 12 Día 3 - Señal compuesta: portadoras satelitales y de radio base LTE.

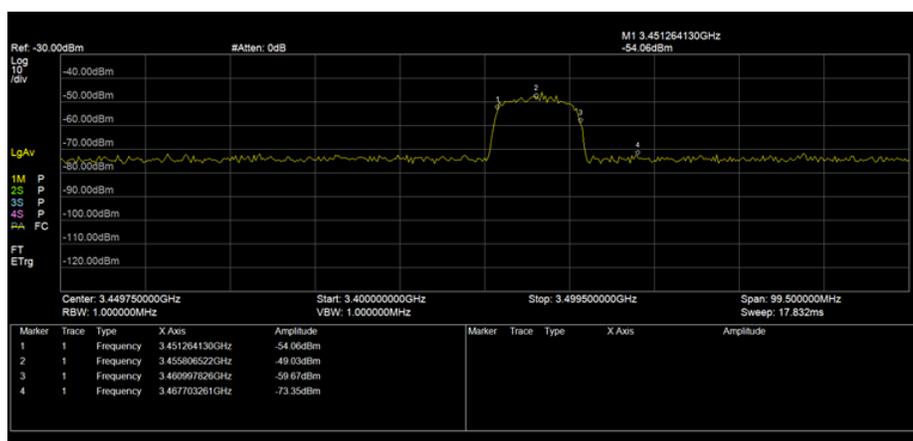


Figura 13 Analizador de espectro: Señal LTE medida en el aire – día 3.

En las tablas 9 y 10 se muestra un extracto de los niveles recibidos el día 3 de pruebas en la ET de Hermosillo sobre las portadoras "a" y "b" con una carga máxima del 70% y una

3.1.4 Escenarios

1. Día de pruebas 1: Transmisión sin interferencia a 3.8 Km - RS Power 2.2 dBm con 50% de Tráfico

Tomando como partida el día 1 de pruebas, en donde no se detectó ninguna interferencia aparente en las trazas del analizador de espectro (Figura 9), la potencia de transmisión de la estación LTE fue de 2.2 dBm con un tráfico de 50 %, resultando una PIRE de 46.21 dBm para la portadora LTE de 10 MHz (-23.79 dBm/Hz). Utilizando dicho valor, y considerando propagación en el espacio libre, resulta que la señal interferente a la salida de la antena receptora es de -146.91 dBm/Hz.

2. Día de pruebas 3: Transmisión sin interferencia a 2.8 Km - RS Power -3.8 dBm con 70% de Tráfico

Al considerar los resultados del día 3, el cual se puede considerar como el más crítico debido a que las antenas de ambos sistemas (LTE y ET) estuvieron alineadas una frente a la otra, en las trazas de este escenario podemos observar que el nivel máximo o permisible para que la ET no se vea afectada por interferencia de forma sustancial fue -3.8 dBm de RS Power para una PIRE = 41.67 dBm, tal y como se indica en las siguientes tablas:

LTE a 70% de carga con -3.8 de RS (Carrier a)

Date/Time	ModulationType	Symbol Rate (KBS)	Center Frequency (MHz)	EIRP(dBW) (Nom:26.53)	Band Width (kHz)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Es/No (dB)	Data Rate (KBS)	BER	C/I (dB)	Car Standard	Inner Coding	Outer Coding
2017-08-18 19:28:53	QPSK	158.823	3452.50843	3.25	222.40723	64.39	9.95	12.38	277.939	1.607980e-005	10.92	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:00	QPSK	158.89	3452.508433	3.18	219.84526	64.16	9.13	12.15	317.78	2.582717e-005	10.71	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:06	QPSK	158.89	3452.508442	2.76	221.19205	64.46	10.02	12.45	278.057	1.379391e-005	11.07	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:13	QPSK	158.921	3452.508418	2.99	219.45974	64.07	9.63	12.06	278.112	3.073911e-005	10.66	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:19	QPSK	158.901	3452.50843	3.15	217.66209	64.03	9.59	12.02	278.076	3.288979e-005	10.56	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:26	QPSK	158.849	3452.508444	2.88	217.8583	64.32	9.3	12.31	317.698	1.833003e-005	10.91	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:33	QPSK	158.855	3452.508448	3.29	223.87966	63.23	8.21	11.22	317.711	1.366002e-004	9.74	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:39	QPSK	158.821	3452.508416	2.92	218.90941	63.48	9.04	11.47	277.936	8.967433e-005	10.03	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:45	QPSK	158.901	3452.508396	3.2	224.58918	63.83	8.81	11.82	317.802	4.856532e-005	10.21	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:51	QPSK	158.826	3452.508427	3.19	224.5445	63.59	9.15	11.58	277.945	7.451607e-005	10.12	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:29:57	QPSK	158.786	3452.508441	3.1	216.86844	64.37	9.93	12.36	277.876	1.660694e-005	10.95	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:30:03	QPSK	158.848	3452.508429	3.04	218.64786	63.35	8.91	11.34	277.984	1.116825e-004	9.87	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:30:10	QPSK	158.795	3452.508431	3	218.796	63.82	8.8	11.81	317.591	4.895567e-005	10.41	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN

Tabla 11 Día 3 - LTE a 70% de carga con -3.8 dBm de RS (Carrier a).

Date/Time	ModulationType	Symbol Rate (KBS)	Center Frequency (MHz)	EIRP(dBW) (Nom:26.53)	Band Width (kHz)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Es/No (dB)	Data Rate (KBS)	BER	C/I (dB)	Car Standard	Inner Coding	Outer Coding
2017-08-18 19:30:10	8PSK	1000.106	3456.508171	14.12	1107.21256	72.57	7.8	12.57	3000.317	2.576366e-004	11.32	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:30:22	8PSK	1000.107	3456.516893	13.99	1109.17410	70.63	6.76	10.63	3000.222	3.036601e-003	9.53	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
(Carrier-0)	UNKNOWN	0.000	3456.720129	---	---	---	0.00	0.00	0.000	---	0.00	---	---	---
2017-08-18 19:30:44	8PSK	999.996	3456.615094	14.14	1107.50521	70.68	5.91	10.68	2999.989	2.625078e-003	9.37	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:30:50	8PSK	1000.011	3456.508172	14.18	1083.25045	72.4	7.63	12.4	3000.032	3.319448e-004	11.31	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:30:56	8PSK	999.989	3456.545281	13.99	1091.93602	70.55	5.78	10.55	299.968	2.960811e-003	8.95	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:03	8PSK	999.991	3456.598261	13.89	1102.38243	70.65	5.88	10.65	299.973	2.701211e-003	9.38	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:09	8PSK	1000.115	3456.469462	14.3	1089.89065	70.44	5.67	10.44	3000.345	3.305248e-003	8.8	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:15	8PSK	1000.096	3456.508176	14.31	1090.4457	72.21	7.43	12.21	3000.288	4.370657e-004	10.93	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:21	8PSK	999.898	3456.571644	14.14	1096.79898	70.69	5.92	10.7	2999.694	2.578105e-003	9.49	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:27	8PSK	1000.119	3456.459529	14.21	1101.27705	70.65	5.87	10.64	3000.357	2.710314e-003	9.46	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:33	8PSK	999.996	3456.494431	14.07	1090.65001	70.8	6.02	10.8	3000.288	3.224266e-003	9.24	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
(Carrier-0)	UNKNOWN	0.000	3456.476319	---	---	---	0.00	0.00	0.000	---	0.00	---	---	---
2017-08-18 19:31:39	8PSK	1000.09	3456.508177	13.98	1095.84879	72.22	7.45	12.22	3000.269	4.305367e-004	10.85	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:31:46	8PSK	1000.117	3456.562452	14.07	1092.33121	70.51	5.74	10.51	3000.35	3.096851e-003	8.81	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN

Tabla 12 Día 3 - LTE a 70% de carga con -3.8 de RS (Carrier b).

En la muestra aleatoria de la Tabla 12 se puede identificar que sobre la portadora satelital más robusta (b), la existencia de al menos dos registros que no se pudieron demodular, lo que es de interpretarse como una interferencia sobre la ET. Si este escenario se compara con el primer día de pruebas, las diferencias son sustanciales, principalmente asociadas a la distancia y orientación entre estaciones.

3. Día de pruebas 3: Transmisión con interferencia a 2.8 Km - RS Power -0.8 dBm con 70% de Tráfico

En las tablas siguientes, se muestra como el aumento al siguiente paso de potencia (de -3.8 dBm a -0.8 dBm de RS Power, PIRE = 44.67 dBm). De igual manera, se generan muestras donde la ET no puede demodular correctamente la información generando estados "unknown". En este escenario se deduce que se está produciendo una interferencia que está degradando la recepción de la ET, mayor que en el escenario previo:

LTE a 70% de carga con 0.2 de RS (Carrier a)

Date/Time	ModulationType	Symbol Rate (KBS)	Center Frequency (MHz)	ERP(dBW) [Nom:26.53]	Band Width (kHz)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Es/No (dB)	Data Rate (KBS)	BER	C/I (dB)	Car Standard	Inner Coding	Outer Coding
2017-08-18 19:24:21	QPSK	158.797	3452.50841	3.26	222.40386	64.01	9.57	12	277.895	3.415264E-005	10.69	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:24:28	QPSK	158.863	3452.508434	3.21	221.11426	64.11	9.09	12.1	317.726	2.818766E-005	10.61	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:24:34	QPSK	158.812	3452.508425	3.21	217.54133	62.69	7.67	10.68	317.624	3.114661E-004	9.17	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:24:40	QPSK	158.817	3452.5084	3.19	225.24474	61.09	6.07	9.08	317.635	2.225961E-003	7.66	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:24:46	QPSK	158.865	3452.508415	3.6	216.28163	61.7	6.68	9.69	317.729	1.140017E-007	8.26	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:24:52	QPSK	158.914	3452.50844	3.38	225.63408	57.72	2.7	5.74	317.828	2.686938E-002	4.12	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
(Carrier-0)	UNKNOWN	0.000	3452.575482	----	----	----	0.00	0.00	0.00	----	0.00	----	----	----
2017-08-18 19:24:59	QPSK	158.84	3452.508403	3.24	230.19777	59.96	4.94	7.95	317.679	6.236248E-003	6.32	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:05	QPSK	158.88	3452.508451	3.42	226.88236	61.37	6.35	9.36	317.76	1.661735E-003	7.88	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:12	QPSK	158.922	3452.508422	2.95	225.32705	60.6	6.15	8.58	278.113	3.611780E-003	7.06	IESS-308	7/8	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:19	QPSK	158.863	3452.508399	3.09	224.10417	62.03	7.01	10.02	317.726	7.633735E-004	8.36	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:25	QPSK	158.83	3452.508426	3.41	223.74252	64.23	9.21	12.22	317.661	2.213141E-005	10.8	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
18/08/2017 19:25	QPSK	158.801	3452.508429	3.05	229.01376	62.27	7.83	10.26	277.902	5.572482E-004	8.62	IESS-308	7/8	UNKNOWN

Tabla 13 Día 3 - LTE a 70% de carga con -0.8 de RS (Carrier a).

Date/Time	ModulationType	Symbol Rate (KBS)	Center Frequency (MHz)	ERP(dBW) [Nom:26.53]	Band Width (kHz)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Es/No (dB)	Data Rate (KBS)	BER	C/I (dB)	Car Standard	Inner Coding	Outer Coding
(Carrier-0)	UNKNOWN	0.000	3456.604712	----	----	----	0.00	0.00	0.00	----	0.00	----	----	----
2017-08-18 19:25:00	8PSK	1000.112	3456.496388	14.02	1106.52038	70.1	5.33	10.1	3000.336	4.497197E-003	8.53	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:06	8PSK	1000.001	3456.476512	14.05	1090.30884	69.61	6.97	9.61	1835.618	6.775507E-003	8.36	IESS-310	2/3	(219,201)
2017-08-18 19:25:12	8PSK	1000.123	3456.51953	13.86	1101.37349	69.77	5	9.77	3000.368	5.957413E-003	8.53	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:19	8PSK	999.918	3456.546794	13.86	1083.56434	70.63	5.86	10.63	2999.753	2.746295E-003	9.44	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:26	8PSK	1000.111	3456.452716	13.98	1125.59896	69.51	4.74	9.51	3000.334	7.331114E-003	8.27	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:32	8PSK	1000.109	3456.503078	14.19	1096.71753	70.16	7.53	10.16	1835.816	4.253180E-003	8.84	IESS-310	2/3	(219,201)
2017-08-18 19:25:39	UNKNOWN	0.000	3456.5204	----	----	----	0.00	0.00	0.00	----	0.00	----	----	----
2017-08-18 19:25:46	8PSK	999.886	3456.559904	14.09	1101.77919	69.5	4.73	9.5	2999.659	7.380401E-003	7.9	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:52	8PSK	1000.101	3456.613376	13.98	1098.1861	70.2	5.42	10.19	3000.303	4.138771E-003	8.88	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:25:58	8PSK	999.903	3456.566549	14.02	1098.95069	69.81	5.04	9.81	2999.708	5.773176E-003	8.53	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:26:04	8PSK	999.994	3456.53686	14.03	1092.54194	70.12	5.35	10.12	29993983	4.426862E-003	8.93	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:26:11	8PSK	1000.103	3456.503651	14.13	1118.73742	69.82	5.05	9.82	3000.31	5.708044E-003	8.36	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:26:17	8PSK	1000.004	3456.504983	14.01	1109.66936	69.74	4.97	9.74	3000.012	6.086610E-003	8.55	UNKNOWN	UNKNOWN	UNKNOWN
2017-08-18 19:26:23	UNKNOWN	0.000	3456.507399	----	----	----	0.00	0.00	0.00	----	0.00	----	----	----

Tabla 14 Día 3 - LTE a 70% de carga con 0.8 de RS (Carrier b).

Para mejor referencia, en las figuras siguientes, se muestra la comparación de portadoras recibidas por la antena de la ET considerando señales interferentes de la estación base LTE a potencias de -3.8 dBm y -0.8 dBm RS Power, respectivamente.

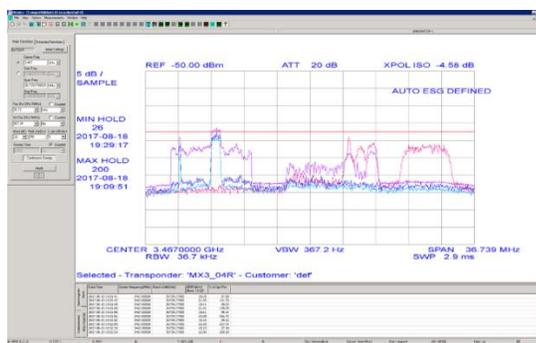


Figura 14 Día 3 - Analizador de espectro sobre Portadoras "a" y "b" / -3.8 dBm.

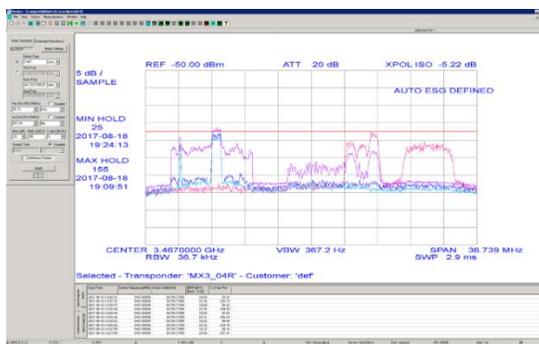


Figura 15 Día 3 Analizador de espectro sobre Portadoras "a" y "b" / -0.8 dBm.

En resumen, considerando la PIRE de 41.67 dBm correspondiente al RS Power de -3.8 dBm al 70% de tráfico, resulta una señal interferente a la salida de la antena receptora de -148.57 dBm/Hz, la cual nuevamente no es lo suficientemente alta para causar interferencia considerando el escenario de las pruebas de campo (-145.00 dBm/Hz)".

4. Día de pruebas 3: Transmisión con interferencia a 2.8 Km - RS Power 14.2 dBm con 70% de Tráfico

Ahora bien, considerando la potencia máxima de 14.2 dBm (RS Power) en la estación LTE utilizada en Hermosillo, para una PIRE de 59.6 dBm, obtenemos una señal teórica interferente a la salida de la antena receptora de -130.57 dBm/Hz; dicho valor es más alto que el nivel del ruido calculado para todos los criterios. En esa tesitura, se tendría que buscar un aislamiento mayor en distancia.

3.2 Análisis de Densidad de Flujo de Potencia (DFP)

Dentro de los criterios que se tienen a nivel internacional para la compartición de las bandas de frecuencia por encima de 1 GHz, el rango de frecuencias en estudio se encuentra incluido en el Artículo 21 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT. A continuación, se muestra el cuadro con los parámetros de referencia:

ARTÍCULO 21

Servicios terrenales y espaciales que comparten bandas de frecuencias por encima de 1 GHz

Sección V – Límites de la densidad de flujo de potencia producida por las estaciones espaciales

21.16

CUADRO 21-4 (Rev. CMR-15)

Banda de frecuencias	Servicio*	Límite en dB(W/m ²) para ángulos de llegada δ por encima del plano horizontal			Anchura de banda de referencia
		0°-5°	5°-25°	25°-90°	
3 400-4 200 MHz	Fijo por satélite (espacio-Tierra) (órbita de los satélites geostacionarios)	-152	-152 + 0,5(δ-5)	-142	4 kHz

De este cuadro, podemos deducir que los límites de DFP, dependiendo del ángulo de llegada, van de:

$$-152 \text{ dB(W/m}^2 \cdot 4\text{kHz)} \Rightarrow -158 \text{ dBm/(m}^2 \cdot \text{Hz)} \text{ a } -142 \text{ dB(W/m}^2 \cdot 4\text{kHz)} \Rightarrow -148 \text{ dBm/(m}^2 \cdot \text{Hz)}$$

El ángulo de llegada de una radio base LTE respecto a la ET cae en el rango de 25° a 90°, por lo tanto, el valor límite será de -142 dB(W/m²·4kHz) o -148 dBm/(m²·Hz). Por consiguiente, el valor de DFP de -148 dBm/(m²· Hz) o -142 dBm/(m²· 4 kHz) es el criterio que al menos debe soportar como mínimo cualquier ET.

Como se sabe, la DFP se mide a la entrada de una antena con respecto a la ganancia unitaria de la antena en relación a una frecuencia determinada; en nuestro caso es 32.08 dBi a 3400 MHz (Ganancia Unitaria = $10\log(4\pi/\lambda^2)$ (dB)). Por esta relación, cuando medimos la energía a la salida de la antena, el valor es el mismo y sólo cambian las unidades, quedando para este caso en particular el valor de -148 dBm/Hz.

En conclusión, cualquier ET debe soportar -148 dBm/(m²· Hz) a la entrada de su antena o -148 dBm/Hz a la salida de su antena con ganancia unitaria, que se calcula a la frecuencia de operación, desde una sola fuente o desde el valor agregado de varias fuentes.

3.3 Criterios de compartición considerando los límites de la DFP del Art.21

El siguiente análisis se basa en una radio base LTE con un patrón de radiación apuntando en sentido contrario a donde se encuentra una ET; esto con la finalidad de definir la distancia promedio donde con esta condición se logre cumplir con un criterio de interferencia permisible para la compartición de la banda 3400 – 3600 MHz entre los servicios de acceso inalámbrico y fijo por satélite. Para este criterio se utilizará lo descrito por el Artículo 21 del Reglamento de Radiocomunicaciones el cual considera -148 dBm/Hz a la salida de la antena como nivel de interferencia permisible o bien -148 dBm/(m²· Hz) o -142 dBm/(m²· 4 kHz) a la entrada de la antena de la ET.

Tomando como referencia los criterios de $C/I \geq C/N + 12.2$ y que el radio de cobertura típico de una base LTE es de 400 m., se realizaron una serie de escenarios con apoyo del software ICS Telecom con la finalidad de establecer una distancia mínima para asegurar la convivencia entre ambos servicios.

Criterio	-148.00 dBm/Hz (Art. 21)		
Separación entre ET y estación LTE (km)	1.0		
Potencia LTE (dBm)	42.67		
Ganancia de antena de LTE a espalda de ET (dBi)	-13		
Pire LTE	29.67		
Número de bases LTE	3	6	9
I/N por cada LTE	-11.54		
I/N por agregado de LTE	-6.75	-3.75	-1.95

Tabla 15 Valores de I/N con aislamiento en distancia a 1 Km.

Criterio	-148.00 dBm/Hz (Art. 21)		
Separación entre ET y estación LTE (km)	2.0		
Potencia de LTE (dBm)	42.67		
Ganancia de antena de LTE a espalda de ET (dBi)	-13		
Pire de LTE	29.67		
Número bases LTE	3	6	12
I/N por cada LTE	-17.63		
I/N por agregado de LTE	-12.85	-9.85	-6.85

Tabla 16 Valores de I/N con aislamiento en distancia a 2 Km.

Criterio	-148.00 dBm/Hz (Art. 21)		
Separación entre ET y estación LTE (km)	2.5		
Potencia de LTE (dBm)	42.67		
Ganancia de antena de LTE a espalda de ET (dBi)	-13		
Pire de LTE	29.67		
Número de bases LTE	3	6	16
I/N por cada LTE	-19.75		
I/N por agregado de LTE	-14.95	-11.95	-7.75

Tabla 17 Valores de I/N con aislamiento en distancia a 2.5 km.

Considerando el nivel agregado de I/N de los escenarios a 1, 2 y 2.5 Km, respectivamente, se puede concluir que la distancia mínima necesaria para que puedan convivir los sistemas de ambos servicios deberá de ser 2.5 Km tomando el valor agregado de I/N para las radio-bases cercanas a la ET.

4. Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos en las pruebas de campo, los parámetros de las estaciones base LTE y la ET, los criterios establecidos por la UIT, y las simulaciones de gabinete considerando todos estos elementos, se han identificado los siguientes criterios, con los cuales es posible asegurar la convivencia de los servicios Fijo por satélite y de Acceso inalámbrico fijo de banda ancha:

- Se establece una distancia mínima de 2.5 Km en línea recta entre la Estación Terrena a proteger y cualquier radio base del servicio de acceso inalámbrico fijo. Al círculo formado por el radio de 2.5 Km con centro en determinadas coordenadas geográficas, se le denomina **Zona de Exclusión** (Figura16).
- En la circunferencia de la Zona de Exclusión o hacia dentro de la misma, no deberá excederse en ningún punto el valor de $-148 \text{ dBm}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ o $-142 \text{ dBW}/(\text{m}^2 \cdot 4 \text{ kHz})$ de DFP.

- c) Más allá de la zona de exclusión, no estará restringido el despliegue de estaciones base, **siempre y cuando se observe en todo momento lo estipulado en el inciso anterior.**
- d) En caso de presentarse una DFP mayor a lo estipulado en el inciso b), los concesionarios del servicio de acceso inalámbrico fijo que operen en porciones de la banda 3.4-3.6 GHz en la zona de influencia de cualquier ET del Servicio fijo por Satélite que esté sujeta a protección conforme a lo indicado por el Instituto, deberán adoptar las medidas necesarias a fin de sujetar sus operaciones al nivel máximo permitido de DFP señalado en el citado inciso b).

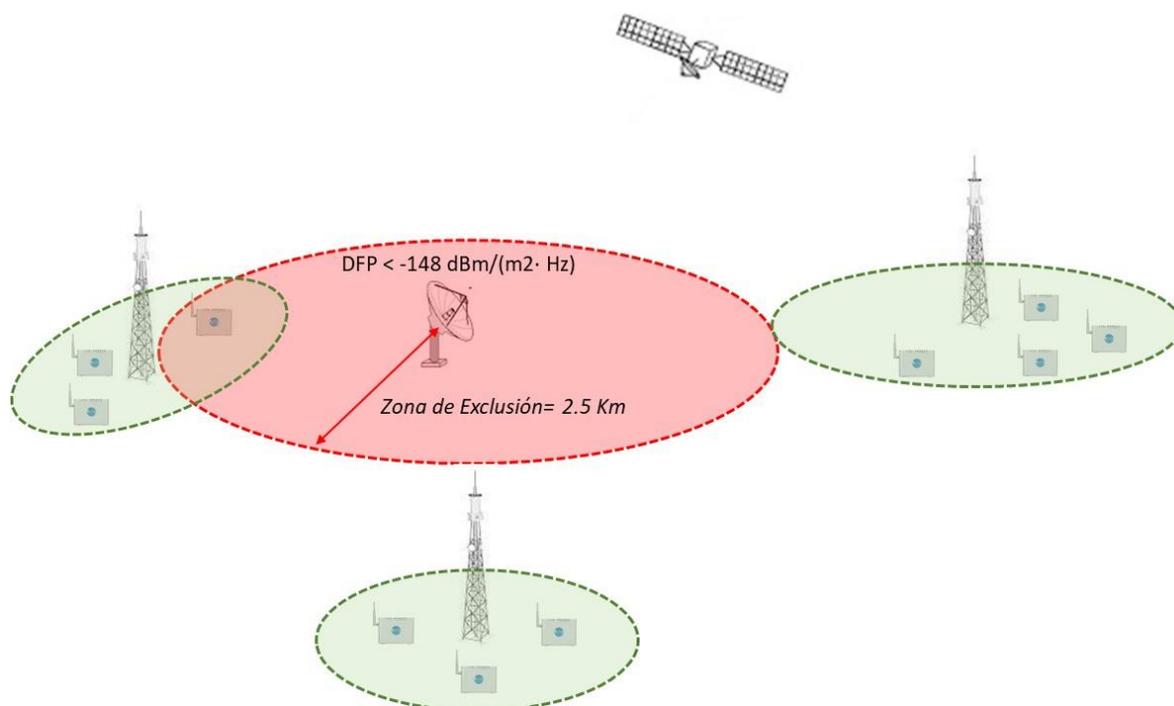


Figura 16 Conclusión: Criterios de convivencia del servicio fijo por satélite y el servicio de acceso inalámbrico fijo.