

Consideraciones sobre el impacto de la interferencia en sistemas de compartición de espectro GEO-LEO

Abril 2026



Índice

1. Resumen ejecutivo	3
2. Implicaciones operativas	11
3. Conclusión principal	15
4. Introducción del estudio	16
5. Alcance y objetivo	17
6. Aspectos relacionados con la adaptación de los sistemas NGSO para cumplir con los límites de EPFD	18
7. Objetivos de las pruebas y principales medidas	23
8. Escenarios fundamentales de interferencia	26
9. Características clave de los sistemas NGSO que afectan la interferencia	27
10. Efectos de canal y propagación	28
11. Impacto en el rendimiento de sistemas GSO	28
12. Técnicas de mitigación	29
13. Marco matemático para la evaluación de la interferencia	29
14. Metodología de simulación	30
15. Recapitulación del capítulo	32
16. Descripción de la simulación del modelo	33
17. Resultados de la simulación del modelo	42
18. Impacto de la interferencia sobre la eficiencia espectral de sistemas GSO	60
Conclusiones	66
Anexo 1: Simulación basada en antena satelital omnidireccional	73

Tablas

Tabla 1: Síntesis de las condiciones de los escenarios de simulación	39
Tabla 2: Estadísticas de los satélites NGSO visibles	39
Tabla 3: Observaciones específicas por ubicación	60
Tabla 4: Estimación de la degradación de la eficiencia espectral en Anchorage	64
Tabla 5: Estimación de la degradación de la eficiencia espectral en Honolulu	65
Tabla 6: Degradación del rendimiento de los MODCOD en ensayos de laboratorio para distintos niveles de C/I	66
Tabla 7: Valores de EPFD correspondientes al ángulo fuera de eje	67
Tabla 8: Cómo se combinan C/N y C/I en sistemas GSO sin ACM	70
Tabla 9: Interpretación de la disponibilidad en sistemas GSO sin ACM	71
Tabla 10: Evolución de la ganancia a nivel de componentes en sistemas GSO sin ACM	72
Tabla 11: Observaciones específicas por ubicación	85
Tabla 12: Características de superación	87
Tabla 13: Análisis rápido del arco de evitación para el ejemplo de Nueva York	96
Tabla 14: Síntesis de las doce ubicaciones del estudio, ordenadas por latitud	104
Tabla 15: Valores típicos de los principales parámetros relacionados con la excedencia	105

1. Resumen ejecutivo

Los satélites NGSO modernos pueden coexistir de forma segura con las redes GSO

Los sistemas satelitales modernos de órbita no geoestacionaria (NGSO) pueden coexistir de manera segura con las redes de órbita geoestacionaria (GSO) bajo límites de interferencia significativamente más flexibles. Sin embargo, el marco de densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) —sin cambios desde 1997— sigue siendo tecnológicamente obsoleto, lo que impone costos severos e innecesarios a los operadores de sistemas NGSO, al tiempo que limita la disponibilidad global de banda ancha sin proporcionar una protección adicional significativa a los servicios GSO. Las pruebas respaldan firmemente una actualización regulatoria formal: modernizar los límites de EPFD permitiría preservar la integridad de los servicios GSO, aprovechar importantes incrementos de capacidad en los sistemas NGSO, reducir los costos de banda ancha, disminuir el tamaño de las constelaciones y el riesgo asociado de desechos orbitales, así como mejorar la economía que, en última instancia, determina los costos para el usuario final en el acceso a banda ancha confiable e independiente de la ubicación. El marco actual protege un mundo que ya no existe.

Normas obsoletas

Los límites de EPFD se diseñaron hace tres décadas para despliegues escasos de sistemas NGSO, grandes estaciones terrenas geoestacionarias (GEO) fijas y sistemas de antenas estáticas. Las constelaciones actuales en órbita terrestre baja (LEO) —Starlink, Amazon Leo (anteriormente Proyecto Kuiper), OneWeb— no se parecen en nada a los sistemas teóricos que esas normas anticipaban. Para cumplir con estos límites obsoletos, los operadores de sistemas NGSO deben aumentar el tamaño de las constelaciones, reducir la potencia de transmisión, desactivar haces cerca del arco GEO y mantener ángulos de evitación de entre 6° y 18°. El resultado es una pérdida del 30 % en la cobertura, un 28 % más de gasto de capital y una eficiencia espectral severamente restringida. Algunas presentaciones de sistemas NGSO estiman que modernizar los límites de EPFD produciría un aumento del 700 % en la capacidad pico, lo que equivale a habilitar 13 100 MHz de nuevo espectro en la banda Ka.

Estas restricciones tienen consecuencias operativas en cascada. La desactivación obligatoria de haces y la limitación de potencia cerca del arco GEO generan zonas sin cobertura, reducen la capacidad instantánea y fuerzan traspasos más frecuentes, lo que obliga a los operadores a lanzar satélites adicionales y mantener más planos orbitales simplemente para preservar la continuidad del servicio. La gestión de potencia y el direccionamiento de haces se convierten en cuellos de botella operativos: los satélites deben reducir la potencia al aproximarse a la línea de visión GEO, y los sistemas multihaz deben desactivar haces en direcciones específicas, incluso durante picos de demanda de usuarios, lo que degrada los presupuestos de enlace y aumenta la latencia. El resultado es una asimetría estructural en la que los sistemas GEO operan sin modificaciones, mientras que los operadores de sistemas NGSO se adaptan continuamente, soportando ineficiencias operativas que no aportan ningún beneficio correspondiente a la calidad del servicio GEO.

Evidencia de una coexistencia segura

Este estudio combina simulaciones de EPFD a gran escala en 12 ubicaciones de EE. UU., junto con análisis regulatorios de la UIT y mediciones de interferencia en condiciones reales para evaluar si los límites actuales reflejan el riesgo real de interferencia. Los resultados son coherentes e inequívocos.

Los eventos de interferencia son poco frecuentes, breves y aislados. En todas las ubicaciones simuladas, las excedencias de EPFD ocurren aproximadamente 25 veces al día, cada una con una duración de entre 20 y 30 segundos, y el tiempo total de excedencia representa apenas entre el 0,2 % y el 0,6 % del día. De manera crítica, el 95 % de la potencia de interferencia proviene de un único satélite LEO en un momento dado, y no de la interferencia agregada de múltiples satélites que suponía el marco original de la UIT. Los sistemas LEO modernos utilizan una planificación dinámica de frecuencias, recalculada en tiempo real a medida que los haces se desplazan por la superficie terrestre a aproximadamente 27 000 km/h, lo que evita la superposición simultánea de interferencia cocanal proveniente de múltiples satélites.

La tecnología moderna de antenas reduce drásticamente la interferencia. Las antenas multihaz de matriz en fase —actualmente estándares en sistemas NGSO de nueva generación— mejoran los valores pico de EPFD en aproximadamente 10 dB y reducen la duración de las excedencias en un factor de entre 3 y 10 veces. Los operadores sostienen que, dados estos avances, los límites actuales son entre 4 y 276 veces más restrictivos de lo necesario.

La degradación en sistemas GSO es mínima y operativamente insignificante. Las simulaciones muestran pérdidas promedio de eficiencia espectral del 0,48 % en latitudes septentrionales (Anchorage) y del 1,47 % en latitudes meridionales (Honolulu); en este último caso, la causa principal es el desvanecimiento por lluvia, y no la interferencia de satélites LEO. Una pérdida de rendimiento significativa del 2,5 % requeriría que la relación portadora-interferencia (C/I) descendiera hasta aproximadamente 14,9 dB; las simulaciones muestran que la relación portadora-interferencia se mantiene muy por encima de este umbral en ángulos típicos fuera de eje superiores a 2°. Los sistemas existentes de codificación y modulación adaptativas (ACM) absorben las fluctuaciones a corto plazo que se producen, lo que evita cualquier impacto en los acuerdos de nivel de servicio. Los operadores de sistemas GEO no necesitan modificar el equipamiento terrestre, y los presupuestos de enlace GEO se mantienen estables.

Las pruebas en condiciones reales confirman las simulaciones. Los ensayos de campo de SpaceX en Rumania (2024-2025) excedieron intencionalmente los límites de EPFD con hasta ocho satélites LEO superpuestos y no encontraron ninguna degradación perjudicial de los servicios GEO, interrupciones del servicio, ni inestabilidad en el rendimiento de los sistemas GEO, incluso cuando los haces interferentes se aproximaron a menos de 4 grados del arco GEO.

Pequeñas medidas de mitigación logran un cumplimiento casi total. Aplicar un ángulo de evitación de 8° con antenas de matriz en fase en una ubicación representativa de EE. UU. reduce los eventos de excedencia de EPFD de 33 a 22, acorta el evento más largo de 30 a

10 segundos y reduce el tiempo total de excedencia en un factor de 4,5 veces, sin impacto significativo en la cobertura del servicio NGSO.

Implicaciones

Para los operadores de sistemas GSO, los resultados confirman que los sistemas NGSO modernos presentan un riesgo mínimo de interferencia en condiciones reales. Las excedencias de EPFD no se traducen en interrupciones del servicio; la ACM y la adaptación del enlace absorben la gran mayoría de las fluctuaciones de la relación C/I a corto plazo.

Para los operadores de sistemas NGSO, los límites actuales imponen ineficiencias estructurales —constelaciones más grandes, mayores costos de capital y operativos, menor eficiencia espectral— que las normas actualizadas podrían eliminar, lo que permitiría obtener importantes ganancias de capacidad y una mejora de las condiciones económicas.

Para las redes de próxima generación, lo que está en juego va más allá. Los sistemas 5G-NTN y las arquitecturas híbridas de múltiples órbitas requieren una compartición flexible del espectro, una gestión dinámica de las interferencias y una coordinación en tiempo real entre las capas orbitales. Las normas actuales sobre EPFD —rígidas, estáticas y diseñadas para una era diferente— son fundamentalmente incompatibles con estas arquitecturas y limitarán su desarrollo, a menos que se actualicen.

Medidas regulatorias recomendadas

1. **Iniciar una revisión formal del límite de EPFD.** Incorporar las características de las antenas modernas, el control adaptativo de potencia y el direccionamiento dinámico de haces. Sustituir los supuestos estáticos del peor caso por métricas basadas en el rendimiento y fundamentadas en la tecnología actual.
2. **Reducir los requisitos del ángulo de evitación GEO.** Las pruebas respaldan la reducción de los ángulos de evitación obligatorios de entre 6° y 18° a entre 2° y 4° sin afectar el cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio GSO.
3. **Adoptar criterios de interferencia basados en el rendimiento.** Sustituir los umbrales estáticos de densidad de flujo de potencia por métricas basadas en la relación C/I, tolerancias de excedencia a corto plazo y cumplimiento de mediciones en condiciones reales, incluida la eficiencia espectral promedio y la pérdida de rendimiento como indicadores primarios.
4. **Institucionalizar las pruebas conjuntas de coexistencia entre GEO y NGSO.** El ensayo de SpaceX en Rumania es un modelo para futuras campañas de medición colaborativas que pueden validar los supuestos regulatorios frente a condiciones operativas reales.

Resumen del estudio

Las pruebas respaldan firmemente la necesidad de actualizar las reglamentaciones sobre EPFD para reflejar la tecnología actual y las realidades operativas. El presente estudio demuestra que los modernos **sistemas NGSO pueden coexistir de forma segura con las**

redes GEO con un impacto mínimo en cuanto a interferencias, especialmente cuando se tienen en cuenta patrones de antena realistas y técnicas de mitigación moderadas. Los límites heredados de EPFD —diseñados para una era tecnológica diferente— son **excesivamente conservadores** y limitan el rendimiento de los sistemas NGSO sin proporcionar una protección adicional significativa a los servicios GEO.

La progresión cronológica de la industria de las comunicaciones por satélite entre la creación de las normas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones en 1997, cuando se introdujeron los límites provisionales de EPFD en las operaciones de espectro compartido, y 2026 se define por una profunda transición del dominio geoestacionario (GSO) a una arquitectura orbital compleja y de múltiples capas, en la que las constelaciones no geoestacionarias (NGSO) desafían la infraestructura tradicional. Esta evolución no es simplemente un cambio en la altitud orbital, sino un cambio fundamental en la economía de la transmisión de datos, la física de la propagación de señales y los marcos regulatorios que rigen los “carriles en el espacio”. Los satélites GSO, situados a una altitud ecuatorial de 35 786 km, han servido históricamente como la columna vertebral de las telecomunicaciones globales, ofreciendo una cobertura regional estable desde un punto fijo en relación con la superficie terrestre. Por el contrario, los sistemas NGSO, que operan en órbita terrestre baja (LEO) a altitudes inferiores a 2000 km o en órbita terrestre media (MEO) entre 8000 y 20 000 km, ofrecen una latencia significativamente menor y un mayor rendimiento, a cambio de requerir grandes constelaciones para lograr una cobertura global continua.

Avances técnicos y la convergencia de múltiples órbitas

El cambio que se ha producido desde 1997 hasta la actualidad se sustenta en varios avances técnicos fundamentales que han difuminado las fronteras entre las órbitas. El primero es la transición hacia los satélites definidos por software (SDS). Las cargas útiles tradicionales eran “bent pipes” (repetidores transparentes), es decir, transpondedores esencialmente estáticos. Los satélites GSO, MEO y LEO modernos ahora integran cargas útiles digitales que pueden reconfigurar las formas de los haces, los niveles de potencia y las asignaciones de frecuencia mientras están en órbita. Esto permite a operadores como SES, con su constelación O3b mPOWER, asignar activamente capacidad a nivel de terabits a cruceros o a operaciones militares en tiempo real.

En segundo lugar, el progreso en la tecnología de antenas, específicamente las matrices en fase y las antenas de dirección electrónica (ESA), ha hecho posible el desarrollo de los terminales terrestres de fácil uso requeridos para los sistemas NGSO. Estas antenas utilizan la formación de haces digital para rastrear satélites que se mueven rápidamente por el cielo sin necesidad de piezas mecánicas. Los terminales de tercera generación, como ALL.SPACE Hydra, ofrecen ahora una arquitectura de “verdadero multitenlace”, lo que permite que un solo terminal se conecte simultáneamente a satélites LEO, MEO y GSO.

Disputa regulatoria: compartición del espectro y límites de EPFD

El crecimiento sin precedentes de las constelaciones NGSO ha creado una tensión significativa en cuanto a la compartición del espectro con los sistemas GSO ya establecidos. Ambas tecnologías operan cada vez más en las mismas bandas Ku y Ka, lo que ha dado lugar a un régimen regulatorio basado en límites de “densidad de flujo de potencia equivalente” (EPFD). Los límites de EPFD, establecidos por la UIT en 1997, se diseñaron para proteger las enormes inversiones en infraestructura de sistemas GSO frente a la interferencia causada por miles de satélites NGSO ágiles.

Sin embargo, la naturaleza “obsoleta” de estos límites es ahora un punto de controversia. Los proveedores de servicios NGSO sostienen que las normas sobre EPFD, que tienen 25 años de antigüedad, se basaron en sistemas teóricos que nunca se construyeron y protegen en exceso las redes GSO a costa de una infrautilización del espectro. Los principales actores del sector NGSO, como SpaceX y Amazon, ya han solicitado a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) exenciones de estos límites, argumentando que restringen la competencia y la conectividad¹. Por el contrario, operadores de sistemas GSO como Viasat y SES, se han opuesto con firmeza a estos cambios, alegando que relajar los límites de EPFD “monopolizaría el espectro” y crearía “riesgos de interferencia insuperables” para las aplicaciones relacionadas con la seguridad de la vida humana².

Impacto del estudio de interferencia en sistemas de compartición de espectro GEO-LEO

En este estudio, se examina cómo las constelaciones modernas en órbita terrestre baja (LEO) afectan a los sistemas de satélites en órbita geoestacionaria (GEO) ya existentes cuando ambos operan en el espectro compartido de las bandas Ku y Ka, en el contexto de las regulaciones relacionadas con la UIT. El estudio demuestra que los límites de EPFD son excesivamente conservadores e imponen restricciones innecesarias a los operadores de sistemas NGSO. El estudio combina modelado teórico, que tiene en cuenta las normas de comunicación GSO y NGSO reales de la UIT, con un análisis regulatorio basado en la UIT, seguido de una simulación a gran escala del impacto de EPFD generado por una constelación satelital NGSO en 12 ubicaciones específicas de EE. UU., que abarcan latitudes extremas del país, y que concluye con los impactos operativos reales de los sistemas NGSO sobre la recepción terrestre de sistemas GSO; los resultados se utilizan además como referencia en mediciones de laboratorio reales, que incluyeron módems de satélites reales y un emulador de canales de satélite en condiciones reales que permitió, en un entorno totalmente controlado, el análisis del rendimiento de la recepción y la interferencia relacionada con sistemas GSO.

¹ N.º de expediente del ICFS: Space Exploration Holdings, LLC - Comisión Federal de Comunicaciones, consultado el 18 de marzo de 2026, <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-26-36A1.pdf>

² Petición de Viasat contra la expansión de SpaceX | PDF | Satélite de comunicaciones - Scribd, consultado el 18 de marzo de 2026, <https://www.scribd.com/document/838088513/Viasat-Petition-to-D>

Contexto y motivación

En la actualidad predominan dos trayectos de interferencia: la interferencia en el enlace de servicio (LEO → terminales de usuario GEO) y la interferencia en el enlace de alimentación (LEO → gateways GEO). El marco regulatorio de la UIT sobre los límites de EPFD está tecnológicamente desactualizado; por lo tanto, el presente estudio evalúa dichos límites a la luz de los desarrollos modernos para determinar si siguen siendo necesarios o si son excesivamente conservadores e imponen restricciones innecesarias a los operadores de sistemas NGSO.

Los límites actuales de EPFD imponen costos importantes a los sistemas NGSO

En la actualidad, para cumplir con los límites de EPFD obsoletos, los operadores de sistemas NGSO deben aumentar el tamaño de las constelaciones, reducir la potencia de los transpondedores, lo que reduce el área de cobertura terrestre del satélite, desactivar haces cerca del arco GEO y mantener grandes ángulos de evitación (de entre 6° y 18°). Todas estas medidas drásticas conducen a una pérdida de cobertura del 30 %, a un aumento del 28 % en el CAPEX debido al tamaño de la constelación, junto con un mayor OPEX para la gestión de la constelación y a una reducción de la eficiencia espectral. Algunas presentaciones de sistemas NGSO estiman que la capacidad pico podría incrementarse entre un 180 % y un 700 % si se modernizan los límites de EPFD, por lo que esta modernización regulatoria sería equivalente a habilitar 13 100 MHz de nuevo espectro en la banda Ka³.

Cuestión política central: límites obsoletos de EPFD

Los límites de EPFD (densidad de flujo de potencia equivalente) constituyen la métrica central de la UIT (Artículo 22 de la UIT) para limitar la potencia de transmisión de los sistemas NGSO, traducida como interferencia en las redes GEO. Sin embargo, dichos límites se diseñaron para la tecnología de la década de 1990 y despliegues escasos de sistemas NGSO, grandes estaciones terrenas GSO, antenas sin matriz en fase y niveles de potencia estáticos. Las antenas modernas de matriz en fase de los sistemas NGSO, el control adaptativo de potencia y el direccionamiento dinámico de haces han reducido de manera significativa el riesgo de interferencia, y los operadores sostienen que los límites son entre 4 y 276 veces más restrictivos de lo necesario. Las pruebas en condiciones reales de sistemas NGSO (SpaceX, Rumania, 2024-2025) superaron intencionalmente los límites de EPFD y no detectaron ninguna degradación perjudicial en los sistemas GSO; la degradación de la relación C/I en sistemas GSO se mantuvo baja; no se observaron interferencias perjudiciales ni interrupciones del servicio, incluso con 8 satélites LEO superpuestos; el rendimiento de los sistemas GEO permaneció estable, aunque los haces interferentes llegaron a aproximarse hasta 4 grados, lo que respalda la afirmación de que los límites actuales son excesivamente restrictivos: “El nivel

³ Los beneficios económicos de actualizar las regulaciones que limitan innecesariamente los sistemas de órbita satelital no geoestacionaria- [The-Economic-Benefits-of-Updating-Regulations-that-Unnecessarily-Limit-Non-Geostationary-Satellite-Orbit-Systems.pdf](#); Ante la COMISIÓN FEDERAL DE COMUNICACIONES, Washington D. C., 20554, n.º de expediente de la Oficina Espacial 25-157-RESPUESTA DE KUIPER SYSTEMS LLC

de interferencia fue bastante mínimo, incluso cuando los haces interferentes se aproximaron hasta 4 grados de distancia”.⁴

Hallazgos clave del marco de simulación

1. La interferencia está dominada por un único satélite LEO en todo momento

Solo un satélite presenta un aumento claro de potencia recibida durante una aproximación cercana, lo que representa aproximadamente el 95 % de la contribución a la EPFD. Esto significa que la interferencia es un problema de una sola fuente, no un problema agregado de múltiples satélites.

2. Las antenas direccionales de sistemas NGSO reducen drásticamente la interferencia

Mediante el uso de las últimas tecnologías de sistemas NGSO, principalmente antenas multihaz de matriz en fase, el valor pico de EPFD mejora en aproximadamente 10 dB, mientras que la duración de las excedencias se reduce entre 3 y 10 veces, y los casos atípicos de latitudes altas (Anchorage, Seattle) se vuelven manejables desde el punto de vista de la interferencia.

3. Las simulaciones confirman que los eventos de interferencia son breves, poco frecuentes y están dominados por un único satélite LEO

Se ha concluido que, **en las 12 ubicaciones seleccionadas de EE. UU.**, se producen unos 25 eventos de excedencia de los niveles de EPFD al día, según los límites actuales de la UIT, cada uno con una duración de entre 20 y 30 segundos. Sin embargo, el tiempo total de excedencia, si se sitúa entre el 0,2 % y el 0,6 % del día, **el 95 % de la potencia de interferencia proviene de un único satélite a la vez, debido a la gestión de la interferencia cocanal (CCI) en la planificación de cofrecuencia, en comparación con las suposiciones iniciales de la UIT de que varios satélites cofrecuencia podrían superponerse simultáneamente.** A diferencia de las suposiciones iniciales de la UIT, en las que los sistemas NGSO tenían planes de cofrecuencia **estáticos**, los sistemas LEO utilizan una planificación **dinámica** de frecuencias. Dado que las “celdas” (haces) se desplazan por la superficie terrestre a aproximadamente 27 000 km/h, el plan de frecuencias debe recalcularse en tiempo real mediante el procesador a bordo del satélite o un controlador de red definida por software (SDN) en tierra, lo que garantiza una mitigación rigurosa de la interferencia cocanal.

4. La degradación de la eficiencia espectral en sistemas GSO es mínima

Para las dos ubicaciones que se encuentran en los extremos de latitud norte y sur, se estima lo siguiente:

⁴ Mediciones de interferencia en condiciones reales realizadas por SpaceX para respaldar los estudios sobre los límites de EPDF https://www.itu.int/dms_ties/itu-r/md/23/wp4a/c/R23-WP4A-C-0343!N20!MSW-E.docx

- ✦ Anchorage (Alaska): aproximadamente el 0,48 % de pérdida promedio de eficiencia espectral
- ✦ Honolulu (Hawái): aproximadamente el 1,47 % de pérdida (dominada por el desvanecimiento por lluvia, y no la interferencia de satélites LEO)
- ✦ Solo se produce una pérdida de rendimiento del 2,5 % cuando la relación C/I desciende a aproximadamente 14,9 dB
- ✦ Las simulaciones muestran que la relación C/I se mantiene muy por encima de este umbral para ángulos típicos fuera del eje ($>2^\circ$)

La conclusión principal muestra que, en la compartición del espectro de la banda Ka, el nivel de interferencia generado por los sistemas NGSO introduce una degradación mínima de los sistemas GSO que no afecta a los acuerdos generales de nivel de servicio GSO.

5. Pequeñas medidas de mitigación logran un cumplimiento casi total

Teniendo en cuenta los resultados de la simulación de la antena direccional de matriz en fase para la ubicación de Nueva York, cuando se aplica un ángulo de evitación de 8° se produce una reducción de potencia de los sistemas NGSO de +20 dB, con lo que los eventos de excedencia se reducen de 33 a 22, el evento más largo se reduce de 30 s a 10 s y el porcentaje global de excedencia se reduce 4,5 veces. Se trata de una mejora drástica de la interferencia si se tienen en cuenta las últimas tecnologías de NGSO de antenas multihaz de matriz en fase.

Implicaciones estratégicas

1. Para los operadores de sistemas GEO

Los sistemas NGSO modernos actuales presentan un riesgo mínimo de interferencia en condiciones reales; las tecnologías de ACM y de adaptación del enlace absorben la mayor parte de las fluctuaciones de C/I a corto plazo. Por lo tanto, las excedencias de EPFD no se traducen en interrupciones del servicio GSO.

A diferencia de la tecnología VSAT, los operadores de sistemas GSO sin ACM (codificación y modulación adaptativas) suelen utilizar, para el diseño de enlaces de radiodifusión en la banda Ka, esquemas de modulación muy robustos, principalmente DVB-S2, empleando modulación 8PSK en combinación con tasas de codificación FEC de 2/3 o 3/4, con un “objetivo de disponibilidad” diseñado del 99,7 % al 99,9 %. En este caso, existe una penalización por interferencia sobre el margen de desvanecimiento por lluvia (margen de lluvia de entre 6 y 8 dB [según **UIT-R P.618]) de solo 1 o 2 dB, lo que lleva a concluir que la disponibilidad del servicio de los operadores de sistemas GSO sin ACM depende principalmente del desvanecimiento por condiciones meteorológicas y de manera insignificante del nivel de interferencia adicional, ya que la interferencia de los sistemas NGSO se atenúa simultáneamente debido al desvanecimiento por condiciones meteorológicas, al igual que la señal principal de radiodifusión de los sistemas GSO.

2. Para los operadores de sistemas LEO

Los límites actuales de EPFD de la UIT imponen restricciones innecesarias, lo que conduce a constelaciones más grandes, mayores CAPEX/OPEX y una eficiencia espectral reducida. La actualización de las normas podría desbloquear un 700 % más de capacidad pico (según presentaciones de Amazon Leo).

3. Implicaciones políticas para los reguladores (UIT, FCC, CEPT)

Los límites actuales de EPFD ya no reflejan la realidad tecnológica, dado que están diseñados para un mundo que ya no existe. Los sistemas LEO modernos utilizan las últimas tecnologías, como antenas de matriz en fase, control adaptativo de potencia, direccionamiento dinámico de haces, haces estrechos y gestión de interferencias en tiempo real. Las pruebas del estudio actual respaldan la revisión de los límites de EPFD para reflejar las nuevas tecnologías, que garantizan una técnica fiable de mitigación de interferencias.

Los sistemas GEO siguen estando protegidos, incluso cuando se exceden los límites de EPFD; tanto las simulaciones como las pruebas en condiciones reales han concluido lo siguiente:

- ✦ No hay interferencias perjudiciales
- ✦ No hay interrupciones del servicio
- ✦ El impacto en la eficiencia espectral es mínimo
- ✦ Las ventanas de interferencia son breves y predecibles

La actualización de los límites de EPFD permitiría desbloquear importantes beneficios de interés público:

- ✦ Menores costos de banda ancha
- ✦ Mayor capacidad de los sistemas NGSO
- ✦ Mejora de la conectividad en zonas rurales y remotas
- ✦ Reducción del tamaño de las constelaciones (**menor riesgo de desechos orbitales**)
- ✦ Uso más eficiente del espectro
- ✦ Mejor coexistencia con los sistemas 5G-NTN

Medidas regulatorias recomendadas

1. Iniciar una revisión formal de los límites de EPFD:

- ✦ Incorporar tecnología moderna de antenas
- ✦ Considerar métricas dinámicas basadas en la interferencia
- ✦ Abandonar los supuestos estáticos del peor caso

2. Permitir ángulos de evitación GEO reducidos:

- ✦ Las pruebas respaldan que reducir los ángulos de evitación de entre 6° y 18° a entre 2° y 4° es totalmente factible sin afectar el cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio GSO.

3. Adoptar criterios de interferencia basados en el rendimiento:

- ✦ Umbrales basados en la relación C/I
- ✦ Tolerancias de excedencia a corto plazo
- ✦ Cumplimiento basado en mediciones en condiciones reales
- ✦ Estimación de la eficiencia espectral promedio y la pérdida de rendimiento, lo que muestra dónde se encuentran las ponderaciones de degradación generales.

4. Fomentar las pruebas conjuntas de coexistencia entre GEO y NGSO:

- ✦ La prueba de SpaceX en Rumania es un modelo para futuras campañas de medición colaborativas que pueden demostrar en el campo resultados reales frente a supuestos teóricos obsoletos.

Conclusión principal para los reguladores

Los sistemas NGSO modernos pueden coexistir de forma segura con las redes GEO bajo límites de EPFD considerablemente más flexibles.

El marco actual de EPFD presenta las siguientes características:

- ✦ Está tecnológicamente obsoleto
- ✦ Protege en exceso a los sistemas GEO mucho más allá de lo necesario
- ✦ Impone cargas considerables e innecesarias a los operadores de sistemas NGSO
- ✦ Limita la disponibilidad y la asequibilidad de la banda ancha

Actualizar los límites de EPFD permitiría lo siguiente:

- ✦ Preservar la integridad del servicio GEO
- ✦ Desbloquear enormes ganancias de capacidad de los sistemas NGSO
- ✦ Mejorar el acceso global a la banda ancha
- ✦ Alinear las regulaciones con la tecnología moderna

Conclusión general

El estudio demuestra que los modernos **sistemas NGSO pueden coexistir de forma segura con las redes GEO con un impacto mínimo en cuanto a interferencias**, especialmente cuando se tienen en cuenta patrones de antena realistas y técnicas de mitigación moderadas.

Los límites heredados de EPFD —diseñados para una era tecnológica diferente— son **excesivamente conservadores** y limitan el rendimiento de los sistemas NGSO sin proporcionar una protección adicional significativa a los servicios GEO.

“Estos valores representan un nivel aceptable de degradación de la eficiencia espectral en sistemas GSO, que puede compensarse con los sistemas de ACM existentes”.

Las pruebas respaldan firmemente la necesidad de actualizar las reglamentaciones sobre EPFD para reflejar la tecnología actual y las realidades operativas.

2. Implicaciones operativas

Las constelaciones LEO modernas pueden operar junto a los sistemas GEO con una interferencia insignificante en condiciones reales. Las pruebas obtenidas de simulaciones, los ensayos de laboratorio y las mediciones en órbita en tiempo real muestran que los límites actuales de EPFD son mucho más restrictivos de lo necesario. Las normas actuales, obsoletas y diseñadas para un panorama tecnológico completamente distinto en el pasado, imponen ahora cargas operativas y económicas significativas a los operadores de sistemas NGSO, al tiempo que ofrecen escasa protección adicional a las redes GEO más allá de lo que los receptores GEO modernos ya logran a través de la ACM, la adaptación del enlace y un rendimiento mejorado de la antena.

Desde un punto de vista centrado en las políticas, la interacción entre los sistemas GEO y NGSO ya no es una cuestión puramente regulatoria: tiene consecuencias operativas directas para el diseño de las constelaciones, la continuidad del servicio, el comportamiento del segmento terrestre y la eficiencia espectral a largo plazo. Estas implicaciones son fundamentales para cualquier esfuerzo de modernización regulatoria.

Las operaciones de las constelaciones NGSO están limitadas por el cumplimiento del límite de EPFD

Ángulos de evitación GSO obligatorios

Los operadores deben mantener zonas de exclusión de entre 6° y 18° alrededor de la línea de visión GEO. Esto obliga a los satélites a desactivar haces, reducir la potencia o evitar prestar servicio a usuarios en grandes arcos geográficos.

“Los sistemas NGSO tienen prohibido transmitir dentro de un ángulo de evitación GSO especificado... Esta restricción hace que una parte de la constelación NGSO resulte inutilizable”.

Impacto operativo:

- ❖ Zonas sin cobertura

- ❖ Reducción de la capacidad instantánea
- ❖ Aumento de la frecuencia de traspasos
- ❖ Mayor cantidad de satélites requerida para mantener la continuidad del servicio

Aumento del tamaño y el costo de la constelación

Dado que los satélites deben desactivar con frecuencia los haces o reducir la potencia para cumplir con los límites de EPFD, los operadores compensan mediante lo siguiente:

- ❖ El lanzamiento de más satélites
- ❖ El aumento del número de planos orbitales
- ❖ La adición de redundancia para mantener una cobertura continua

“Los operadores de sistemas NGSO pagan hoy en día un sobre costo del 28 % para desplegar los satélites adicionales necesarios a fin de ofrecer una continuidad del servicio del 100 %”.

Impacto operativo:

- ❖ Mayores gastos de capital (CAPEX) y gastos operativos (OPEX)
- ❖ Gestión de la flota más compleja
- ❖ Mayor carga para evitar colisiones
- ❖ Mayores obligaciones de mitigación de desechos

La gestión de potencia y el direccionamiento de haces se convierten en cuellos de botella operativos

Los sistemas NGSO modernos dependen en gran medida del control dinámico de la potencia y del direccionamiento mediante matrices en fase. Según las normas actuales de EPFD:

- ❖ Los satélites deben reducir la potencia al aproximarse a la línea de visión GEO
- ❖ El direccionamiento de haces debe evitar los arcos GEO, incluso cuando la demanda de usuarios es alta
- ❖ Los satélites multihaz deben desactivar los haces en direcciones específicas

Esto conduce a lo siguiente:

- ❖ Presupuestos de enlace subóptimos
- ❖ Reducción del rendimiento durante los picos de demanda
- ❖ Mayor latencia debido a los traspasos forzados

Los sistemas GEO sufren un impacto operativo mínimo

A pesar de las excedencias de EPFD en simulaciones y pruebas en condiciones reales, los sistemas GEO muestran lo siguiente:

- ✦ No hay interrupciones del servicio
- ✦ Degradación mínima de la relación C/I
- ✦ Pérdida insignificante de eficiencia espectral

“El nivel de interferencia fue bastante mínimo, incluso cuando los haces interferentes se aproximaron hasta 4 grados de distancia”.

Implicaciones operativas para sistemas GEO:

- ✦ Los operadores de sistemas GEO no necesitan modificar el equipamiento terrestre
- ✦ La ACM (codificación y modulación adaptativas) absorben la interferencia a corto plazo
- ✦ Los operadores sin ACM se enfrentan a una penalización por interferencia mínima de 1 a 2 dB, muy por debajo de las restricciones típicas por desvanecimiento por condiciones meteorológicas que definen la disponibilidad de los servicios
- ✦ Los presupuestos de enlace GEO se mantienen estables

Las excedencias EPFD son breves, predecibles y gestionables desde el punto de vista operativo

Las simulaciones muestran lo siguiente:

- ✦ Aproximadamente 25 eventos de excedencia al día
- ✦ Cada evento tiene una duración de hasta 20 a 30 segundos
- ✦ Los eventos están dominados por un único satélite a la vez
- ✦ Tiempo total de excedencia: entre el 0,2 y el 0,6 % del día

Implicación operativa:

Los sistemas NGSO pueden gestionar estos eventos mediante lo siguiente:

- ✦ Ajustes de micropotencia
- ✦ Direccionamiento de haces de corta duración
- ✦ Arcos de evitación localizados
- ✦ Programación predictiva

La carga operativa recae de manera desproporcionada sobre los sistemas NGSO

Según las normas actuales:

- ❖ Los sistemas GEO operan con normalidad
- ❖ Los sistemas NGSO deben adaptarse constantemente para evitar violar los límites de EPFD

Esto crea una carga operativa asimétrica, en la que:

- ❖ Los operadores de sistemas GEO reciben una protección mucho mayor de lo necesario
- ❖ Los operadores de sistemas NGSO se enfrentan a importantes ineficiencias operativas

La modernización de los límites de EPFD mejoraría la eficiencia operativa

Mejoras operativas en los sistemas NGSO:

- ❖ Ángulos de evitación más reducidos (de entre 2° y 4°)
- ❖ Menor cantidad de desactivaciones de haces
- ❖ Mayor disponibilidad de potencia
- ❖ Reducción del tamaño de la constelación
- ❖ Menor frecuencia de traspasos
- ❖ Experiencia de usuario más estable

Impacto operativo en los sistemas GEO:

- ❖ Sin degradación significativa
- ❖ La ACM sigue protegiendo la integridad del enlace
- ❖ No se requieren actualizaciones de equipamiento

Implicaciones para 5G-NTN y futuras redes híbridas

El documento señala que los sistemas futuros (5G-NTN, redes de múltiples órbitas) requieren lo siguiente:

- ❖ Compartición flexible del espectro
- ❖ Gestión dinámica de interferencias
- ❖ Coordinación en tiempo real entre órbitas

Las normas actuales sobre EPFD obstaculizan estos desarrollos mediante la imposición de restricciones rígidas y estáticas incompatibles con las arquitecturas de red modernas.

Conclusión operativa clave para los reguladores

Los datos operativos son claros:

Los límites actuales de EPFD imponen restricciones operativas fuertes y continuas sobre los sistemas NGSO, al tiempo que brindan a los sistemas GEO un nivel de protección muy superior al necesario para garantizar un servicio fiable.

La modernización de los límites de EPFD permitiría lo siguiente:

- ❖ Reducir las ineficiencias operativas
- ❖ Disminuir el tamaño y el costo de las constelaciones
- ❖ Mejorar la utilización del espectro
- ❖ Hacer posibles arquitecturas de múltiples órbitas y 5G-NTN más robustas
- ❖ Mantener la integridad del servicio GEO

En síntesis, las implicaciones operativas respaldan firmemente una actualización regulatoria que alinee las normas de EPFD con la tecnología moderna de antenas, el comportamiento real de la interferencia y las necesidades de las redes satelitales de próxima generación.

3. Conclusión principal

Las constelaciones LEO modernas pueden coexistir con sistemas GEO bajo condiciones de interferencia armonizadas basadas en situaciones reales; las pruebas obtenidas de simulaciones, los ensayos de laboratorio y las mediciones en órbita en tiempo real muestran que los límites actuales de EPFD son mucho más restrictivos de lo necesario. Estas normas obsoletas, diseñadas hace casi tres décadas para un panorama tecnológico completamente distinto, imponen ahora cargas operativas y económicas significativas a los operadores de sistemas NGSO, al tiempo que ofrecen escasa protección adicional a las redes GEO más allá de lo que los receptores GEO modernos ya logran a través de la ACM, la adaptación del enlace y un rendimiento mejorado de la antena. La flexibilización de los límites de EPFD para reflejar la tecnología actual permitiría lo siguiente:

- ❖ Preservar la integridad del servicio GEO, tal y como demuestran las pruebas de excedencia en condiciones reales, las simulaciones y los ensayos de laboratorio, sin evidencia de interferencia perjudicial.
- ❖ Desbloquear mejoras significativas en la eficiencia de los sistemas NGSO, que incluyen una reducción del tamaño de las constelaciones, menor cantidad de desactivaciones de haces y una mejora drástica en la utilización del espectro.
- ❖ Reducir los costos globales de banda ancha mediante la disminución de la necesidad de constelaciones sobredimensionadas y las restricciones de potencia innecesarias.

- ❖ Hacer posibles arquitecturas más avanzadas de múltiples órbitas y 5G-NTN, que dependen de una gestión de interferencias flexible y dinámica, en lugar de los supuestos rígidos de la década de 1990.
- ❖ Mejorar la sostenibilidad orbital, ya que se necesitarían menos satélites para lograr la misma cobertura y capacidad, con menos desechos, menor uso de materiales y, en última instancia, una mejor economía de escala que se refleje en los costos de acceso para los usuarios finales a servicios de banda ancha confiables e independientes de la ubicación.

En resumen, la idea central es la siguiente: el marco de EPFD no ha seguido el ritmo de la tecnología satelital moderna, y actualizarlo reportaría importantes beneficios de interés público sin comprometer la protección de los sistemas GEO. Los datos muestran que la coexistencia no solo es posible, sino que ya está ocurriendo de manera segura.

4. Introducción del estudio

Con la aparición de las nuevas comunicaciones por satélites en órbita terrestre baja (LEO), que ofrecen mejoras en la cobertura y en la capacidad de banda ancha, se requiere un nuevo modo de operación armonizado con los sistemas de comunicación por satélites en órbita geoestacionaria (GEO) ya establecidos, principalmente a través de la gestión de la compartición del espectro.

Los operadores de sistemas GEO y LEO comparten actualmente las mismas bandas de frecuencia, como la banda Ku (de 12 a 18 GHz) y la banda Ka (de 26,5 a 40 GHz), por lo que deben implementarse técnicas de compartición de espectro para evitar interferencias. Por lo general, se prevén dos tipos principales de interferencia:

Interferencia en el enlace de servicio (usuario-satélite/satélite-usuario)

Este mecanismo se produce cuando un terminal de usuario de sistemas GEO (estación terrena) recibe la señal deseada desde su satélite GEO, pero también recibe de manera no intencional interferencia de uno o más satélites LEO que pasan por la zona (enlace descendente) o cuando el satélite LEO se encuentra cerca de la trayectoria de línea de visión entre el terminal GEO y el satélite GEO (interferencia en línea). Del mismo modo, los enlaces ascendentes de los satélites LEO pueden interferir con el receptor del satélite GEO.

Impacto principal: degradación de la calidad de la señal del usuario de sistemas GEO, lo que conduce a una reducción del rendimiento, mayores tasas de error de bits (BER) y posibles interrupciones del servicio.

Interferencia en el enlace de alimentación (gateway-satélite/satélite-gateway)

El mecanismo se produce cuando la estación gateway GEO (estación terrena que envía/recibe datos hacia/desde el satélite GEO) puede sufrir interferencias provenientes de las señales del satélite LEO. Debido a la alta sensibilidad de los receptores gateway GEO y a la posibilidad de que un gran número de satélites LEO pasen por encima de ellos, la interferencia agregada puede ser considerable.

Impacto principal: la interferencia en los enlaces de alimentación GEO puede resultar especialmente perjudicial, ya que estos enlaces transportan tráfico de alta capacidad para todo un haz o transpondedor GEO.

Límites de densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD)

La principal herramienta regulatoria para gestionar la interferencia de LEO a GEO son los límites de **densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD)**, establecidos por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (principalmente el Artículo 22).

Por definición, la EPFD es una medida diseñada para tener en cuenta la **interferencia agregada** procedente de un sistema de órbita satelital no geoestacionaria (NGSO, por ejemplo, LEO) completo sobre la antena de una estación terrena GEO específica. Es un valor calculado que traduce la suma de las emisiones de todos los satélites LEO visibles, teniendo en cuenta la directividad de la antena GEO, en una densidad de flujo de potencia (PFD) equivalente procedente de una única fuente teórica.

El propósito de los límites de EPFD es establecer los “límites estrictos” que deben cumplir las constelaciones LEO para garantizar la protección de los sistemas GEO existentes **sin** requerir una coordinación individual con cada red GEO en todo el mundo. El cumplimiento se demuestra típicamente durante el proceso de presentación ante la UIT.

El desafío actual es que los límites originales de EPFD se establecieron hace más de 25 años, cuando los sistemas LEO solo se vislumbraban y los sistemas GEO tenían diferentes tipos de misiones operativas. Las normas de densidad de flujo de potencia equivalente de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), elaboradas hace 28 años, limitan la capacidad y la eficacia de los sistemas NGSO del servicio fijo por satélite (FSS), lo que reduce la disponibilidad y aumenta el costo de los servicios prestados por estos sistemas. Adoptados de forma provisional en 1997 y de manera definitiva en 2000⁵, los límites de EPFD se establecieron para cuantificar el nivel de protección frente a interferencias inaceptables para las redes GSO, de conformidad con el Artículo 22.2 del Reglamento de Radiocomunicaciones. Estos límites sirvieron para garantizar la protección de las redes GSO frente a interferencias inaceptables procedentes de transmisiones de sistemas NGSO FSS. Los principales actores del sector NGSO consideran que las normas actuales sobre EPFD están desactualizadas y privan a los consumidores de un mayor acceso a servicios de sistemas satelitales LEO a precios más bajos⁶. La tecnología satelital ha avanzado de manera considerable en los últimos 28 años. Los límites de EPFD de 1997 están desactualizados porque no tienen en cuenta los avances tecnológicos que reducen la probabilidad de interferencias, entre los que se incluyen los siguientes: haces puntuales más pequeños y dirigibles para los sistemas NGSO

⁵ Véanse las Actas Finales de la CMR-97, Artículo S22; las Actas Finales de la CMR-2000, Artículo S22; y la Resolución 58 (CMR-2000).

⁶ Los beneficios económicos de actualizar las regulaciones que limitan innecesariamente los sistemas de satélites en órbita no geoestacionaria, Harold Furchtgott-Roth

FSS⁷; geometría y diseño mejorados de la constelación NGSO; tecnologías de codificación y modulación adaptativas para redes GSO a fin de mantener sus enlaces frente a la degradación natural; equipamientos de estación terrena mejorados tanto para redes GSO como para sistemas NGSO FSS.

Con la introducción de nuevas **constelaciones** de satélites LEO de múltiples órbitas y el despliegue de diferentes casos de uso de operaciones GSO, como los servicios de banda ancha y las **antenas de usuario de sistemas GEO** más pequeñas y vulnerables, con ganancias de lóbulos laterales relativamente más altas, existe un debate y un esfuerzo en curso en el ámbito de la CMR (Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones) para revisar y, posiblemente, actualizar estos límites a fin de reflejar la tecnología y la densidad actuales⁸.

5. Alcance y objetivo

En este documento, se analizan los mecanismos de interferencia y los impactos a nivel de sistema que provocan las constelaciones de satélites en órbita no geoestacionaria (NGSO), principalmente en órbita terrestre baja (LEO), sobre los servicios geoestacionarios (GSO) existentes, incluidos los sistemas GEO y MEO pertinentes, que operan en las bandas satelitales K (Ku y Ka). El análisis se centra tanto en los enlaces descendentes como ascendentes, los efectos de interferencia agregada y las restricciones regulatorias y de ingeniería aplicables a los despliegues modernos de sistemas NGSO de banda ancha.

El documento incluye, en la primera parte, el análisis teórico, basado en modelos de simulación de software, que abarca los principales aspectos del impacto de la compartición del espectro y, principalmente, la influencia del nivel de EPFD de los sistemas NGSO sobre una estación terrena receptora GSO.

En los anexos se presentan casos de prueba reales de laboratorio de RF basados en módems DVB-S2 y el emulador de canal satelital CELEOS, junto con los resultados asociados.

6. Aspectos relacionados con la adaptación de los sistemas NGSO para cumplir con los límites de EPFD

Se han analizado varios documentos para identificar el consenso científico respecto del enfoque adecuado en términos de análisis general del sistema. A continuación se presentan algunos de los extractos que se consideran relevantes para la configuración del marco de pruebas adicionales.

⁷ Véase, por ejemplo, el Suplemento de Información Técnica de Telesat al Anexo S, FCC, 4 de noviembre de 2021, [13337277.pdf \(fcc.report\)](#); el Suplemento de Información Técnica de OneWeb al Anexo S, FCC, [2379706.pdf \(fcc.report\)](#); SpaceX, Suplemento de Información Técnica al Anexo S, FCC, 15 de noviembre de 2016, [1158350.pdf \(fcc.report\)](#); Apéndice técnico a la solicitud de Kuiper Systems LLC a fin de obtener autorización para lanzar y operar un sistema de órbita satelital no geoestacionaria en las frecuencias de la banda Ka, [Apéndice técnico \(arstechnica.net\)](#), 4 de julio de 2019.

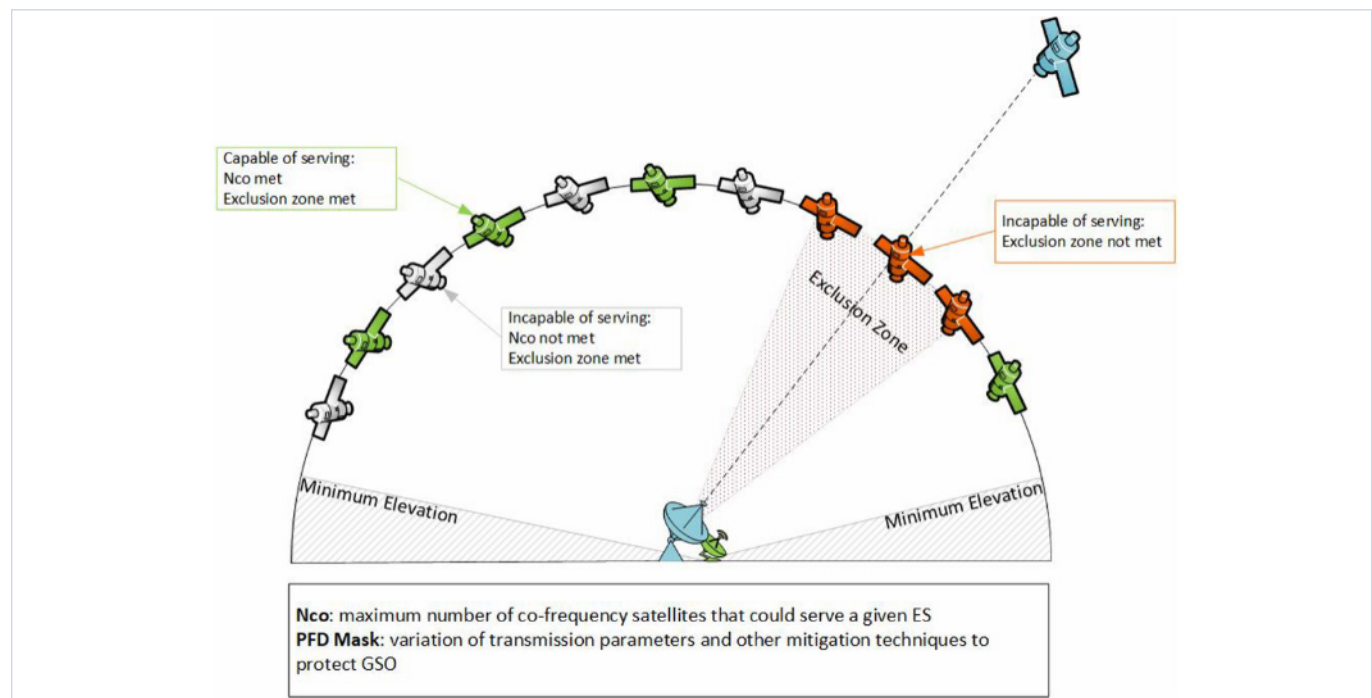
⁸ [Un novedoso modelo de reutilización de frecuencias para la coexistencia de satélites LEO y GEO - SmartSat CRC](#)

Extracto de: [Oficina Espacial 25-157, Comentarios de CCIA sobre la modernización de la compartición del espectro](#)

Para cumplir con los límites actuales de EPFD, los sistemas NGSO deben ajustar su funcionamiento de las siguientes cuatro maneras:

- ✦ Limitar su potencia de RF.
- ✦ Orientar sus antenas para evitar a los sistemas GSO.
- ✦ Actualizar los ángulos de elevación.
- ✦ En general, limitar el número de satélites capaces de prestar servicio a los usuarios en tierra⁹.

Figura 1: Interacción global entre sistemas GSO y NGSO



El impacto acumulativo de las restricciones impuestas a los sistemas NGSO no se limita a una sola región. Por su naturaleza, los satélites NGSO entran y salen constantemente de estas zonas de exclusión necesarias para cumplir con los límites de EPFD mientras orbitan la Tierra. Esto puede desencadenar un efecto en cadena en el que los satélites no pueden prestar servicio a múltiples regiones, lo que conduce a una pérdida significativa de capacidad y a brechas de cobertura para toda la constelación NGSO. Además, esto puede generar la necesidad de lanzar más satélites, lo que aumenta el costo de la constelación en general.

⁹ Grupo de Trabajo 4A de la UIT, Documento de trabajo con miras a un borrador preliminar de nuevo Informe, (19 de abril de 2024) Documento UIT-R R23-WP4A-C-0084, <https://www.itu.int/md/R23-WP4A-C-0084/en> (última consulta el 14 de julio de 2025).

Los ángulos de evitación GSO constituyen un obstáculo para la operación de los sistemas satelitales NGSO¹⁰

Los sistemas NGSO tienen prohibido transmitir dentro de un ángulo de evitación GSO especificado en dirección a una estación terrena GSO. Esta restricción hace que una parte de una constelación NGSO quede inutilizable.

A modo de resumen:

- ❖ con un ángulo de exclusión GSO de 6 grados, la pérdida de cobertura es de aproximadamente un 10 %;
- ❖ con 16 grados, la pérdida de cobertura se triplica hasta alcanzar el 30 %.

Extracto de [la respuesta de Leo sobre EPFD del 27 de agosto de 2025](#):

El expediente ya demuestra un respaldo abrumador a la propuesta de la Comisión de reformar el régimen de compartición del espectro, vigente desde hace décadas, entre los sistemas de satélites GSO y NGSO: los límites de potencia (expresados como “densidad de flujo de potencia equivalente” o “EPFD”) desarrollados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (“UIT”) e incorporados por referencia en las normas de la FCC (los “límites de EPFD de la UIT”).

Reemplazar los límites de EPFD de la UIT, que son excesivamente protectores, por un régimen de protección razonable podría reducir a más de la mitad los costos de despliegue de los sistemas NGSO, al tiempo que aumentaría su capacidad pico hasta en un 700 %³. Solo en la banda Ka, sustituir los límites de EPFD de la UIT por una metodología de rendimiento degradado equivaldría a habilitar 13 100 MHz adicionales de espectro de primera calidad para las operaciones de los sistemas NGSO. Estos beneficios no tendrían consecuencias significativas para las operaciones de los sistemas GSO, ya que la evidencia del expediente no refutada demuestra que estos sufrirían impactos pequeños o incluso indetectables en sus operaciones en la misma frecuencia⁴.

Leo Systems LLC, una filial de propiedad exclusiva de Amazon.com Services LLC (en conjunto, “Amazon”), presenta respetuosamente esta respuesta en relación con el Aviso de Propuesta de Reglamentación (“Aviso”) de la Comisión Federal de Comunicaciones (“FCC” o “Comisión”), que revisa la metodología de compartición del espectro que rige las operaciones de los sistemas de servicio fijo por satélite (“FSS”) en órbita no geoestacionaria (“NGSO”) y los sistemas FSS en órbita geoestacionaria (“GSO”) en las bandas de 10,7-12,7, 17,3-18,6 y 19,7-20,2 GHz.

¹⁰ 37 “¿Qué ángulos de evitación del arco GSO, o restricciones sobre las direcciones en las que los sistemas NGSO FSS pueden orientar sus haces de antena para evitar eventos de interferencia en línea con las redes de satélites GSO, están adoptando los operadores de sistemas NGSO para cumplir con los límites actuales de EPFD, y en qué se diferencian de los ángulos con los que podrían operar bajo límites menos restrictivos?” NPRM ¶ 23. 38, Grupo de Trabajo 4A de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, Documento de trabajo con miras a un borrador preliminar de nuevo Informe (19 de abril de 2024), Documento UIT-R R23-WP4A-C-0084, <https://www.itu.int/md/R23-WP4A-C-0084/en> (última consulta el 14 de julio de 2025).

En sus comentarios, Amazon sostuvo que los límites de EPFD de la UIT “son innecesariamente prescriptivos, están muy desactualizados y son excesivamente protectores respecto de las operaciones GSO”, por lo que deben sustituirse. Amazon explicó que dichos límites se establecieron hace casi treinta años basándose en la tecnología de la década de 1990 y en un sistema NGSO que nunca llegó a implementarse. **Amazon demostró que los límites de EPFD de la UIT son excesivamente protectores: entre 4 y 5 veces más que las protecciones GSO-GSO de la UIT, que resguardan frente a todos los niveles de interferencia salvo los insignificantes, y 276 veces más en la banda Ka superior que los valores recomendados en otros casos por la UIT,9 permitiendo únicamente incrementos indetectables en la indisponibilidad y disminuciones en el rendimiento relativo de, como máximo, el 0,162 % en la banda Ka inferior y el 0,0148 % en la banda Ka superior.**¹⁰ Para expresarlo de manera más concreta, los límites de EPFD de la UIT permiten efectivamente que los sistemas NGSO provoquen aproximadamente un segundo y medio adicional de indisponibilidad en los sistemas GSO cada 50 años. Desde cualquier punto de vista, los límites de EPFD de la UIT protegen a los sistemas GSO no solo frente a interferencias perjudiciales o inaceptables, sino incluso frente a la mera posibilidad de interferencia.

Estos problemas se manifiestan con mayor intensidad en la banda Ka superior. Los límites de EPFD de la UIT exigen niveles de EPFD sustancialmente más bajos que los de la banda Ka inferior la gran mayoría de las veces (por ejemplo, -175,4 dB (W/m²) frente a -166 dB (W/m²)).²¹ Tal y como explicó Amazon en el estudio adjunto a sus comentarios (el “Estudio de Leo sobre EPFD”), esto implica reducir drásticamente los niveles de potencia de los sistemas NGSO cuando se utiliza la banda Ka superior, así como proteger a los operadores de sistemas GSO mucho más allá incluso de la interferencia insignificante que podrían recibir en la banda Ka inferior.²

Extracto de [Mediciones de interferencia en condiciones reales realizadas por SpaceX en apoyo de los estudios sobre los límites de EPFD](#)

En 2024, SpaceX inició una serie de campañas de medición de interferencia en condiciones reales en varios países de las distintas regiones de la UIT. El objetivo es demostrar, mediante datos medidos, que aun cuando se superen los límites de EPFD del Artículo 22, los servicios GSO no sufren interferencias inaceptables. La primera prueba se implementó en Rumania en julio de 2024, se llevó a cabo durante varios meses y concluyó en marzo de 2025. Actualmente hay otras cuatro pruebas en curso en distintos países, y se realizarán varias más a lo largo de 2025. Esta contribución se centra en los resultados de la prueba realizada en Rumania, y SpaceX tiene la intención de presentar el conjunto completo de resultados de todos los países restantes en la reunión del Grupo de Trabajo 4A de octubre de 2025.

Se supone que los datos medidos complementarán el informe sobre los estudios de EPFD actualmente en elaboración por el Grupo de Trabajo 4A.

Starlink es un sistema flexible, y el control de sus emisiones y parámetros operativos puede estar a cargo del centro de control de red. Para esta campaña de pruebas en Rumania, así como para las pruebas en curso y las posteriores, durante el transcurso de la prueba se modificaron las operaciones de Starlink sobre el área de prueba (radio de 15 a 25 km) y se superaron deliberadamente los límites de EPFD.

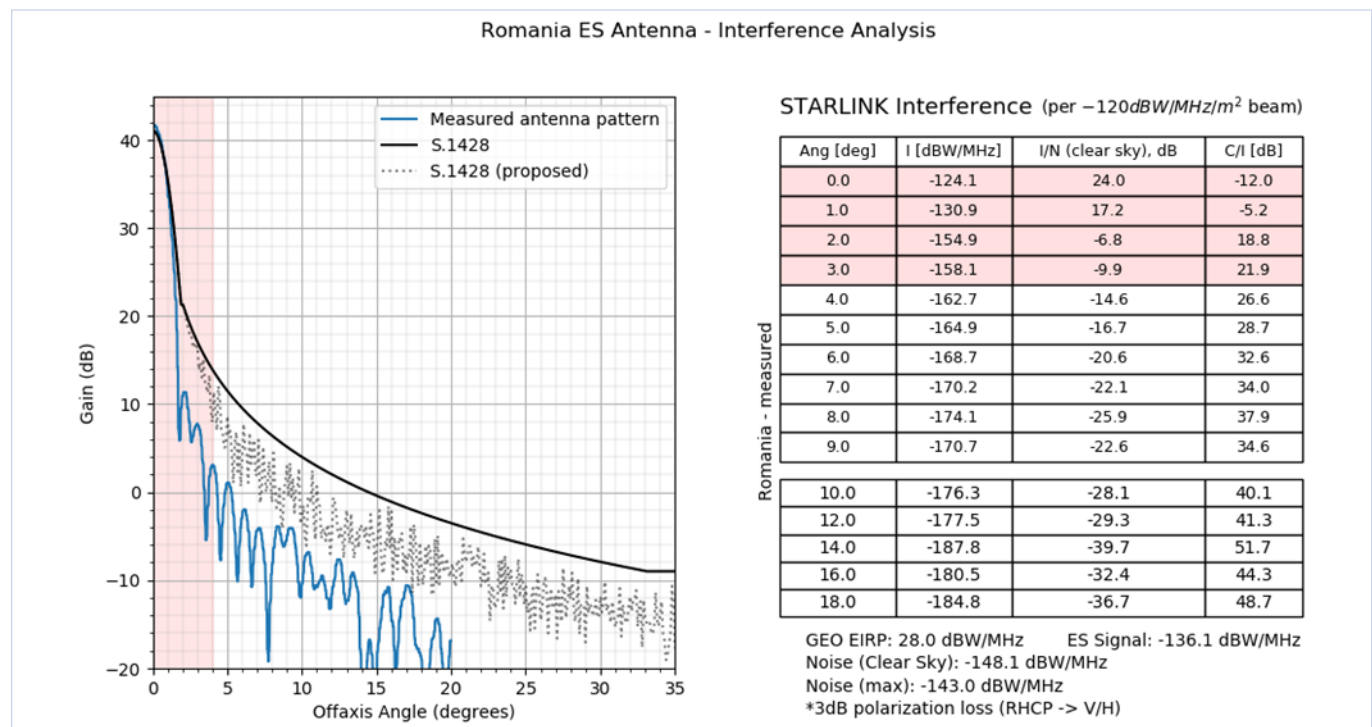
Como satélite GEO, se utilizó para el experimento la señal descendente en banda Ku (de 10,7 a 12,75 GHz) del satélite Intelsat 39, ubicado a 62° E.

Las pruebas en condiciones reales de SpaceX son las más concluyentes en la actualidad, ya que han evaluado mediciones del impacto y la degradación sobre servicios GSO en tiempo real, al tiempo que concluyen con precisión lo que también han demostrado estudios teóricos previos: la degradación general de los servicios GSO es insignificante en comparación con la ganancia de cobertura del servicio NGSO.

Las pruebas de SpaceX han reducido el ángulo alfa de 4 a 2 grados, midiendo el nivel de C/I y la desensibilización. En estas pruebas se consideraron hasta 8 satélites superpuestos simultáneamente, evaluando configuraciones nco4 y nco8 en haces de frecuencia conjunta.

El nivel de interferencia fue bastante mínimo, incluso cuando los haces interferentes se aproximaron hasta 4 grados de distancia de la dirección de apuntamiento de la antenna.

Figura 2: Análisis de interferencia realizado por SpaceX

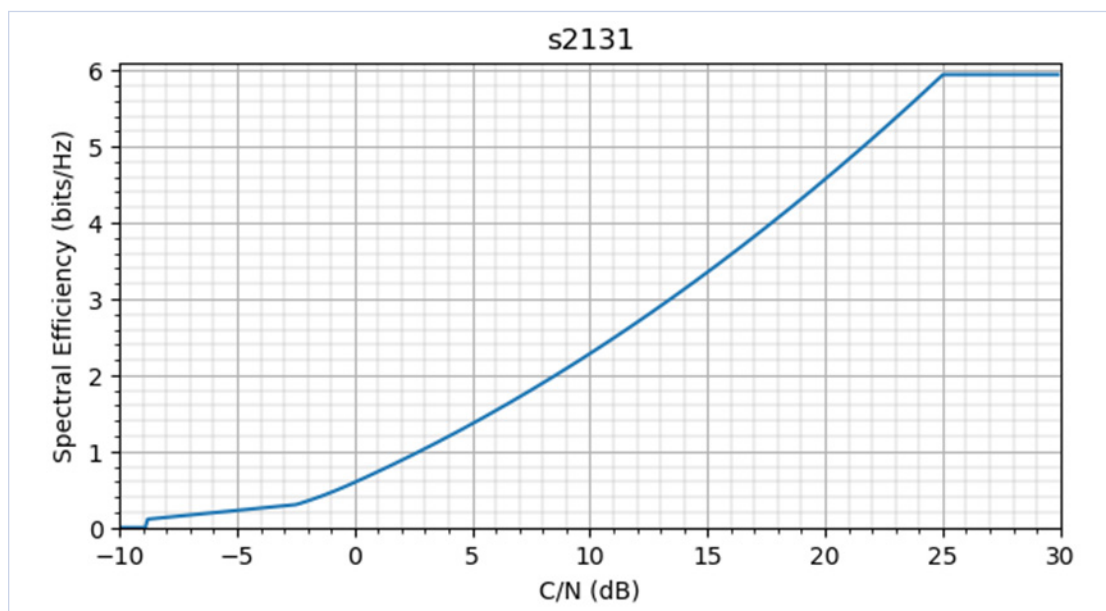


Esta figura muestra la relación teórica entre el ángulo de separación del satélite interferente y la interferencia correspondiente.

Degradación del rendimiento: conclusiones

La tecnología DVB-S2X es compatible con la codificación y modulación adaptativas, diseñadas para operar en un rango de niveles de señal, ajustando la tasa de datos de forma dinámica al entorno de señal. La interferencia de la señal incrementa efectivamente el nivel de ruido del receptor y reduce la relación señal a ruido (C/N). Los distintos sistemas responden de manera diferente a estos cambios; la recomendación [UIT-R S.2131](#) muestra cómo modelar la tasa de datos en función de la intensidad de la señal.

Figura 3: Recomendación UIT-R S.2131 que muestra cómo modelar la tasa de datos en función de la intensidad de la señal



También se ha concluido que una desensibilización de 0,1 dB en la relación C/N, de 15 a 14,9 dB, da como resultado una reducción insignificante de aproximadamente el 0,7 % en la eficiencia espectral, pasando de 3,35 a 3,27 bits/Hz.

Según los límites actuales de EPFD establecidos por la UIT, los sistemas NGSO FSS pueden requerir ángulos de evitación del arco GSO que varían entre 6 y 18 grados, dependiendo del número de satélites en su constelación y del rendimiento de ganancia de sus antenas satelitales. El uso de un ángulo de evitación del arco de 8 grados en demostraciones públicas de EPFD se presentó ante la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT, que realizó una evaluación de este¹¹. Se han llevado a cabo simulaciones de laboratorio para identificar el compromiso adecuado entre el número óptimo de satélites, los planos orbitales y el ángulo

¹¹ Véanse los datos de EPFD y los resultados del examen de EPFD, Sector de Radiocomunicaciones, UIT, <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/Pages/epfdData.aspx>

mínimo de evitación del arco, suponiendo que un ángulo alfa de hasta cuatro grados es suficiente para proteger a las redes GSO de interferencias a corto plazo bajo los nuevos límites de interferencia. La conclusión ha revelado un ahorro del 28 % en gastos de capital en vehículos satelitales para lograr una conectividad continua; dicho de otra manera, los operadores de sistemas NGSO actualmente están pagando un sobre costo del 28 % para lanzar los satélites adicionales necesarios a fin de ofrecer una continuidad del servicio del 100 %, al tiempo que cumplen con los objetivos conservadores de protección a corto plazo establecidos en los límites actuales de EPFD. También habrá un aumento en los costos operativos asociados a la gestión diaria de un sistema NGSO más grande, así como a las instalaciones terrestres, el equipamiento y el personal adicionales que dan soporte a las operaciones de los satélites adicionales¹².

En resumen, la mayoría de las pruebas y los análisis han cuantificado la identificación del ángulo mínimo de evitación del arco GSO que puede conducir a un cierto aumento del nivel de EPFD, lo que afecta la sensibilidad del receptor de estaciones terrenas GSO, así como la eficiencia espectral que afecta la modulación de código adaptativa, debido a valores más elevados de la relación C/I.

No obstante, los límites de EPFD impuestos por la UIT se definen para proteger el rendimiento de DVB-S2X; por lo tanto, se debe abordar el rendimiento de la modulación de códec adaptativa relacionada con DVB-S2X, considerando un nivel específico de EPFD que se alcanza bajo determinados ángulos de evitación GSO y valores específicos de NCO (4-8)

Planes de mitigación previstos

Las estrategias de mitigación actuales se aplican en los ámbitos regulatorios, espaciales, espectrales y de potencia:

Ámbito	Técnica de mitigación	Descripción
Regulatorio	Cumplimiento de EPFD	Los sistemas LEO deben demostrar el cumplimiento de los límites de EPFD de la UIT (por ejemplo, mediante validación por software) para minimizar la interferencia agregada.
Espacial	Zonas de exclusión/ aislamiento	Los satélites LEO pueden implementar un ángulo exclusivo o una zona de exclusión alrededor de la línea de visión de las estaciones terrenas GEO, apagándose o reduciendo la potencia cuando pasan por ella. Esto protege el enlace GEO, pero genera zonas sin cobertura temporales en el sistema LEO.
Espacial	Formación de haces/ Generación de nulos	Tanto los sistemas GEO como LEO pueden utilizar antenas de matriz en fase avanzadas para direccionar dinámicamente los haces, generando nulos (zonas de mínima ganancia) hacia la fuente de interferencia (satélites LEO o terminales GEO).
Potencia	Control de Potencia Adaptativo (APC)	Los satélites LEO pueden ajustar dinámicamente su potencia de transmisión en función de su posición orbital y su proximidad a los sistemas GEO, reduciéndola cuando se encuentran cerca de la línea de visión GEO.

¹² <https://allianceforsatellitebroadband.org/wp-content/uploads/2023/10/The-Economic-Benefits-of-Updating-Regulations-that-Unnecessarily-Limit-Non-Geostationary-Satellite-Orbit-Systems.pdf>

Ámbito	Técnica de mitigación	Descripción
Espectral	Radio Cognitiva (CR)	Los sistemas LEO pueden detectar el espectro y adaptar de forma autónoma sus parámetros operativos (frecuencia, potencia, haz) para aprovechar los huecos espectrales o limitar la interferencia al usuario primario del sistema GEO.
Modulación	Modulación y Codificación Adaptativas (ACM)	Los sistemas GEO pueden emplear una modulación y codificación más robustas y de menor tasa (como en DVB-S2X) durante los períodos de alta interferencia para mantener un enlace, aunque con un rendimiento menor.

7. Objetivos de las pruebas y principales medidas

Límites de densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD)

La principal herramienta regulatoria para gestionar la interferencia de LEO a GEO son los **límites de densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD)**, establecidos por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (Artículo 22).

- ❖ **Definición de EPFD:** la EPFD es una medida diseñada para tener en cuenta la interferencia **agregada** procedente de un sistema de órbita satelital no geoestacionaria (NGSO, por ejemplo, LEO) completo sobre la antena de una estación terrena GEO específica. Es un valor calculado que traduce la suma de las emisiones de todos los satélites LEO visibles, teniendo en cuenta la directividad de la antena GEO, en una densidad de flujo de potencia (PFD) equivalente procedente de una única fuente teórica.
- ❖ **Propósito:** los límites de EPFD son “límites estrictos” que deben cumplir las constelaciones LEO para garantizar la protección de los sistemas GEO existentes **sin** requerir una coordinación individual con cada red GEO en todo el mundo. El cumplimiento se demuestra típicamente durante el proceso de presentación ante la UIT.
- ❖ **Desafío:** los límites originales de EPFD se establecieron cuando los sistemas LEO solo se vislumbraban y los sistemas GEO consideraban casos de uso diferentes a los que utilizan hoy en día. Teniendo en cuenta la estrategia real de compartición del espectro en SATCOM con satélites LEO de múltiples órbitas y el despliegue de diferentes casos de uso de operaciones GSO, como los servicios de banda ancha y las **antenas de usuario de sistemas GEO** más pequeñas y vulnerables, con ganancias de lóbulos laterales relativamente más altas, existe un debate y un esfuerzo en curso en el ámbito de la CMR (Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones) para revisar y, posiblemente, actualizar estos límites a fin de reflejar la tecnología y la densidad actuales.

Niveles absolutos de potencia recibida y relación C/I

La degradación del rendimiento es, fundamentalmente, una cuestión de presupuesto de enlace definida por la **relación portadora-interferencia (C/I)**.

- ❖ Niveles absolutos de potencia recibida: la potencia absoluta recibida (P_R) para la señal GEO deseada se calcula a partir de la potencia isotrópica radiada equivalente del satélite GEO ($EIRP_{GEO}$), la pérdida de trayectoria (L_{Path}) y la ganancia del receptor de la estación terrena GEO GR:

$$P_{R,GEO} = EIRP_{GEO} - L_{Path,GEO} + G_{R,GEO} \quad (\text{en dBW})$$

- ❖ La potencia total de interferencia (I_{LEO}) recibida es la potencia agregada de todos los satélites LEO visibles (i), que varía dinámicamente debido al movimiento de los satélites LEO:

$$I_{LEO} = \sum_i P_{R,i} = \sum_i (EIRP_{LEO,i} - L_{Path,i} + G_{R,i}) \quad (\text{en dBW})$$

- ❖ Relación portadora-interferencia (C/I): esta es la métrica clave que determina la calidad del servicio, donde C es la potencia de portadora recibida ($P_{R,GEO}$) e I es la potencia total de interferencia (I_{LEO}):

$$C/I = P_{R,GEO} - I_{LEO} \quad (\text{en dB})$$

Para mantener el servicio, la relación resultante portadora-interferencia más ruido $C/(I+N)$ debe permanecer por encima de un umbral mínimo (por ejemplo, C/N_{min}) requerido por el esquema de modulación y codificación (por ejemplo, DVB-S2X). Una caída significativa de la C/I debido a la interferencia de sistemas LEO degrada directamente la $C/(I+N)$, y puede provocar una degradación de la calidad del enlace o una interrupción del servicio.

Bandas de frecuencia y contexto del servicio

- ❖ **Banda Ku:** ~10,7–12,75 GHz (enlace descendente), ~13,75–14,5 GHz (enlace ascendente)
- ❖ **Banda Ka:** ~17,7–21,2 GHz (enlace descendente), ~27,5–31 GHz (enlace ascendente)

Servicios GSO existentes

- ❖ Servicio fijo por satélite (FSS)
- ❖ Servicio de radiodifusión por satélite (BSS)
- ❖ Sistemas GEO de satélites de alto rendimiento (HTS)

Estos sistemas dependen de un espaciamiento orbital estricto, un apuntamiento estable de antenas y entornos de interferencia predecibles.

Supuestos numéricos base y parámetros de referencia

Para garantizar la reproducibilidad y la relevancia regulatoria, este estudio adopta un conjunto de **supuestos numéricos representativos, pero no específicos de ningún sistema**, coherentes con las presentaciones públicas de sistemas NGSO y las recomendaciones UIT-R. Estos valores son ilustrativos y pueden adaptarse a análisis específicos de operadores.

Parámetros de referencia de constelaciones NGSO (LEO)

- ✦ **Tipo de órbita:** LEO circular
- ✦ **Altitud:** 550–1200 km (referencia nominal: 600 km)
- ✦ **Inclinación:** 53°–98° (casos de referencia: inclinación media y casi polar)
- ✦ **Número de satélites:** 1000–10 000 (densidad de referencia: 4000 satélites)
- ✦ **Planos orbitales:** 20–80
- ✦ **Velocidad satelital:** ~7,5 km/s

Supuestos de transmisión de los satélites NGSO

- ✦ **Bandas de frecuencia:**
 - ✦ Ku DL: 10,7–12,75 GHz
 - ✦ Ka DL: 17,7–21,2 GHz
 - ✦ Ka UL: 27,5–30,0 GHz
- ✦ **Densidad máxima de EIRP:**
 - ✦ Ku: 10–20 dBW/Hz
 - ✦ Ka: 15–25 dBW/Hz
- ✦ **Control de potencia:** dinámico, a nivel de haz
- ✦ **Huella del haz:** 100–500 km de diámetro (dependiendo de la altitud)

Características de la antena NGSO

- ✦ **Tipo de antena:** matriz en fase
- ✦ **Ganancia del lóbulo principal:**
 - ✦ Ku: 30–38 dBi
 - ✦ Ka: 38–45 dBi
- ✦ **Envoltorio de los lóbulos laterales:** conforme a los patrones de referencia de la UIT-R S.1528/S.672
- ✦ **Rango de apuntamiento del haz:** $\pm 60^\circ$ fuera del nadir

Parámetros del sistema de referencia GSO

- ✦ **Órbita:** GEO a 35 786 km (se considera MEO cuando proceda)
- ✦ **Espaciamiento orbital:** 2°–3°
- ✦ **Servicio:** FSS/HTS

❖ **EIRP típica de un satélite GEO:**

- ❖ Ku: 50–60 dBW
- ❖ Ka: 60–70 dBW

Supuestos de la antena de la estación terrena GSO

❖ **Diámetro de la antena:**

- ❖ Ku: 1,2–2,4 m
- ❖ Ka: 0,6–1,8 m

❖ **Ganancia máxima de la antena:**

- ❖ Ku: 42–50 dBi
- ❖ Ka: 48–60 dBi

❖ **Patrón de radiación:** envolventes de referencia de la UIT-R S.465/S.580

❖ **Precisión de apuntamiento:** $\leq 0,1^\circ$

Límites de EPFD y criterios de protección

- ❖ **Base regulatoria de los límites de EPFD:** Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT-R, Artículo 22
- ❖ **Métrica de protección:** degradación de C/I a largo plazo

8. Escenarios fundamentales de interferencia

Interferencia NGSO → GSO

- ❖ **Interferencia en el enlace ascendente:** terminales de usuario o gateways NGSO que iluminan satélites GEO o estaciones terrenas GEO.
- ❖ **Interferencia en el enlace descendente:** satélites NGSO que transmiten hacia los lóbulos principales o laterales de las antenas de las estaciones terrenas GEO.

Efectos de interferencia agregada

- ❖ Los interferentes individuales de los sistemas NGSO pueden ser insignificantes, pero la **interferencia agregada** proveniente de cientos o miles de satélites se convierte en la principal fuente de degradación.
- ❖ La interferencia agregada variable en el tiempo debido al movimiento de los satélites es una distinción clave con respecto a la coordinación tradicional GSO-GSO.

Eventos de alineación y de casi alineación

- ❖ Períodos en los que los satélites NGSO se alinean con el arco GEO desde la perspectiva de una estación terrena GEO.
- ❖ Estos eventos pueden producir picos de interferencia de corta duración, pero de gran impacto.

9. Características clave de los sistemas NGSO que afectan la interferencia

Parámetros orbitales

- ❖ Altitud (típicamente 500–1500 km para LEO)
- ❖ Inclínación y número de planos orbitales
- ❖ Velocidad angular del satélite respecto al arco GEO

Altitudes más bajas incrementan la potencia recibida, pero reducen el tiempo de permanencia; inclinaciones mayores incrementan los cruces del arco GEO.

Densidad de la constelación

- ❖ Número total de satélites
- ❖ Distribución espacial en latitud y longitud
- ❖ Visibilidad simultánea desde una estación terrena GEO dada

Las constelaciones de alta densidad incrementan significativamente la probabilidad de interferencia agregada.

Características de transmisión

- ❖ Densidad de EIRP (dBW/Hz)
- ❖ Control de potencia adaptativo
- ❖ Salto de haz y conformación dinámica de haz

Los haces altamente direccionales reducen la interferencia promedio, pero pueden incrementar los picos de interferencia durante los cruces de haz.

Patrones de antena

- ❖ Niveles de lóbulos laterales de la antena satelital
- ❖ Rendimiento de la antena del terminal de usuario
- ❖ Cumplimiento de las envolventes de patrones de antena de la UIT-R

El comportamiento de los lóbulos laterales suele ser el factor dominante durante los eventos de interferencia.

Uso del espectro y formas de onda

- ✦ Ancho de banda de canal y máscaras espectrales
- ✦ Formas de onda basadas en OFDM y recrecimiento espectral
- ✦ Comportamiento de sincronización y temporización

La fuga espectral y el filtrado imperfecto pueden agravar la interferencia entre canales adyacentes.

10. Efectos de canal y propagación

Pérdida de trayectoria en espacio libre (FSPL)

- ✦ Una menor altitud NGSO reduce la FSPL en comparación con GEO, lo que aumenta el potencial de interferencia instantánea.

Efectos atmosféricos

- ✦ Atenuación por lluvia (crítica en la banda Ka)
- ✦ Centelleo y absorción gaseosa

Si bien la lluvia puede reducir la interferencia, no puede considerarse un mecanismo confiable de mitigación.

Desajuste de polarización

- ✦ Discriminación de polarización cruzada (XPD)
- ✦ Errores dinámicos de alineación de polarización en enlaces NGSO

11. Impacto en el rendimiento de sistemas GSO

Relación portadora-interferencia (C/I)

- ✦ Degradación de la relación C/I a corto plazo durante eventos de alineación
- ✦ Reducción de la disponibilidad a largo plazo debido a eventos repetidos

Métricas de calidad de servicio

- ✦ Pérdida de rendimiento
- ✦ Aumento de la tasa de error de paquetes
- ✦ Erosión del margen del enlace

Consecuencias operativas

- ❖ Reducción en la modulación y la codificación adaptativas (ACM)
- ❖ Aumento de los requisitos de diversidad de gateways
- ❖ Reducción de las garantías de disponibilidad del servicio

12. Técnica de mitigación

Medidas de mitigación en sistemas NGSO

- ❖ Control de potencia y silenciamiento de haces durante cruces del arco GEO
- ❖ Zonas de evitación del arco GEO
- ❖ Programación adaptativa y conformación de haces

Medidas de mitigación en sistemas GSO

- ❖ Mejora de la discriminación de antenas de estaciones terrenas
- ❖ Diversidad de sitio y reubicación de gateways
- ❖ Mecanismos de detección y reporte de interferencias

Coordinación a nivel de sistema

- ❖ Intercambio de efemérides en tiempo real
- ❖ Algoritmos cognitivos de evitación de interferencias
- ❖ Interfaces de coordinación entre sistemas

13. Marco matemático para la evaluación de interferencia

EPFD y métricas regulatorias

La principal métrica regulatoria que rige la coexistencia entre sistemas NGSO y GSO es la **densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD)**, definida como la densidad de flujo de potencia agregada producida en la antena de una estación terrena GSO por todos los satélites NGSO visibles, ponderada por la ganancia de la antena en sus respectivas direcciones. La EPFD se calcula de la siguiente manera:

$$EPFD = \sum (PFD_i \cdot G_{ES}(\theta_i, \varphi_i))$$

donde PFD_i es la densidad de flujo de potencia del i -ésimo satélite NGSO y G_{ES} es la ganancia de la antena de la estación terrestre GSO hacia ese satélite. Se deben considerar tanto la **EPFD ↓** (del espacio a la Tierra) como la **EPFD ↑** (de la Tierra al espacio), según la dirección del enlace.

El Artículo 22 de la UIT-R especifica límites estadísticos de EPFD (por ejemplo, que no se excedan durante más del X % del tiempo), lo que requiere un análisis en el dominio del tiempo y probabilístico, en lugar de una evaluación estática de peor caso.

Relación portadora-interferencia (C/I)

El impacto en el rendimiento del sistema se evalúa típicamente mediante lo siguiente:

$$C/I = C/(I_{\text{GSO}} + I_{\text{NGSO,agg}})$$

donde $I_{\text{NGSO,agg}}$ representa la interferencia NGSO agregada que varía en el tiempo. Se deben evaluar tanto la degradación a corto plazo durante eventos de alineación como la pérdida de disponibilidad a largo plazo.

Modelado de la interferencia agregada

La interferencia agregada se modela sumando las contribuciones de todos los satélites NGSO visibles simultáneamente, teniendo en cuenta lo siguiente:

- ❖ Efemérides satelitales
- ❖ Apuntamiento y programación de haces
- ❖ Control dinámico de potencia
- ❖ Acoplamiento de patrones de antena

14. Metodología de simulación

Simulación en el dominio del tiempo

- ❖ Las posiciones satelitales se actualizan con una resolución adecuada; la resolución elegida debe permitir determinar los tiempos de permanencia de los haces de los sistemas NGSO y los eventos de alineación, sin dejar de ser computacionalmente manejable
- ❖ La visibilidad y la ganancia de antena se calculan dinámicamente
- ❖ La interferencia agregada se computa en cada paso de tiempo

Análisis de peor caso y estadístico

- ❖ Identificación de eventos de alineación
- ❖ Análisis de excedencia del tiempo X % para EPFD
- ❖ Estimación de la disponibilidad del servicio a largo plazo

Propagación orbital y geometría

- ❖ Las órbitas de los satélites NGSO se propagan mediante el uso de modelos SGP4 o keplerianos de dos cuerpos.

- ✦ Los satélites GEO se modelan como fijos en el marco inercial centrado en la Tierra.
- ✦ En cada paso de tiempo:
 - ✦ La visibilidad del satélite se calcula en relación con la máscara de elevación de la estación terrena GSO.
 - ✦ Se calculan los ángulos fuera de eje hacia el arco GEO.

Hay dos parámetros geométricos fundamentales: la **máscara de elevación de la estación terrena GSO** y el **ángulo fuera de eje respecto al arco GEO**.

La máscara de elevación de la estación terrena GSO define el ángulo de mínimo de elevación por encima del horizonte local en el que se considera que una estación terrestre GSO puede recibir la señal de un satélite. Modela las obstrucciones físicas (terreno, edificios), las restricciones mecánicas de la antena y las prácticas operativas de protección contra interferencias. Los valores típicos son los siguientes: Estaciones terrenas gateway: entre 5° y 10° y Terminales de usuario: entre 10° y 15°.

Para un satélite NGSO dado i en el momento t , la visibilidad se determina de la siguiente manera:

1. Calcular el vector de posición del satélite en coordenadas centradas en la Tierra y fijas a la Tierra (ECEF).
2. Transformar el vector al sistema de coordenadas topocéntrico local (Este-Norte-Arriba) de la estación terrena GSO.
3. Calcular el ángulo de elevación:

$$\varepsilon_i(t) = \arcsin(r_{up}/|r|)$$

4. Se considera que el satélite es visible si:

$$\varepsilon_i(t) \geq \varepsilon_{\text{mask}}$$

Solo los satélites que superan esta prueba de visibilidad contribuyen a los cálculos de interferencia. Este paso limita significativamente el número de satélites NGSO que contribuyen simultáneamente y es esencial para la eficiencia computacional.

El ángulo fuera de eje hacia el arco GEO cuantifica qué tan alejado se encuentra un satélite NGSO interferente respecto de la dirección principal de apuntamiento de la antena de la estación terrena GSO, la cual está nominalmente alineada con el satélite GEO objetivo.

Para cada satélite NGSO visible:

1. Definir el vector unitario de la dirección de apuntamiento de la antena de la estación terrena GSO, dirigido hacia el satélite GEO deseado.
2. Definir el vector unitario desde la estación terrena hacia el satélite NGSO.

3. Calcular el ángulo fuera de eje:

$$\theta_i(t) = \arccos(u_{GEO} \cdot u_{NGSO,i})$$

Este ángulo determina directamente la ganancia de la antena aplicada a través del patrón de referencia de la UIT-R.

Dado que los satélites GEO ocupan un arco estrecho ($\sim \pm 0,1^\circ$ en latitud, extendido en longitud), la severidad de la interferencia aumenta cuando un satélite NGSO se ubica próximo a dicho arco visto desde la estación terrena:

❖ **Evento de alineación:** $\theta_i(t) \leq 1^\circ$

❖ **Evento de casi alineación:** $1^\circ < \theta_i(t) \leq 3^\circ$

Durante estos eventos, la antena GSO opera en la región del lóbulo principal cercano o del primer lóbulo lateral, lo que genera niveles máximos de interferencia.

Por lo tanto, el cálculo de este ángulo fuera de eje es el factor determinante principal de lo siguiente:

- ❖ El acoplamiento de la ganancia de la antena
- ❖ Los eventos pico de EPFD
- ❖ El comportamiento estadístico de las distribuciones de interferencia

Cálculo de la interferencia por satélite, para cada satélite NGSO i en el momento t :

- ❖ Calcular la pérdida de trayectoria en espacio libre (FSPL)
- ❖ Aplicar pérdidas atmosféricas (gaseosas + lluvia, si se consideran)
- ❖ Calcular la potencia de interferencia recibida:

$$I_i(t) = EIRP_i(t) - FSPL_i(t) - L_a t m + G_E S(\theta_i(t))$$

Todas las cantidades se calculan de manera consistente en unidades lineales o logarítmicas.

Interferencia agregada y EPFD

- ❖ La interferencia agregada se obtiene de la siguiente manera:

$$I_{agg}(t) = \sum I_i(t)$$

- ❖ La EPFD se calcula normalizando la potencia recibida agregada por el área efectiva de la antena y el ancho de banda.
- ❖ Las series temporales de EPFD(t) y C/I(t) se almacenan para su posterior análisis estadístico.

15. Recapitulación del capítulo

La interferencia generada por constelaciones LEO de sistemas NGSO sobre servicios GSO existentes en bandas satelitales K constituye un problema multidimensional y variable en el tiempo, dominado por efectos agregados y dinámicas a escala de constelación. Una evaluación sólida requiere un análisis estadístico basado en la EPFD, un modelado realista de las antenas y simulaciones en el dominio del tiempo. A medida que las bandas Ku y Ka se vuelven cada vez más congestionadas y los sistemas NGSO evolucionan hacia paradigmas 5G NTN, serán esenciales mecanismos dinámicos y cooperativos de coexistencia para garantizar una compartición sostenible del espectro y la protección a largo plazo de los servicios GSO.

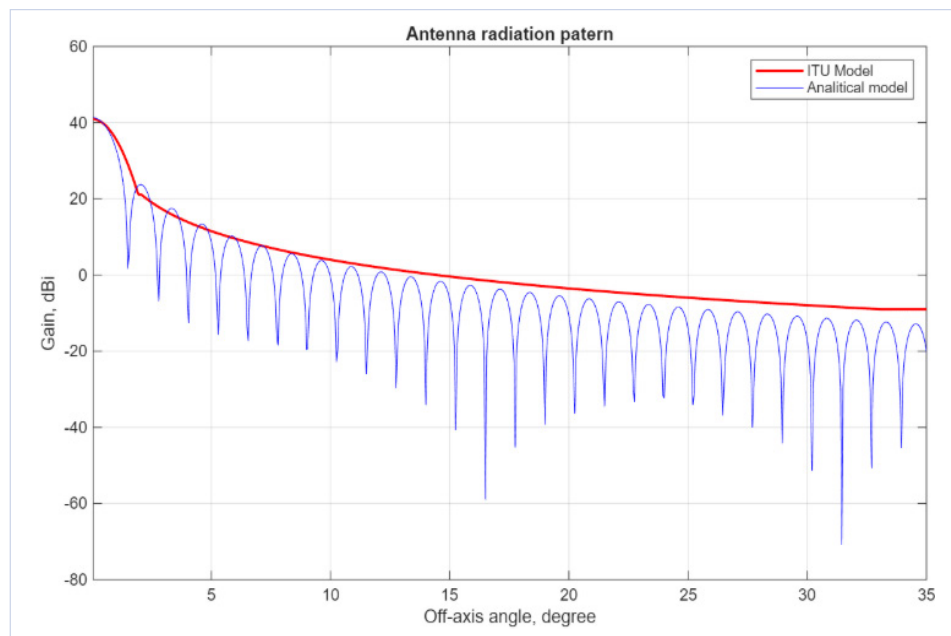
16. Descripción de la simulación del modelo

Modelado de los patrones de antena de una estación terrena GSO

El cálculo preciso de la EPFD depende fundamentalmente de la caracterización del patrón de antena. Para las antenas parabólicas se dispone de un patrón teórico descrito mediante una ecuación de forma cerrada. La UIT proporciona patrones de referencia en varias de sus Recomendaciones:

- ✦ UIT-R S.465 Patrones de antenas de estaciones terrenas para el FSS
- ✦ UIT-R S.1428 Patrones de referencia para antenas de estaciones terrenas en el FSS
- ✦ UIT-R F.699 Patrones de referencia para antenas del servicio fijo

Figura 4: Modelo analítico y de la UIT del patrón de antena parabólica de 0,7 m de diámetro a 19,7 GHz



En la Figura 4, se muestra el patrón de antena analítico y del modelo de la UIT para una antena parabólica de 0,7 m de diámetro a una frecuencia de 19,7 GHz, utilizada en simulaciones como antena de estación terrena GSO.

Estos patrones emplean funciones analíticas por tramos para describir las regiones del haz principal, los lóbulos laterales y los lóbulos posteriores. Sin embargo, el rendimiento real de la antena puede desviarse de los patrones de referencia debido a las tolerancias de fabricación, el montaje y los efectos del radomo.

La comparación entre el modelo analítico (azul) y el de la UIT-R S.1428 (rojo) para la antena parabólica de 0,7 m a 19,7 GHz es ilustrativa. La figura muestra una buena concordancia en el lóbulo principal, pero una divergencia notable en la región del lóbulo lateral (más allá de aproximadamente 5 grados fuera del eje), donde el modelo de la UIT proporciona una envolvente de lóbulo lateral más conservadora (más alta).

El modelado de antenas satelitales plantea desafíos adicionales. Los satélites modernos emplean matrices en fase con haces direccionables electrónicamente, lo que genera patrones de radiación complejos y variables en el tiempo que pueden alterar sustancialmente las distribuciones de la EPFD.

Con el fin de evaluar las ventajas adicionales que aportan las antenas de matrices en fase en el aislamiento de interferencias, se han estudiado y simulado dos modelos de antenas satelitales.

Simulación basada en una antena satelital omnidireccional

Para tener en cuenta el peor de los casos, se consideró una antena satelital omnidireccional y se supuso que ilumina la antena receptora terrena en posiciones angulares que maximizan la EPFD resultante. La decisión de modelar la antena del satélite NGSO como omnidireccional es una suposición válida para el peor de los casos. Sin embargo, vale la pena cuantificar cuánto esta aproximación sobreestima la EPFD en comparación con un patrón realista de antena satelital con matriz en fase. Para el evento de interferencia dominante (satélite NGSO pasando cerca del arco GEO), el haz del satélite está prestando servicio a usuarios en tierra y, por lo general, no apunta hacia la estación terrena GSO. El ángulo fuera de eje en el satélite hacia la estación terrena GSO depende de dónde el haz del satélite esté prestando servicio a los usuarios y de la posición del satélite con respecto a la estación terrena GSO.

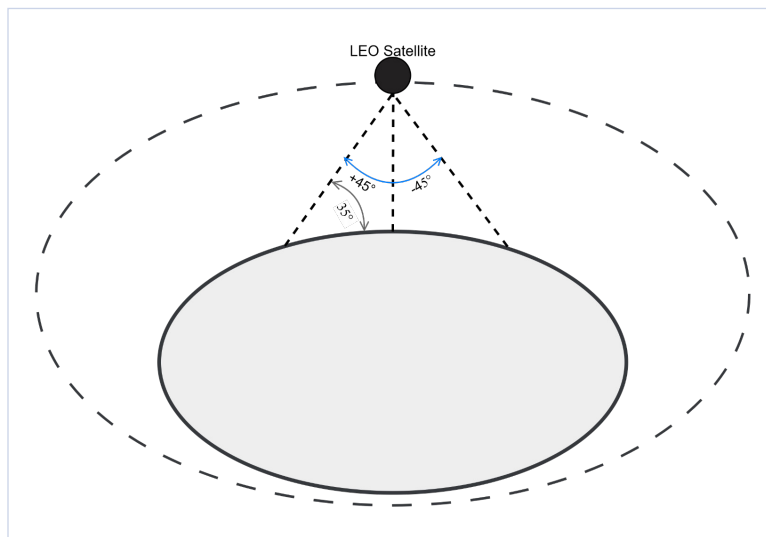
Desde un punto de vista estadístico, en el caso de un satélite multihaz con entre 8 y 16 haces simultáneos, cada uno con un ancho de entre 3 y 5 grados, que cubren una huella de aproximadamente ± 25 a ± 45 grados desde el nadir, la probabilidad de que un haz apunte a menos de 3 grados de la estación terrena GSO es de aproximadamente entre el 5 % y el 15 % del tiempo. Durante el 85 al 95 % restante del tiempo, el ángulo fuera de eje suele ser de entre 10 y 25 grados, lo que produce una sobreestimación promedio estadísticamente representativa de unos 20 a 25 dB.

La suposición de una antena NGSO omnidireccional sobreestima la EPFD agregada en aproximadamente 20 dB en promedio, en comparación con una antena típica de matriz en fase de la banda Ka con una ganancia pico de 36 dBi y un ancho de haz puntual de 3 a 5 grados. Esta sobreestimación oscila entre 0 dB (cuando el haz del satélite apunta directamente a la estación víctima) y más de 35 dB (cuando el haz se aleja). Por lo tanto, la suposición omnidireccional introduce un margen de conservadurismo que limita simultáneamente todos los escenarios posibles de apuntamiento del haz, pero se espera que los niveles reales de interferencia bajo la programación operativa del haz sean significativamente más bajos.

Simulación basada en el modelo de patrón de antena multihaz NGSO

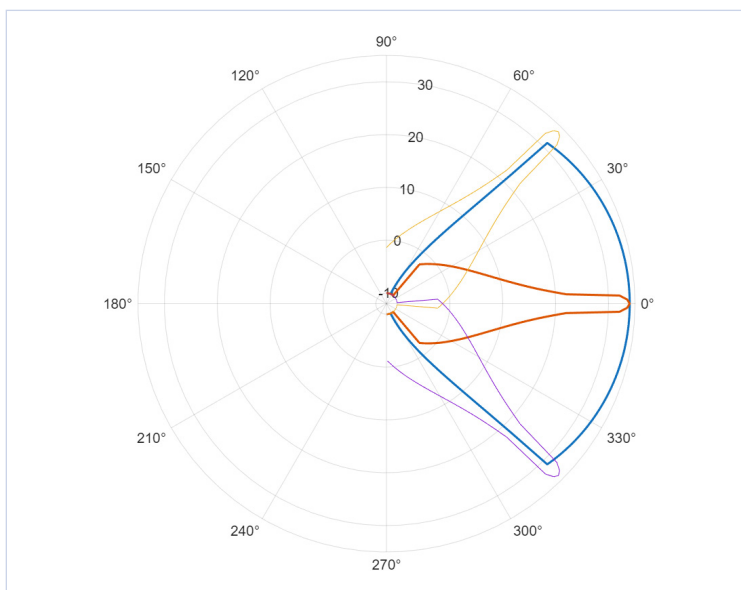
En la segunda serie de simulaciones, consideramos un patrón de antena de satélite NGSO multihaz como la envolvente de los múltiples haces, que cubre el mismo rango de ángulo de apuntamiento y tiene la misma ganancia que una antena de haz único del escenario multihaz. Por lo general, las antenas NGSO utilizan múltiples haces direccionables para dar servicio a los usuarios en el área de cobertura. En un escenario multihaz, cada haz tiene un ancho de entre 3° y 5°, cubriendo una huella de aproximadamente ± 25 a ± 45 grados, medida desde el nadir.

Figura 5: Rango de apuntamiento de los haces de usuario para una antena satelital de matriz en fase



En el lóbulo principal, la ganancia de la antena se modela con forma parabólica fuera del ángulo de 3 dB, la ganancia es logarítmica según la UIT-R S.1428, y la ganancia mínima es de -10 dB.

Figura 6: Patrón de antena de un satélite NGSO multihaz como envoltorio de los múltiples haces



En la Figura 6, se muestra, en coordenadas polares, la superposición de dos patrones de antena: en azul, la envoltura considerada en las simulaciones; y en magenta, rojo y amarillo, los haces estrechos que apuntan a 0 grados y al ángulo máximo de barrido hacia la izquierda y la derecha.

Además del ángulo fuera de eje, que representa el ángulo entre los vectores estación terrena – GSO y estación terrena – NGSO, y que se utiliza para calcular la ganancia de la antena de la estación terrena, se calcula el ángulo entre los vectores NGSO–centro de la Tierra (nadir) y NGSO–estación terrena, para considerar la ganancia de la antena NGSO.

La suposición del patrón de antena NGSO basado en la envoltura también introduce un margen de conservadurismo, pero se espera que proporcione mayor precisión en comparación con el patrón de antena omnidireccional.

Metodología de cálculo de la EPFD y marco de simulación

Descripción general del enfoque de evaluación de la EPFD

La evaluación de la densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD) con fines de cumplimiento regulatorio se lleva a cabo mediante simulación numérica, lo que refleja la complejidad y la naturaleza variable en el tiempo de los sistemas de satélites no geoestacionarios. Las soluciones analíticas de forma cerrada generalmente no son aplicables debido a la geometría dinámica de la constelación, la directividad de las antenas y los mecanismos de interferencia agregada involucrados.

Por lo general, se pueden adoptar dos enfoques de simulación complementarios:

- ❖ Una simulación determinista con resolución temporal, basada en datos orbitales reales de los satélites y en una geometría definida de la estación víctima, destinada a capturar el comportamiento de la EPFD en el peor de los casos y su variación temporal en condiciones operativas realistas.
- ❖ Un marco de simulación probabilístico, destinado a evaluar las características estadísticas de la EPFD en un amplio conjunto de geometrías de satélite-estación receptora.

A continuación solo se considera el primer modelo.

Supuestos y modelo del sistema

Se han considerado los siguientes supuestos:

- ❖ Características de la red satelital
 - ❖ Sistema de satélites no geoestacionarios que opera en la banda de frecuencias considerada
 - ❖ Asunción de la constelación completa
 - ❖ Transmisión continua a potencia nominal
 - ❖ Patrones de antena satelital modelados mediante envolventes de ganancia para casos de uso omnidireccionales y direccionales.
- ❖ Estación terrena receptora
 - ❖ Estación terrena fija ubicada en una posición geográfica definida
 - ❖ Antena receptora modelada mediante un patrón de referencia apropiado de la UIT-R
 - ❖ No se considera apantallamiento por terreno ni pérdidas por obstáculos, a menos que se indique explícitamente
- ❖ Modelo de propagación
 - ❖ Pérdida de propagación en espacio libre basada en la distancia inclinada instantánea
 - ❖ Pérdidas atmosféricas ignoradas o limitadas de forma conservadora
 - ❖ No se aplican mecanismos adicionales de desvanecimiento ni de sombreado

Estas suposiciones garantizan una evaluación conservadora y transparente de la EPFD.

Metodología de simulación determinística de EPFD

La simulación determinística tiene como objetivo evaluar la evolución temporal de la EPFD en una estación receptora GSO específica, en respuesta a una población de satélites conocida y variable en el tiempo, bajo condiciones geométricas definidas explícitamente.

Este enfoque resulta especialmente útil para hacer lo siguiente:

- ❖ Identificar eventos de EPFD máximos
- ❖ Comprender la dinámica temporal de la interferencia
- ❖ Demostrar el cumplimiento en escenarios realistas de peor caso

Datos orbitales y selección de satélites

Las posiciones de los satélites se derivan a partir de datos de elementos de dos líneas (TLE), que representan todos los satélites disponibles pertenecientes al sistema NGSO considerado. El uso de la propagación basada en TLE garantiza que la simulación refleje configuraciones orbitales realistas y su evolución temporal.

En cada paso temporal de la simulación:

- ❖ Todos los satélites se propagan a sus posiciones instantáneas.
- ❖ La visibilidad se determina en función de las restricciones de elevación y del horizonte radioeléctrico.
- ❖ Solo los satélites que cumplen los criterios de visibilidad se incluyen en el cálculo de EPFD.
- ❖ No se aplica ningún filtrado adicional basado en la orientación de los haces ni en la asociación de servicio, lo que garantiza una inclusión conservadora de las estaciones espaciales que podrían causar interferencia.

Geometría del receptor víctima

El receptor víctima se modela como una estación terrena de un sistema satelital geoestacionario, caracterizada por lo siguiente:

- ❖ Una ubicación fija de la estación terrena
- ❖ Una estación espacial GEO seleccionada de tal manera que permanezca visible a un ángulo de elevación medio durante todo el período de simulación

Se supone que la antena receptora de la estación víctima sigue continuamente al satélite GEO seleccionado, y su respuesta fuera del eje hacia los satélites LEO que causan interferencia se calcula en consecuencia.

Resolución temporal y duración de la simulación

La simulación determinística se lleva a cabo durante un período continuo de 24 horas, seleccionado para hacer lo siguiente:

- ❖ Captar las variaciones diurnas
- ❖ Incluir múltiples pasadas de satélites LEO
- ❖ Observar posibles agrupamientos de eventos de interferencia

La resolución temporal se estableció en 1 segundo para la simulación basada en el modelo de patrón de antena multihaz NGSO, debido a la rápida variación del ángulo fuera del eje; mientras tanto, para la simulación basada en la antena satelital omnidireccional, se eligió una resolución temporal de 5 segundos, lo suficientemente detallada para capturar con precisión las variaciones rápidas de EPFD debido al movimiento satelital y a las variaciones de ganancia de la antena omnidireccional.

Procedimiento de cálculo de EPFD

En cada paso temporal de la simulación:

- ❖ Se calculan el ángulo de elevación y la distancia inclinada entre cada satélite LEO visible y la estación terrena receptora.
- ❖ Se determinan los ángulos fuera del eje relativos tanto a la antena transmisora LEO como a la antena receptora GEO.
- ❖ Se calculan las contribuciones individuales de EPFD mediante la formulación teórica.
- ❖ Todas las contribuciones individuales se suman en el dominio lineal para obtener la EPFD instantánea.
- ❖ La serie temporal de EPFD resultante se almacena para su posterior procesamiento y análisis estadístico.

Representación de los resultados determinísticos

Los resultados de la simulación determinística se presentan en forma de:

- ❖ Gráfico de visibilidad de satélites NGSO en función del tiempo
- ❖ Gráficos de EPFD de cada satélite NGSO individual en función del tiempo
- ❖ Valores agregados de EPFD durante el período de simulación
- ❖ Análisis estadístico a lo largo del tiempo

Los parámetros del escenario de simulación se resumen en la Tabla 1. Cabe señalar que la EIRP tanto para los satélites GSO como NGSO se expresa en dB/W/1 MHz; sin embargo, en el gráfico de resultados se ha escalado a un ancho de banda de 40 kHz para cumplir con las normas de la UIT.

El satélite GSO se eligió al azar; el único criterio fue que tuviera una elevación adecuada a nivel de la ubicación de la estación terrena. Se consideran dos satélites GEO: SES-22 a 139,0° Oeste para ubicaciones de alta latitud, pero misma longitud (por ejemplo, Anchorage y Seattle), y SES-2 a 87° Oeste para ubicaciones de menor latitud, lo que da lugar a elevaciones razonables ($> 10^\circ$). La elección de dos satélites GEO para la evaluación de EPFD, en particular para un par de ubicaciones, podría dar lugar a algunas discrepancias aparentes en el modelo global, lo que constituye un compromiso inevitable del escenario de simulación.

Síntesis de las condiciones de los escenarios de simulación:

Tabla 1: Síntesis de las condiciones de los escenarios de simulación

Sistema GSO	Frecuencia GSO	19,2 GHz
	EIRP del sistema GSO	42,54 dBW/MHz
	Tamaño de la antena GSO	0,70 m
	Modelo de antena GSO	UIT-R S.1428
	Ganancia máxima de recepción de la antena GSO	40,95 dBi
	Elevación GSO	20,1° – 57,8° depende de la latitud de la estación terrena
Sistema NGSO	Número de satélites NGSO	180
	EIRP del sistema NGSO	19,86 dBW/MHz
	Antena NGSO	Omnidireccional/Direccional
	Altitud NGSO	590, 610, 630 km
	Inclinación orbital NGSO	33°, 42°, 51,9°

La visibilidad de los satélites NGSO con respecto a una estación terrena GSO en Honolulu se muestra como ejemplo en la Figura 5, para el tiempo total de simulación de 24 horas, y de forma resumida durante aproximadamente 2 horas en la Figura 6. El agrupamiento de la constelación de satélites es claramente visible.

El número de satélites visibles simultáneamente se representa en las Figuras 7 y 8 para dos ubicaciones (Anchorage y Honolulu). Las estadísticas de los satélites NGSO visibles muestran un mínimo de 2 satélites visibles para 8 ubicaciones, 1 para una ubicación y 0 para 3 ubicaciones. El número máximo de satélites visibles simultáneamente se sitúa entre 17 y 23, con un promedio para todas las ubicaciones de 20,42.

Tabla 2: Estadísticas de los satélites NGSO visibles

	Mínimo (en todas las ubicaciones)	Máximo	Promedio
Satélites visibles promedio	7,01 (Anchorage)	10,50 (Denver)	9,33
Satélites visibles mínimos	0 (3 ubicaciones)	2 (8 ubicaciones)	1,42

	Mínimo (en todas las ubicaciones)	Máximo	Promedio
Satélites visibles máximos	17 (San Juan)	23 (Denver)	20,42

La fuerte dependencia de la latitud es claramente visible. Las ubicaciones de mayor latitud (Anchorage a 61,1; Seattle a 47,6) y de muy baja latitud (San Juan a 18,4; Honolulu a 21,3) muestran una visibilidad promedio más baja (entre 7 y 9 satélites), en consonancia con las inclinaciones orbitales de 33 a 51,9 grados que favorecen a las latitudes medias.

Las 3 ubicaciones con un mínimo de 0 satélites visibles (Anchorage, Honolulu y San Juan) en determinados momentos indican posibles brechas de cobertura, lo que también podría afectar a la distribución temporal de la EPFD.

El patrón de agrupamiento observado en el gráfico de visibilidad es característico de las geometrías de constelaciones tipo Walker-delta, en las que grupos de satélites situados en el mismo plano orbital transitan en sucesión.

Figura 7: Visibilidad de satélites NGSO con respecto a la estación terrena de Honolulu

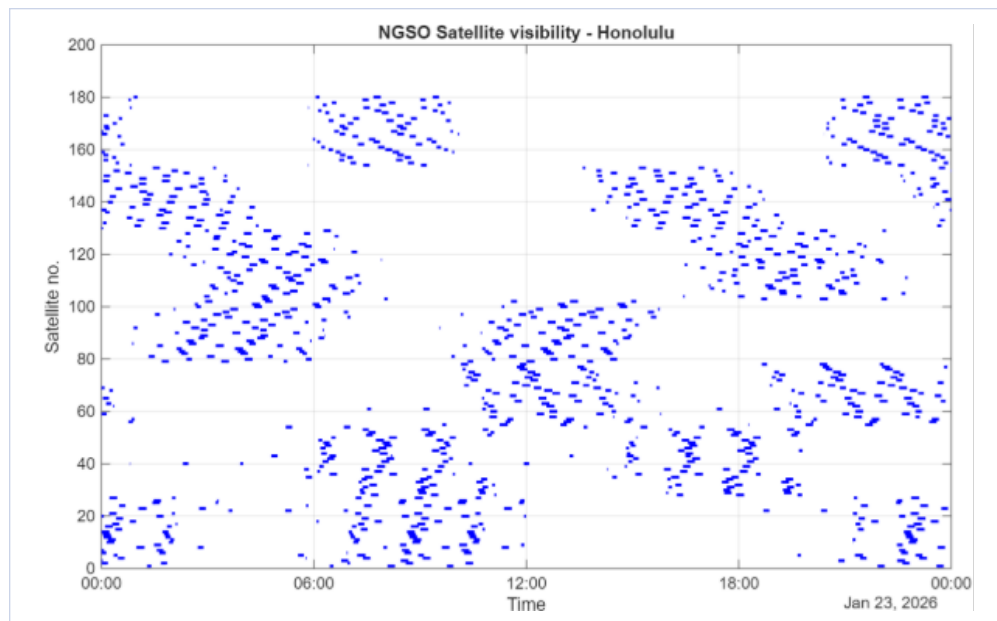


Figure 8: Visibilidad de satélites NGSO durante dos horas con respecto a la estación terrena de Honolulu

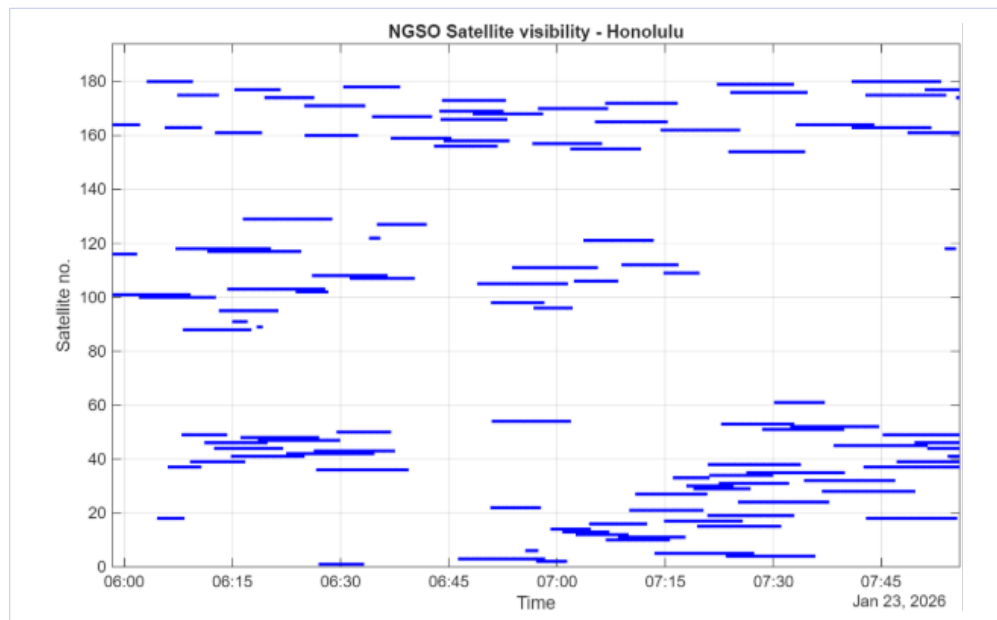


Figura 9: Número de satélites visibles simultáneamente en Anchorage

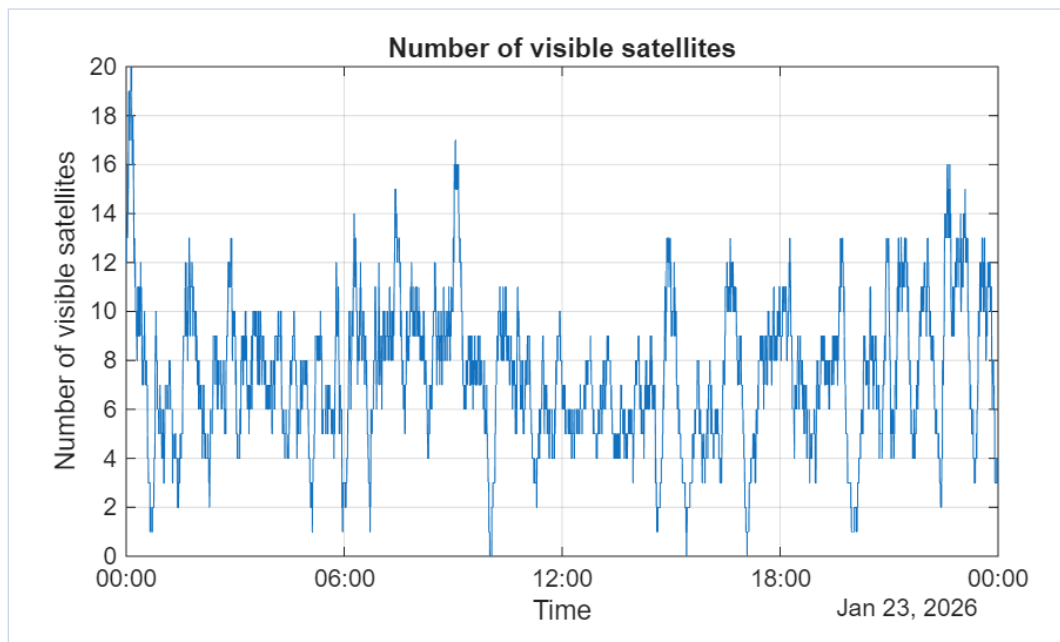
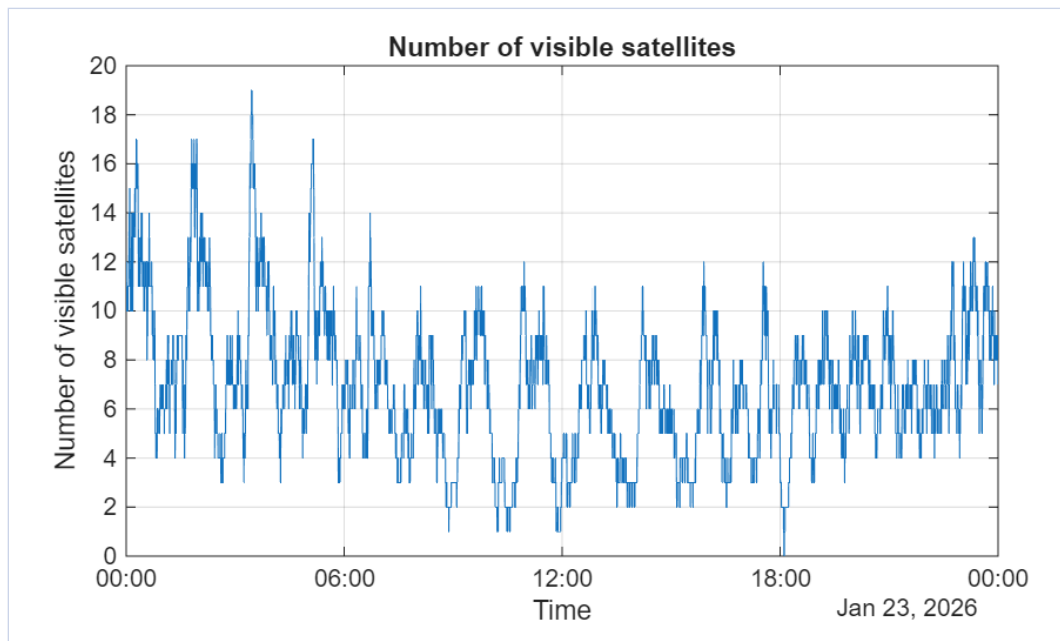


Figura 10: Número de satélites visibles simultáneamente en Honolulu



17. Resultados de la simulación del modelo

Se realizaron dos simulaciones, según el patrón de antena satelital utilizado, patrones de antenas omnidireccionales y direccionales, tal como se describe en el capítulo 14, Descripción de la simulación del modelo.

Para la comparación del nivel de EPFD entre los patrones de antenas omnidireccionales y direccionales, entre las 12 ubicaciones consideradas, se utilizaron 5 ubicaciones relevantes que cubren el rango de latitudes más altas y más bajas para las 12 ubicaciones, desde Anchorage (Alaska) hasta Honolulu (Hawái).

La simulación basada en la antena de satélite omnidireccional en 12 ubicaciones se detalla en el Anexo 1; algunos de los resultados de estas ubicaciones se han utilizado en los resultados de la simulación de la antena direccional con fines comparativos, más específicamente para Anchorage (Alaska), Honolulu (Hawái), Los Ángeles (California), Nueva York (Nueva Yotk) y Seattle (Washington).

Resultados de la simulación del modelo de antena direccional

En los siguientes resultados, la simulación basada en antenas NGSO de la UIT se refiere a una simulación del modelo de antena direccional.

Resolución temporal y duración de la simulación

La simulación determinística se lleva a cabo durante un período continuo de 24 horas, seleccionado para hacer lo siguiente:

- ❖ Captar las variaciones diurnas
- ❖ Incluir múltiples pasadas de satélites LEO
- ❖ Observar posibles agrupamientos de eventos de interferencia

La resolución temporal se incrementó a 1 segundo.

En las siguientes figuras, se muestran el ángulo fuera del eje, el valor de EPFD por satélite contribuyente y la EPFD total agregada para cada una de las 5 ubicaciones, de entre las 12 seleccionadas inicialmente.

Los límites de la UIT, de acuerdo con el Art. 22 para la frecuencia y la antena consideradas, se superponen sobre los gráficos de EPFD. El nivel de señal recibido del enlace GSO también se representa como referencia y se utilizará para estimar los parámetros SINR y C/I en las mediciones de laboratorio.

Figura 11: Anchorage, simulación con antena NGS0 omnidireccional

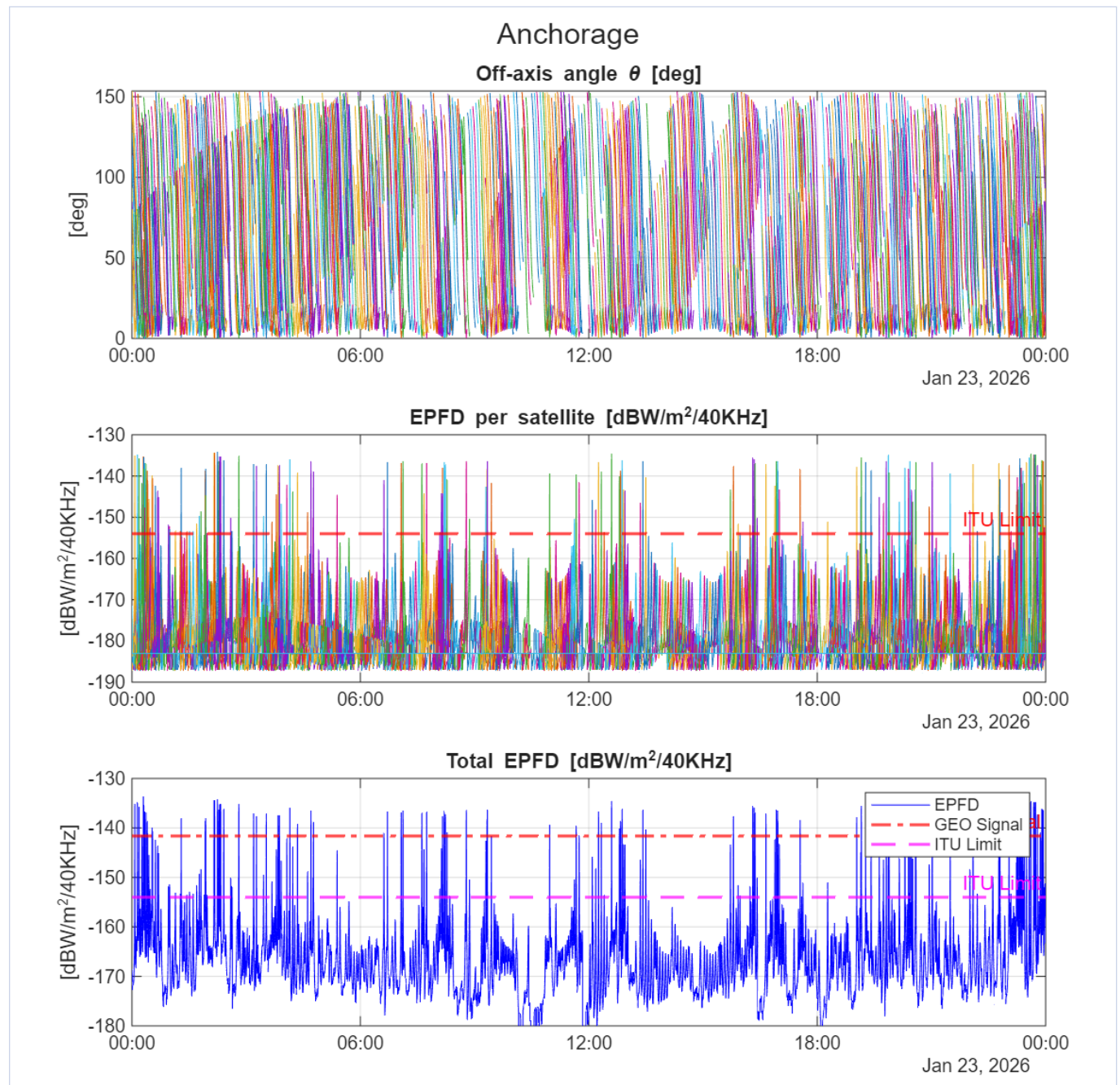


Figura 12: Anchorage, simulación basada en antena NGSO direccional de la UIT

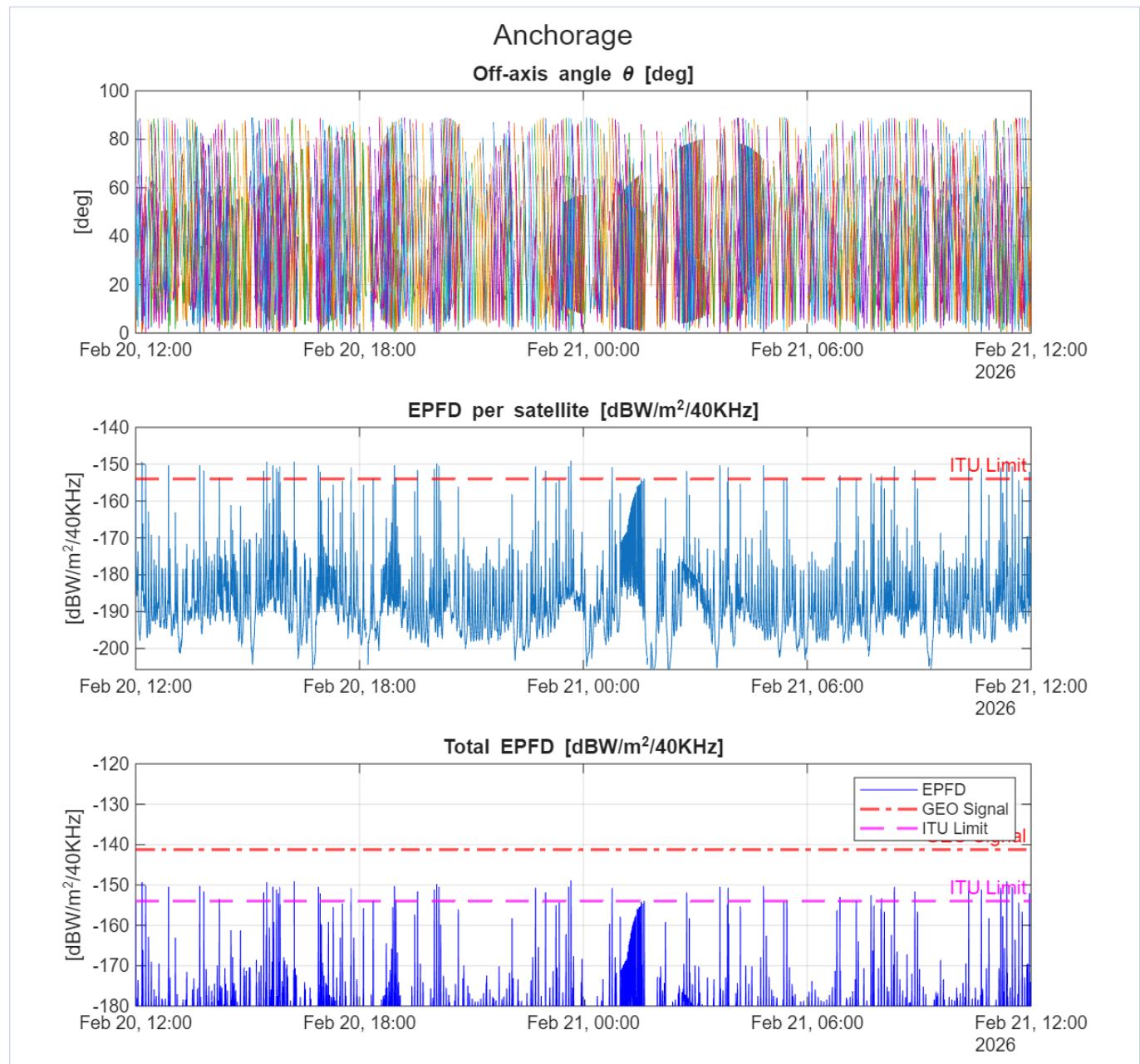


Figura 13: Honolulu, simulación con antena NGSO omnidireccional

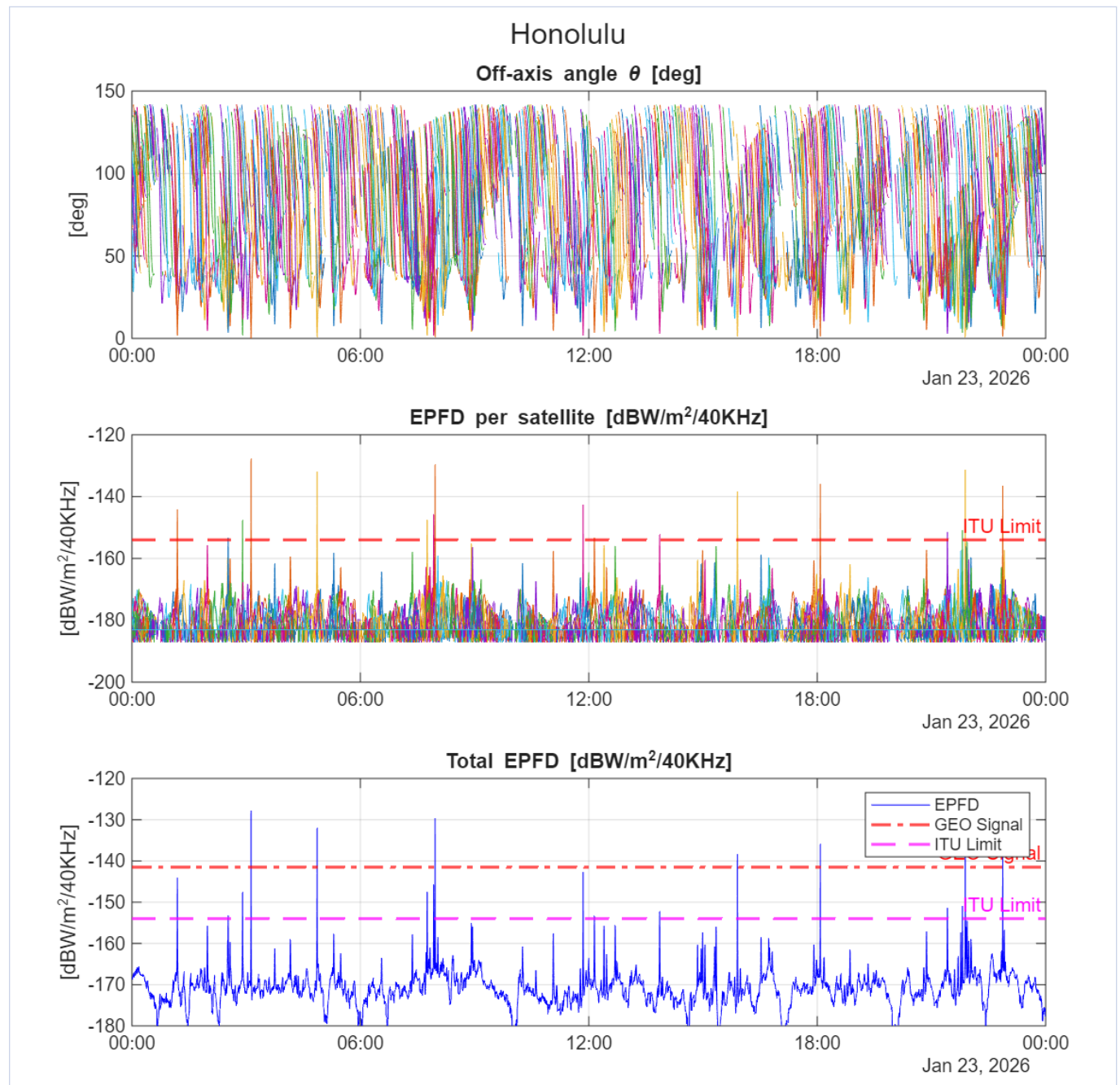


Figura 14: Honolulu, simulación basada en antena NGSO direccional de la UIT

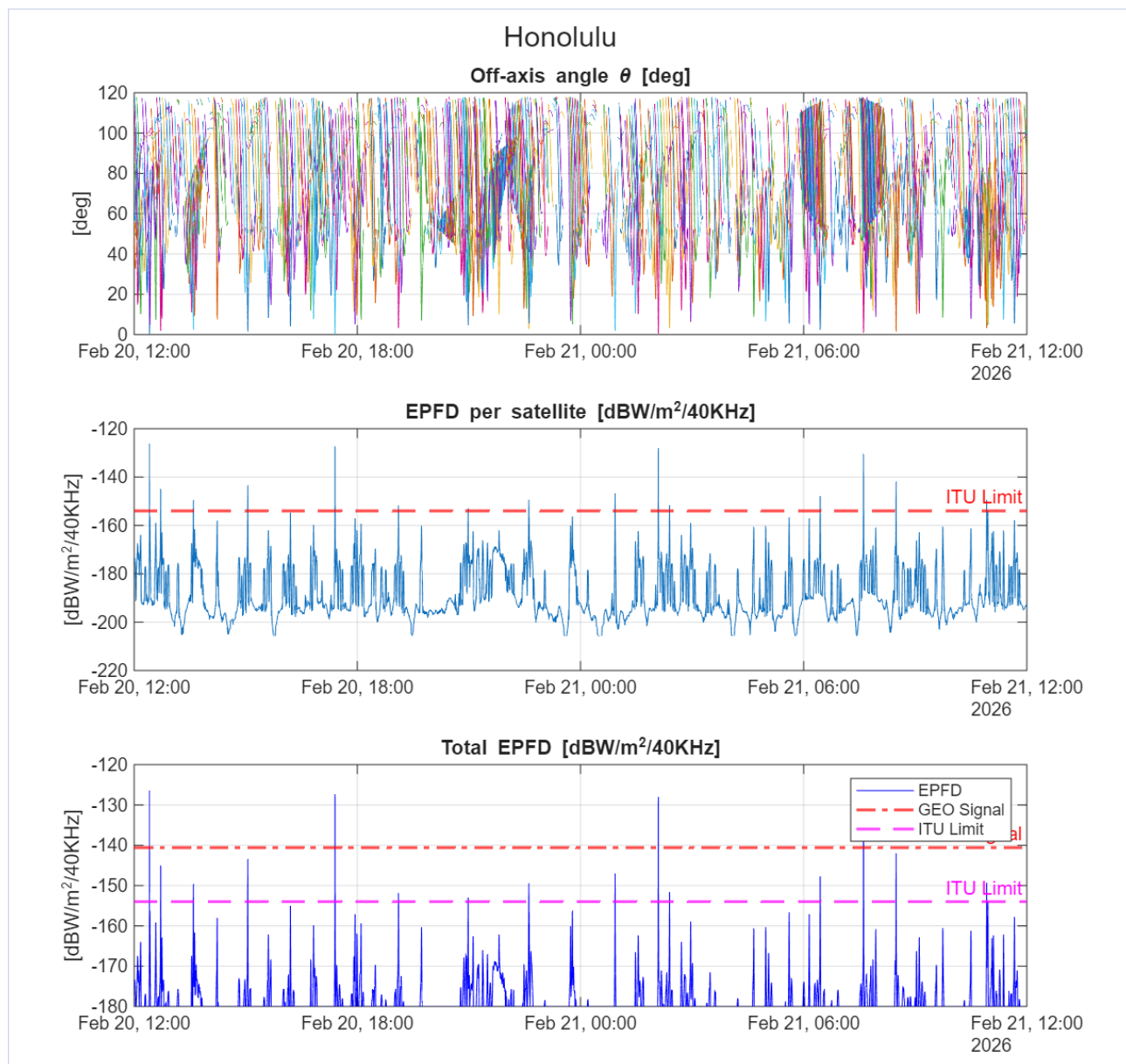


Figura 15: Los Ángeles, simulación basada en antena NGSO omnidireccional

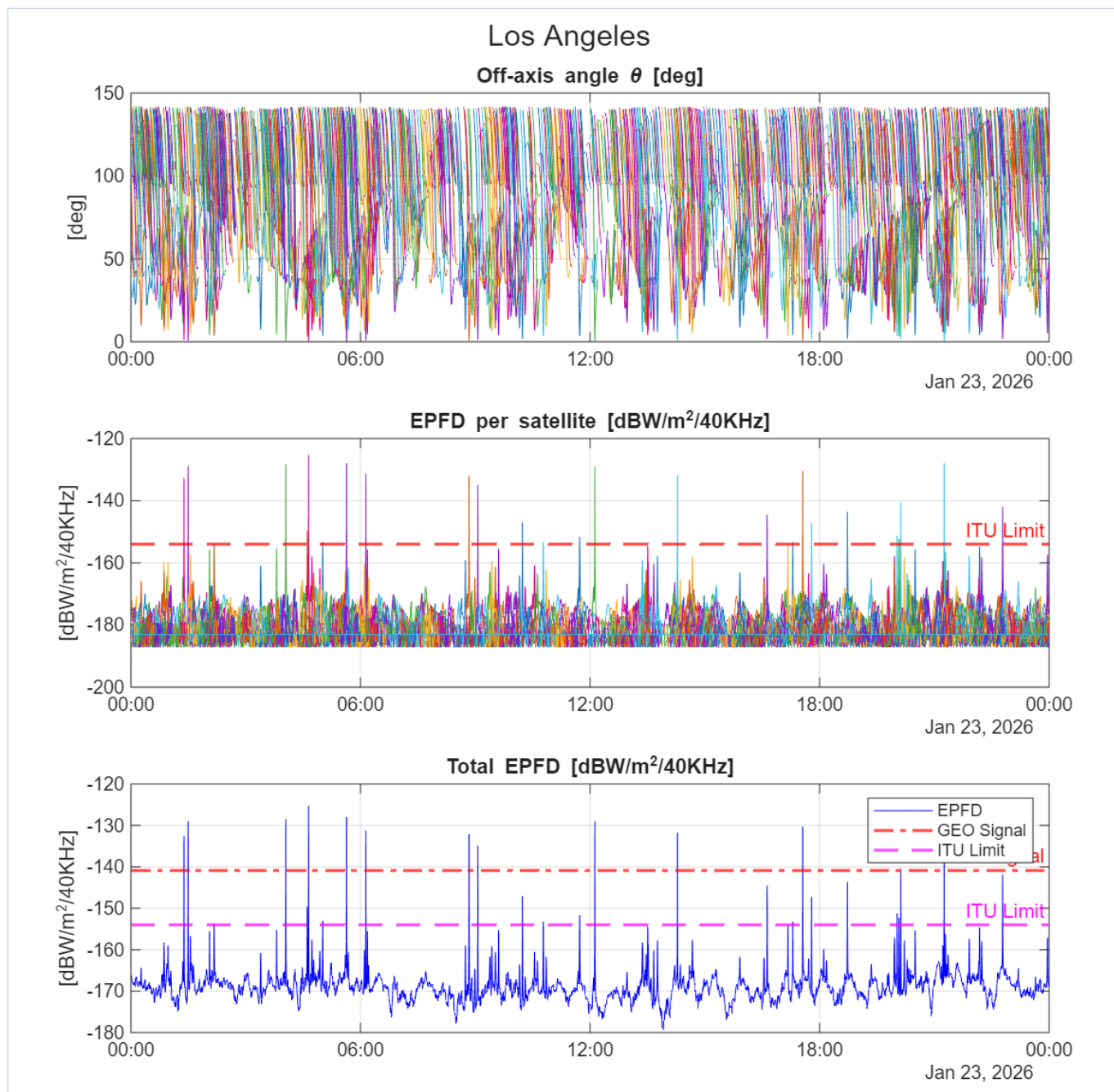


Figura 16: Los Ángeles, simulación basada en una antena direccional NGSO de la UIT; elevación GSO de 38 grados

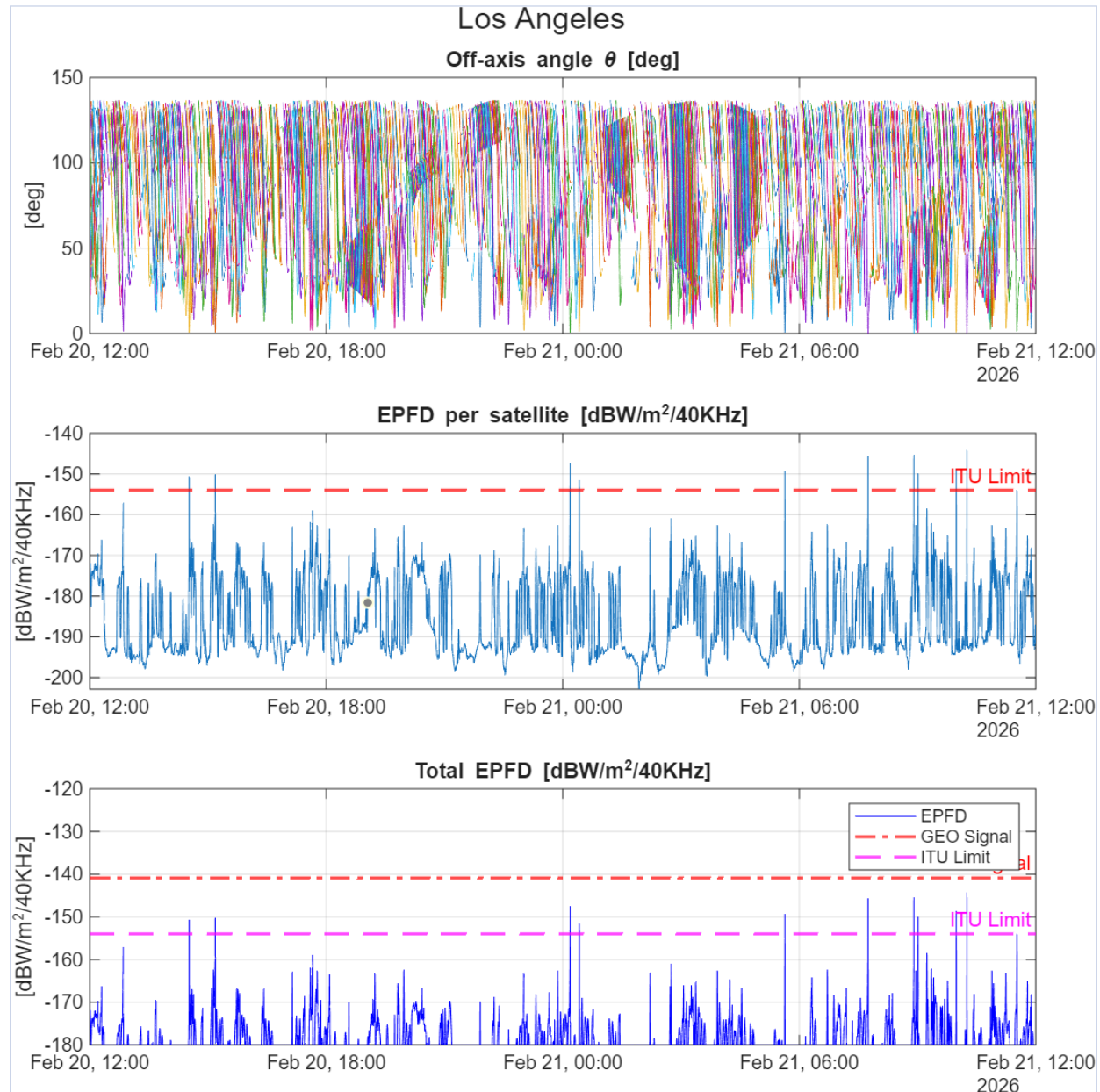


Figura 17: Los Ángeles, simulación basada en una antena direccional NGSO de la UIT; elevación GSO de 44 grados

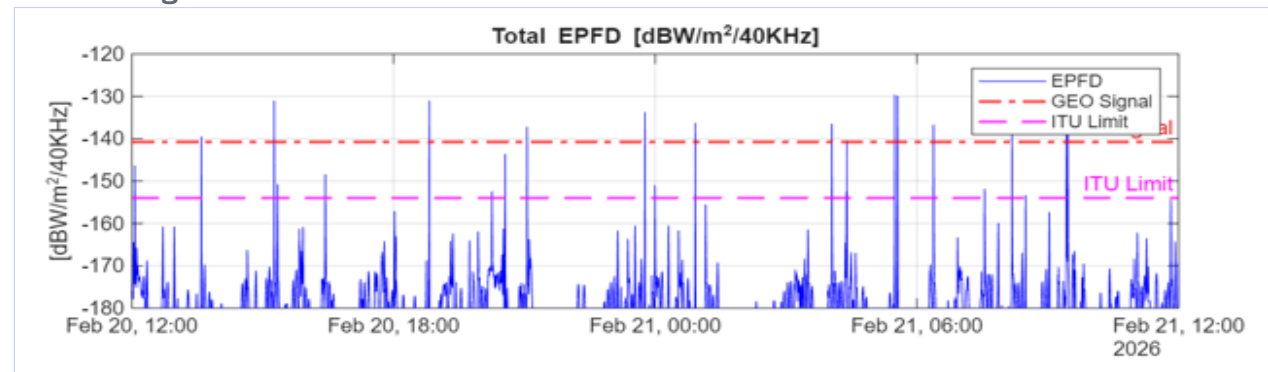


Figura 18: Nueva York, simulación basada en antena NGS0 omnidireccional

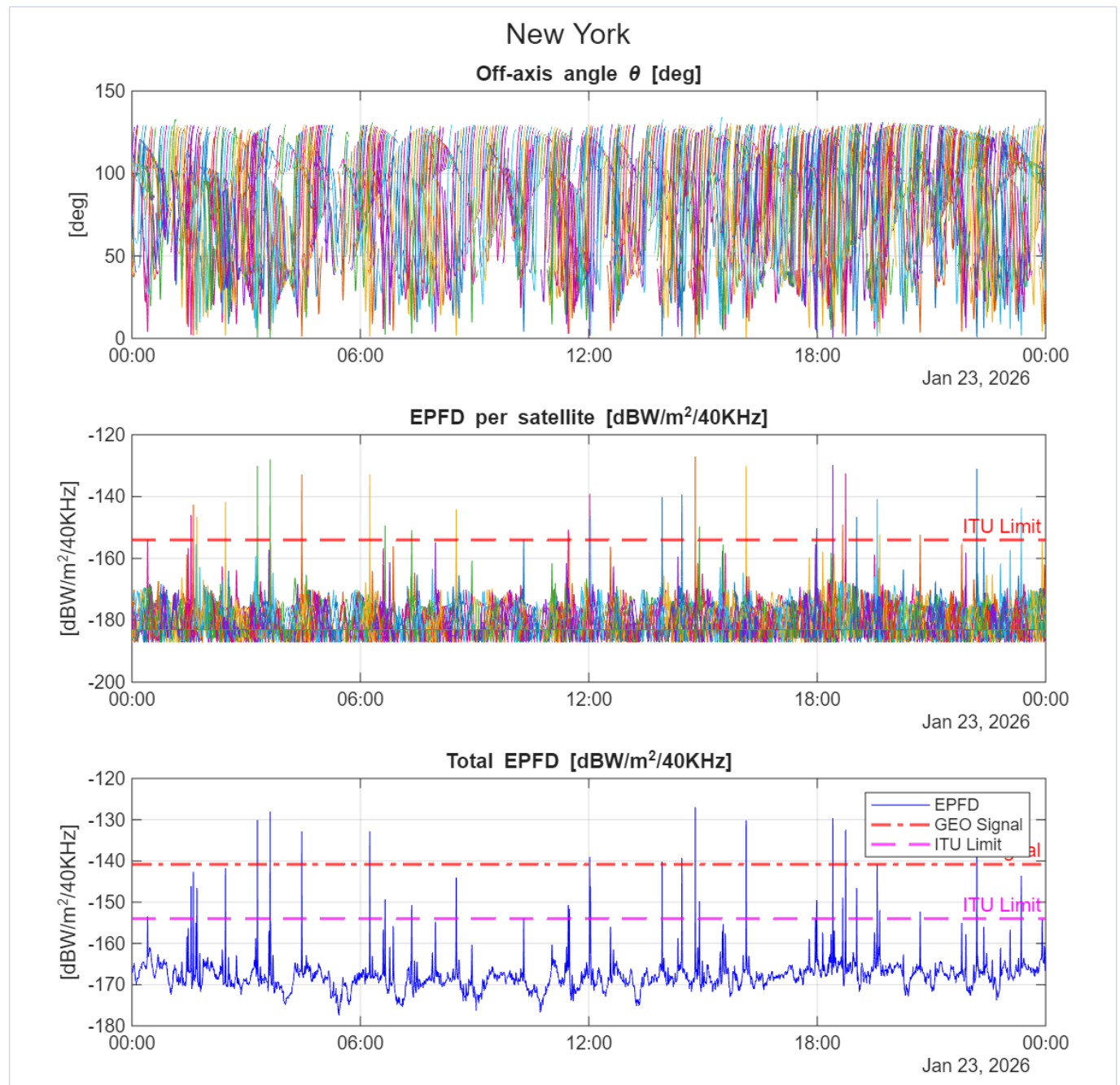


Figura 19: Nueva York, simulación basada en antena NGSO direccional de la UIT

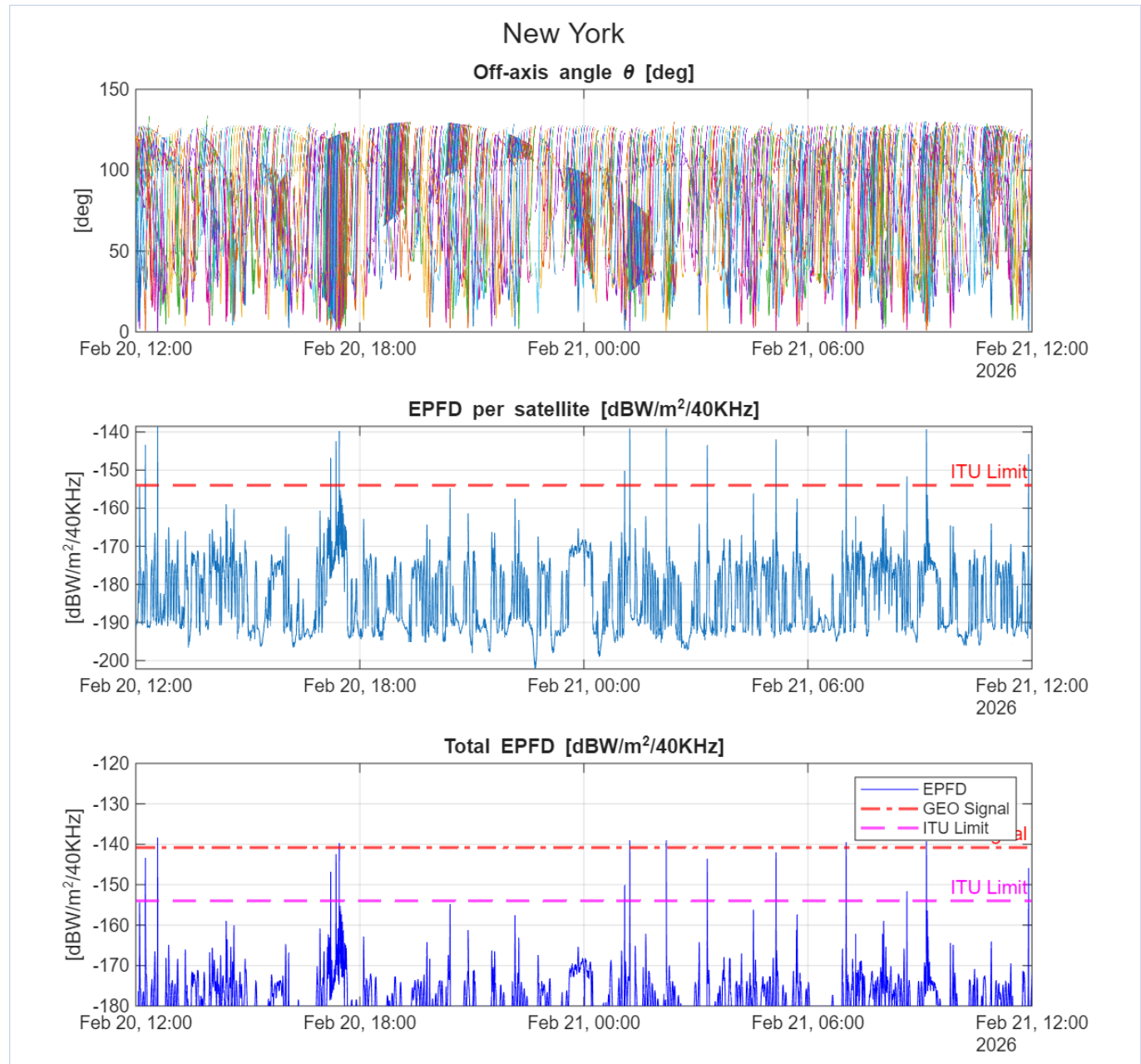


Figura 20: Seattle, simulación basada en antena NGSO omnidireccional

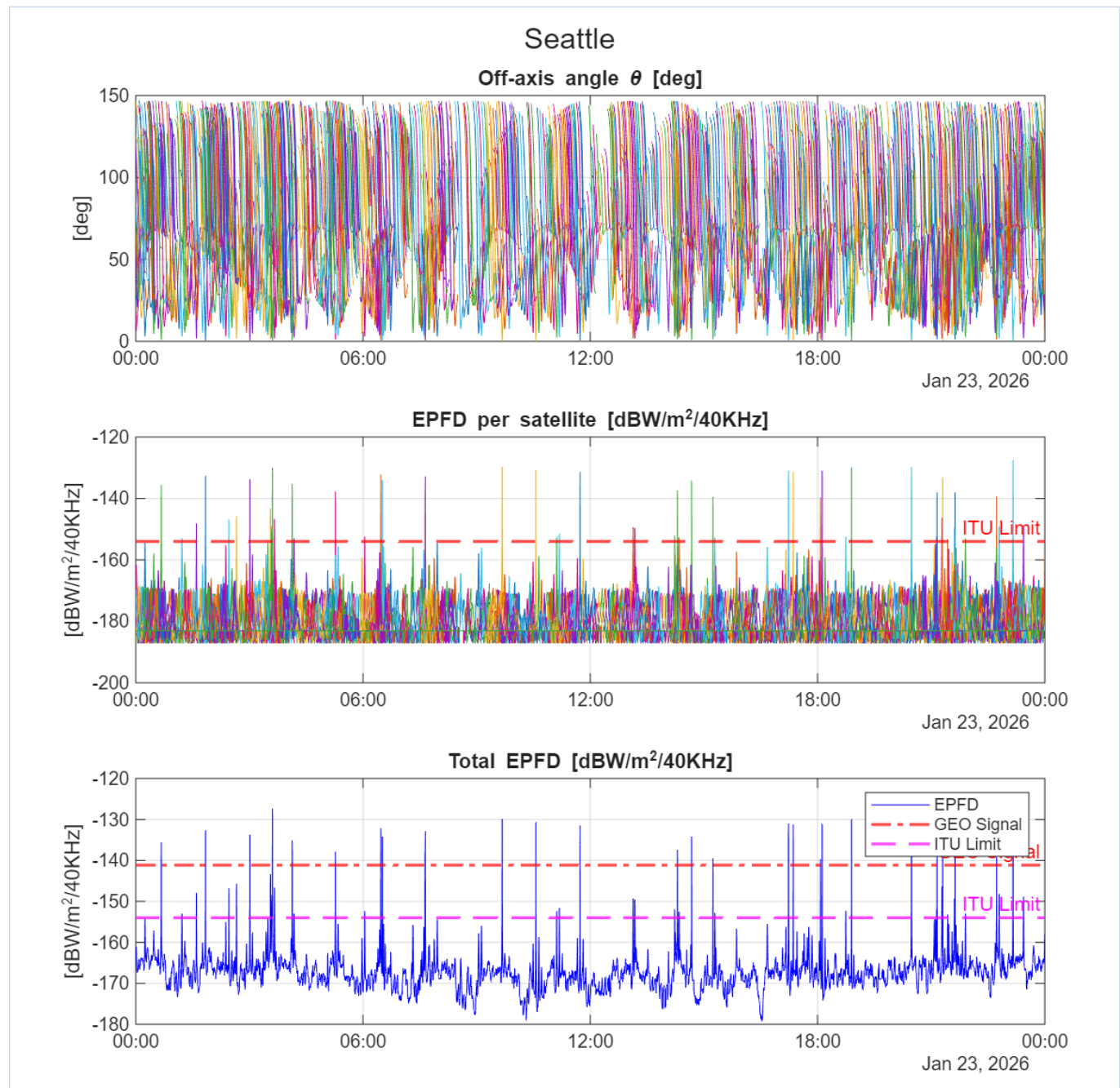
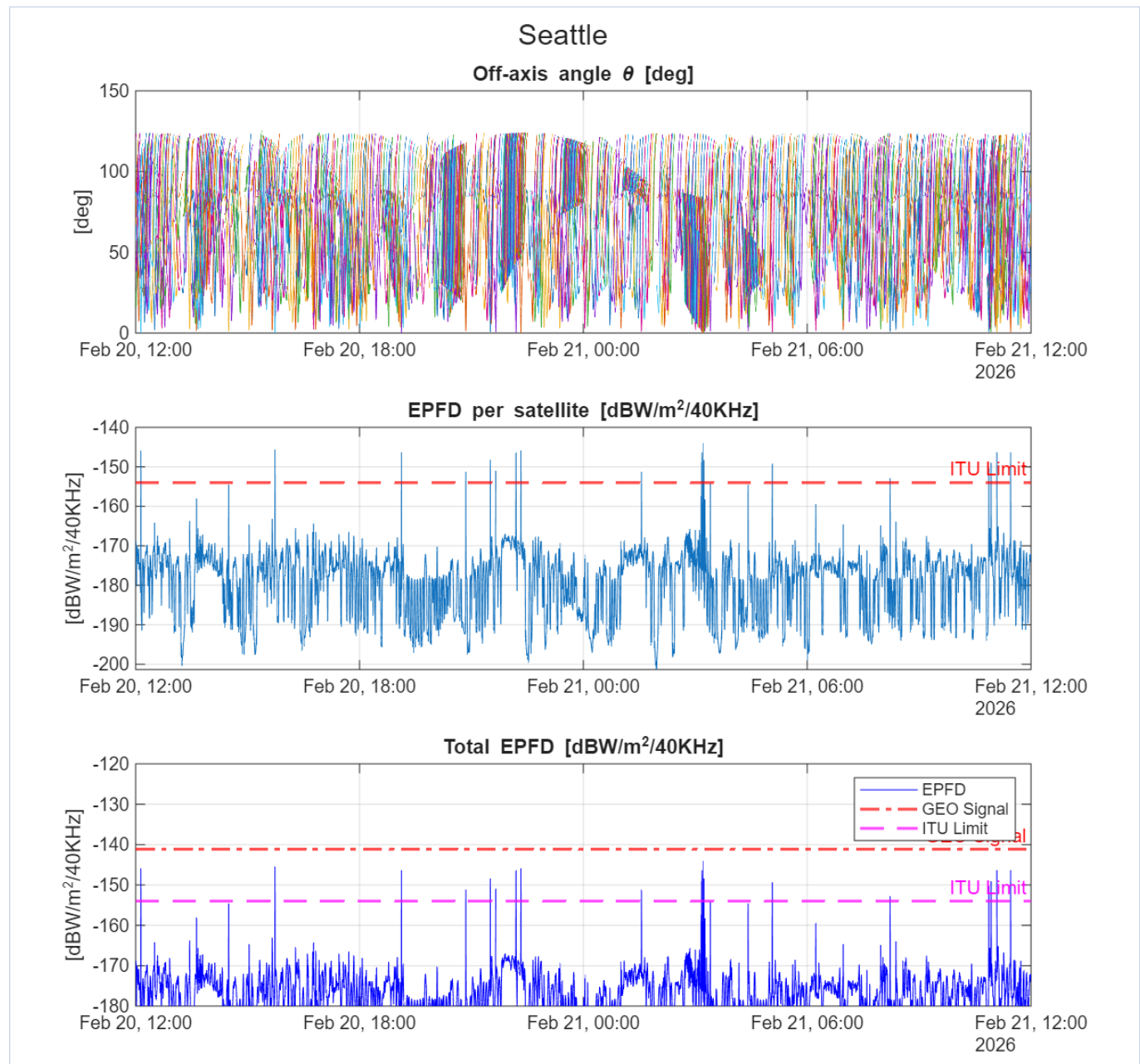


Figura 21: Seattle, simulación basada en antena NGSO direccional de la UIT



Al analizar los gráficos correspondientes a las 5 ubicaciones, se observa un patrón general común en todas ellas. En comparación con el primer conjunto de simulaciones del modelo de antena omnidireccional, se observa una clara mejora de las situaciones. Cuando se introduce un patrón de antena direccional de matriz en fase para satélites NGSO, se refuerza el aislamiento de interferencia, ya que la EPFD agregada en la recepción GSO desde tierra excluye la contribución de algunos satélites NGSO que “ven” la antena de la estación terrena con un ángulo de apuntamiento elevado.

- ❖ La EPFD agregada de fondo muestra cambios menores; típicamente fluctúa entre -165 y -175 dBW/m²/40 kHz, al igual que en simulaciones anteriores basadas en antenas omnidireccionales.
- ❖ Cuando se utiliza una antena direccional NGSO, los valores pico de EPFD se sitúan en un rango de -140-150 dBW/m²/40 kHz, en comparación con aproximadamente -130-140 dBW/m²/40 kHz en el escenario omnidireccional. Durante eventos de acercamiento cercano, los picos de EPFD se reducen notablemente en alrededor de 10 dB, lo que puede traducirse en una mejora de 10 dB en la relación C/I, a la vez que se garantizan MODCOD más altos para las comunicaciones GSO.

Para una única ubicación (Los Ángeles), se realizaron dos simulaciones considerando diferentes satélites GSO: la primera fue la de SES-2 (87 grados Oeste), que ofrece un ángulo de elevación de 38 grados, y la segunda la de SES-22 (139 grados Oeste), que ofrece un ángulo de elevación mayor de 44 grados. En los gráficos y la tabla de síntesis final, se muestra que, a menor ángulo de elevación del satélite GSO, el efecto de los sistemas NGSO sobre la EPFD disminuye y la situación general mejora. Esto también se observa claramente en Anchorage, la ubicación más septentrional (61,21 grados de latitud), que tiene un ángulo de elevación de solo 20 grados con respecto al satélite GSO.

El análisis estadístico basado en los gráficos de función de distribución acumulada empírica (ECDF) que se muestran a continuación indica la probabilidad de que la EPFD sea inferior o igual al valor de referencia del 99 %, representado en rojo. El análisis de la ECDF indica que todas las ubicaciones consideradas en la etapa de simulación del modelo de antena direccional alcanzan el 99 % con valores de EPFD más bajos, al igual que antes. La ubicación más nórdica, Anchorage, con menor elevación, presenta la mayor mejora de aproximadamente 12 dB (de -140 dB a -152 dB) en comparación con el caso omnidireccional (Figura 24) y, para el resto de ubicaciones, la mejora es de aproximadamente 6 a 9 dB, lo cual está muy cerca del límite de la UIT. Si bien Anchorage era un caso atípico en la etapa anterior, ahora, al considerar un patrón de antena direccional NGSO realista, la situación mejora y la EPFD se acerca más al límite de la UIT.

Figura 22: ECDF múltiple con antena direccional NGSO - Anchorage

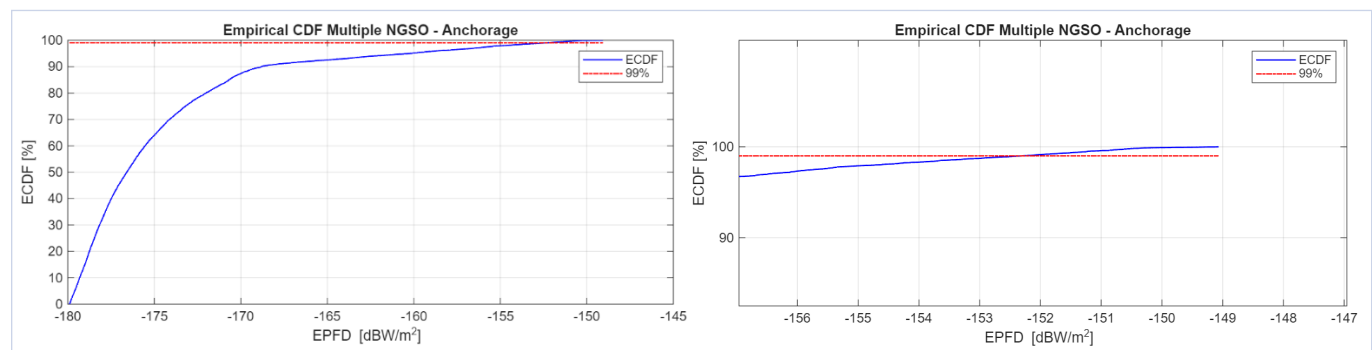


Figura 23: ECDF múltiple con antena direccional NGSO - Seattle

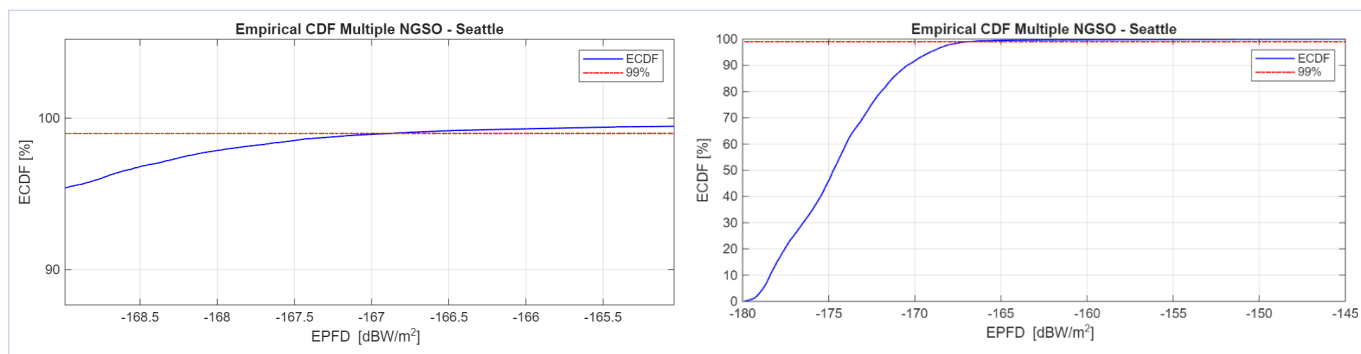


Figura 24: ECDF múltiple con antena direccional NGSO - Nueva York

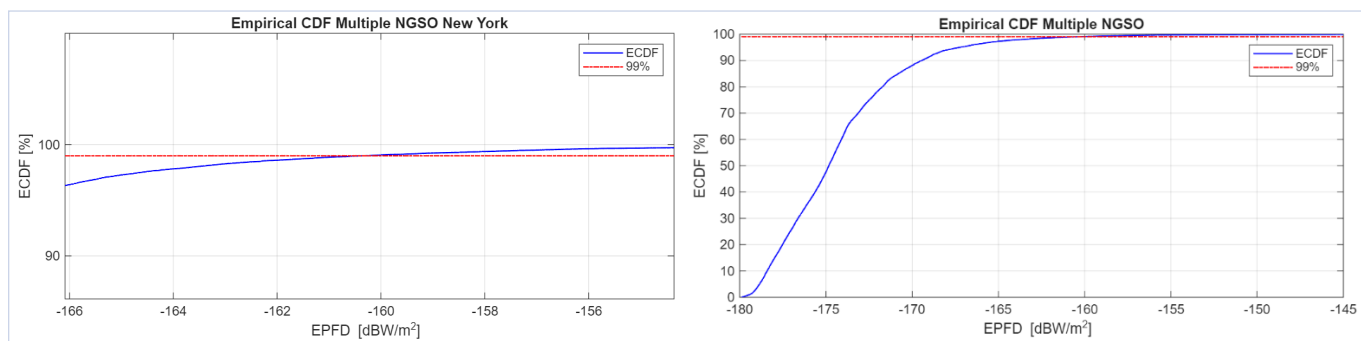


Figura 25: ECDF múltiple con antena direccional NGSO - Los Ángeles

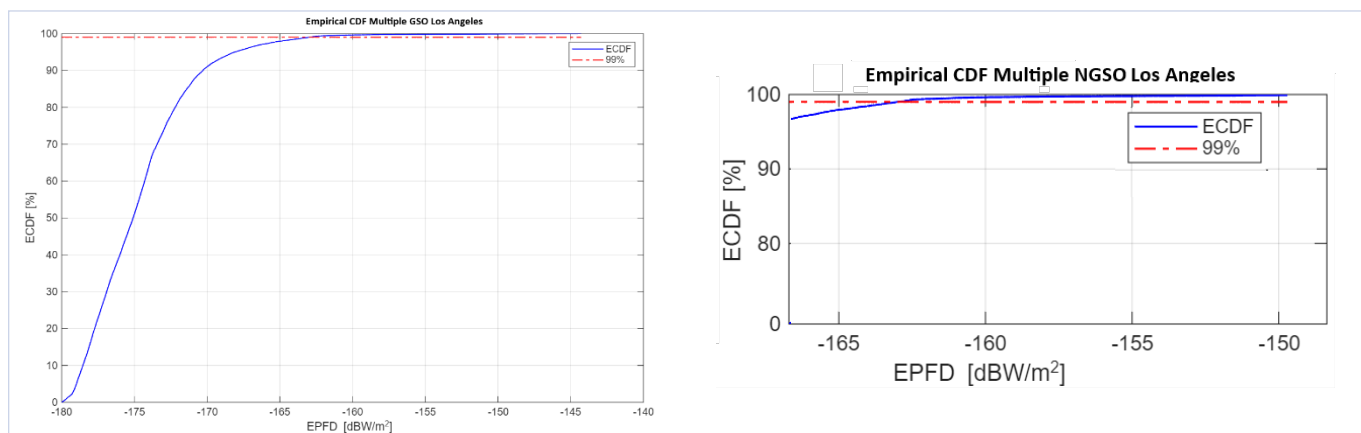
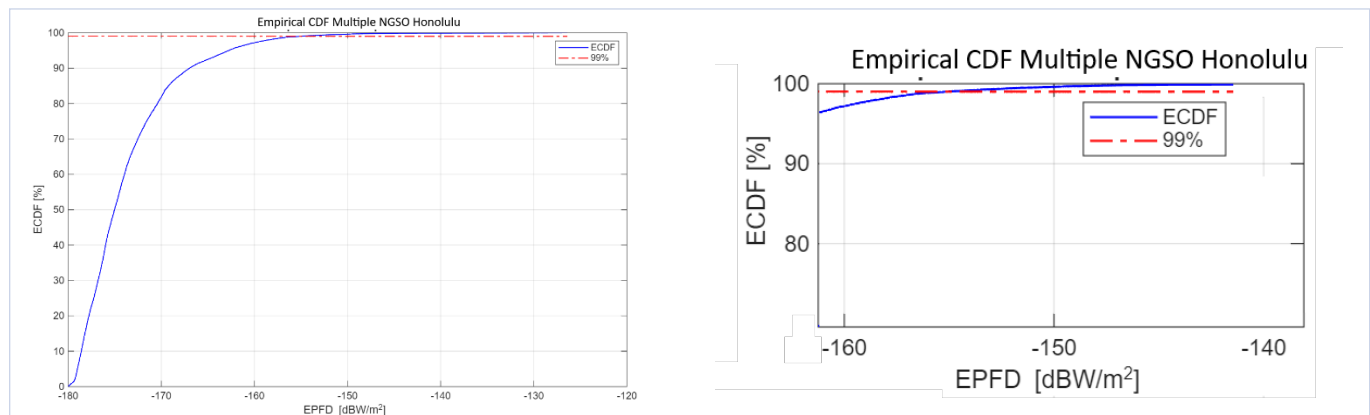


Figura 26: ECDF múltiple con antena direccional NGSO - Honolulu



Distribución a lo largo del tiempo de los intervalos en los que se supera el límite de la UIT

En los siguientes gráficos, se muestra la distribución a lo largo del tiempo de los intervalos en los que se supera el límite de la UIT.

Para cada ubicación, el primer gráfico muestra las simulaciones con una antena omnidireccional NGSO, y el segundo gráfico, los resultados con el patrón real de una antena direccional multihaz NGSO.

La distribución de la duración de la excedencia de EPFD muestra una situación mucho más favorable. En cada ubicación, la duración máxima de excedencia es menor que antes, con la reducción más consistente en Anchorage, donde el máximo se reduce de 80 segundos (1 evento) a 7 segundos (1 evento).

Figura 27: Anchorage, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO omnidireccional

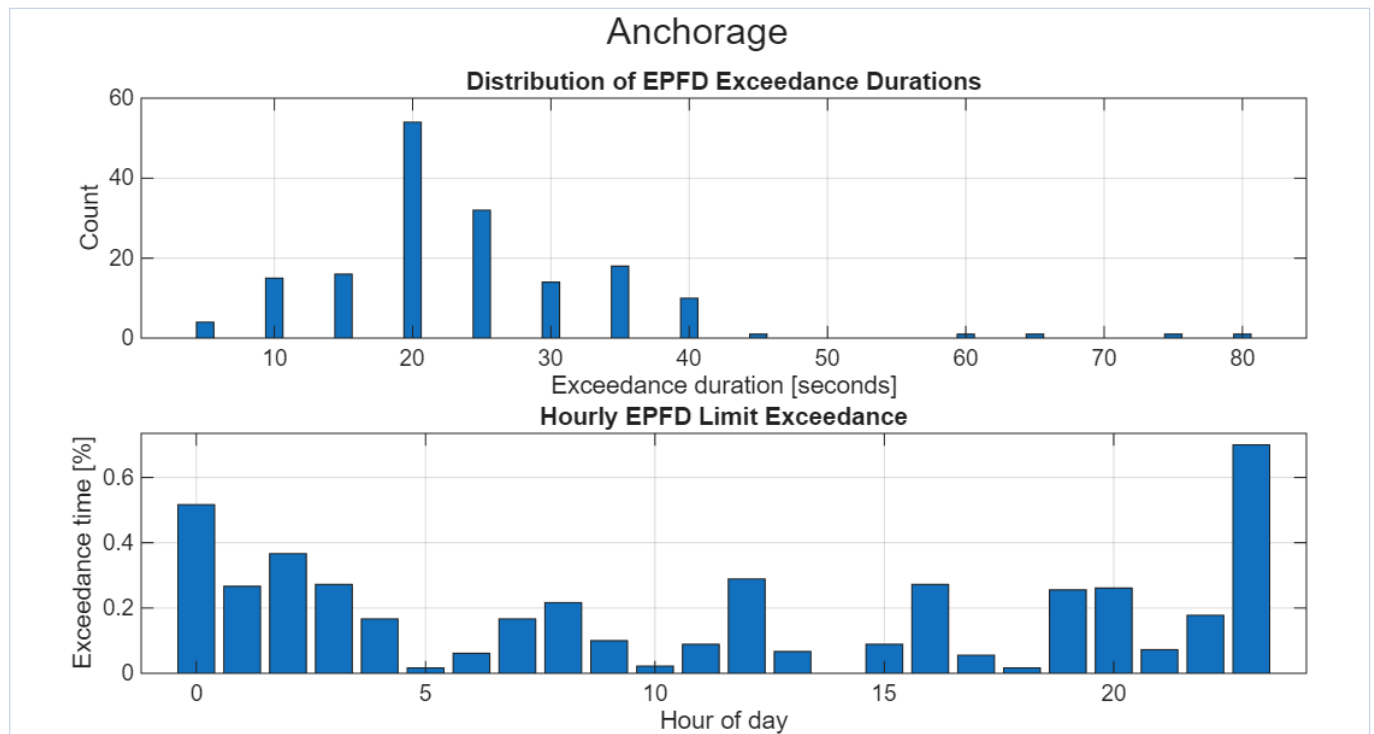


Figura 28: Anchorage, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO direccional según la UIT

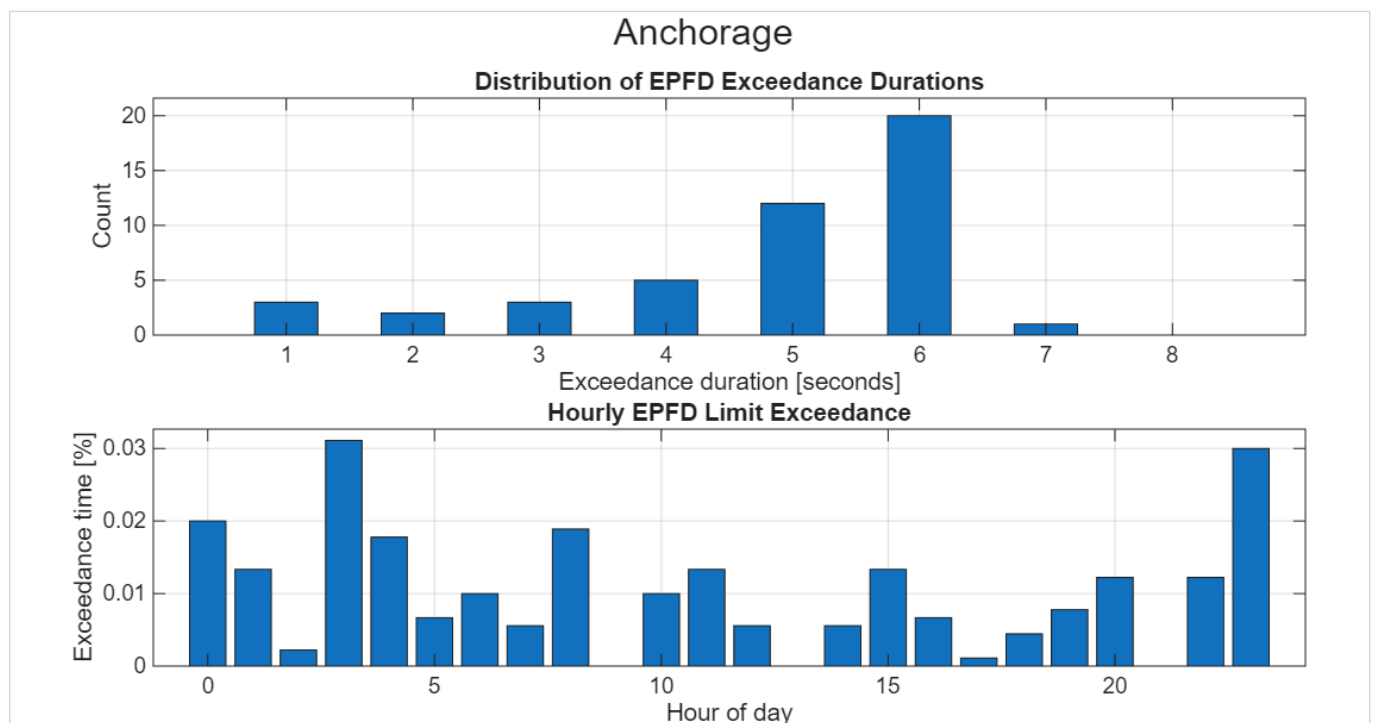


Figura 29: Honolulu, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO omnidireccional

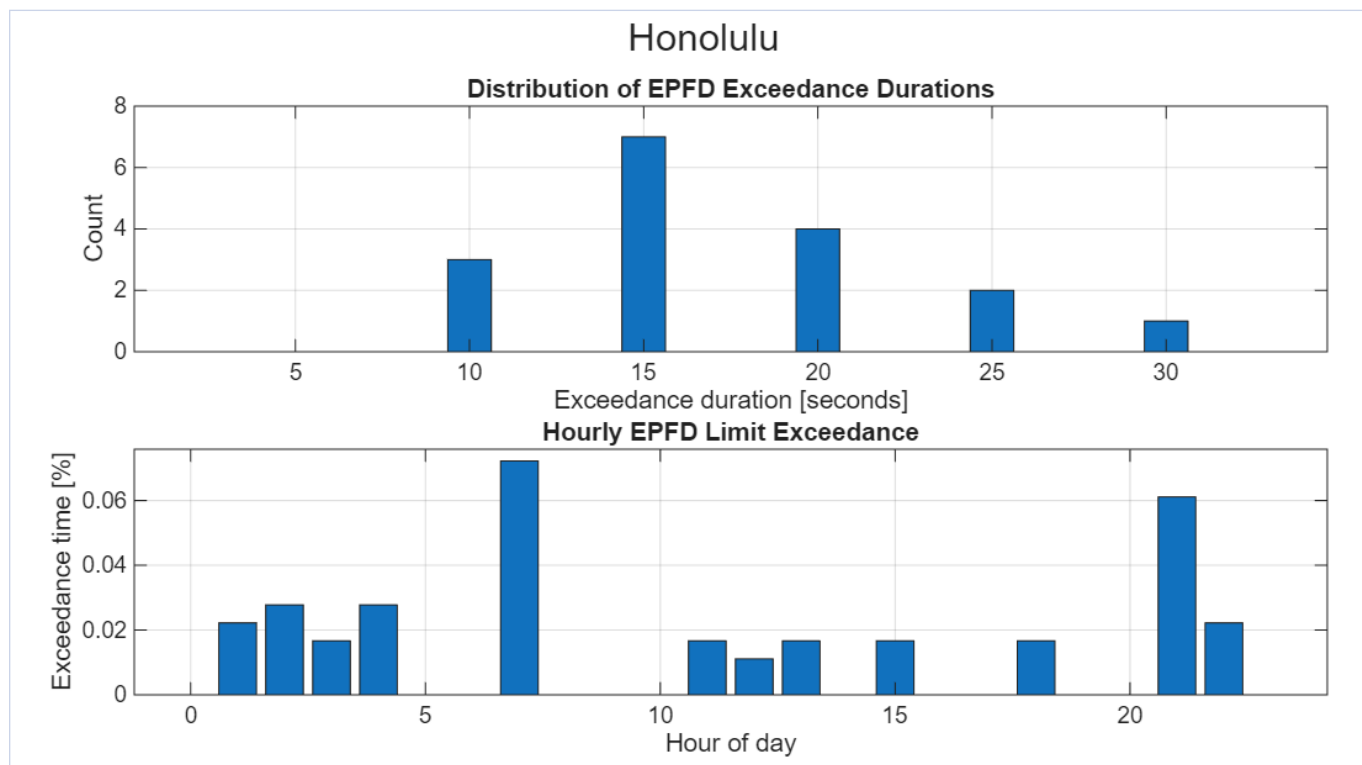


Figura 30: Honolulu, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO direccional según la UIT

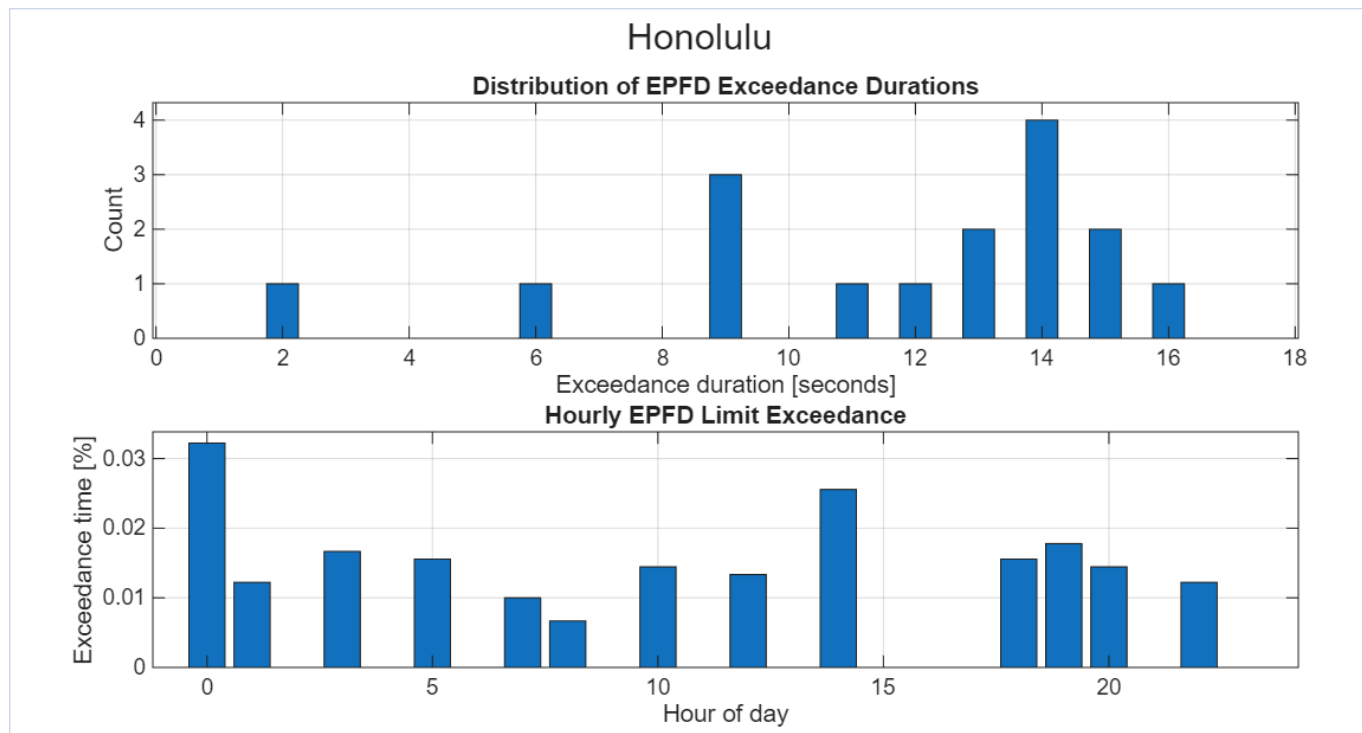


Figura 31: Los Ángeles, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO omnidireccional

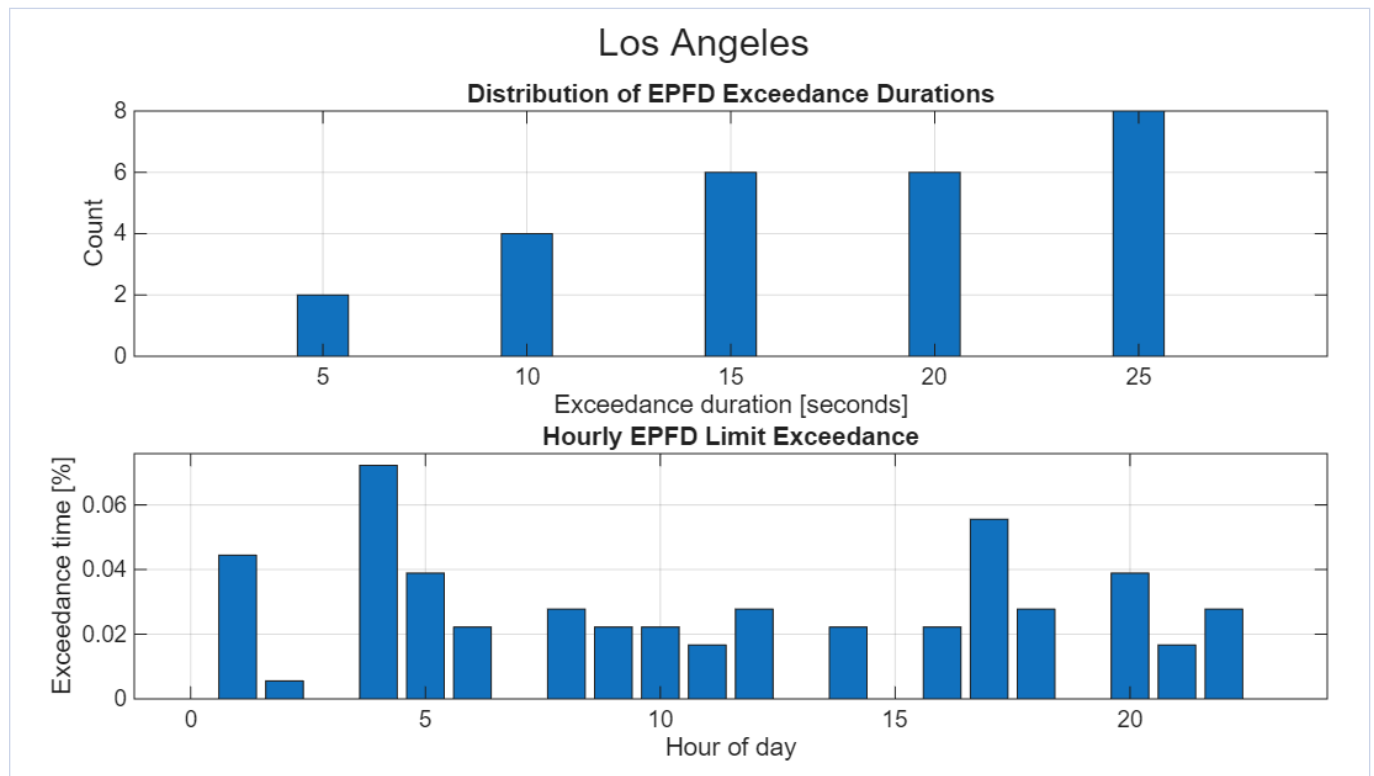


Figura 32: Los Ángeles, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO direccional según la UIT

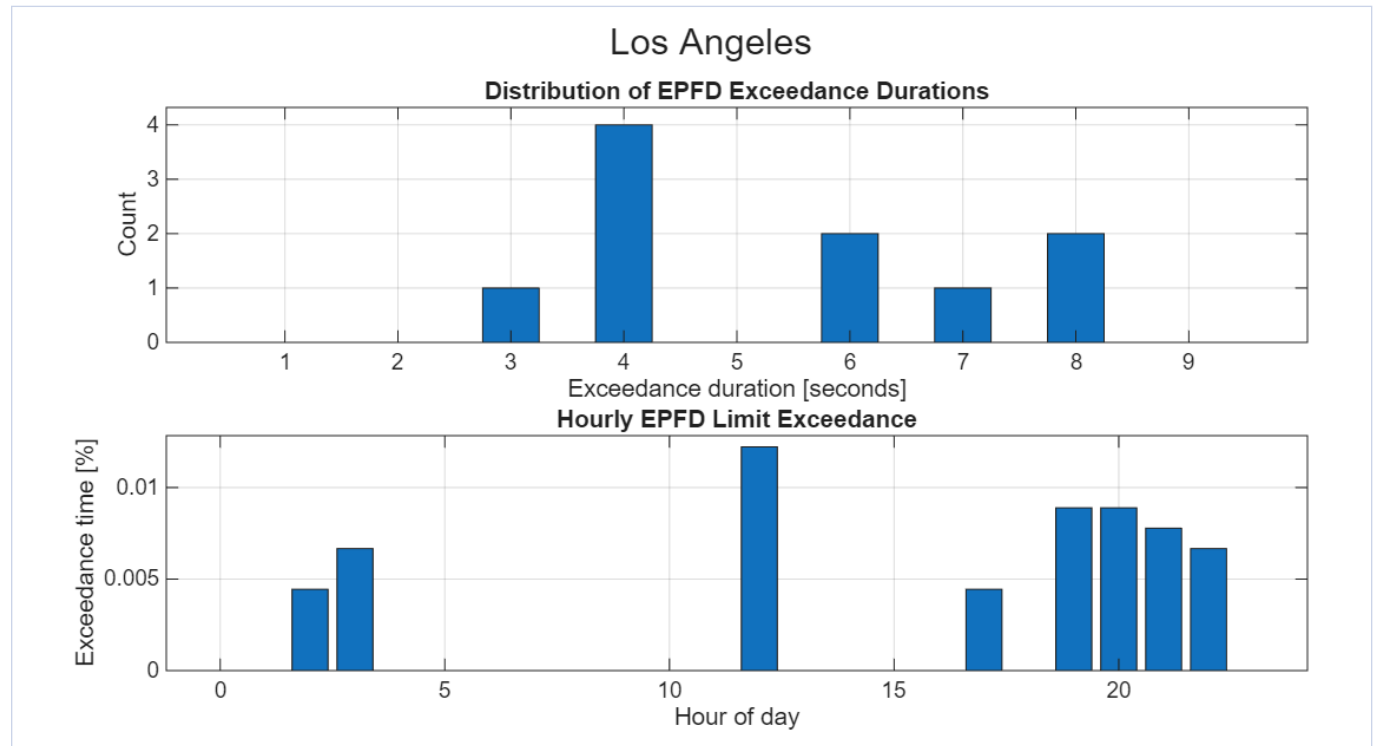


Figura 33: Nueva York, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO omnidireccional

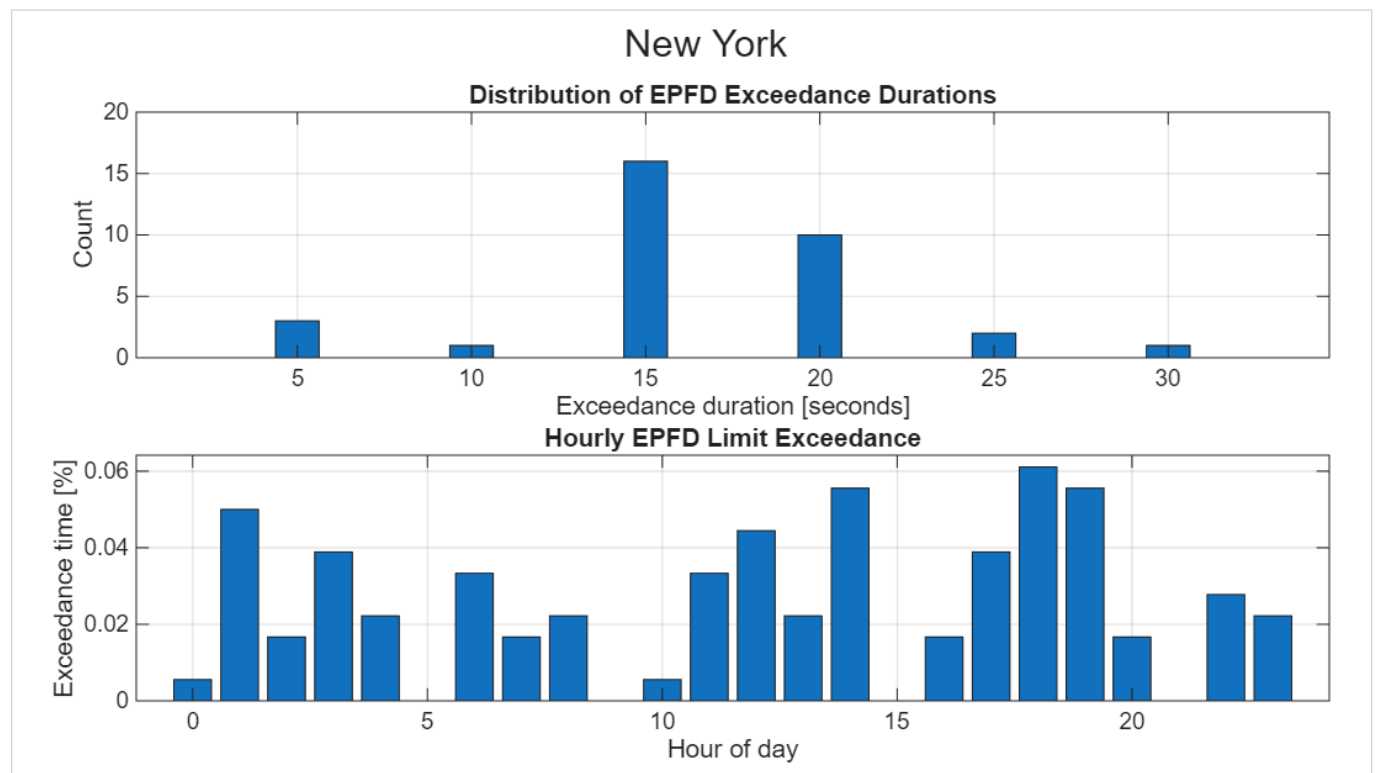


Figura 34: Nueva York, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO direccional según la UIT

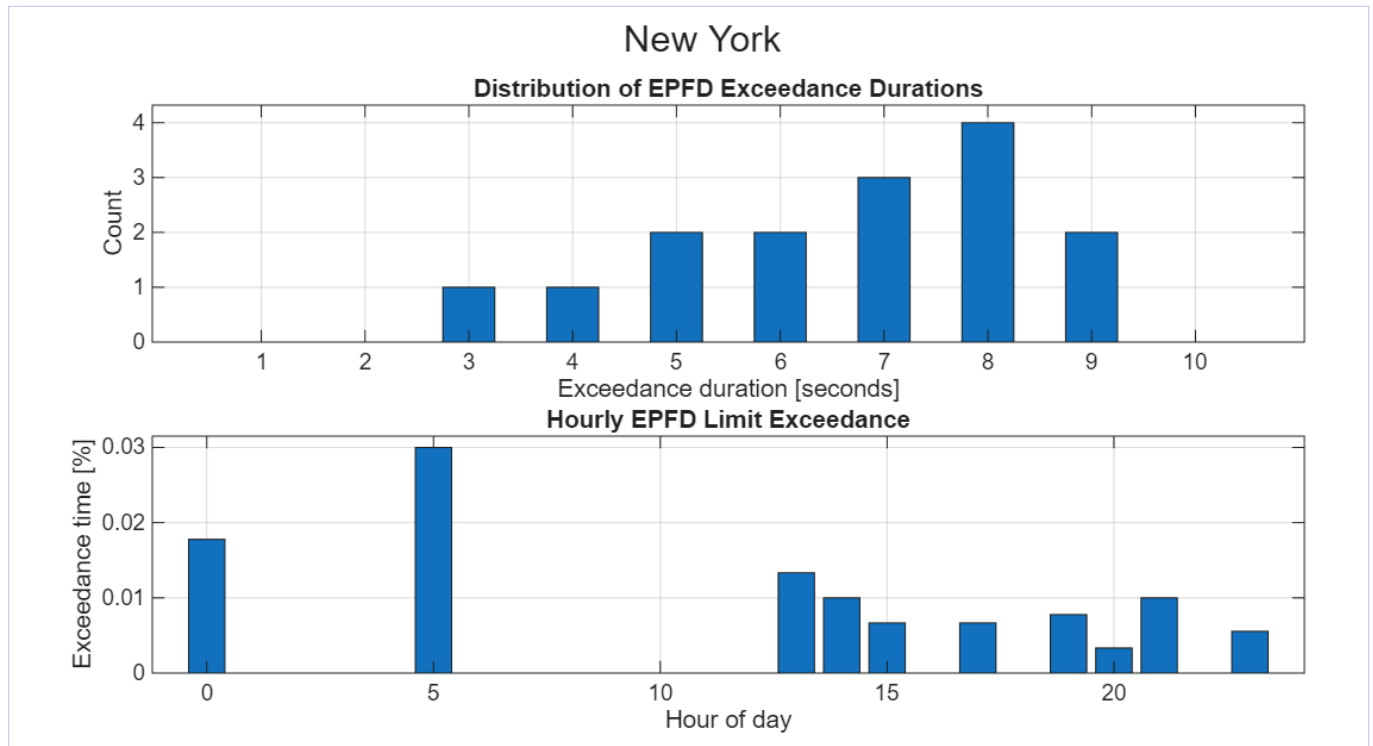


Figura 35: Seattle, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO omnidireccional

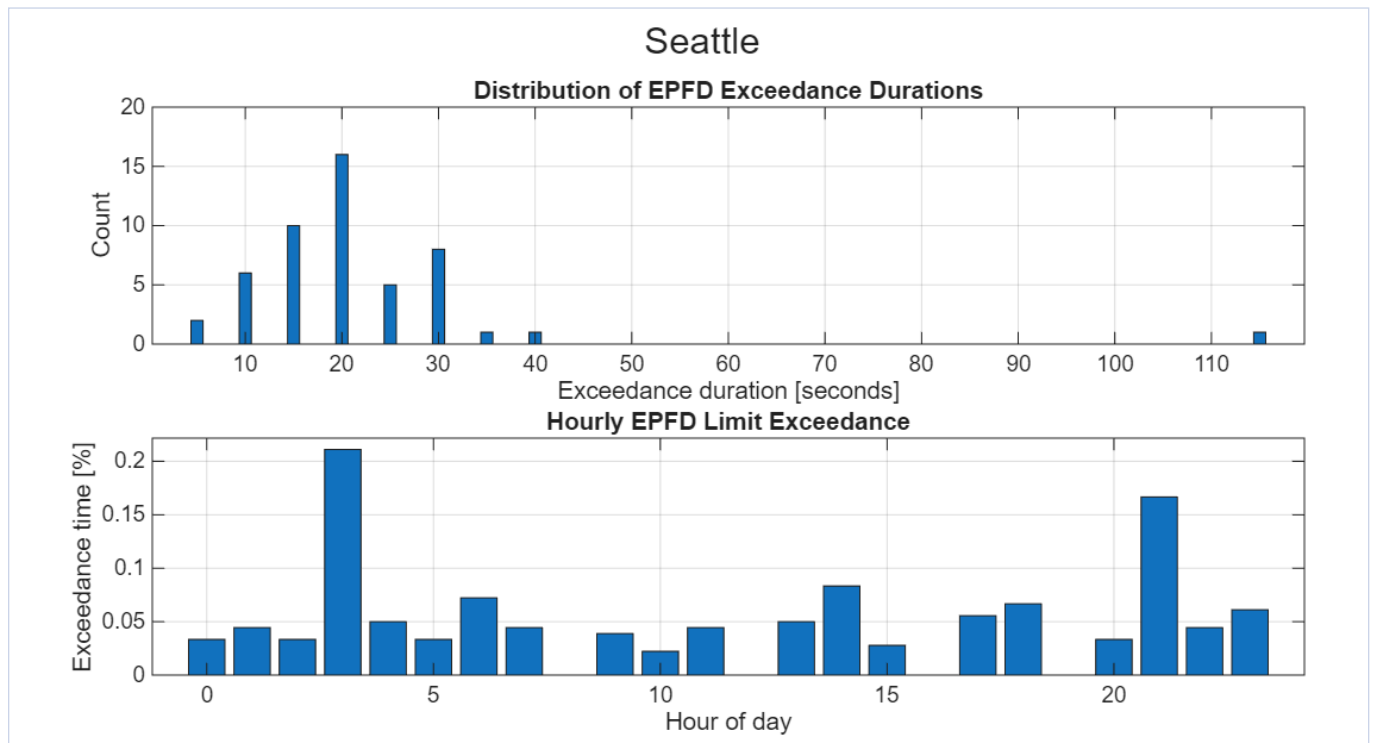
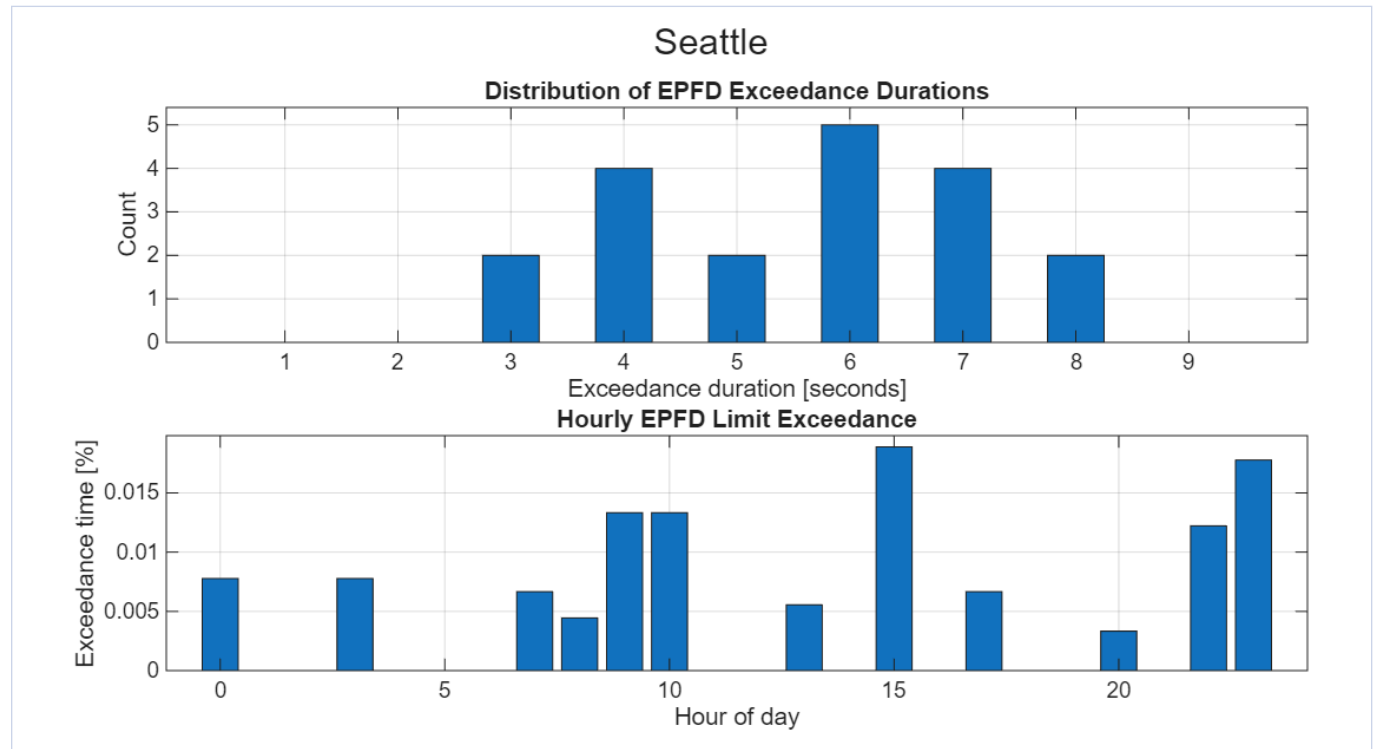


Figura 36: Seattle, distribución de excedencia de la PFD con antena NGSO direccional según la UIT



Síntesis de las observaciones específicas por ubicación

Las observaciones específicas por ubicación se sintetizan en la tabla siguiente:

Tabla 3: Observaciones específicas por ubicación

	Número promedio de satélites visibles	Número mínimo de satélites visibles	Número máximo de satélites visibles	Tiempo total de observación (horas)	Tiempo total de excedencia (min)	Porcentaje de excedencia (%)	Número de eventos	Duración del evento más largo (s)	Duración máxima de cumplimiento (min)	Latitud (grados)
Anchorage	7,01	0	19	24	67,75	4,7	168	80	132,8	61,1°
	5,06	0	14	24	3,72	0,26	46	7	155,2	
Seattle	9,91	2	21	24	18,25	1,27	50	115	121,17	47,6°
	8,45	1	19	24	1,77	0,12	19	50	215,53	
Nueva York	10,43	2	20	24	9,08	0,63	33	30	112,58	40,69°
GSO _{elev} 44°	8,91	2	20	24	1,67	0,12	15	9	458,2	

	Número promedio de satélites visibles	Número mínimo de satélites visibles	Número máximo de satélites visibles	Tiempo total de observación (horas)	Tiempo total de excedencia (min)	Porcentaje de excedencia (%)	Número de eventos	Duración del evento más largo (s)	Duración máxima de cumplimiento (min)	Latitud (grados)
Los Ángeles	10,29	2	21	24	7,67	0,53	26	25	161,5	34,02°
GSO _{elev} 44°	8,05	1	20	24	4,17	0,29	24	14	187,67	
GSO _{elev} 38°	8,05	1	20	24	0,9	0,06	10	8	539	
Honolulu	7,41	0	20	24	4,92	0,34	17	30	232,83	21,32°
	5,48	0	18	24	3,1	0,22	16	16	242,85	

Conclusiones preliminares

El uso de antenas direccionales multihaz de matriz en fase en los satélites NGSO reduce significativamente los valores pico de EPFD y las duraciones de excedencia a lo largo de latitudes desde el norte hasta el extremo sur, lo que permite una evaluación más detallada del ajuste de los valores de CIR, ya que la comunicación GSO, desde el punto de vista de la pérdida de rendimiento y la eficiencia espectral, teniendo en cuenta también las condiciones meteorológicas, se ve mínimamente afectada.

18. Impacto de la interferencia sobre la eficiencia espectral de sistemas GSO

Los valores de EPFD analizados anteriormente, bajo distintos modelos de antena, han puesto de manifiesto que las nuevas tecnologías de transmisión radioeléctrica de los sistemas NGSO utilizadas en el acceso de banda ancha a Internet, como las antenas multihaz de matriz en fase, junto con las técnicas de mitigación en la misma frecuencia, han reducido significativamente los niveles de interferencia generados por los sistemas NGSO, de conformidad con la zona de exclusión definida en el Artículo 22 de la UIT, mediante máscaras reguladas de EPFD, hasta en 10 dB en comparación con una antena clásica no direccionable, lo que permite una mayor reducción del ángulo fuera de eje, con un impacto mínimo sobre la eficiencia espectral y el rendimiento de las estaciones terrenas GSO.

Uno de los criterios clave y actualmente en debate definidos por la UIT para la protección del sistema GSO es la definición del rendimiento de sus comunicaciones basada en el tiempo de indisponibilidad; *la Recomendación UIT-R S.1323 establece que la interferencia agregada proveniente de todos los sistemas de FSS no GSO que comparten frecuencias con un enlace GSO no debe ser responsable de más del 10 % del tiempo asignado para el BER (o el valor de C/N) especificado en los objetivos de rendimiento a corto plazo de la red deseada y correspondiente al menor porcentaje de tiempo (valor de C/N más bajo).*

A modo de ejemplo, para un enlace GSO que tiene una disponibilidad requerida del 99,5 %, su correspondiente indisponibilidad es $100 - 99,5 \% = 0,5 \%$ o aproximadamente 263 minutos al año. Según la declaración de la UIT mencionada anteriormente, esto significa que la interferencia de los sistemas no GSO solo puede generar $263 * 0,1 = 26,3$ minutos de indisponibilidad en este enlace al año¹³. Este enfoque no considera las nuevas técnicas de ACM que ajustan dinámicamente los MODCOD, lo que garantiza la mayor eficiencia espectral posible y, por lo tanto, una protección mucho mayor frente a diversos factores del canal.

Esta regulación, definida inicialmente en 1997, se considera hoy en día conservadora, ya que los sistemas modernos de comunicaciones satelitales utilizan técnicas más avanzadas de codificación y modulación adaptativas que ajustan dinámicamente los MODCOD (modulación y codificación FEC) con el fin de mejorar constantemente la eficiencia espectral, en función de las condiciones del canal radioeléctrico, en cuyo caso el tiempo de indisponibilidad pasa a ser un concepto relativo.

De acuerdo con la recomendación más reciente UIT-R S.2131-1, que contempla la codificación y modulación adaptativas, uno de los parámetros clave que define una comunicación satelital está relacionado con el rendimiento y la eficiencia espectral en diversas condiciones de propagación, incluidas condiciones climáticas y meteorológicas específicas, como el desvanecimiento por lluvia. La nueva recomendación sugiere también que las Recomendaciones existentes sobre rendimiento de error (por ejemplo, la Recomendación UIT-R S.1062-4) cubren trayectos digitales ficticios de referencia (HRDP) de tasa de bits constante y, por lo tanto, no son aplicables a los sistemas que utilizan técnicas de ACM¹⁴.

El rendimiento de muchos sistemas satelitales modernos se especifica en términos de tasa de error de paquetes (PER), al considerar transmisiones basadas en paquetes, y las características de la PER muestran un comportamiento de disminución casi tan rápida como el de la BER. Este comportamiento implica que el rendimiento satelital en términos de PER como función del tiempo no es relevante para los sistemas satelitales que utilizan técnicas de ACM, ya que dichos sistemas se adaptarán a condiciones degradadas reduciendo el rendimiento total y, por lo tanto, dejan de ser sistemas de tasas de bits constante. El concepto de medir el rendimiento de los enlaces satelitales que emplean técnicas de ACM mediante el rendimiento promedio o degradado ya se ha explorado anteriormente¹⁵. El artículo al que se hace referencia considera aplicaciones de ACM tolerantes a una reducción en la tasa de información.

La probabilidad de que la PER de un sistema satelital que utiliza ACM se degrade hasta un nivel inutilizable es extremadamente baja hasta que el conjunto de MODCOD de ACM haya agotado sus alternativas de codificación disponibles. Por consiguiente, ya no es necesario proporcionar tanto un valor de rendimiento de error como uno de disponibilidad para

¹³ [EPFD Part I Overview WRS-2024.pdf](#)

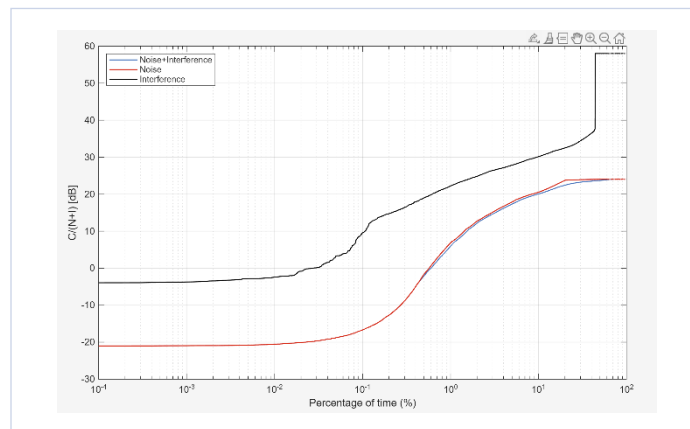
¹⁴ Recomendación UIT-R S.2131-1

¹⁵ Gerald Shewan, “Medida alternativa de rendimiento para enlaces satelitales que emplean codificación y modulación adaptativas”, 30.^a Conferencia Internacional de Sistemas de Comunicaciones Satelitales de AIAA (ICSSC-2012), del 24 al 27 de septiembre de 2012, Ottawa, Canadá.

especificar el rendimiento de HRDP satelitales. Además, el objetivo de rendimiento adecuado sería independiente de la tasa del canal y podría aplicarse a cualquier tasa “nominal” utilizada.

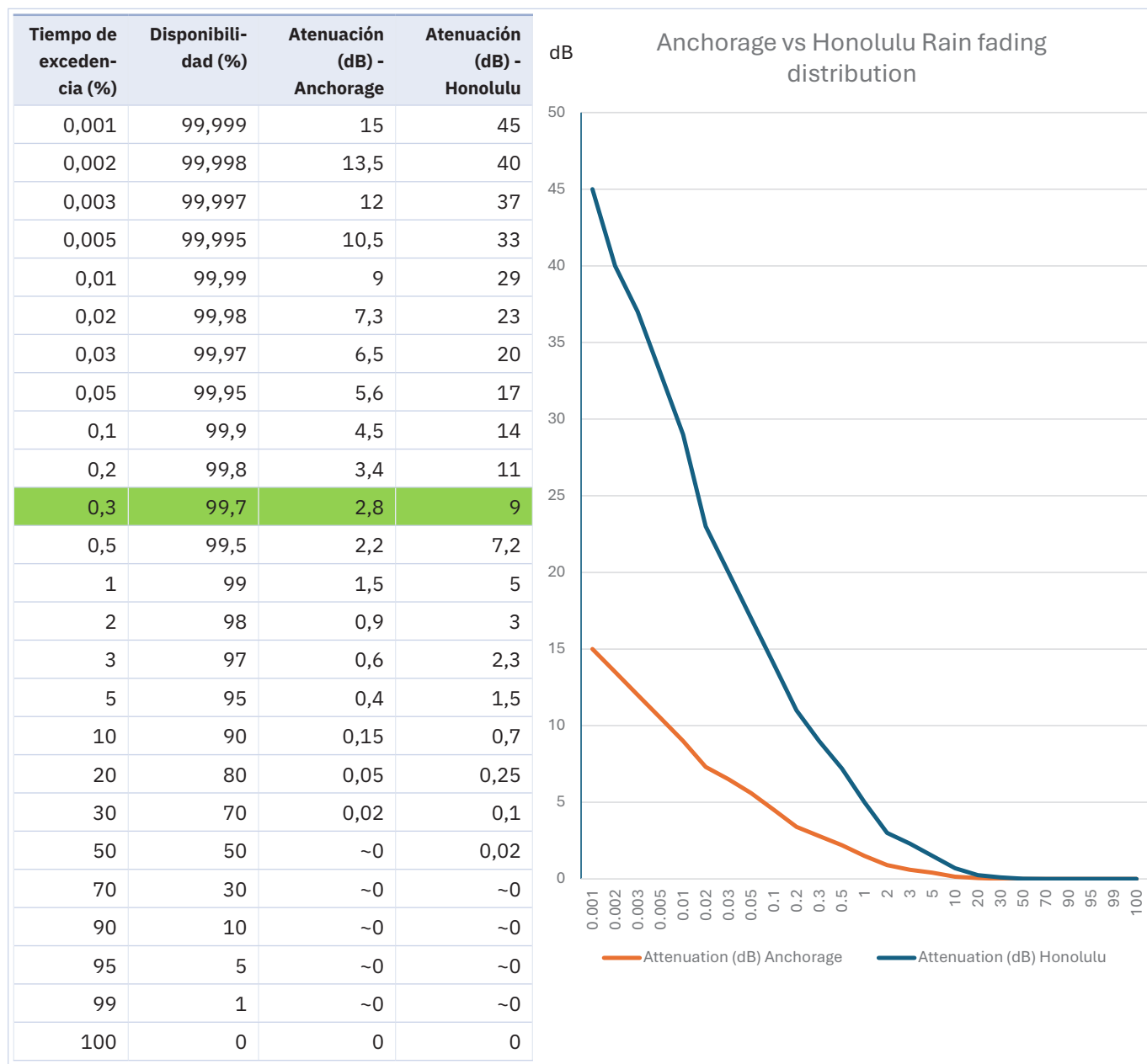
Teniendo en cuenta todo lo anterior, en la presente investigación se ha analizado en mayor profundidad, con base en la metodología de la Recomendación UIT-R S.2131-1, cuál sería la degradación de la eficiencia espectral y del rendimiento del enlace de usuario en tierra del sistema GSO para dos ubicaciones representativas situadas en latitudes extremas: Anchorage (Alaska) y Honolulu (Hawái). Para ello, se ha incorporado en la metodología de la UIT la interferencia de los satélites NGSO, ya que la relación C/I sigue la misma distribución que la relación C/N debido a la distribución del desvanecimiento por condiciones meteorológicas en función del tiempo de excedencia, según la Recomendación UIT-R P.618 para una conexión satelital que utiliza ACM.

Figura 37: Correlación entre la distribución de la interferencia y el ruido basada en el tiempo de excedencia del desvanecimiento por condiciones meteorológicas



Por lo tanto, se ha estimado la distribución del desvanecimiento por lluvia para las ubicaciones de Anchorage y Honolulu, evaluando el impacto global de C/N+I sobre la degradación de la eficiencia espectral, en función del tiempo de excedencia del desvanecimiento por condiciones meteorológicas, para una disponibilidad del sistema del 99,7 %.

Figura 38: Distribución del desvanecimiento por lluvia en Anchorage y Honolulu



La eficiencia espectral también se ha calculado considerando la metodología de la Recomendación UIT-R S.2131-1, pero incluyendo también el impacto de la interferencia en la degradación de la eficiencia espectral. La eficiencia espectral teórica máxima, según la UIT-R S.2131-1, considerando una relación C/N = 24 dB, es de aproximadamente 5,653 b/s/Hz.

En las siguientes tablas, se muestra la degradación promedio de la eficiencia espectral en función del tiempo de excedencia del desvanecimiento por condiciones meteorológicas, lo que corresponde también a una degradación promedio del rendimiento, para las ubicaciones de Anchorage y Honolulu, considerando la estimación del nivel de interferencia I basada en los valores de EPFD previamente calculados.

Tabla 4: Estimación de la degradación de la eficiencia espectral en Anchorage

				Eficiencia espectral			Degradación de la eficiencia espectral						
T%	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	$\Delta T\%$	$\varphi(T\%) \Delta T\%$ C/N	$\varphi(T\%) \Delta T\%$ C/I	$\varphi(T\%) \Delta T\%$ C/N+I
0,3	21,930	13,360	13,055	5,080	2,983	2,917	0,101	0,472	0,484	0,100	0,010	0,047	0,048
0,4	22,230	14,688	14,272	5,161	3,279	3,185	0,087	0,420	0,437	0,100	0,009	0,042	0,044
0,5	22,530	15,732	15,215	5,243	3,519	3,400	0,072	0,377	0,399	0,100	0,007	0,038	0,040
0,6	22,670	17,183	16,479	5,282	3,864	3,695	0,066	0,316	0,346	0,100	0,007	0,032	0,035
0,7	22,810	18,401	17,491	5,320	4,163	3,939	0,059	0,264	0,303	0,100	0,006	0,026	0,030
0,8	22,950	19,436	18,264	5,359	4,424	4,129	0,052	0,217	0,270	0,100	0,005	0,022	0,027
0,9	23,090	20,847	19,352	5,398	4,791	4,403	0,045	0,153	0,221	0,100	0,005	0,015	0,022
1	23,230	22,063	20,168	5,437	5,116	4,613	0,038	0,095	0,184	0,500	0,019	0,047	0,092
1,5	23,530	27,488	21,845	5,520	5,653	5,057	0,023	0,000	0,105	0,500	0,012	0,000	0,053
2	23,830	32,000	22,665	5,605	5,653	5,280	0,009	0,000	0,066	0,500	0,004	0,000	0,033
2,5	23,980	32,000	23,035	5,647	5,653	5,382	0,001	0,000	0,048	0,500	0,001	0,000	0,024
3	24,130	32,000	23,275	5,653	5,653	5,449	0,000	0,000	0,036	0,500	0,000	0,000	0,018
3,5	24,180	32,000	23,578	5,653	5,653	5,534	0,000	0,000	0,021	0,500	0,000	0,000	0,011
4	24,230	32,000	23,865	5,653	5,653	5,614	0,000	0,000	0,007	0,500	0,000	0,000	0,003
4,5	24,280	32,000	24,020	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000	0,000	0,000
5	24,330	32,000	24,146	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000	0,000	0,000
5,6	24,360	32,000	24,205	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
6,6	24,410	32,000	24,305	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	1,400	0,000	0,000	0,000
8	24,480	32,000	24,391	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,000	0,000	0,000	0,000
10	24,580	32,000	24,494	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,200	0,000	0,000	0,000
12,2	24,602	32,000	24,584	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,300	0,000	0,000	0,000
14,5	24,625	32,000	24,607	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,500	0,000	0,000	0,000
17	24,650	32,000	24,634	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,000
20	24,680	32,000	24,665	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
30	24,710	32,000	24,706	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
40	24,720	32,000	24,719	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
50	24,730	32,000	24,729	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	50,000	0,000	0,000	0,000
100	24,730	32,000	24,730	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
							Degradación de la eficiencia espectral [%]				0,084	0,269	0,480

Tabla 5: Estimación de la degradación de la eficiencia espectral en Honolulu

				Eficiencia espectral			Degradación de la eficiencia espectral						
T%	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	ΔT%	φ(T%) C/N	φ(T%) C/I	φ(T%) C/N+I
0,3	15,730	15,432	13,480	3,519	3,450	3,010	0,378	0,390	0,468	0,100	0,038	0,039	0,047
0,4	16,630	16,704	14,130	3,731	3,749	3,154	0,340	0,337	0,442	0,100	0,034	0,034	0,044
0,5	17,530	17,632	14,777	3,948	3,973	3,299	0,302	0,297	0,416	0,100	0,030	0,030	0,042
0,6	17,970	18,482	15,351	4,056	4,183	3,431	0,282	0,260	0,393	0,100	0,028	0,026	0,039
0,7	18,410	19,190	15,852	4,165	4,362	3,548	0,263	0,228	0,372	0,100	0,026	0,023	0,037
0,8	18,850	19,864	16,275	4,276	4,534	3,647	0,244	0,198	0,355	0,100	0,024	0,020	0,035
0,9	19,290	20,385	16,719	4,387	4,669	3,752	0,224	0,174	0,336	0,100	0,022	0,017	0,034
1	19,730	20,890	17,093	4,500	4,802	3,842	0,204	0,151	0,320	0,500	0,102	0,075	0,160
1,5	20,730	22,817	18,409	4,760	5,322	4,165	0,158	0,059	0,263	0,500	0,079	0,029	0,132
2	21,730	24,579	19,336	5,026	5,653	4,399	0,111	0,000	0,222	0,500	0,055	0,000	0,111
2,5	22,080	26,134	20,040	5,121	5,653	4,580	0,094	0,000	0,190	0,500	0,047	0,000	0,095
3	22,430	27,154	20,545	5,216	5,653	4,711	0,077	0,000	0,167	0,500	0,039	0,000	0,083
3,5	22,630	28,057	21,074	5,271	5,653	4,851	0,068	0,000	0,142	0,500	0,034	0,000	0,071
4	22,830	28,734	21,584	5,326	5,653	4,987	0,058	0,000	0,118	0,500	0,029	0,000	0,059
4,5	23,030	29,224	21,899	5,381	5,653	5,071	0,048	0,000	0,103	0,500	0,024	0,000	0,051
5	23,230	32,000	22,142	5,437	5,653	5,137	0,038	0,000	0,091	0,600	0,023	0,000	0,055
5,6	23,326	32,000	22,388	5,463	5,653	5,204	0,034	0,000	0,079	1,000	0,034	0,000	0,079
6,6	23,486	32,000	22,667	5,508	5,653	5,281	0,026	0,000	0,066	1,400	0,036	0,000	0,092
8	23,710	32,000	23,029	5,571	5,653	5,381	0,015	0,000	0,048	2,000	0,029	0,000	0,096
10	24,030	32,000	23,356	5,653	5,653	5,472	0,000	0,000	0,032	2,200	0,000	0,000	0,071
12,2	24,129	32,000	23,685	5,653	5,653	5,564	0,000	0,000	0,016	2,300	0,000	0,000	0,036
14,5	24,233	32,000	24,042	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,500	0,000	0,000	0,000
17	24,345	32,000	24,158	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,000
20	24,480	32,000	24,300	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
30	24,630	32,000	24,582	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
40	24,670	32,000	24,659	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
50	24,710	32,000	24,701	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	50,000	0,000	0,000	0,000
100	24,730	32,000	24,730	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
							Degradación de la eficiencia espectral [%]				0,734	0,293	1,470

Conclusiones

Teniendo en cuenta el procedimiento de la Recomendación UIT-R S.2131-1 para la degradación promedio anual de la eficiencia espectral, se observa que, para dos ubicaciones situadas en latitudes extremas, el efecto combinado de C/N+I en ambas ubicaciones es el siguiente:

- ❖ Anchorage (lat. 61,1°): se observa una degradación de hasta el 0,48 % en la eficiencia espectral promedio y, respectivamente, en la pérdida de rendimiento.
- ❖ Honolulu (lat. 21,32°): se observa una degradación de hasta el 1,47 % en la eficiencia espectral media y, respectivamente, en la pérdida de rendimiento, debido principalmente al desvanecimiento por lluvias tropicales que degrada aún más la relación C/I+N.

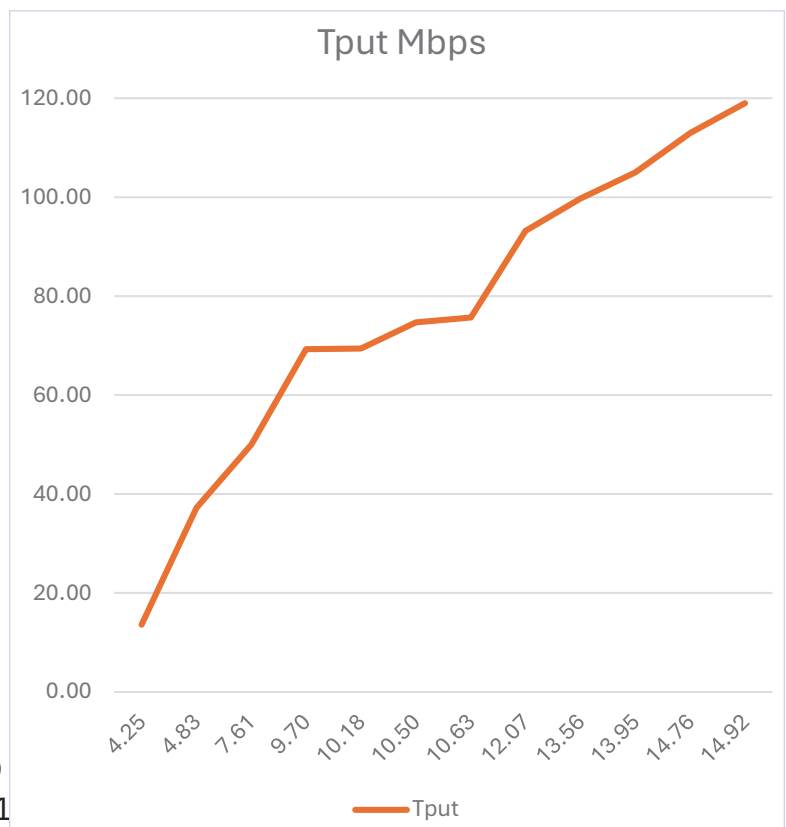
Estos valores representan un nivel aceptable de degradación de la eficiencia espectral de los sistemas GSO, que puede compensarse con los sistemas de ACM existentes.

Con el fin de evaluar el impacto de dichas degradaciones, se realizó un ensayo de laboratorio sobre un módem DVB-S2 real, modelo Newtec EL470, con un ancho de banda de canal (CBW) de 36 MHz, sobre un canal satelital emulado, evaluando el límite de un sistema GSO en presencia de interferencia NGSO.

Tabla 6: Degradación del rendimiento de los MODCOD en ensayos de laboratorio para distintos niveles de C/I

MODCOD	CIR	Ren- dimien- to (Mbps)	Pérdida de ren- dimien- to
QPSK-1/4	4,25	13,60	-2,2 %
QPSK-2/3	4,83	37,20	-0,8 %
QPSK-9/10	7,61	50	-2,2 %
8PSK-5/6	9,70	69,30	-2,3 %
8PSK-5/6	10,18	69,40	-2,1 %
8PSK-9/10	10,50	74,70	-2,5 %
8PSK-9/10	10,63	75,70	-1,2 %
16APSK-5/6	12,07	93,20	-1,2 %
16 APSK-9/10	13,56	99,70	-2,3 %
32APSK-3/4	13,95	105	-0,9 %
32APSK-5/6	14,76	113	-1,7 %
32APSK-9/10	14,92	119	-2,5 %

Como resultado, para el tipo MODCOD máximo alcanzable en laboratorio de 1



36 MHz, la primera degradación del rendimiento, del 2,5 %, se produce a una relación C/I de 14,92 dB. Por lo tanto, desde el punto de vista de la relación C/I, un sistema real DVB-S2 en tierra del sistema GSO es capaz de operar con un nivel de interferencia muy por debajo del valor ideal de C/N de 24 dB, tal como se ha mencionado anteriormente en la Recomendación UIT-R S.2131-1. 1.

Con el fin de evaluar el ángulo fuera de eje correspondiente para el cual la relación C/I supera el valor crítico de 14,92 dB, se ha considerado, a partir de simulaciones previas, una ubicación típica en el área de Nueva York, para permitir una correlación entre EPFD, C/I y los ángulos fuera de eje, con el objetivo de determinar el ángulo fuera de eje mínimo para el cual es alcanzable una relación C/I de 14,92 dB.

Figura 39: Picos de EPFD para Nueva York, simulación con antena NGSO direccional según la UIT

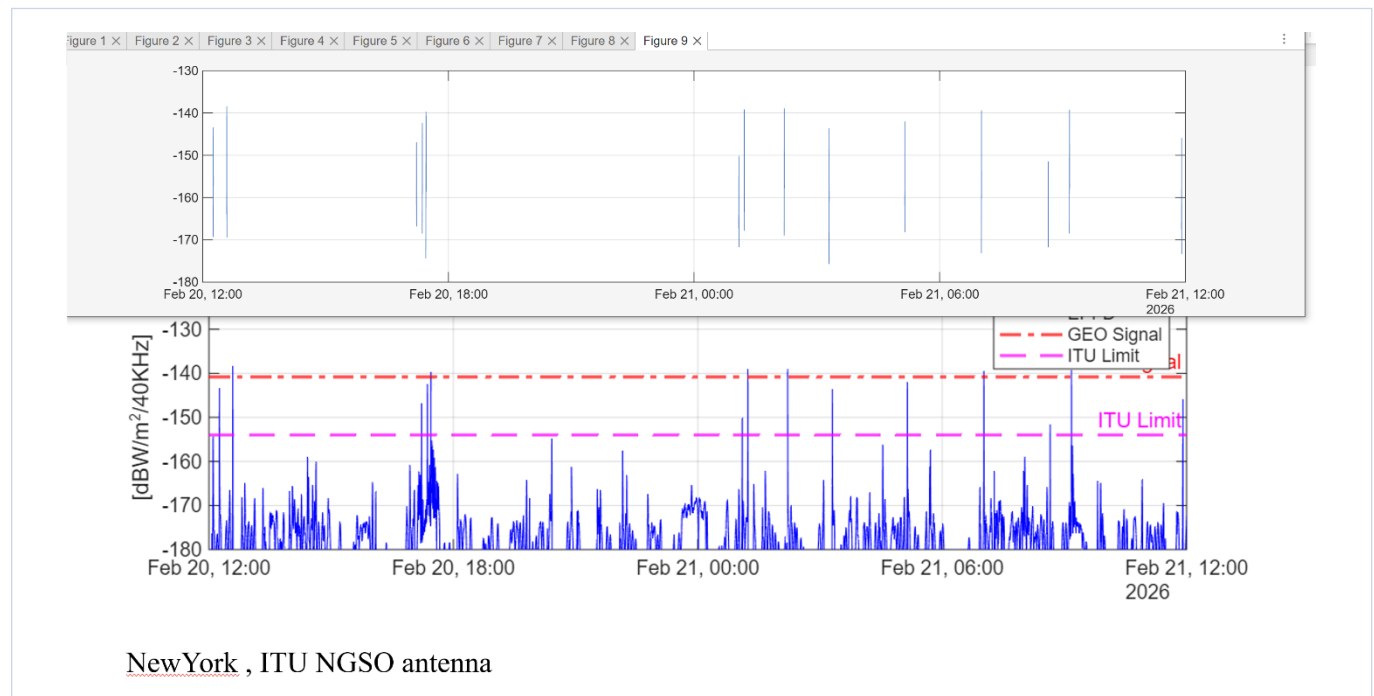
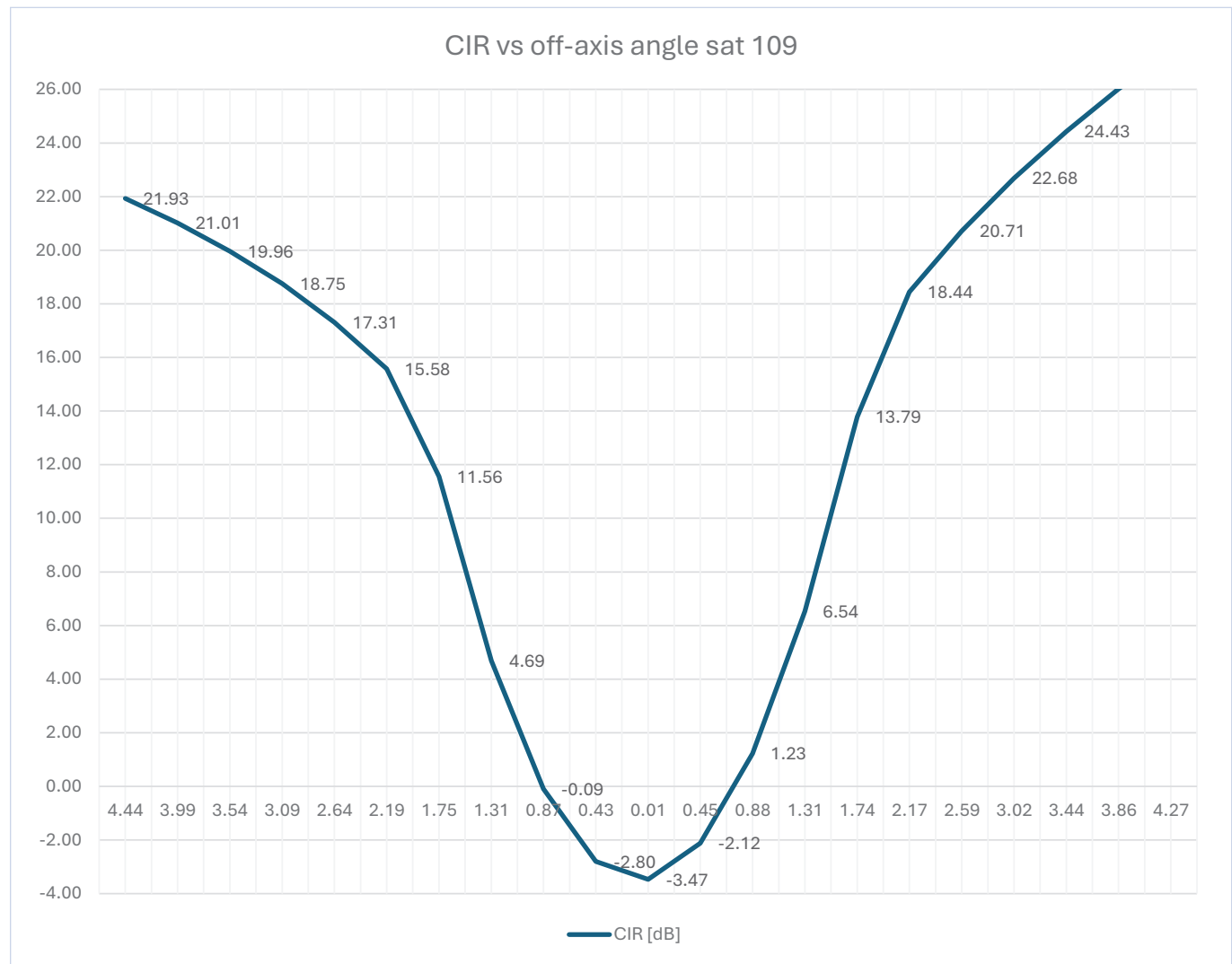


Tabla 7: Valores de EPFD correspondientes al ángulo fuera de eje

Tiempo	ID de pico	ID de satélite	EPFD	Ángulo fuera de eje	CIR GEO
20/2/2026 12:35	2	109	-163,9	4,44	21,9
20/2/2026 12:35	2	109	-163	3,99	21
20/2/2026 12:35	2	109	-162	3,54	20
20/2/2026 12:35	2	109	-160,7	3,09	18,7
20/2/2026 12:35	2	109	-159,3	2,64	17,3
20/2/2026 12:35	2	109	-157,6	2,19	15,6
20/2/2026 12:35	2	109	-153,6	1,75	11,6

Tiempo	ID de pico	ID de satélite	EPFD	Ángulo fuera de eje	CIR GEO
20/2/2026 12:35	2	109	-146,7	1,31	4,7
20/2/2026 12:35	2	109	-141,9	0,87	-0,1
20/2/2026 12:35	2	109	-139,2	0,43	-2,8
20/2/2026 12:35	2	109	-138,5	0,01	-3,5
20/2/2026 12:35	2	109	-139,9	0,45	-2,1
20/2/2026 12:35	2	109	-143,2	0,88	1,2
20/2/2026 12:35	2	109	-148,5	1,31	6,5
20/2/2026 12:35	2	109	-155,8	1,74	13,8
20/2/2026 12:35	2	109	-160,4	2,17	18,4
20/2/2026 12:35	2	109	-162,7	2,59	20,7
20/2/2026 12:35	2	109	-164,7	3,02	22,7
20/2/2026 12:35	2	109	-166,4	3,44	24,4
20/2/2026 12:35	2	109	-168	3,86	26
20/2/2026 12:35	2	109	-169,5	4,27	27,5

Figura 40: CIR en función del ángulo fuera de eje



Entre los 15 picos de EPFD identificados en la simulación para Nueva York con antena direccional NGSO según la UIT, se ha tomado como ejemplo el segundo pico (ID de pico = 2), para el cual se puede observar que, para una relación C/I = 15,6 dB (> 14,92 dB), el ángulo fuera de eje teórico correspondiente es aproximadamente igual a 2,2°, valor que se encuentra muy por debajo de un ángulo fuera de eje típico, sin considerar ningún control de potencia de transmisión.

Esta estimación muestra que, a pesar de superar ampliamente la zona de exclusión típica de la UIT dentro de un ángulo alfa (+/- 15°~), la relación C/I obtenida se mantiene dentro de un nivel operativo, lo que solo puede provocar una degradación espectral del 2,5 %, según las mediciones realizadas en los ensayos de laboratorio.

Por otro lado, al analizar las Tablas 4 y 5, puede concluirse que, teóricamente, para una degradación máxima de la eficiencia espectral del 2,5 % en un receptor en tierra GSO, lo que corresponde a 5,43 b/s/Hz, la relación C/(N+I) debería ser de al menos ~23 dB, lo que

teóricamente corresponde a un ángulo fuera de eje de aproximadamente $4,4^\circ$, valor que sigue estando muy por debajo de un ángulo fuera de eje típico, permitiendo avanzar en futuros estudios orientados a una mayor reducción de la zona de exclusión y al aumento de la capacidad de las redes NGSO.

Impacto en servicios GSO específicos sin ACM

Entre las generaciones DVB-S de 2005 y DVB-S2 de 2025 en sistemas de radiodifusión como DirecTV, la relación C/N requerida aumentó de aproximadamente 5 o 6 dB a alrededor de entre 9,5 y 10,5 dB debido a modulaciones de orden superior, pero esto se compensó con una ganancia acumulativa del sistema de aproximadamente 5 o 6 dB impulsada por LNB de menor ruido, una mayor eficiencia de la antena, una mayor EIRP satelital y, especialmente, una ganancia de unos 2 dB derivada de la demodulación DVB-S2 basada en LDPC. Como resultado, los enlaces modernos alcanzan márgenes en cielo despejado significativamente más altos (aprox. 4 o 5 dB frente a los aprox. 3 dB anteriores) y mejor disponibilidad (del orden del 99,9 %), a pesar de necesitar también acomodar restricciones emergentes de interferencia, como el ruido agregado de los sistemas NGSO.

Para los servicios de radiodifusión GSO en banda Ka sin ACM (por ejemplo, DirecTV), basados en DVB-S2 (típicamente MODCOD 8PSK 2/3–3/4), el sistema está diseñado en torno a un umbral de recepción requerido de aproximadamente 8 o 9 dB de C/(N+I), mientras que opera en condiciones de cielo despejado con aproximadamente entre 14 y 16 dB de C/N y entre 18 y 22 dB de C/I, lo que da como resultado un margen efectivo utilizable de alrededor de 5 o 6 dB una vez considerada la interferencia. Dado que el sistema de los Servicios utiliza MODCOD fijo (sin ACM), este margen debe absorber tanto la atenuación por lluvia (típicamente de entre 6 y 8 dB para una disponibilidad de alrededor del 99,7 %) como una penalización por interferencia de aproximadamente 1 o 2 dB.

En los sistemas de radiodifusión en banda Ka, la atenuación por lluvia afecta tanto a la portadora como a la interferencia de manera similar debido a que las trayectorias de propagación están altamente correlacionadas; por lo tanto, aunque la interferencia pueda reducirse ligeramente, la relación C/I se mantiene relativamente constante y el enlace se vuelve rápidamente limitado por el ruido. Esto significa que el desvanecimiento por lluvia degrada principalmente la relación C/N y provoca interrupciones, en lugar de proporcionar una mitigación significativa de la interferencia.

Umbral mínimo operativo

Para un enlace DVB-S2 sin ACM que utiliza 8PSK 3/4 (típico de operaciones de radiodifusión), el valor clave mínima requerido de C/(N+I) es: **$\approx 8,5 - 9$ dB**

Esto corresponde a:

- ❖ Operación cuasi libre de errores (QEF)
- ❖ BER después de FEC $\approx 10^{-7}$

✦ Rendimiento normal de decodificación LDPC/BCH en **DVB-S2**

Valor práctico de ingeniería

En sistemas reales, los operadores no diseñan exactamente en el umbral, sino más bien en un **mínimo operativo (con margen)**:

✦ **~9,5–10,5 dB de C/(N+I)**

Este valor contempla las pérdidas de implementación (~0,5–1 dB), el ruido de fase/no linealidades y los errores de estimación de canal

Cómo se combinan C/N y C/I

Porque:

$$\frac{1}{C/(N+I)} = \frac{1}{C/N} + \frac{1}{C/I}$$

El sistema se vuelve inoperable cuando los efectos combinados caen por debajo del umbral MODCOD sin ACM de ~8,5–9 dB

Tabla 8: Cómo se combinan C/N y C/I en sistemas GSO sin ACM

C/N	C/I	C/(N+I) resultante	Estado
14 dB	20 dB	~13 dB	Seguro
10 dB	20 dB	~9,6 dB	Margen
9 dB	20 dB	~8,6 dB	Umbral
8 dB	20 dB	~7,7 dB	Interrupción

En el caso de un enlace de radiodifusión DVB-S2 sin ACM que utiliza 8PSK 3/4, la condición mínima operativa se alcanza aproximadamente en **8,5–9 dB de C/(N+I)** (umbral QEF), mientras que el diseño práctico del sistema apunta a **~10 dB** para garantizar la robustez frente a pérdidas de implementación e interferencia, lo que significa que cualquier combinación de ruido e interferencia que reduzca la relación efectiva por debajo de este nivel provoca una interrupción acelerada del servicio.

A partir de los resultados de ensayos de laboratorio sobre el rendimiento de MODCOD DVB-S2 que se resumen en la Tabla 6, correlacionados con simulaciones masivas de estimación de valores de EPFD de sistemas NGSO, se ha demostrado que para una C/I de 20 dB, el ángulo fuera de eje puede reducirse a 3,54°, lo que afecta ligeramente tanto a sistemas basados en ACM como sin ACM, a un nivel que se gestiona ya sea mediante ACM o mediante codificación FEC.

Disponibilidad del servicio sin ACM

Para un enlace de radiodifusión DVB-S2 sin ACM que utiliza 8PSK 3/4, la interferencia NGSO reduce la $C/(N+I)$ efectiva típicamente entre 1 y 3 dB, según los niveles de interferencia, consumiendo directamente el limitado margen de desvanecimiento por lluvia de entre 4 y 6 dB y desplazando el umbral de interrupción hacia eventos de lluvia menos severos, lo que da como resultado una degradación de la disponibilidad del servicio desde ~99,7 % hasta ~99–99,5 % en escenarios realistas, mientras que la interferencia agregada en el peor caso podría reducir la disponibilidad por debajo del 99 % debido a la incapacidad del sistema de adaptar la modulación o la codificación.

Tabla 9: Interpretación de la disponibilidad en sistemas GSO sin ACM

Escenario	Margen de desvanecimiento	Disponibilidad
Sin NGSO	~5–6 dB	~99,7 %
NGSO leve	~4 dB	~99,5 %
NGSO moderado	~3 dB	~99,2 %
NGSO alto	~2 dB	~98,5–99 %

Evolución de las redes de radiodifusión GSO sin ACM

Por otro lado, en las últimas dos décadas, los sistemas de servicios de radiodifusión han mejorado la calidad y disponibilidad de recepción mediante la combinación de avances en la tecnología de receptores DVB-S2 (en particular, la codificación LDPC y la mejora de la demodulación, que aportan ~2–3 dB), reducciones significativas en la figura de ruido del LNB (~1–2 dB) y mejoras en el rendimiento de las antenas tanto en ganancia como en rechazo a interferencias (~1–2 dB), junto con una mayor EIRP satelital y una mejor conformación del haz, lo que ha dado como resultado una ganancia acumulativa del sistema de ~3–6 dB, que permitió una mayor eficiencia espectral y una operación más robusta frente al desvanecimiento por lluvia y la interferencia sin recurrir a ACM.

Aspectos en los que los sistemas más nuevos son más resilientes

Los receptores DVB-S2 modernos incluyen una mejor demodulación mediante la incorporación de codificación LDPC + BCH (comportamiento en cascada muy sólido), mejor seguimiento del ruido de fase, AGC y filtros mejorados, y menores pérdidas de implementación (mejora de ~0,5–1 dB). Como resultado, pueden operar más cerca del umbral de manera más estable, con mayor tolerancia a ráfagas cortas de interferencia y mejor rendimiento bajo degradaciones bajas o moderadas de C/I . En resumen, esto representa una mejora de robustez de **~1,5–3 dB en $C/(N+I)$ respecto de la era DVB-S**.

Una mejor etapa frontal de RF (LNB + filtrado) garantiza una cifra de ruido más baja (0,3–0,5 dB frente a ~1 dB), junto con una mayor selectividad y estabilidad del oscilador local, lo que se traduce en una leve mejora en el rechazo de interferencias y una menor sensibilidad

a las interferencias similares al ruido de fase, lo que da lugar a una ganancia efectiva de C/I y robustez de **~0,5–1 dB**.

Mejores patrones de antena ofrecen un control mejorado de los lóbulos laterales con una mejor discriminación de polarización cruzada, lo que reduce la sensibilidad a interferentes fuera del eje (incluidos los satélites NGSO fuera del haz principal), con una mejora de **~1–2 dB en la relación C/I (dependiendo de la geometría)**.

Tabla 10: Evolución de la ganancia a nivel de componentes en sistemas GSO sin ACM

Subsistema	2005	2025	Ganancia
Figura de ruido del LNB	~0,9 dB	~0,4 dB	+1,0 dB C/N
Demodulador/FEC	DVB-S	DVB-S2 (LDPC)	+2,0–2,5 dB
Eficiencia de antena	menor	alimentador optimizado	+0,5–1 dB
EIRP del satélite	~51 dBW	~53 dBW	+2 dB
Pérdida de implementación	~1,2 dB	~0,5 dB	+0,7 dB

Mejora total de ganancia del sistema: mejora neta de ~5–6 dB

Los sistemas modernos tipo DirecTV basados en DVB-S2 son intrínsecamente más robustos a nivel de capa física debido a la codificación LDPC avanzada, las mejoras en las etapas frontales de RF y una mejor discriminación de antena, lo que en conjunto incrementa la tolerancia a la degradación de C/(N+I) en aproximadamente 2–4 dB en comparación con los sistemas DVB-S más antiguos. Sin embargo, dado que estos sistemas también operan más cerca de los límites teóricos de eficiencia con modulaciones de orden superior, su margen disponible es más limitado, lo que significa que la interferencia agregada NGSO aún puede tener un impacto comparable a nivel del sistema, a menos que se considere explícitamente en la planificación de enlaces y del espectro.

Anexo 1: Simulación basada en antena satelital omnidireccional

En las siguientes imágenes, se muestran el ángulo fuera del eje, el valor de la EPFD por satélite contribuyente y la EPFD agregada total para cada una de las 12 ubicaciones consideradas.

Los límites de la UIT, de acuerdo con el Art. 22 para la frecuencia y la antena consideradas, se superponen sobre los gráficos de EPFD. El nivel de señal recibido del enlace GSO también se representa como referencia y se utilizará para estimar los parámetros SINR y C/I en las mediciones de laboratorio.

Figura 41: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Anchorage

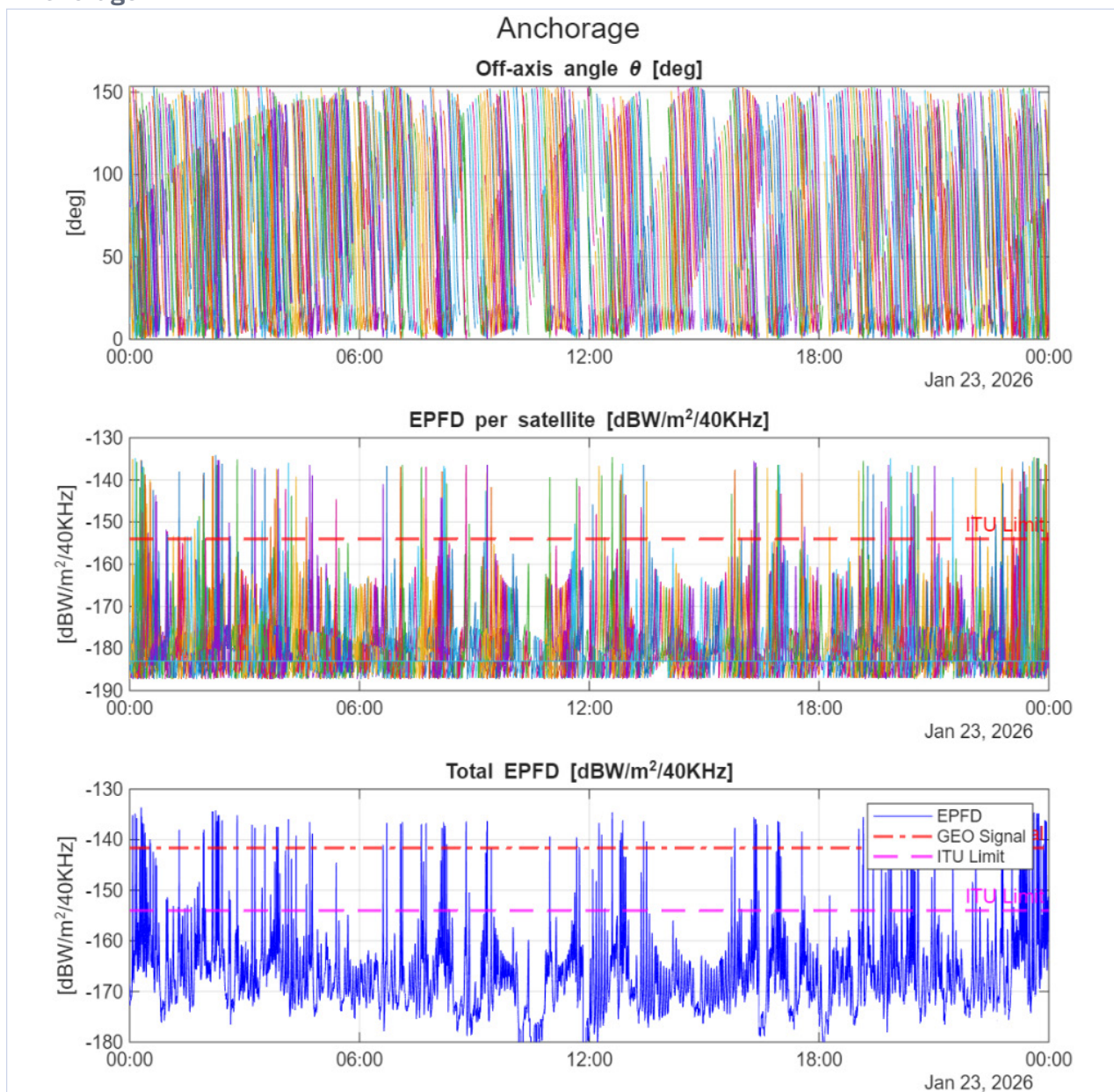


Figura 42: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Chicago

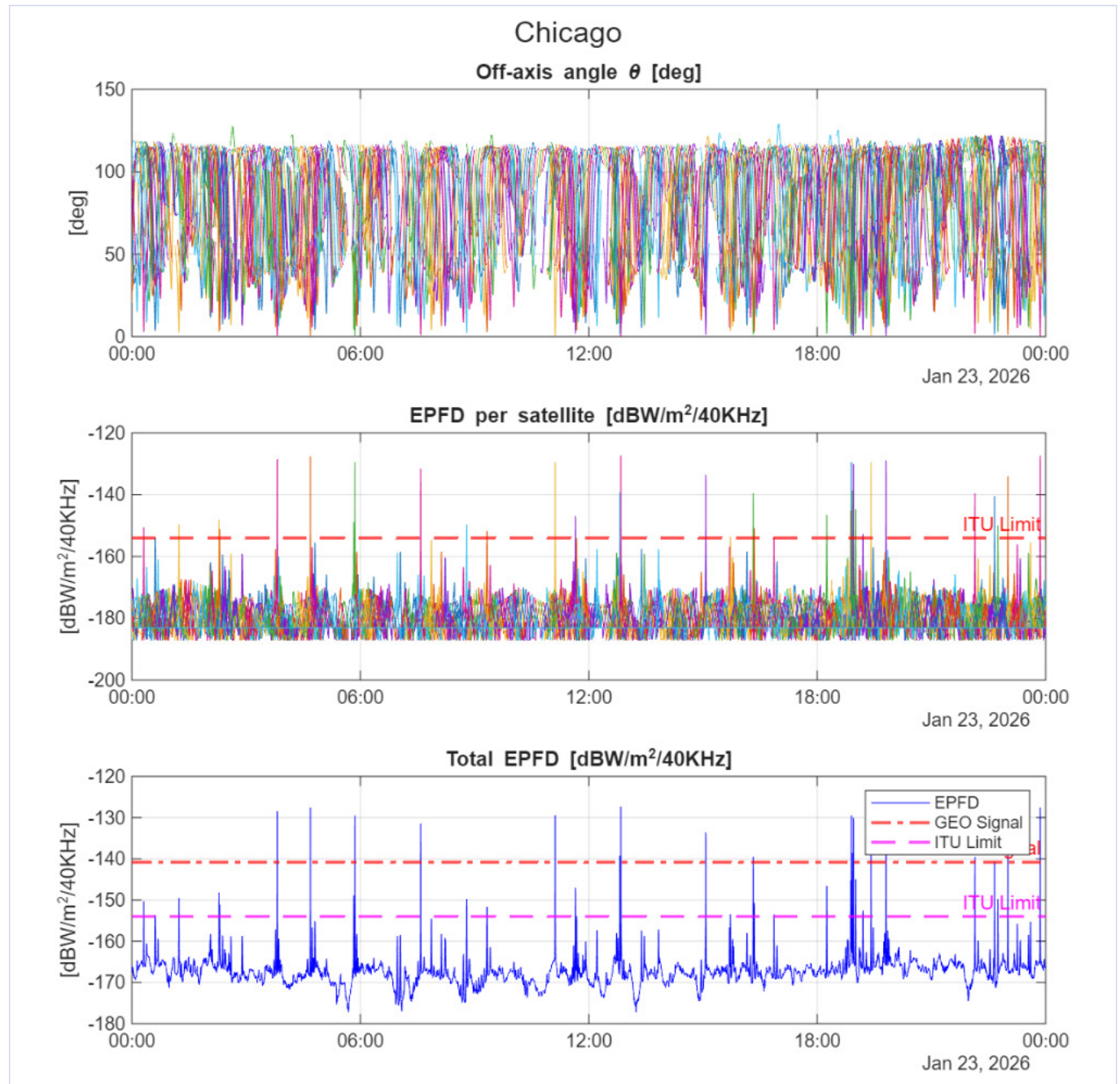


Figura 43: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Dallas

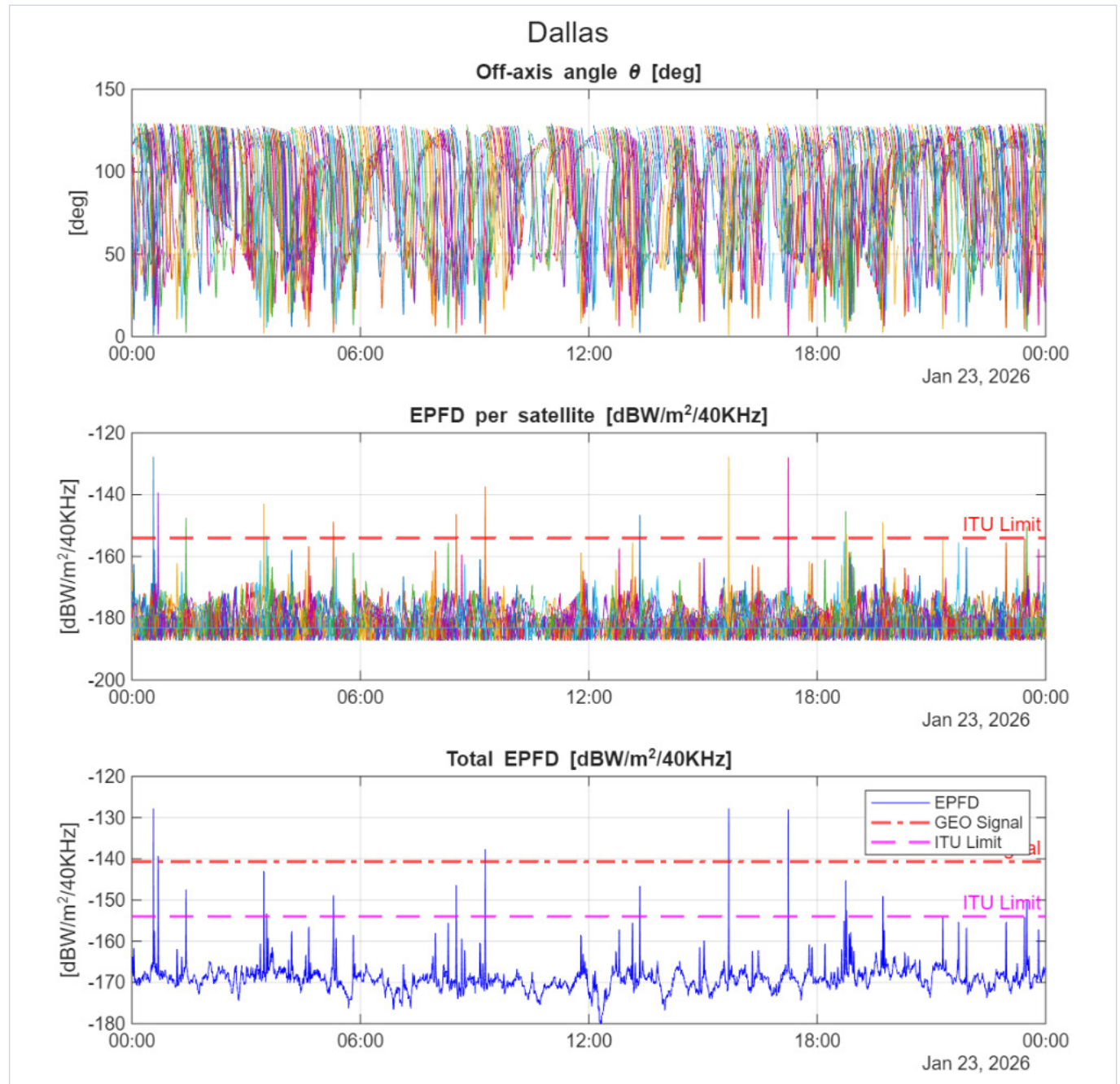


Figura 44: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Denver

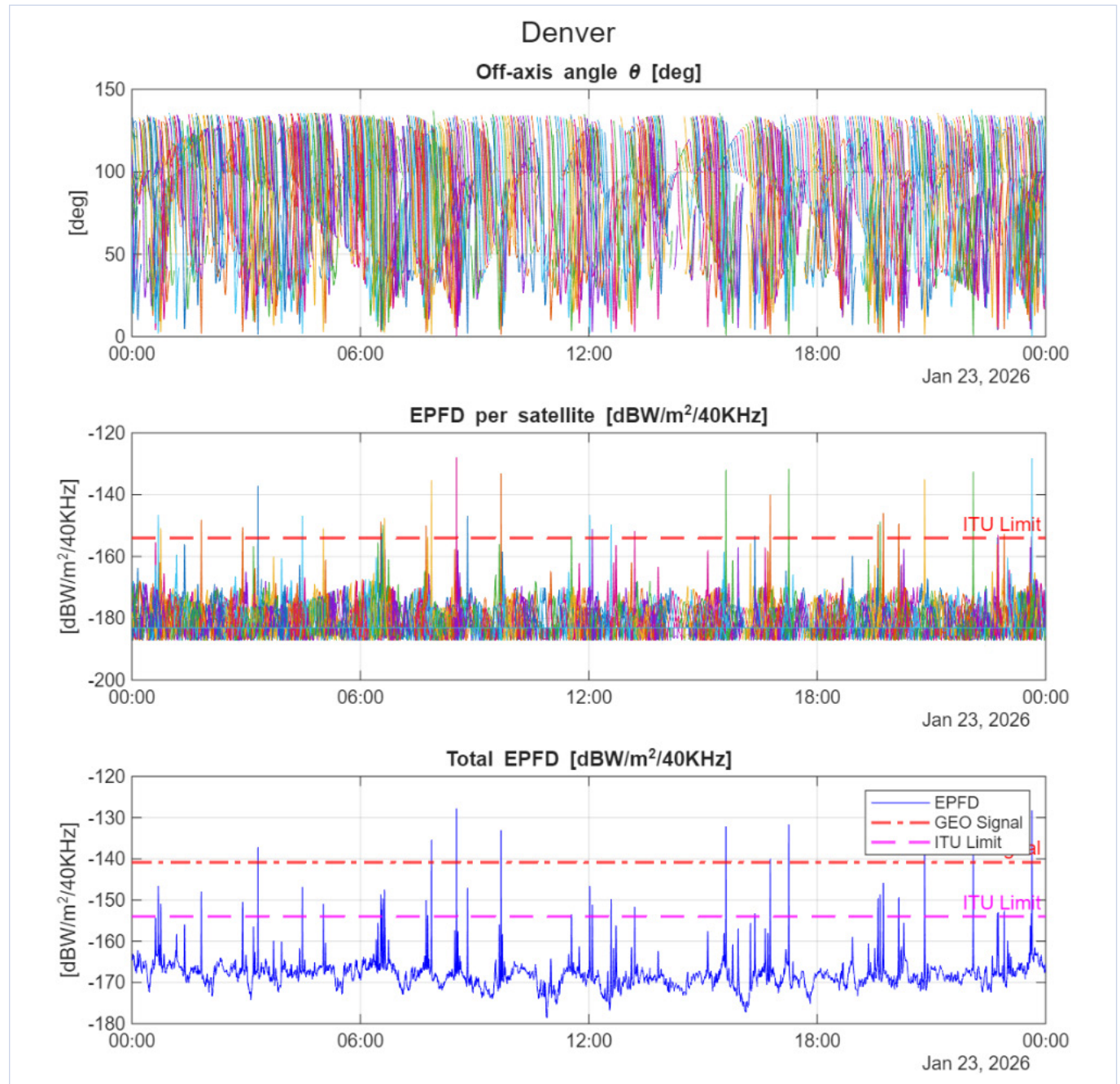


Figura 45: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Honolulu

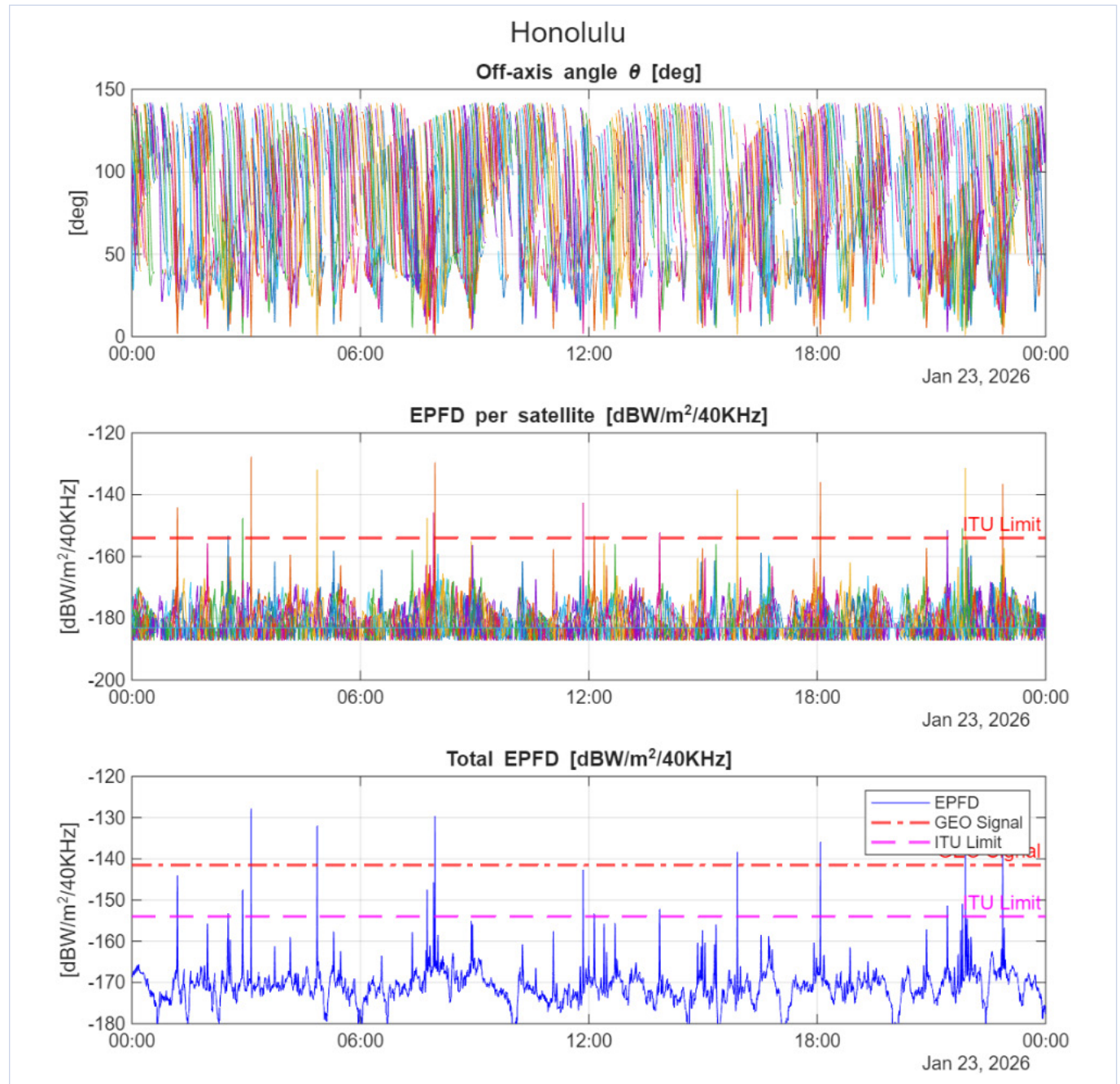


Figura 46: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Kansas

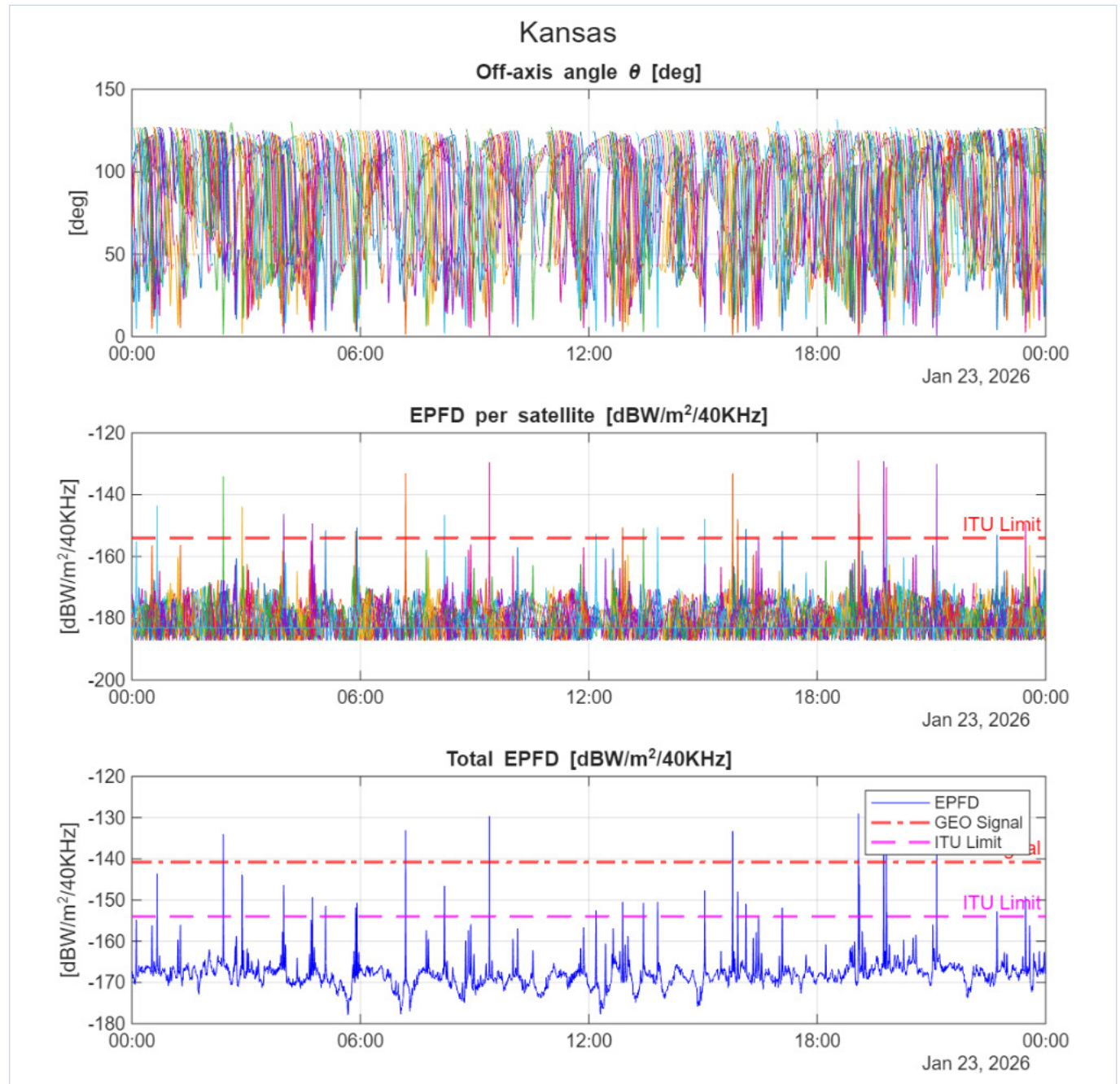


Figura 47: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Los Ángeles

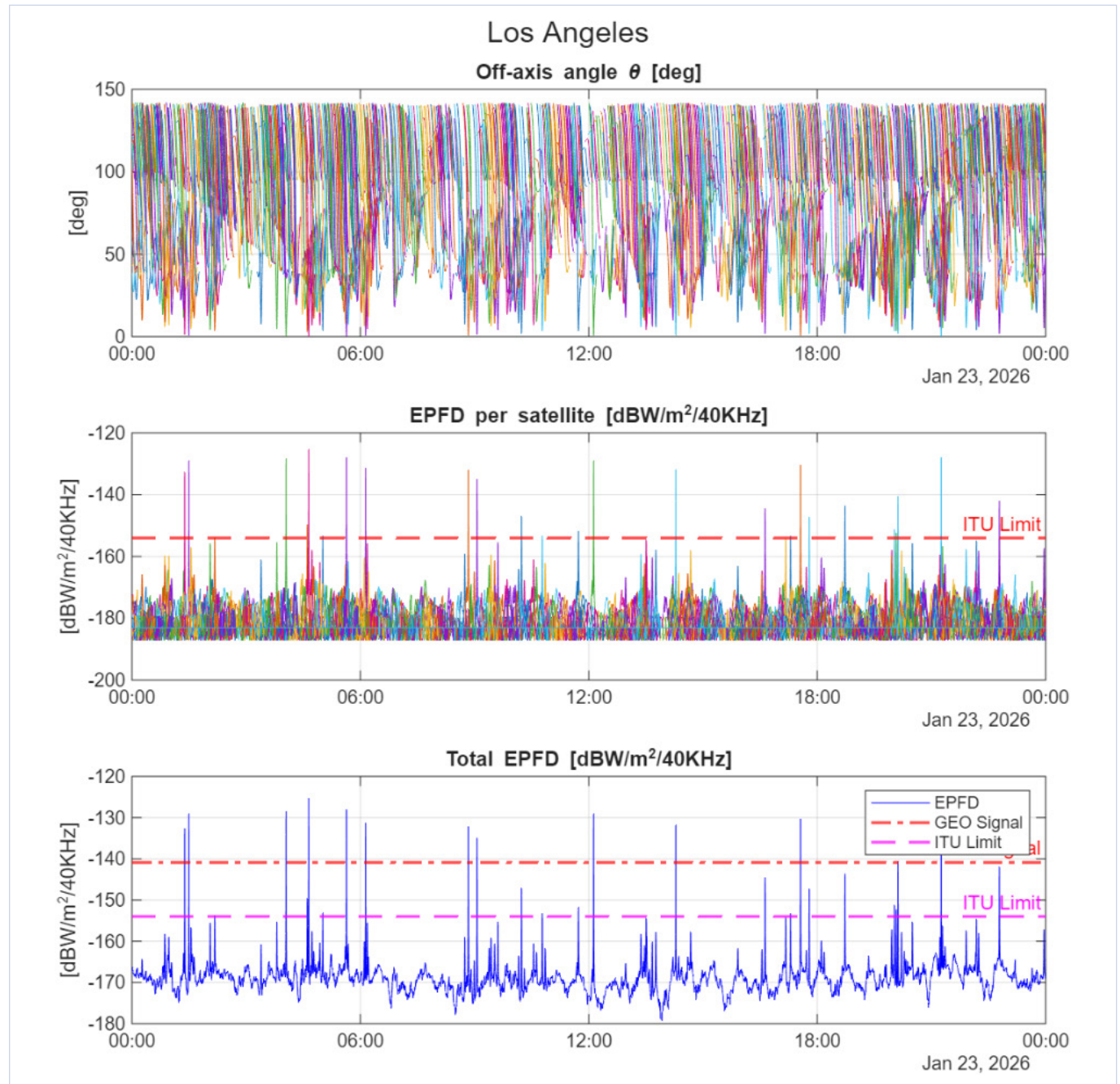


Figura 48: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Miami

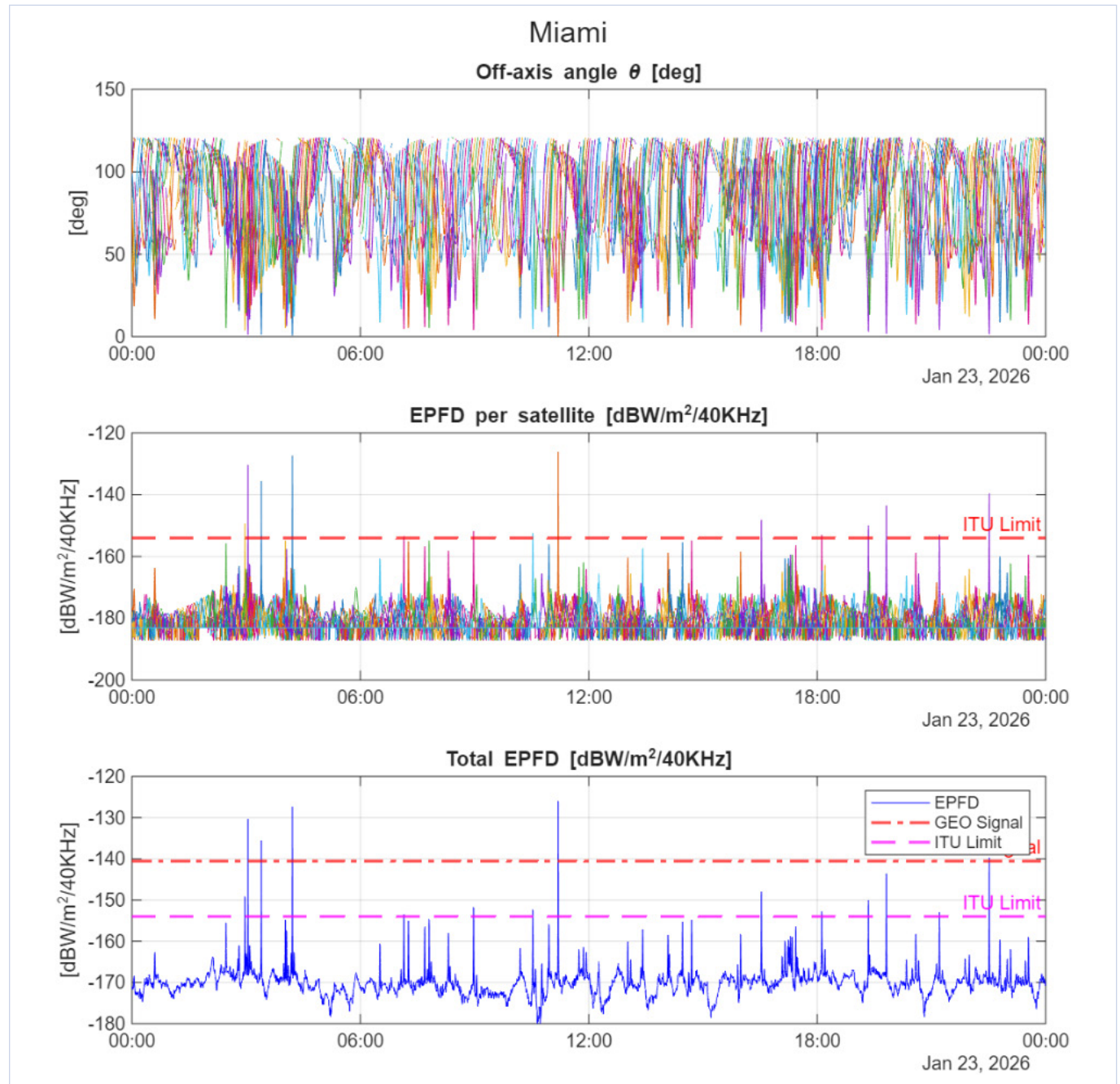


Figura 49: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Nueva York

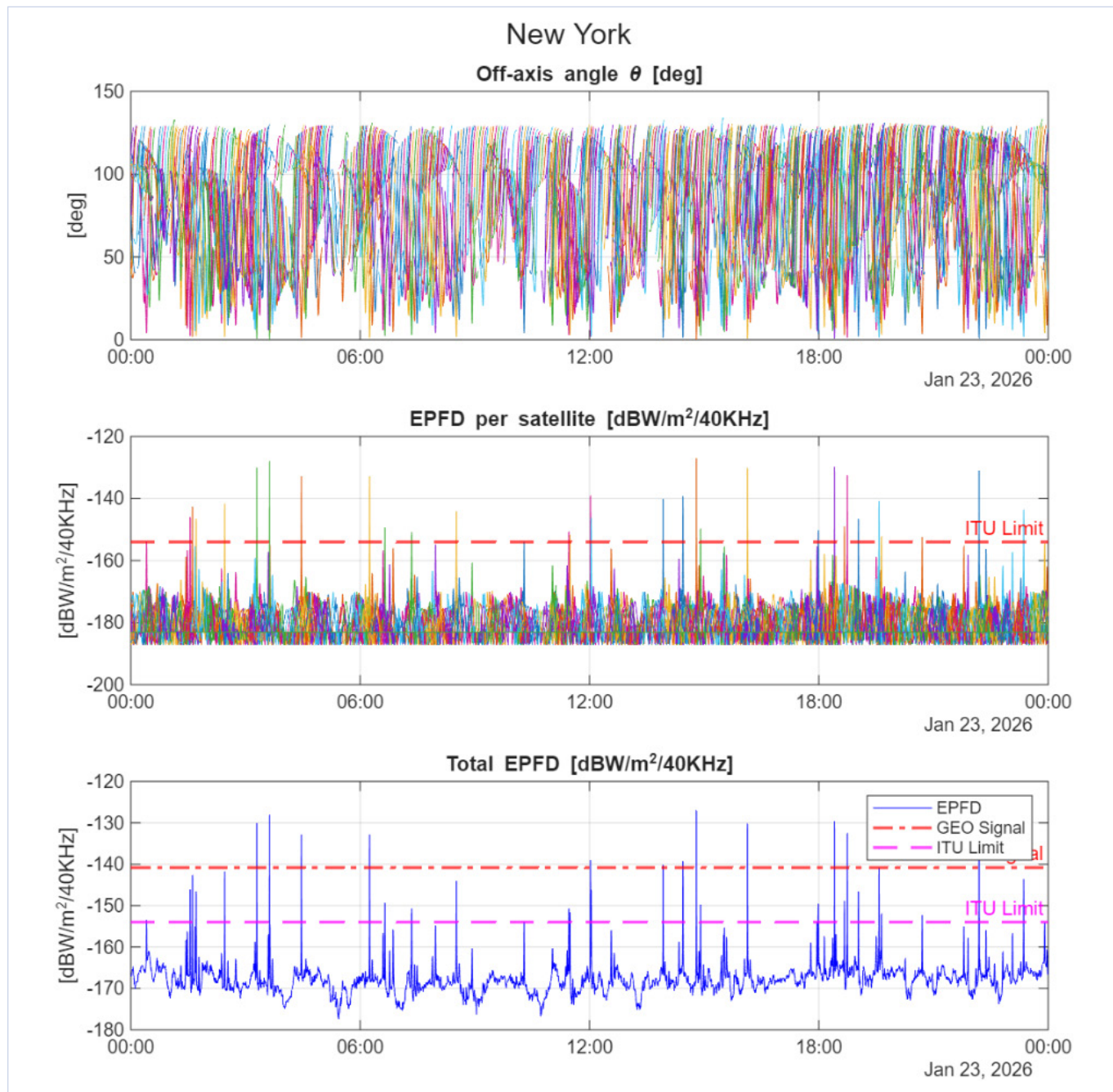


Figura 50: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Phoenix

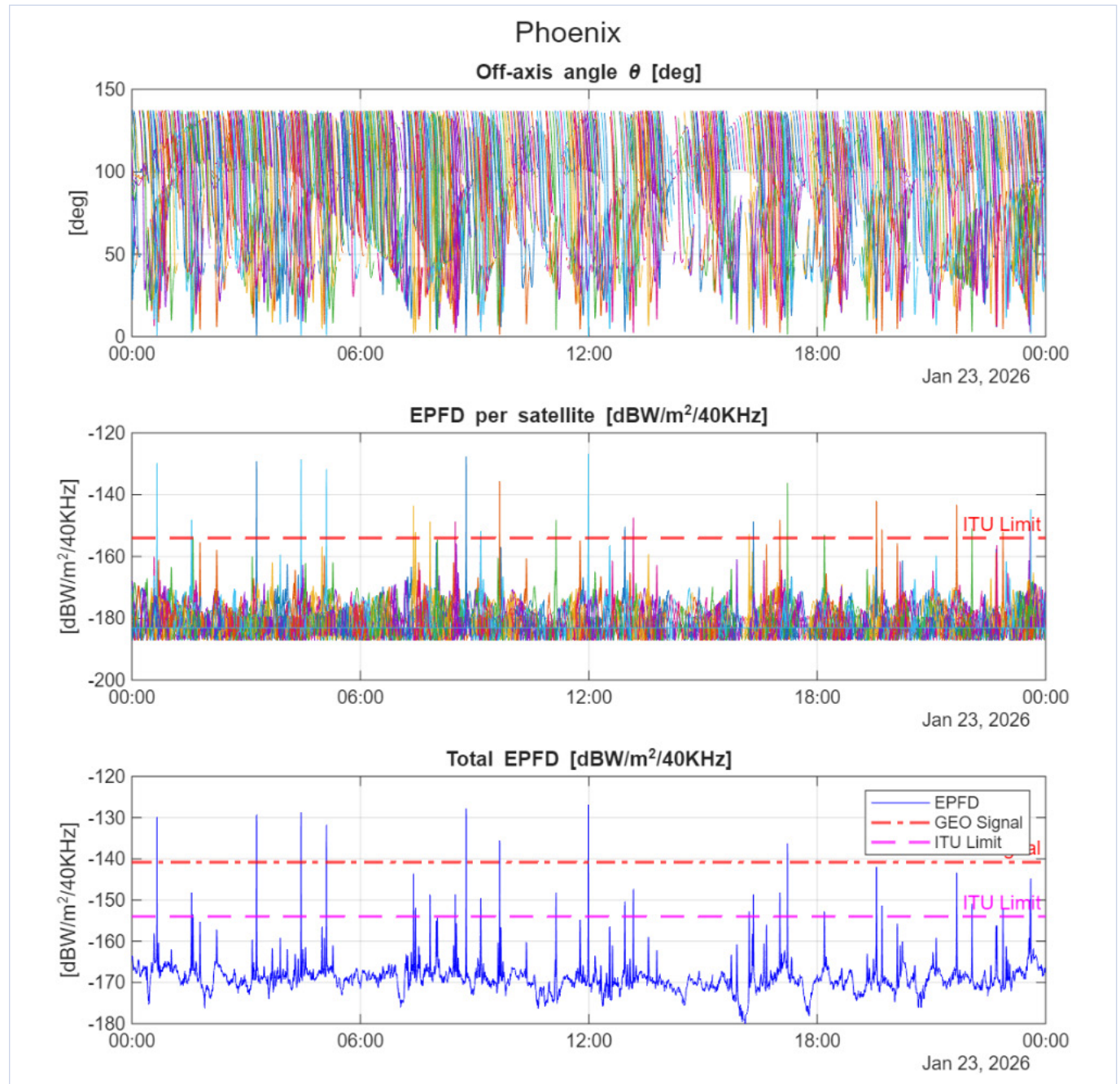


Figura 51: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, Seattle

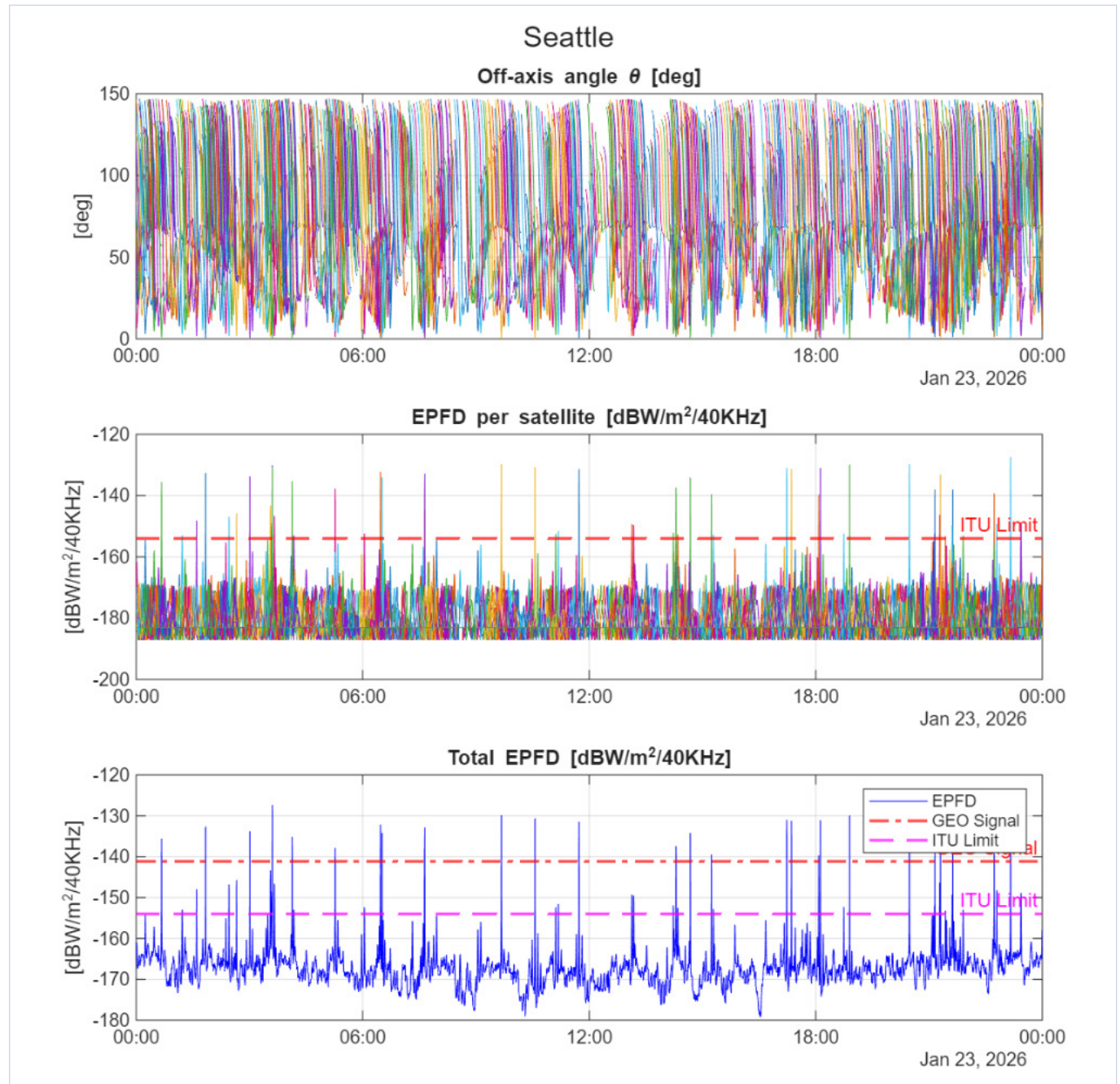
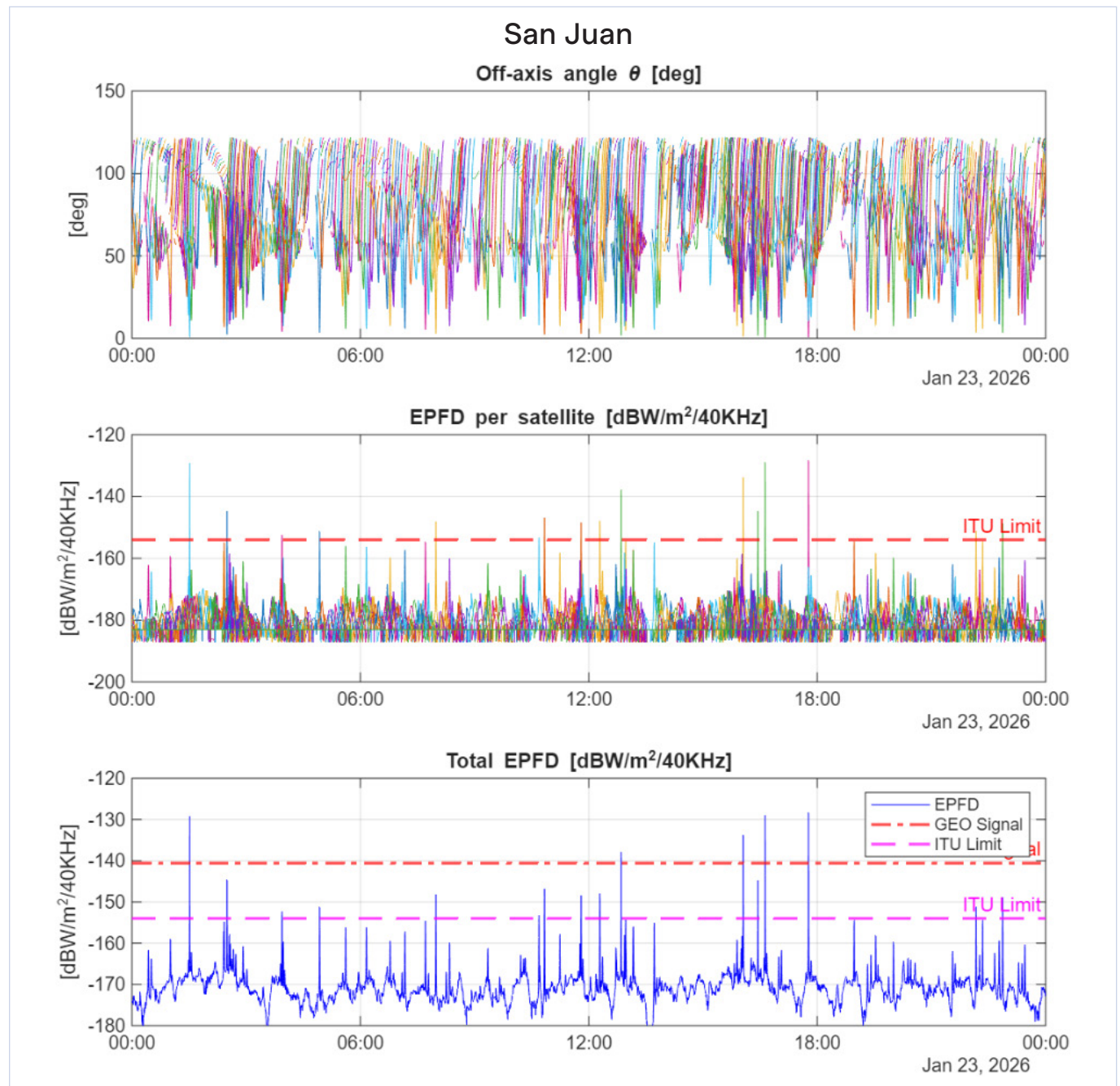


Figura 52: Ángulo fuera del eje, valor de EPFD por satélite contribuyente y EPFD agregada total, San Juan



Resultado del análisis de las ubicaciones

Al analizar los gráficos correspondientes a las 12 ubicaciones, se puede observar un patrón general común en todas ellas:

- ❖ La EPFD agregada de fondo fluctúa típicamente entre -165 y -175 dBW/m²/40 kHz.
- ❖ Los picos máximos de EPFD alcanzan aproximadamente entre -130 y -140 dBW/m²/40 kHz durante eventos de aproximación cercana.
- ❖ El límite del Artículo 22 de la UIT (línea magenta discontinua) se sitúa aproximadamente entre -150 y -152 dBW/m²/40 kHz.
- ❖ El nivel de señal GEO (línea roja de trazo y punto) es de aproximadamente -138 a -142 dBW/m²/40 kHz.

Las observaciones específicas por ubicación se sintetizan en la tabla siguiente:

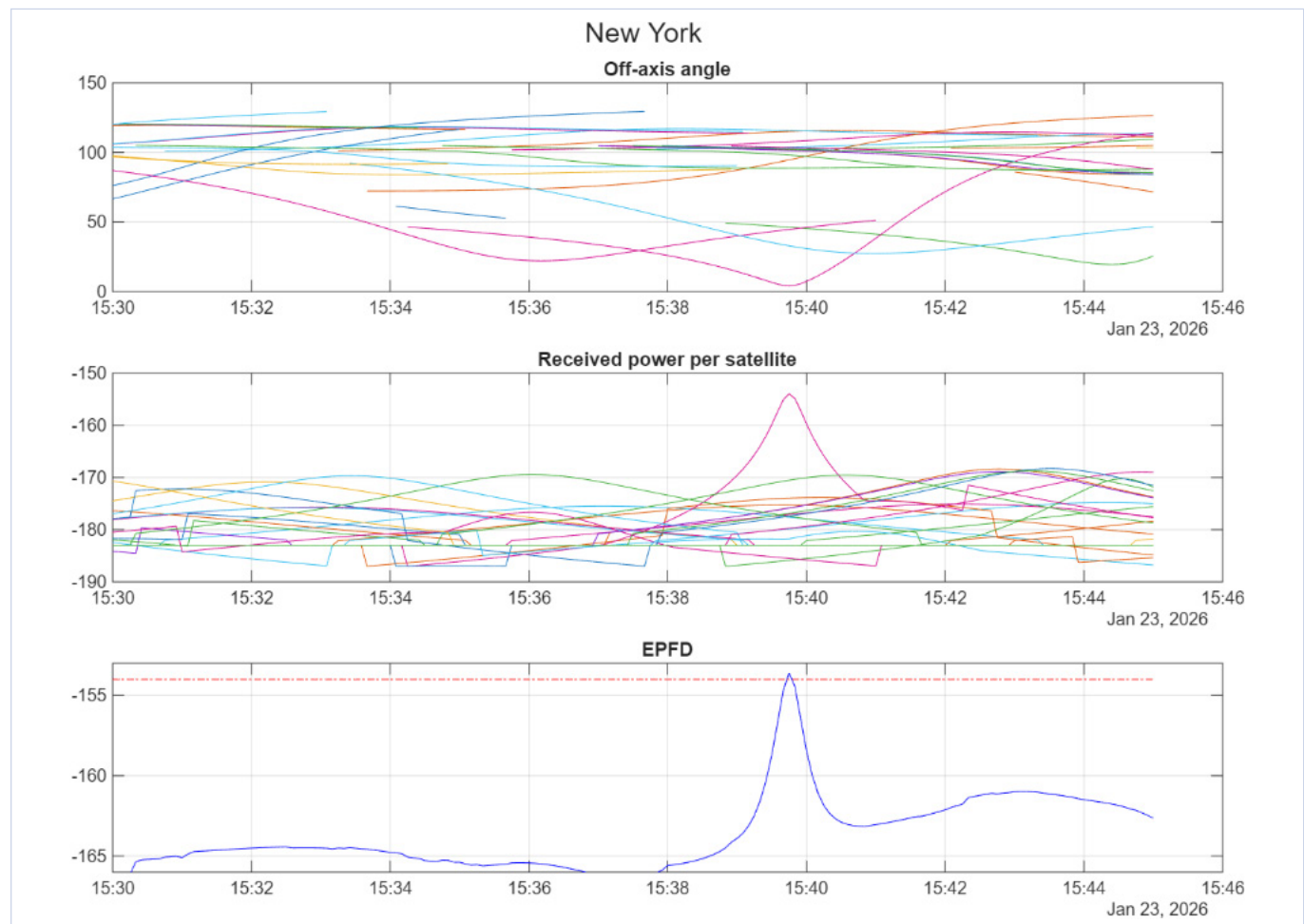
Tabla 11: Observaciones específicas por ubicación

Ubicación	Lat.	Rango típico de EPFD	Picos máximos	Gravedad de las violaciones de la UIT
Anchorage	61,1	-155 a -170	Frecuentes, hasta ~-135	La peor: mayor densidad de violaciones
Seattle	47,6	-155 a -170	Múltiples y prolongados	Segunda peor: eventos de larga duración
Chicago	41,8	-160 a -175	Ocasionales y abruptos	Moderada
Nueva York	40,7	-158 a -175	Ocasionales y abruptos	Moderada
Denver	39,8	-160 a -175	Ocasionales	Moderada
Kansas	39,1	-160 a -175	Ocasionales	Moderada
Los Ángeles	34,0	-162 a -175	Menos frecuentes	Menor
Phoenix	33,6	-162 a -175	Menos frecuentes	Menor
Dallas	32,8	-165 a -175	Esporádicos	Baja
Miami	25,8	-165 a -175	Esporádicos	La más baja
Honolulu	21,3	-163 a -175	Esporádicos	Baja
San Juan	18,4	-163 a -175	Esporádicos	Baja

Un análisis detallado, representado en la Figura 21, revela que solo un único satélite NGSO, el que tiene el ángulo fuera del eje mínimo, es el que más contribuye a la EPFD agregada, mientras que las contribuciones de los satélites NGSO vecinos con ángulos fuera del eje más altos son insignificantes. En la siguiente figura, se muestra en detalle la contribución de EPFD de cada satélite NGSO visible y la EPFD agregada, lo que confirma que la EPFD agregada está dominada por un único satélite, el que tiene el ángulo fuera del eje mínimo con respecto del arco GEO. El gráfico detallado (se eligió como ejemplo Nueva York, entre las 15:30 y las 15:46) confirma que solo un satélite presenta un incremento distinguible de potencia recibida durante un evento de aproximación cercana, mientras que todos los demás permanecen entre 15 y

25 dB por debajo. El principal satélite NGSO activo representa aproximadamente el 95 % de la contribución a la EPFD, mientras que los lóbulos laterales de los otros 4 a 18 satélites NGSO adyacentes contribuyen con aproximadamente el 5 %. Esto significa que la interferencia es efectivamente un problema de una única entrada, a pesar de tratarse de una constelación multisatélite, y que las estrategias de mitigación solo necesitan apuntar al satélite más cercano en cada instante dado.

Figura 53: solo un satélite presenta un incremento distinguible de potencia recibida durante una aproximación cercana, mientras que todos los demás permanecen entre 15 y 25 dB por debajo, Nueva York



Conclusión preliminar

Cabe destacar que estos resultados teóricos se han determinado dentro de las condiciones conservadoras de la UIT, las cuales consideran interferencia de múltiples satélites en la misma frecuencia. Además, de manera conservadora, para el trayecto de transmisión LEO se consideró una antena isotrópica tal y como se define en la Tabla 4. Estas condiciones son idealizadas, ya que no consideran el patrón de antena de matriz en fase, ni las técnicas avanzadas de direccionamiento de haz utilizadas en los servicios actuales de acceso de banda

ancha LEO. En la próxima etapa de investigación, que se agregará como apéndice al presente informe, utilizando técnicas de cálculo más avanzadas que consideren las características de las antenas transmisoras NGSO de matriz en fase y los límites de direccionamiento del haz, se espera que los resultados teóricos iniciales basados en las condiciones de la UIT se adapten aún más a las implementaciones técnicas reales de los sistemas NGSO.

Función de distribución acumulada empírica (ECDF) y estadísticas temporales

A continuación se presenta un análisis estadístico basado en la función de distribución acumulada empírica (ECDF) y las estadísticas temporales.

La ECDF muestra la probabilidad de que la EPFD sea menor o igual que un valor dado y proporciona una representación visual completa de toda la distribución de los valores de la EPFD. Se traza una línea del 99 % en rojo, a modo de referencia. El análisis de la ECDF muestra que en todas las ubicaciones la ECDF alcanza el 99 % aproximadamente entre -150 y -155 dBW/m²/40 kHz, valor muy cercano al límite de la UIT. Bajo las condiciones actualmente definidas, la ubicación de Anchorage es claramente un valor atípico, con la curva de la ECDF desplazada hacia la derecha (valores de EPFD más altos) en más de 10 dB respecto de las demás ubicaciones.

Tabla de resumen de las características de excedencia:

Tabla 12: Características de excedencia

Ubicación	Porcentaje de excedencia	Número de eventos	Duración máxima (s)	Período más largo de cumplimiento (min)
Anchorage	4,70	168	80	132,8
Seattle	1,27	50	115	121,2
Chicago	0,65	36	20	139,9
Nueva York	0,63	33	30	112,6
Denver	0,65	37	20	143,4
Kansas	0,54	29	20	167,8
Phoenix	0,54	29	25	182,3
Los Ángeles	0,53	26	25	161,5
Honolulu	0,34	17	30	232,8
Dallas	0,25	15	20	243,1
San Juan	0,27	16	20	263,9
Miami	0,21	14	20	319,8

Existe una clara correlación con la latitud: Anchorage (latitud 61,1^o) presenta un 4,70 % de excedencia frente a Miami (25,8^o) con un 0,21 %, lo que supone una relación aproximada de 22 veces.

Sin incluir los dos valores atípicos (Anchorage y Seattle), las 10 ubicaciones restantes muestran un comportamiento muy coherente: excedencia en el rango de 0,21-0,65 %, duración máxima de los eventos de 20 a 30 segundos y de 14 a 37 eventos en 24 horas.

Anchorage y Seattle presentan un comportamiento anómalo porque sus altas latitudes las ubican cerca del borde de los planos orbitales, lo que genera mayores tiempos de permanencia con ángulos fuera del eje bajos respecto de la dirección del arco GEO, considerando patrones de antena transmisora isotrópicos. Se espera que el ángulo fuera del eje sea mucho mayor cuando se utilicen patrones reales de antenas de matriz en fase, lo que reduciría aún más el valor de la EPFD.

La distribución horaria de excedencia no muestra un patrón diurno marcado para la mayoría de las ubicaciones (aproximadamente uniforme), lo cual es esperable dado que los períodos orbitales de satélites LEO (~95 min) son bajos en comparación con los tiempos de simulación de 24 horas. Sin embargo, Anchorage muestra una variabilidad ligeramente mayor, probablemente debido al efecto combinado de la rotación terrestre y de las orientaciones específicas de los planos orbitales.

Figura 54: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Anchorage

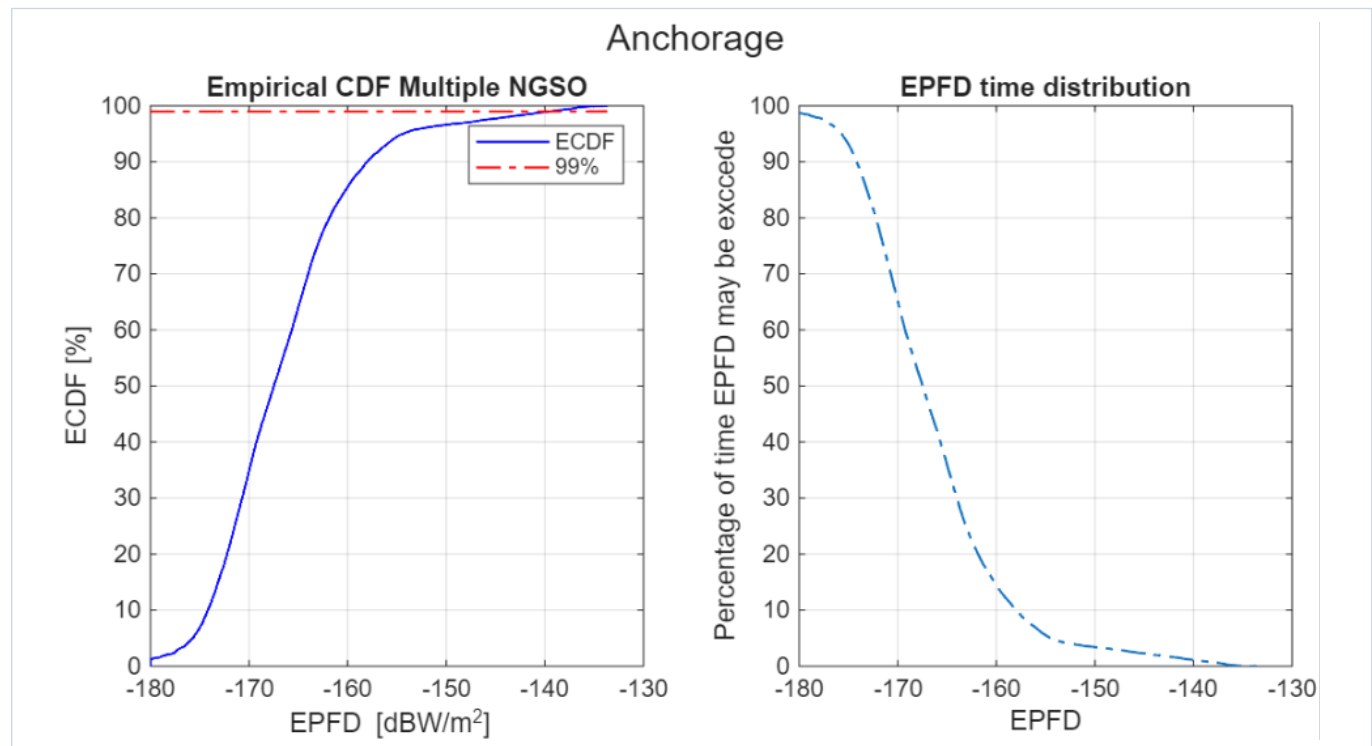


Figura 55: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Chicago

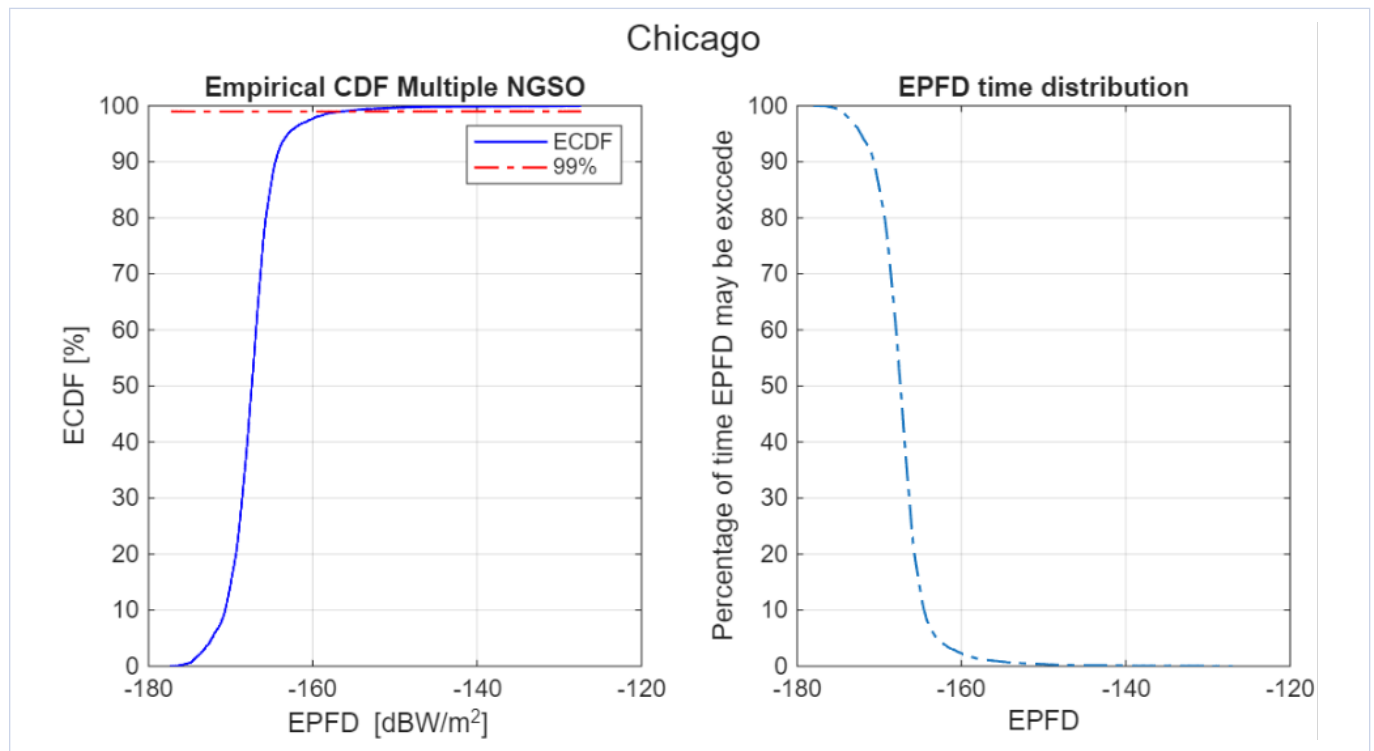


Figura 56: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Dallas

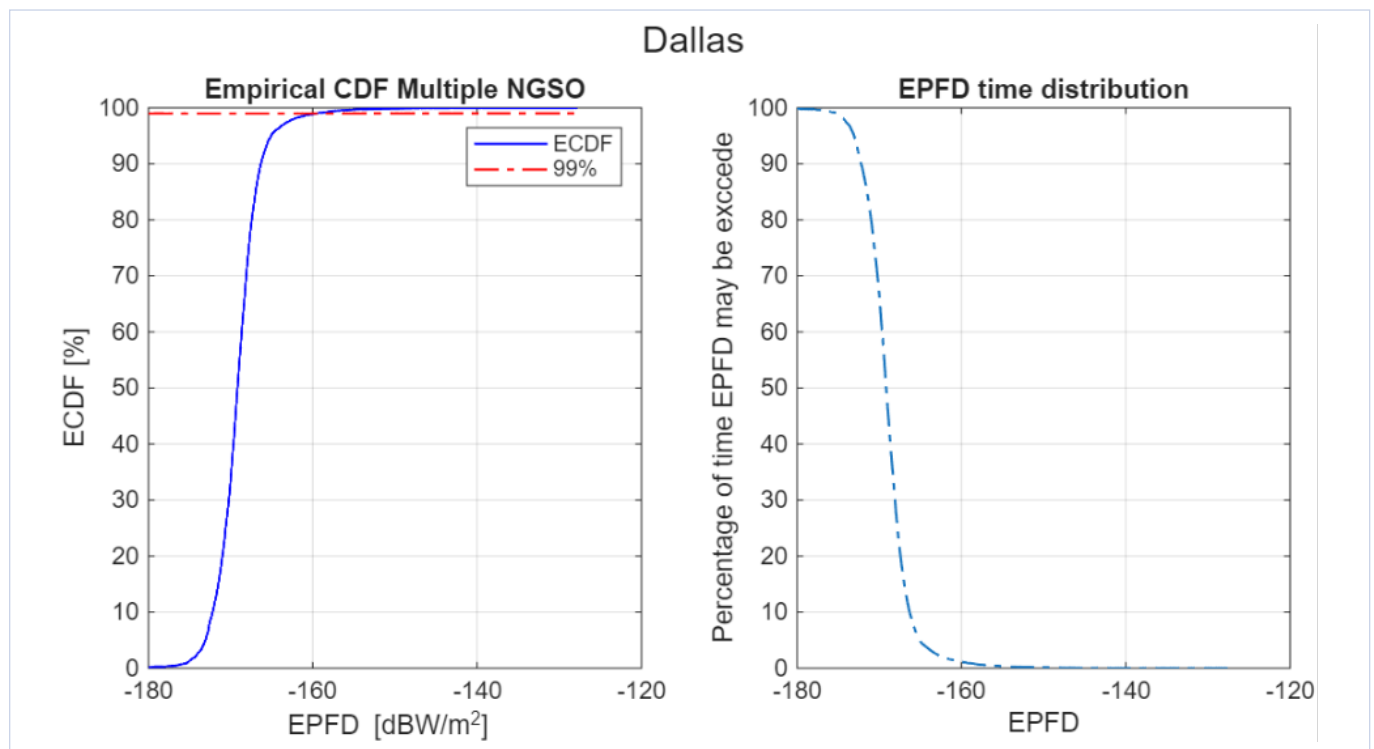


Figura 57: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Denver

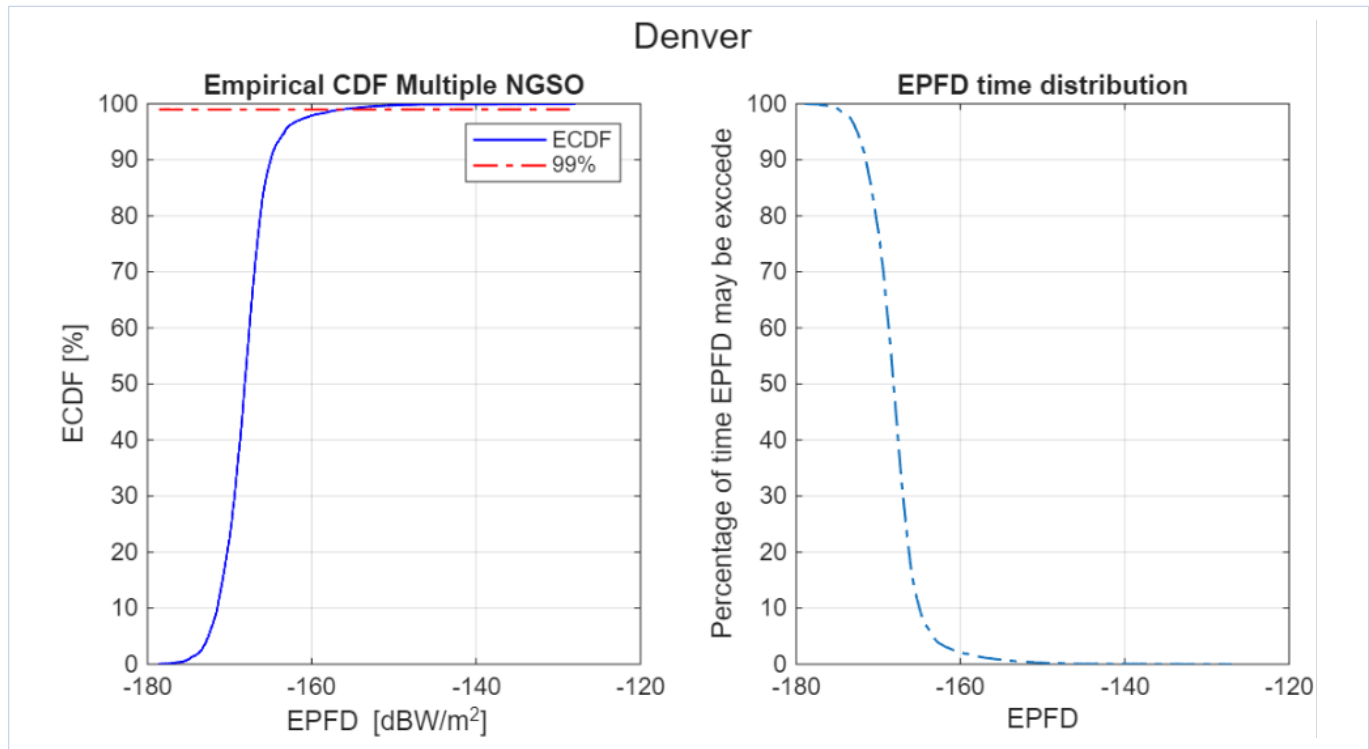


Figura 58: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Honolulu

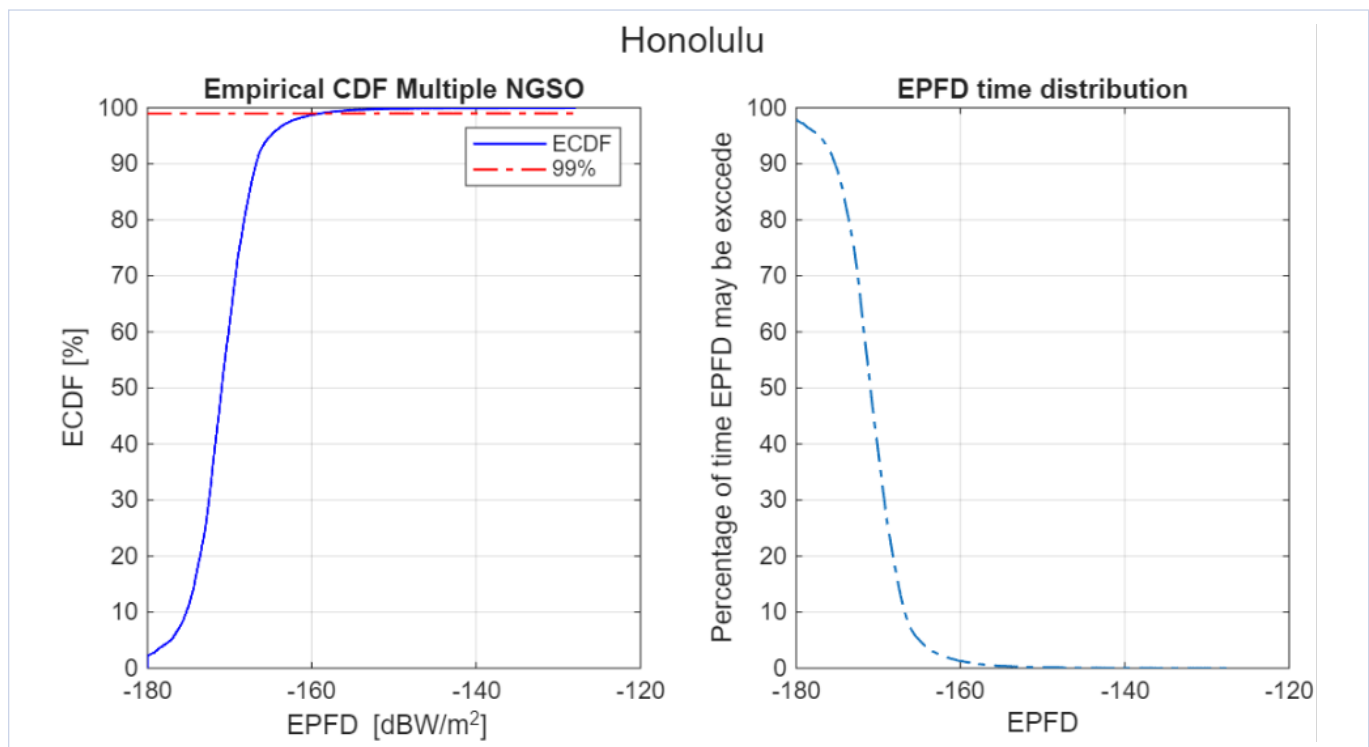


Figura 59: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Kansas

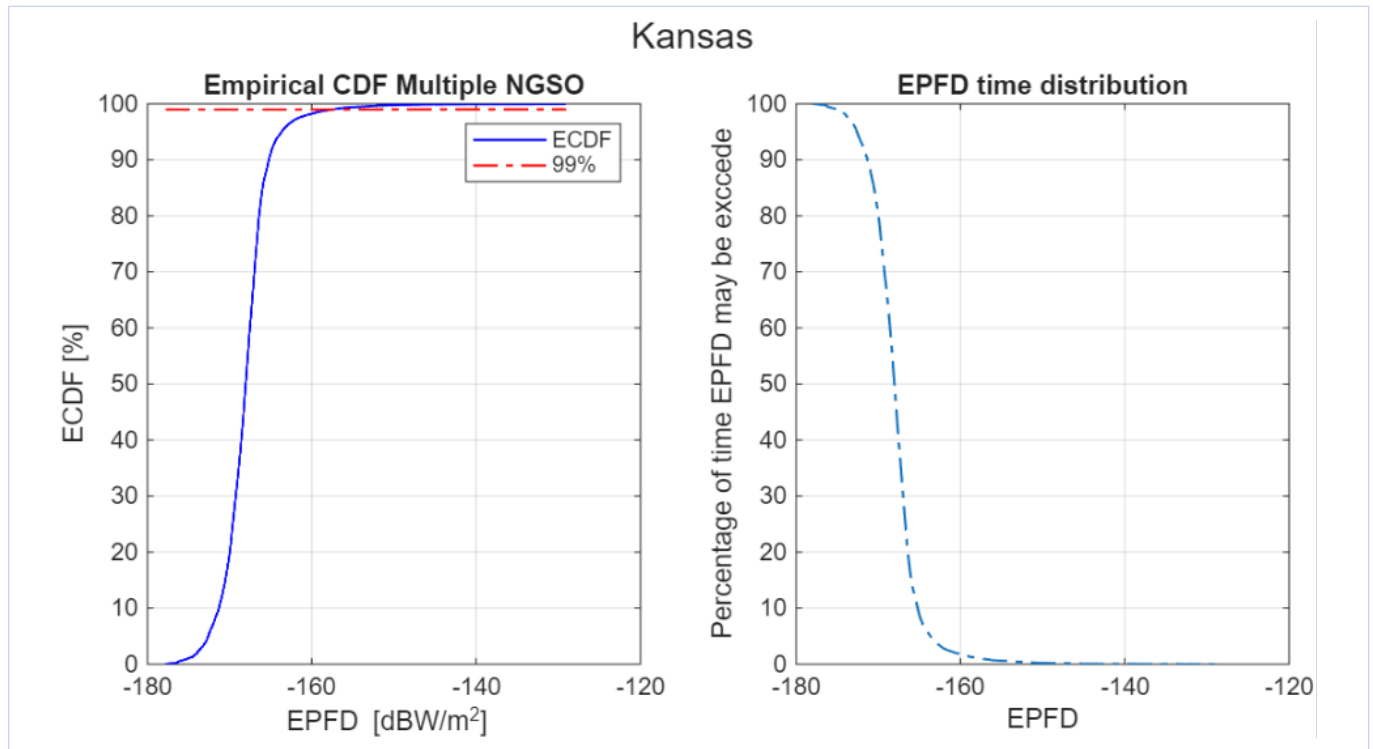


Figura 60: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Los Ángeles

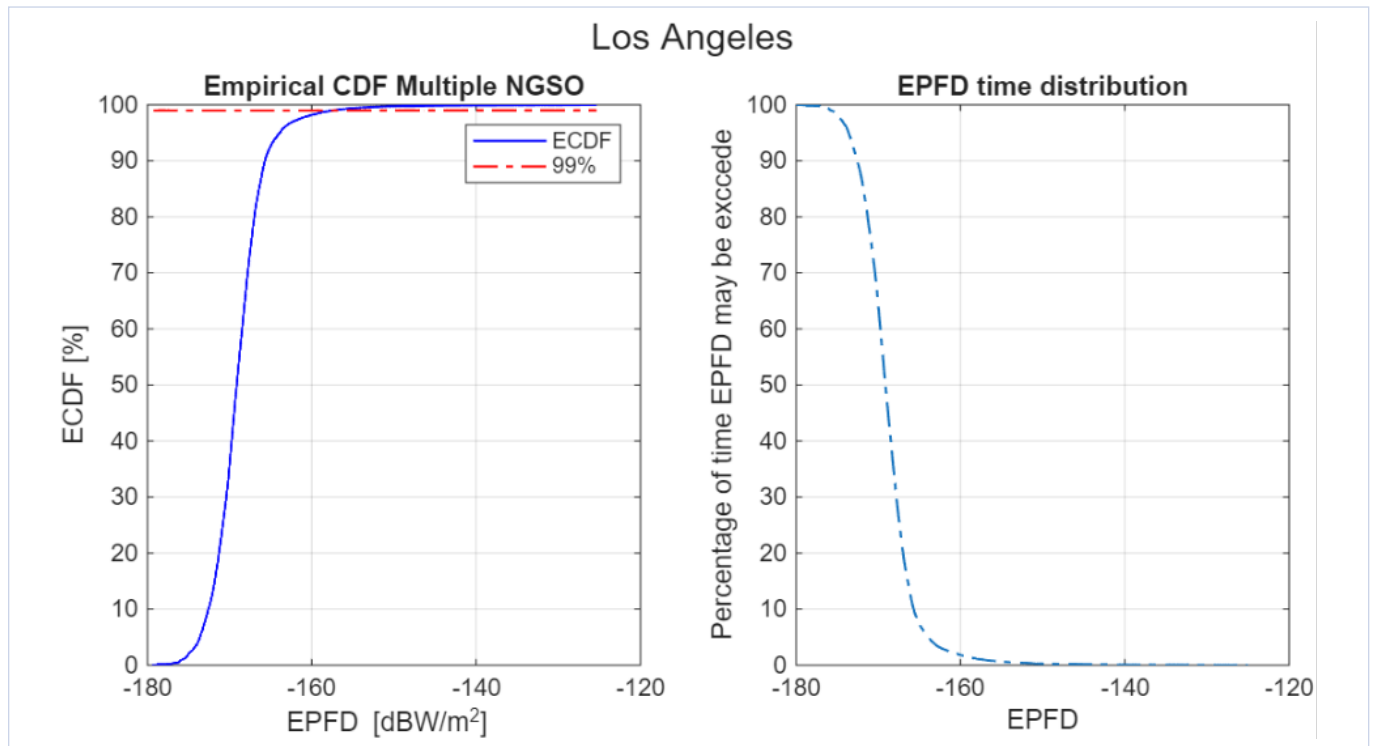


Figura 61: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Miami

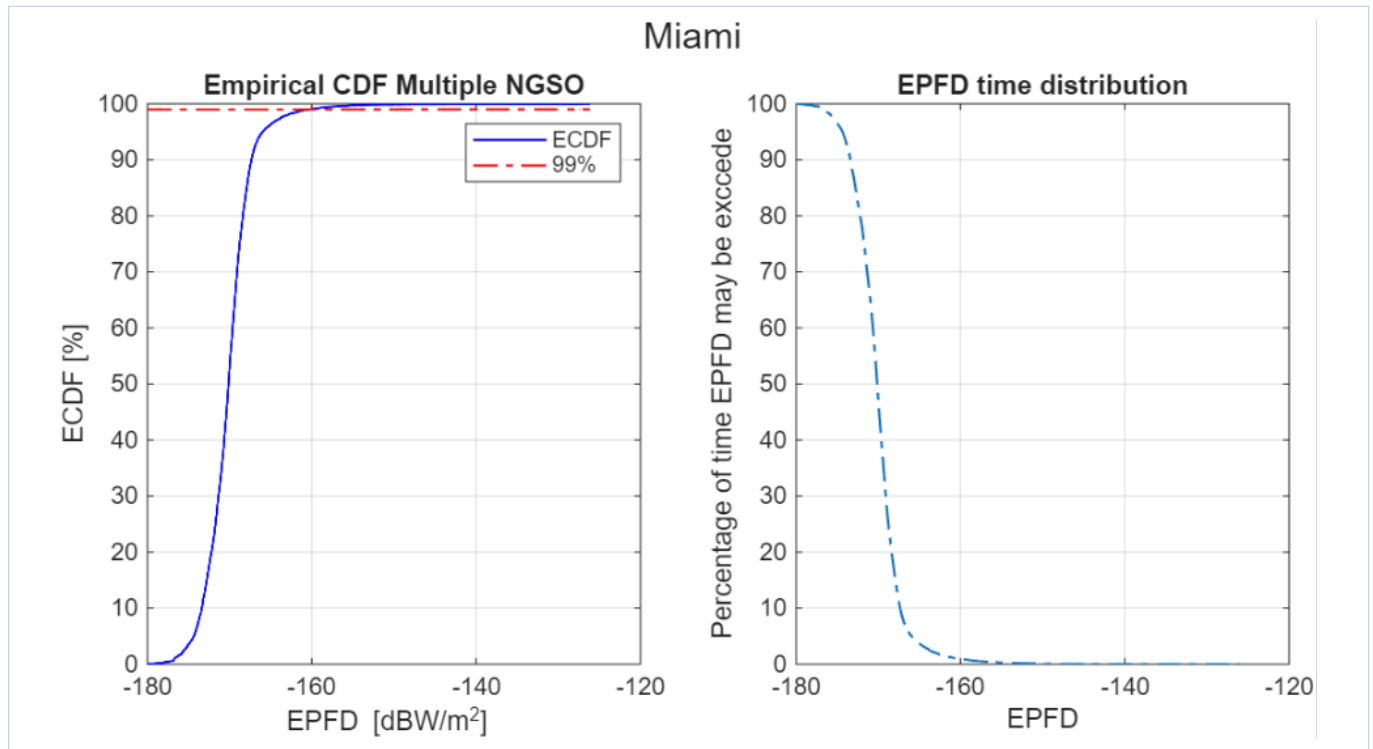


Figura 62: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Nueva York

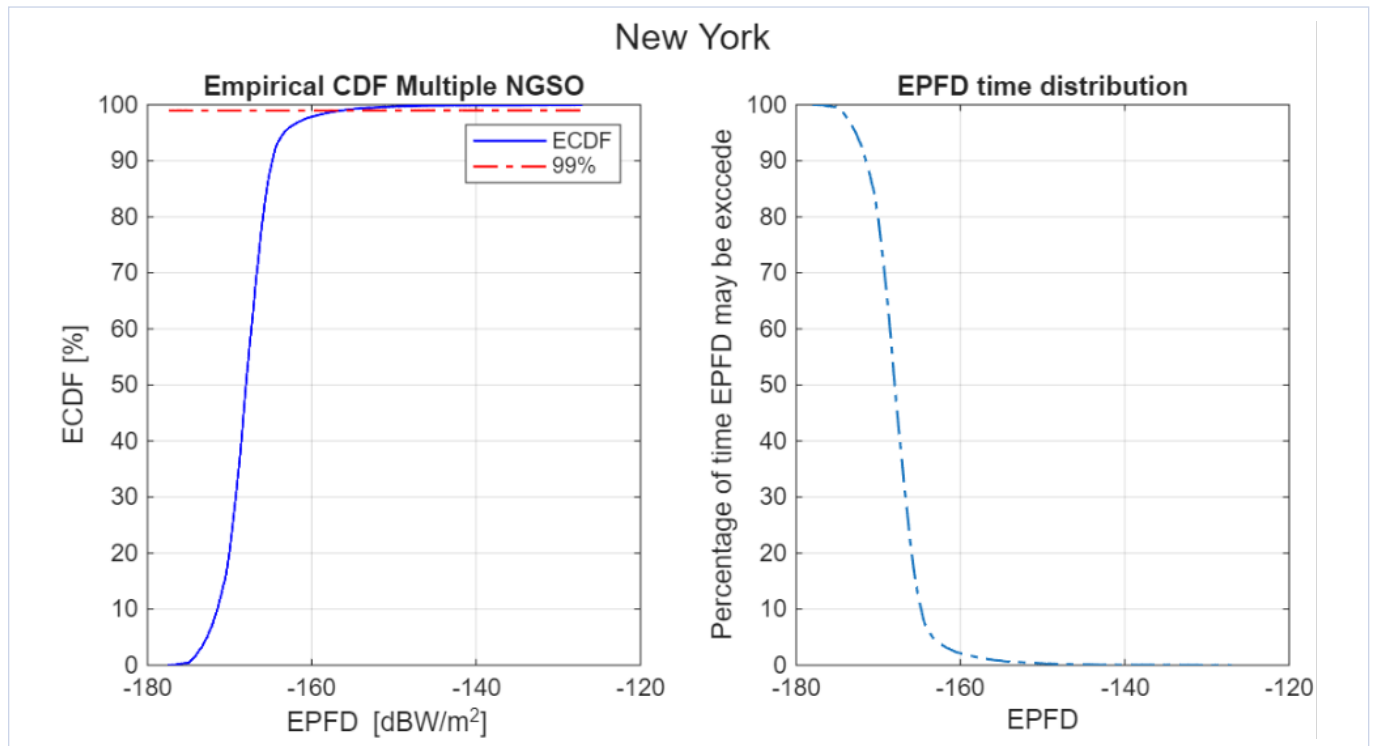


Figura 63: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Phoenix

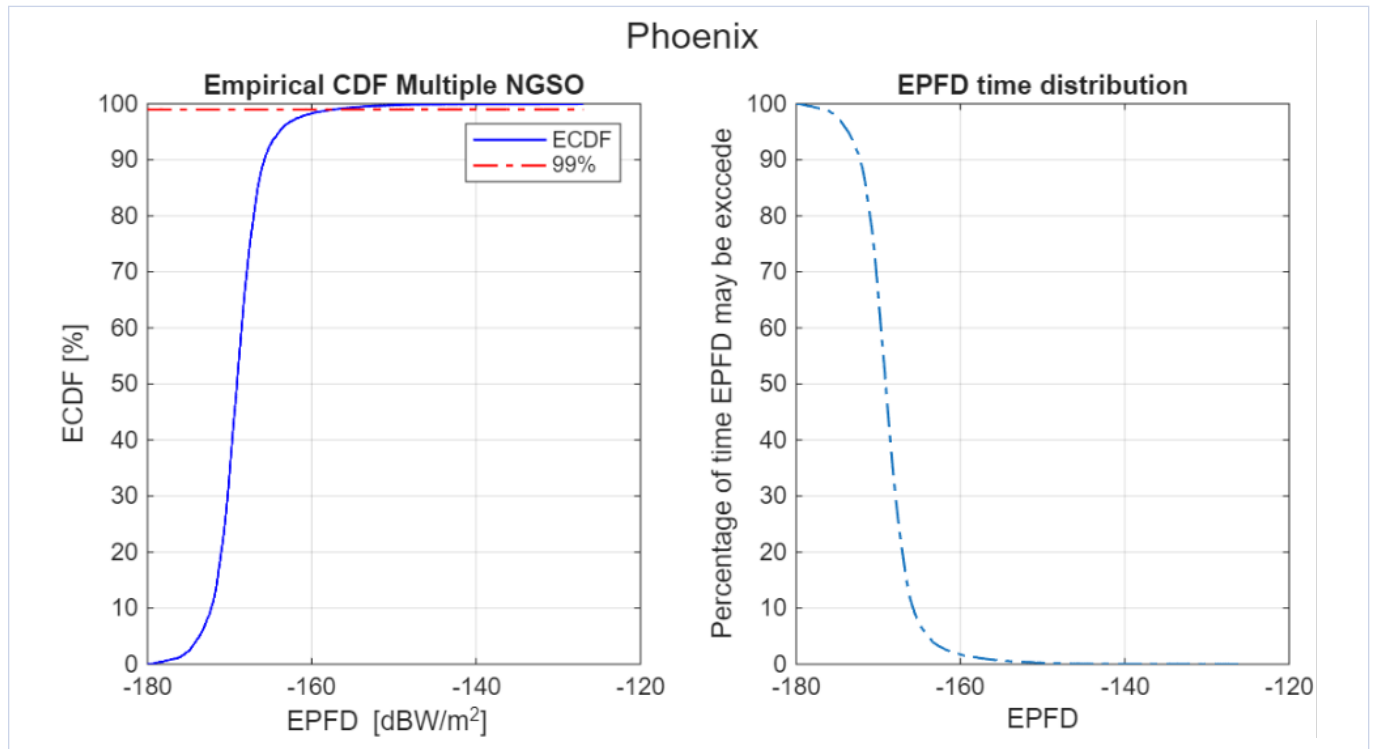


Figura 64: Distribución temporal de EPFD y ECDF, Seattle

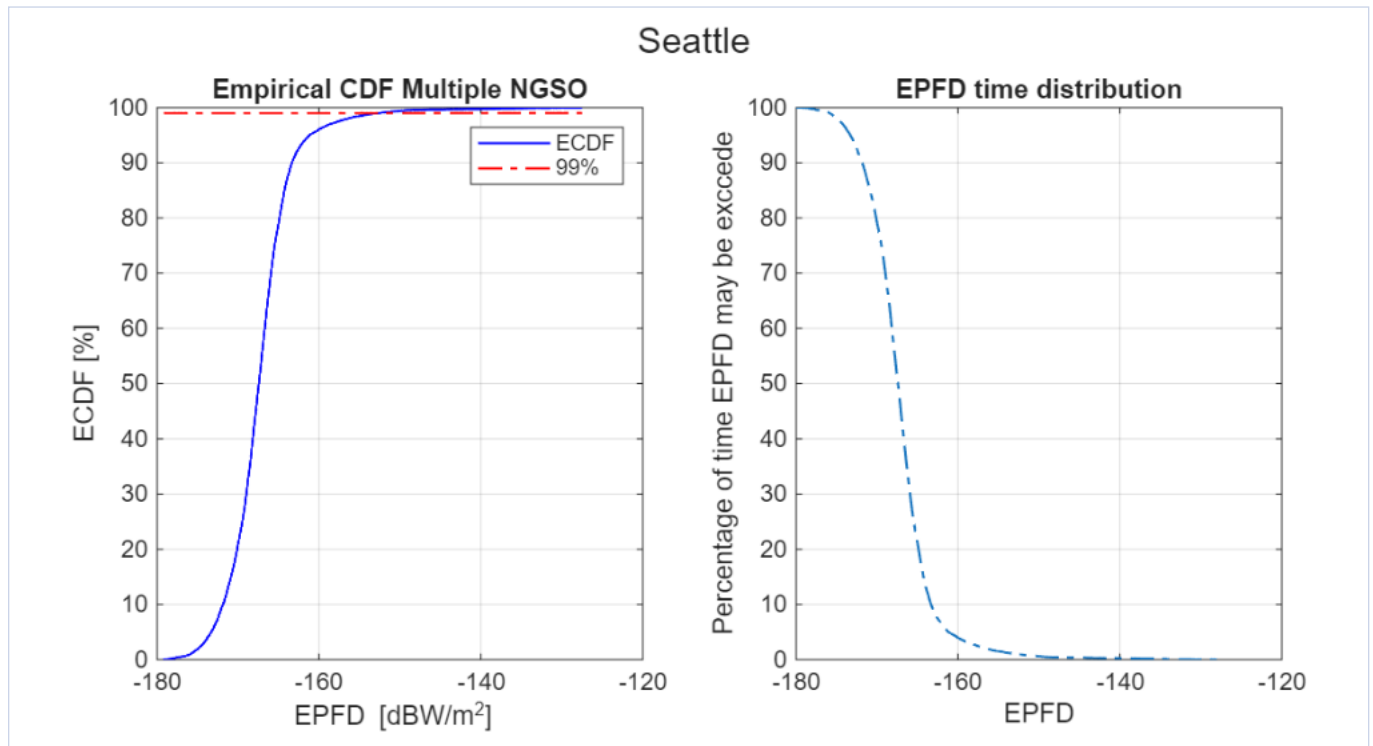
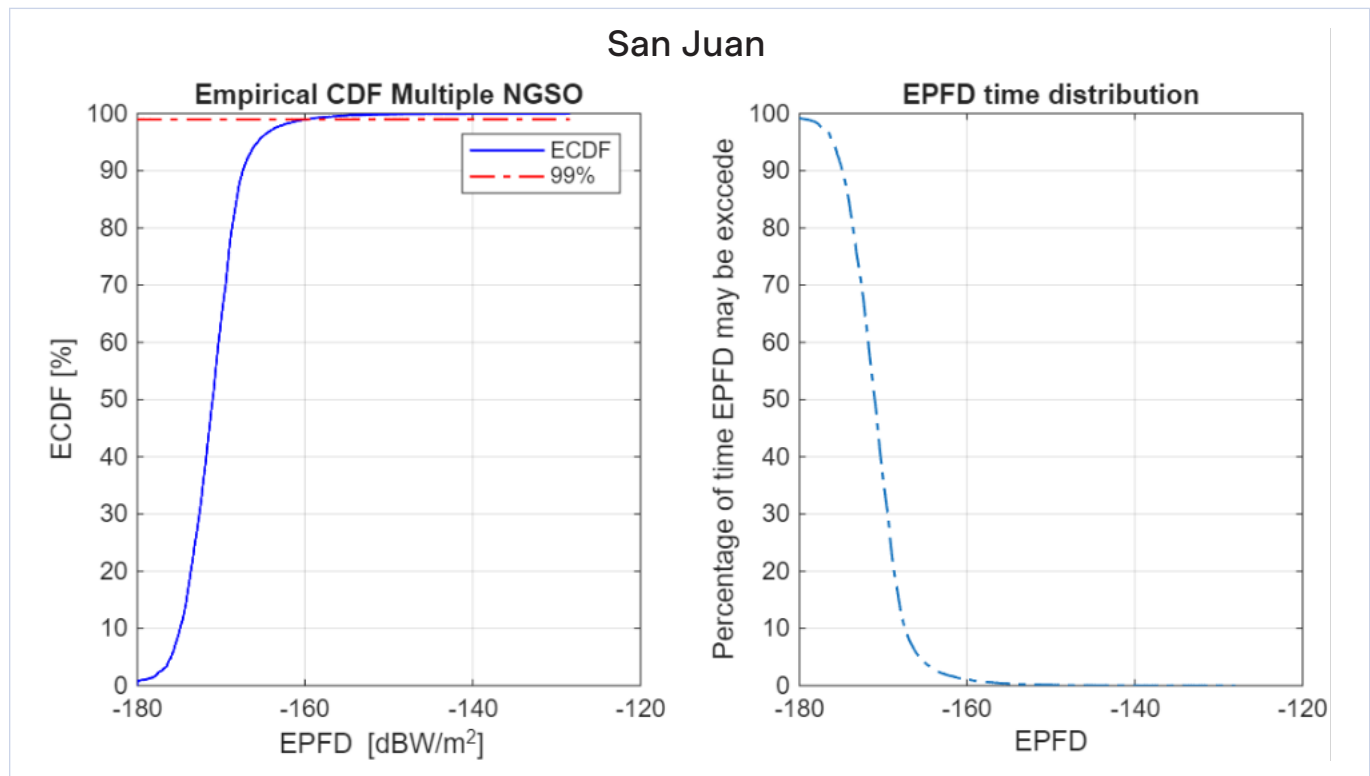


Figura 65: Distribución temporal de EPFD y ECDF, San Juan



En el siguiente gráfico, para facilitar la comparación, se superpuso la ECDF de todas las ubicaciones consideradas en un único gráfico. También se muestra una vista detallada del cruce de la línea del 99 %. El gráfico compuesto de la CDF muestra claramente el agrupamiento de todas las ubicaciones, excepto Anchorage, dentro de una banda relativamente estrecha, con una dispersión aproximada de 3–5 dB en el nivel del 99 %.

Figura 66: ECDF para todas las ubicaciones consideradas

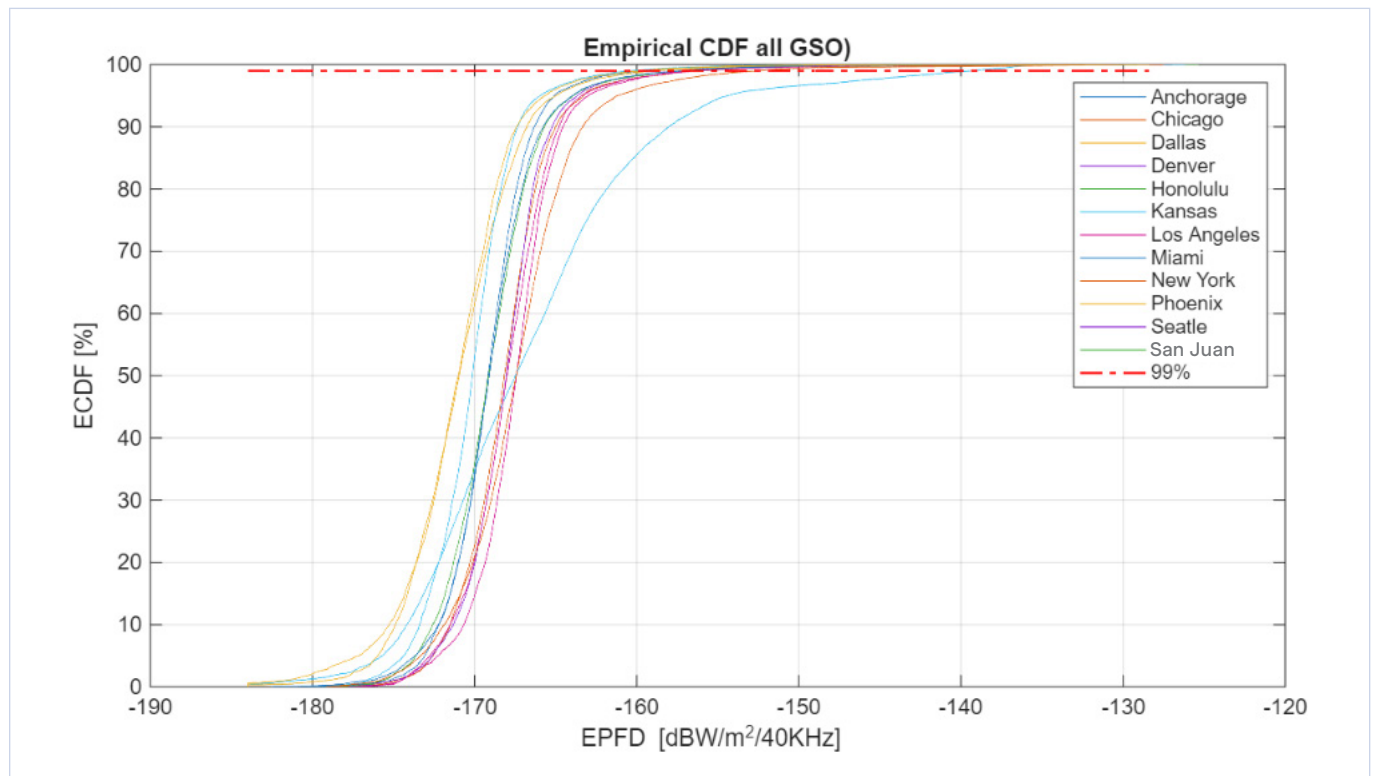
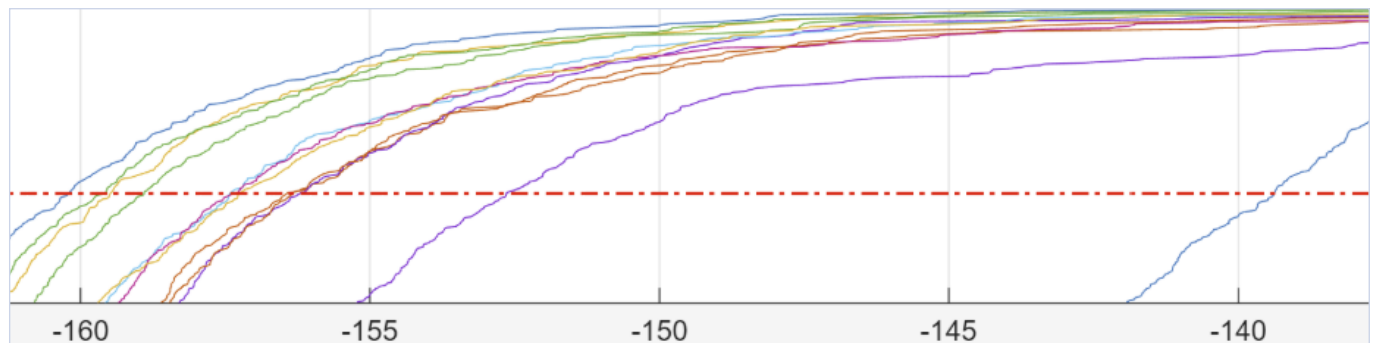


Figura 67: Vista detallada del cruce de la línea del 99 % de la CDF

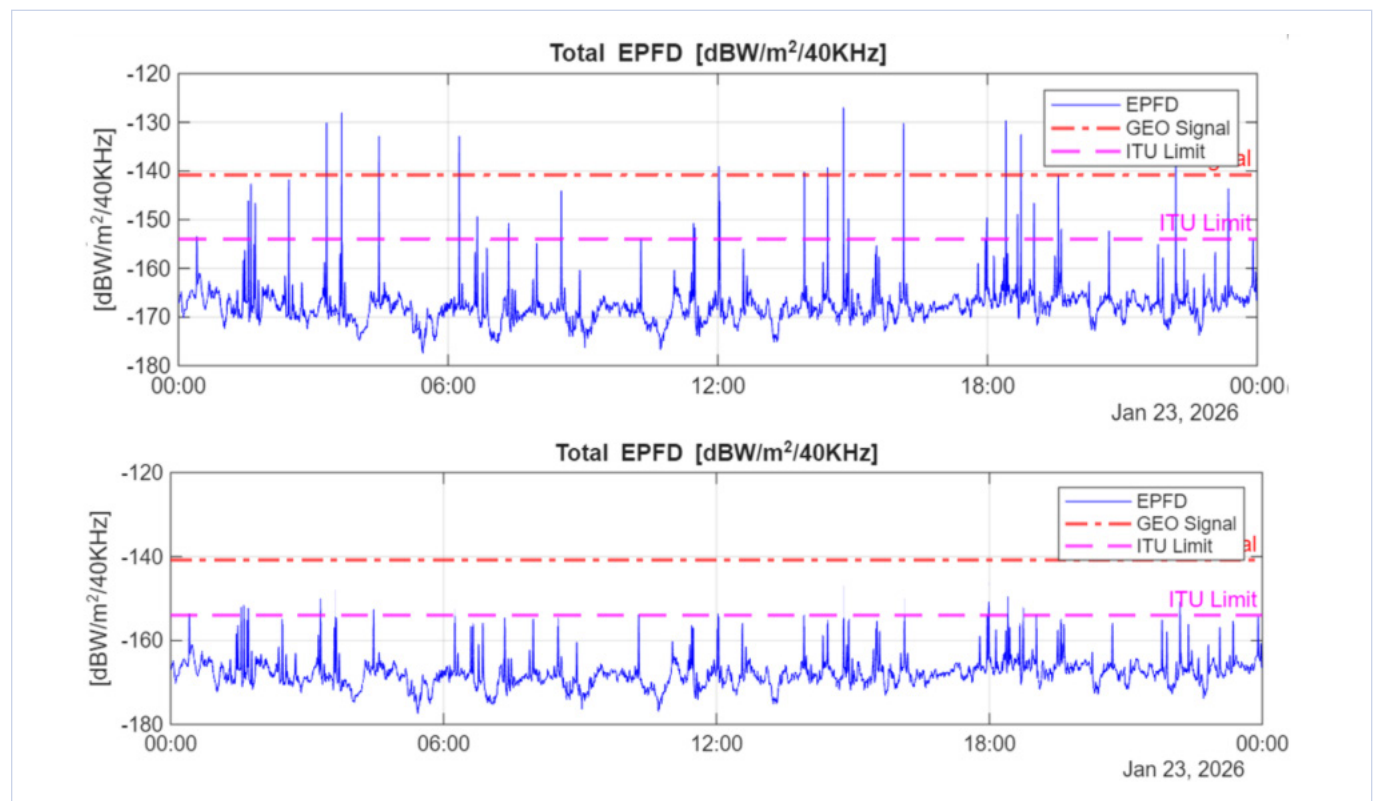


Consideraciones relativas al arco de evitación GSO

En las simulaciones realizadas, no se consideró ningún arco de evitación GSO para los satélites NGSO. Dado que los resultados se guardaron en un formato adecuado, el arco de evitación GSO podría integrarse fácilmente en el análisis actual. Como tal, el límite de la UIT, de acuerdo con el Artículo 22, se viola constantemente en todas las ubicaciones. El estudio reveló una no conformidad mínima de EPFD en sistemas NGSO, que puede corregirse fácilmente mediante una reducción mínima de potencia para sistemas NGSO dentro del ángulo de evitación, en la zona de exclusión.

Como ejemplo para la ubicación de Nueva York, la siguiente imagen muestra una comparación de la EPFD total, sin ángulo de evitación (arriba) como en la Figura 17 anterior, y con un ángulo de evitación de 8° y una reducción de potencia de 20 dB para los sistemas NGSO (abajo). En este caso, la cantidad de eventos de excedencia es de solo 22 en lugar de 33, la duración máxima del evento se reduce de 30 a 10 segundos, la duración máxima de cumplimiento aumenta de 112 a 242 minutos, y el porcentaje total de excedencia se reduce en aproximadamente 4,5 veces, pasando del 0,6308 % al 0,1389 %.

Figura 68: Comparación de la EPFD total, sin (arriba) y con (abajo) ángulo de evitación, Nueva York



Este análisis rápido del arco de evitación para el ejemplo de Nueva York, con un ángulo de evitación de 8 grados y una reducción de potencia de los sistemas NGSO de 20 dB, sintetizado en la tabla a continuación, demuestra que una mitigación relativamente modesta mediante

el control de potencia y el direccionamiento del haz acerca mucho más al sistema al nivel de cumplimiento de la UIT:

Tabla 13: Análisis rápido del arco de evitación para el ejemplo de Nueva York

	Sin evitación	Con evitación (8°, -20 dB)	Mejora
Eventos de excedencia	33	22	Reducción del 33 %
Duración del evento más largo	30 s	10 s	Mejora de 3 veces
Período más largo de cumplimiento	112 min	242 min	Mejora de 2,2 veces
Porcentaje de excedencia	0,63 %	0,14 %	Mejora de 4,5 veces

Distribución a lo largo del tiempo de los intervalos en los que se supera el límite de la UIT

En los siguientes gráficos, se muestra la distribución a lo largo del tiempo de los intervalos en los que se supera el límite de la UIT.

Para cada ubicación, el primer gráfico muestra el histograma de la duración de excedencia de la EPFD. El gráfico muestra que, excepto en dos ubicaciones (Anchorage y Seattle), la duración máxima de excedencia es de unos 20 a 30 segundos durante un tiempo de observación de 24 horas. Teniendo en cuenta también el número de eventos de excedencia del límite de la UIT, se puede concluir que el porcentaje de tiempo de excedencia se sitúa entre el 0,2 % y el 0,63 %. Las dos ubicaciones mencionadas anteriormente (Anchorage y Seattle) constituyen excepciones, con una duración máxima de excedencia de 80 y 115 segundos y un porcentaje de tiempo de excedencia del 4,7 % y el 1,26 %, respectivamente.

Figura 69: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Anchorage

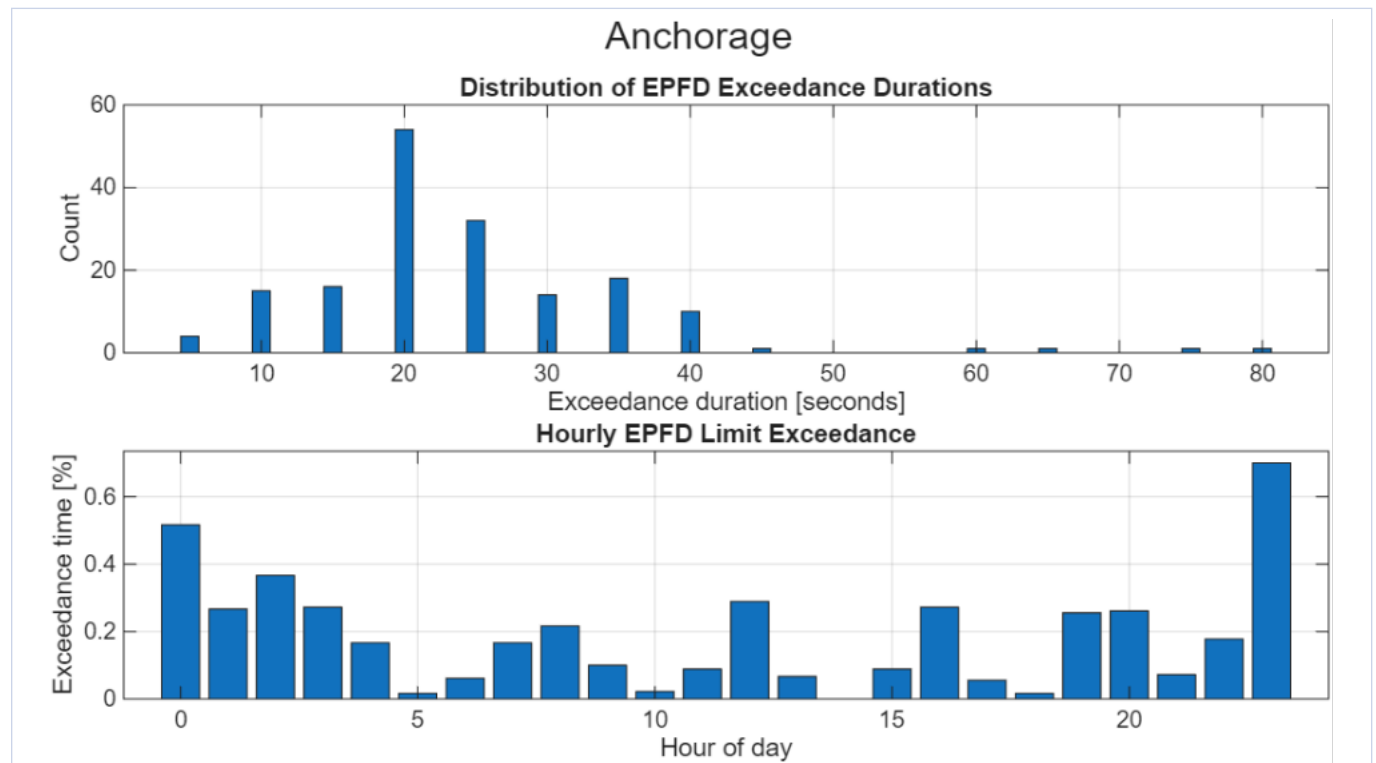


Figura 70: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Chicago

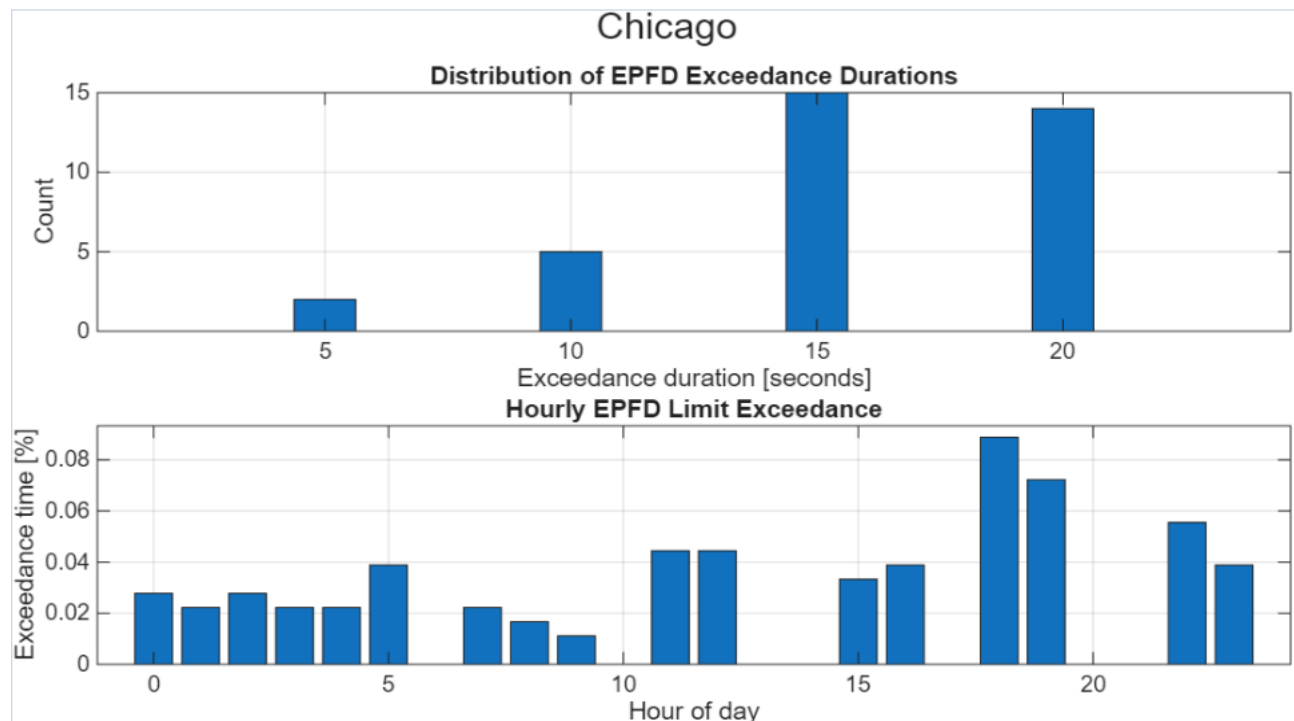


Figura 71: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Dallas

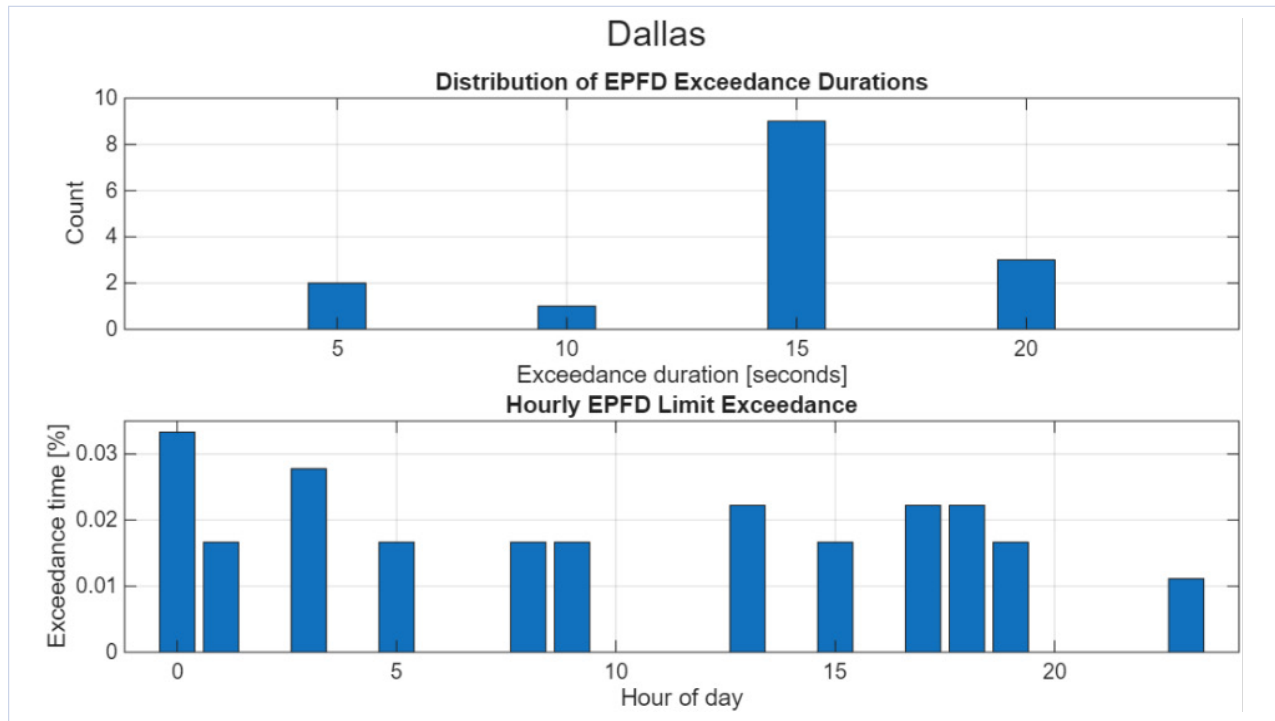


Figura 72: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Denver

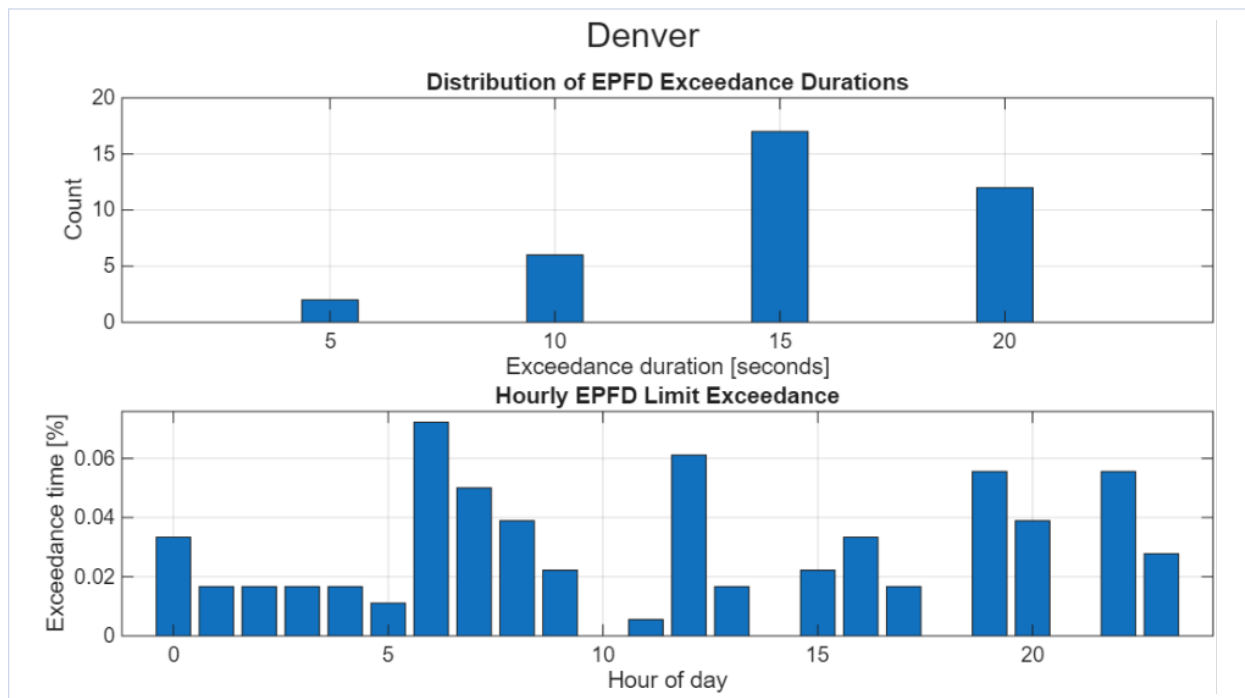


Figura 73: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Honolulu

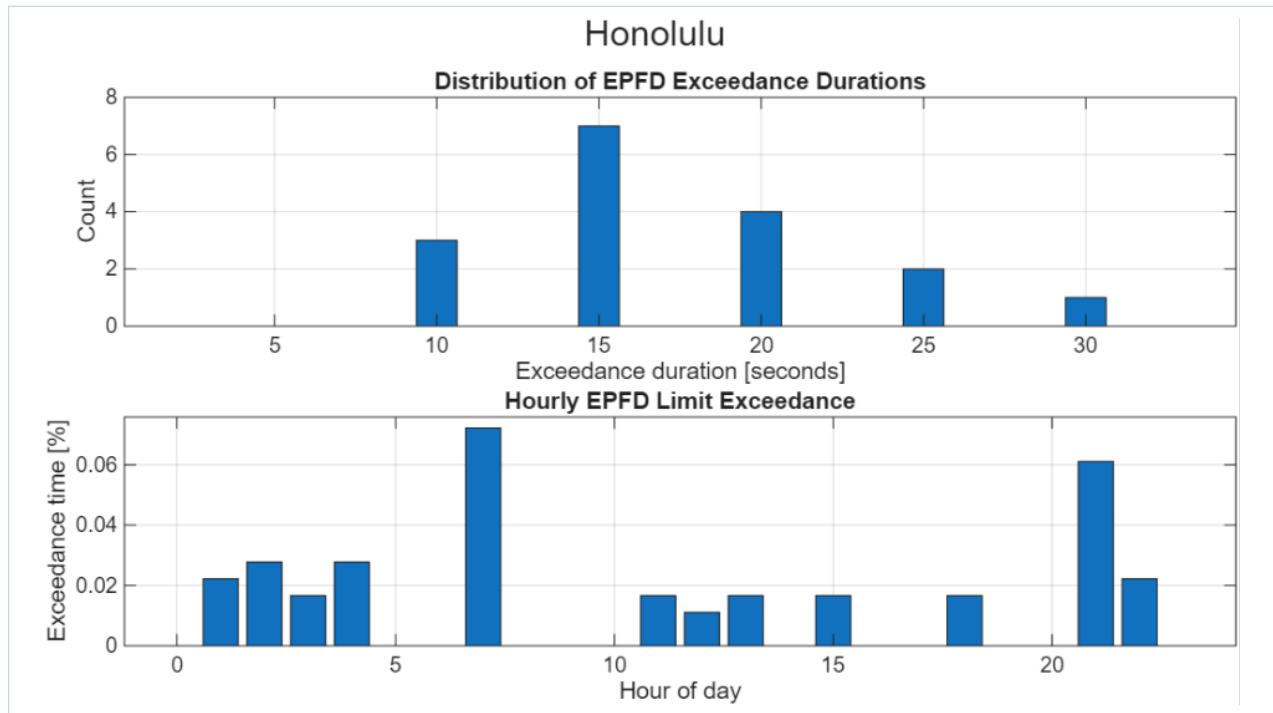


Figura 74: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Kansas

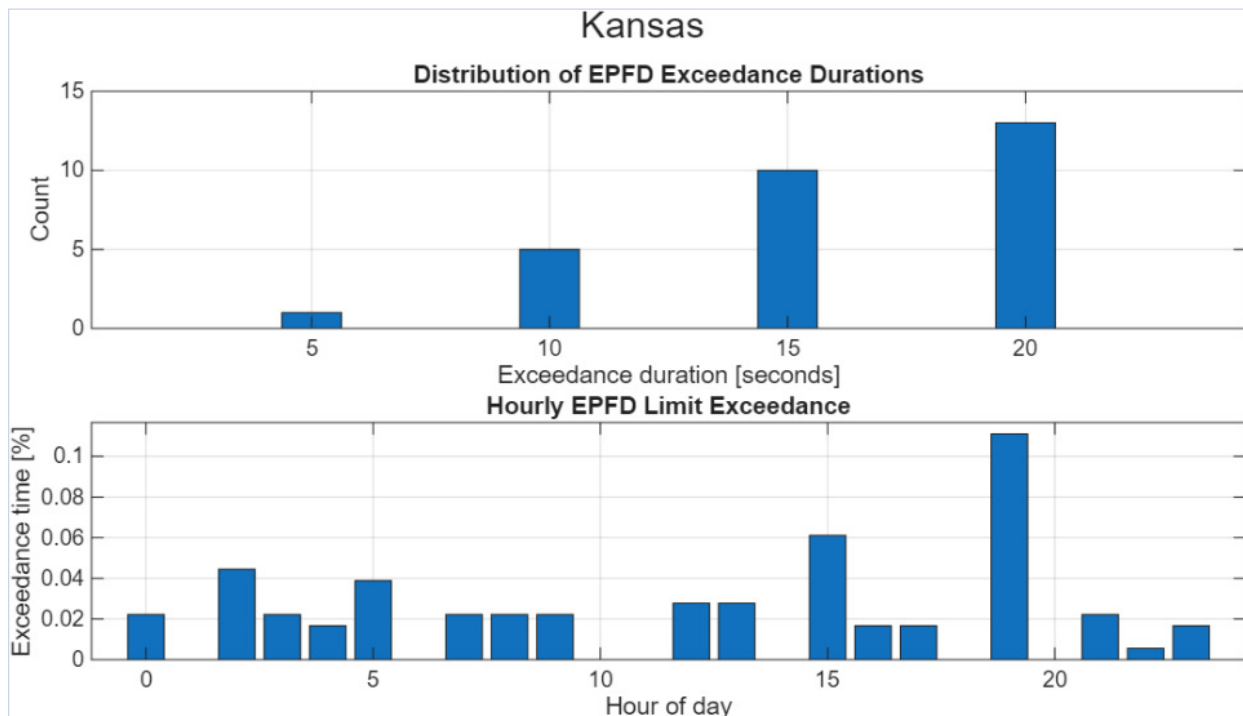


Figura 75: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Los Ángeles

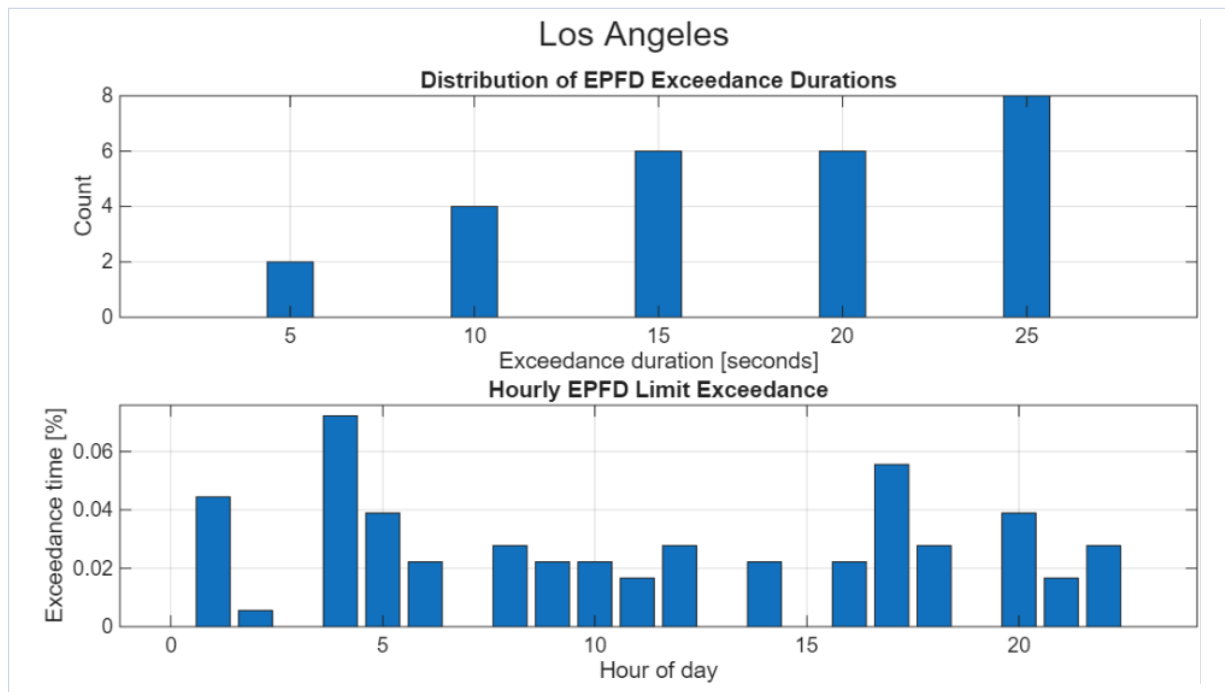


Figura 76: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Miami

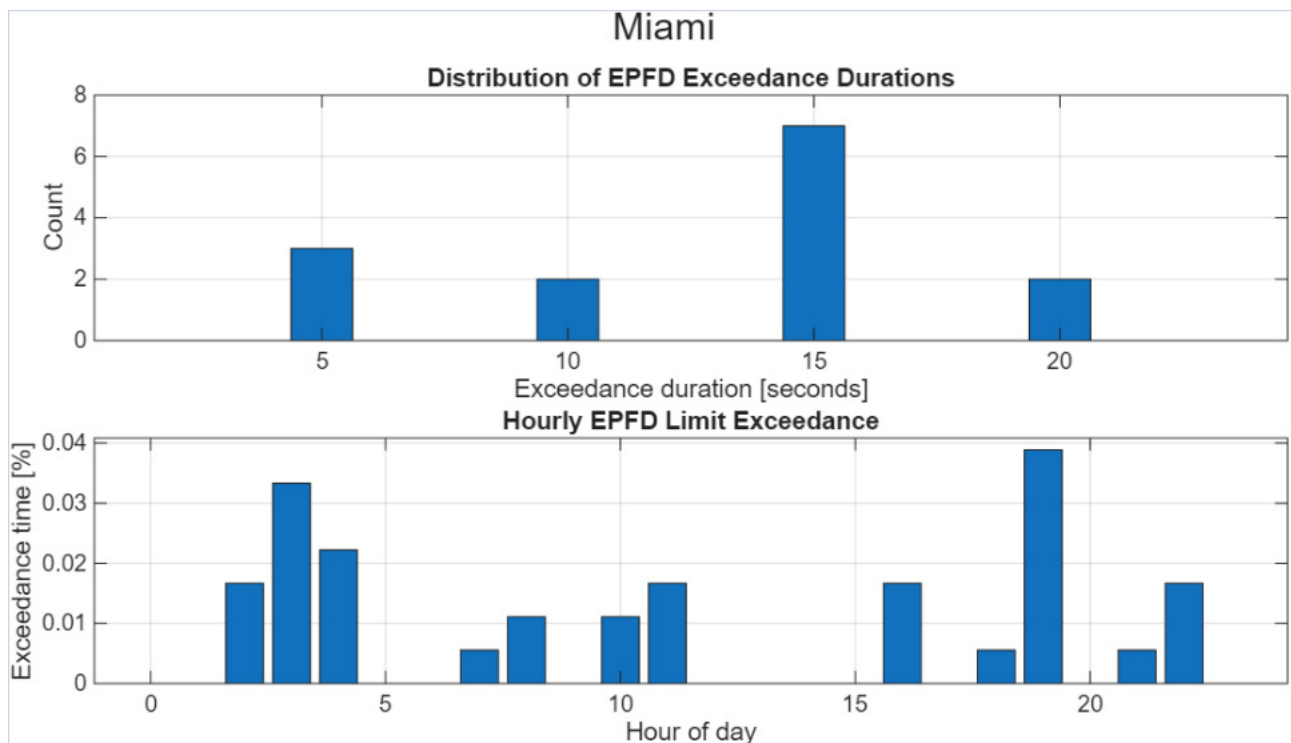


Figura 77: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Nueva York

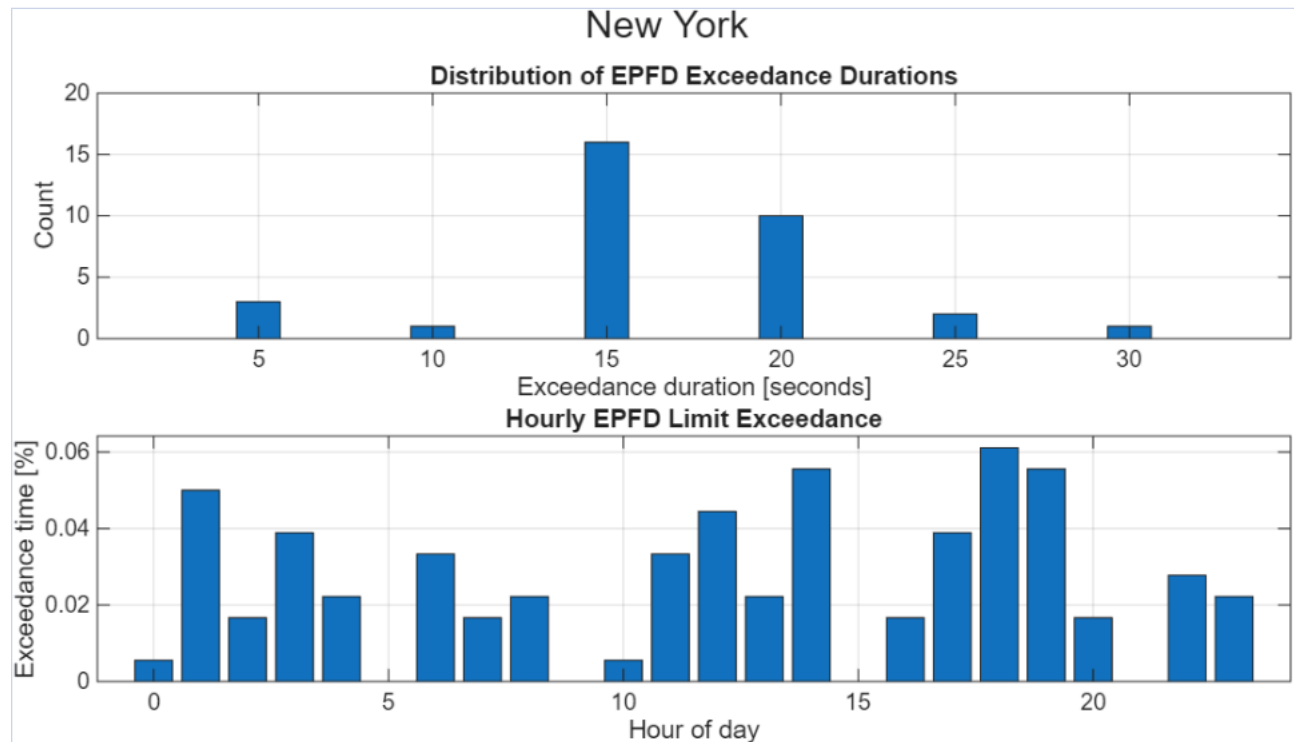


Figura 78: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Phoenix

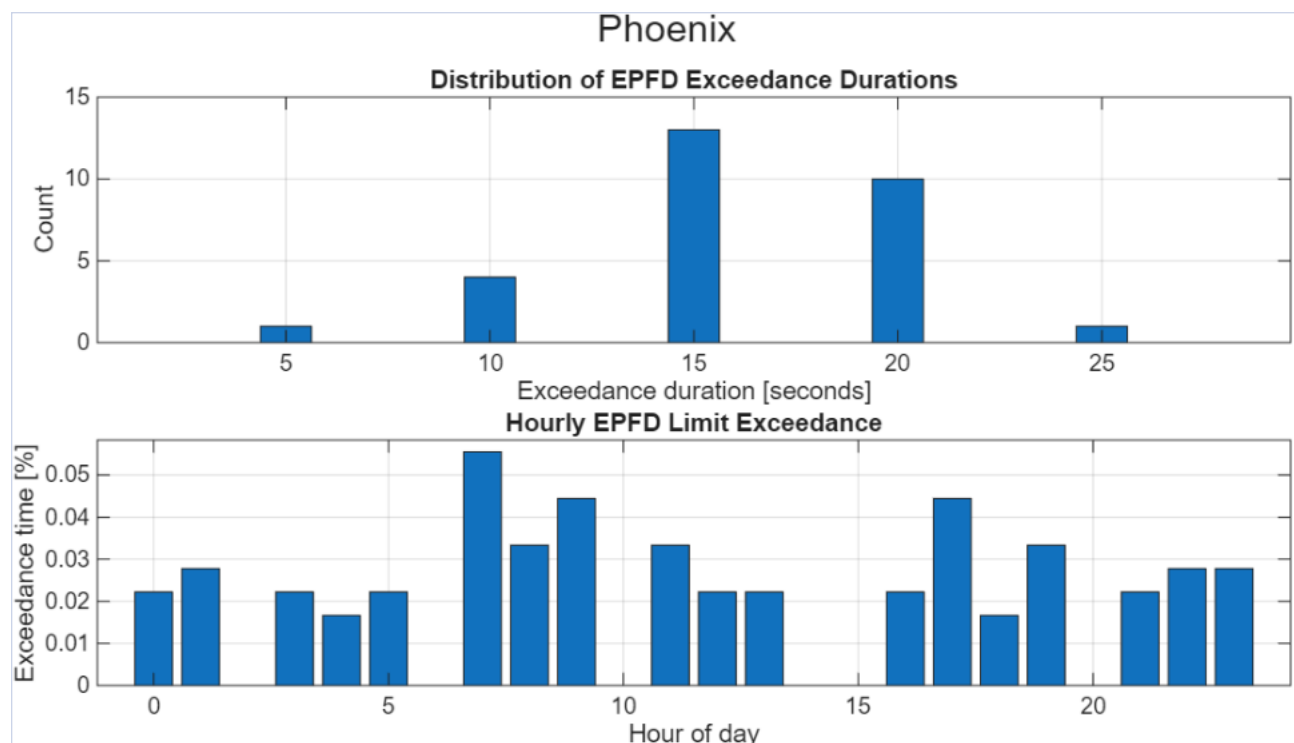


Figura 79: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, Seattle

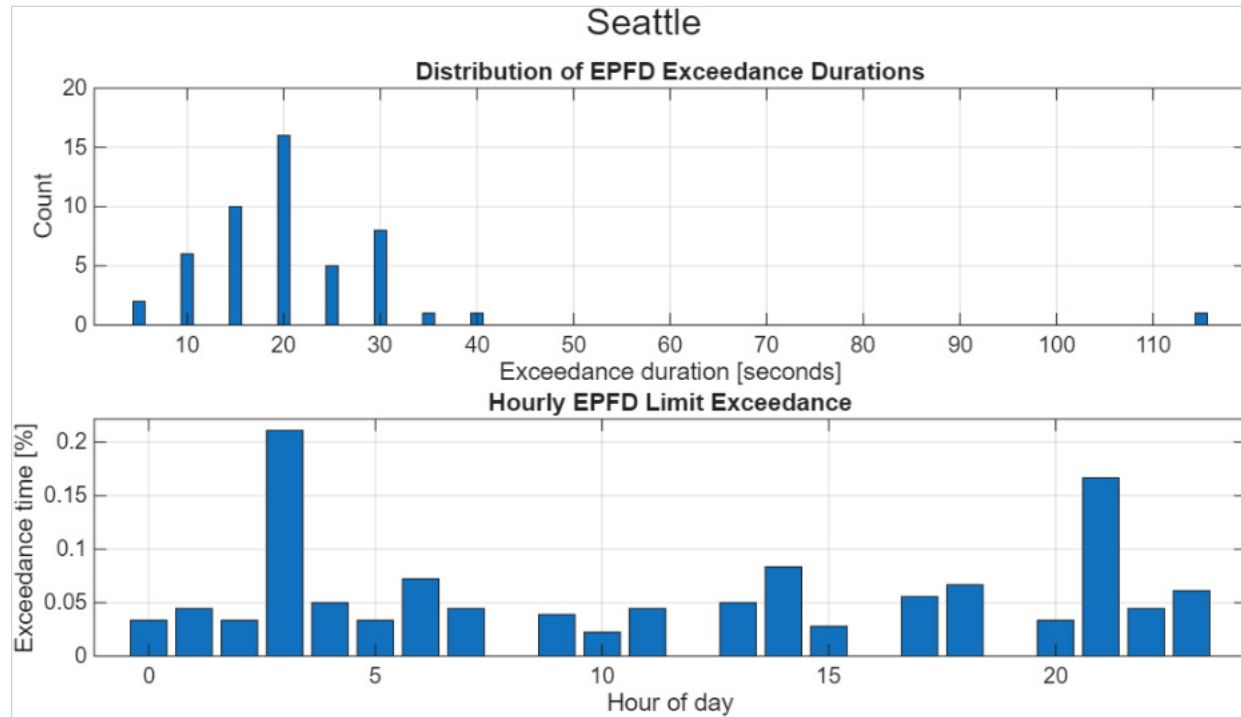


Figura 80: Distribución de las duraciones de excedencia de la EPFD, excedencia horaria del límite de EPFD, San Juan



Tabla 14: Síntesis de las doce ubicaciones del estudio, ordenadas por latitud

	Número promedio de satélites visibles	Número mínimo de satélites visibles	Número máximo de satélites visibles	Tiempo total de observación (horas)	Tiempo total de excedencia (min)	Porcentaje de excedencia (%)	Número de eventos	Duración del evento más largo (s)	Intervalo del evento más largo	Duración máxima de cumplimiento (min)	Intervalo de cumplimiento más largo	Latitud (grados)
Anchorage	7,01	0	19	24	67,75	4,7	168	80	01:55:15 01:56:35	132,8	13:30:05 15:42:55	61,1
Seattle	9,91	2	21	24	18,25	1,2674	50	115	03:35:00 03:36:55	121,17	07:38:55 09:40:05	47,6
Chicago	10,4	1	20	24	9,42	0,6539	36	20	01:13:45 01:14:05	139,9	19:48:30 22:08:25	41,83
Nueva York	10,43	2	20	24	9,08	0,6308	33	30	17:59:00 17:59:30	112,58	12:02:45 13:55:20	40,69
Denver	10,5	2	23	24	9,42	0,6539	37	20	06:38:05 06:38:25	143,42	13:12:25 15:35:50	39,76
Kansas	10,47	2	22	24	7,75	0,5382	29	20	00:39:25 00:39:45	167,83	09:23:20 12:11:10	39,09
Los Ángeles	10,29	2	21	24	7,67	0,5324	26	25	04:02:50 04:03:15	161,5	06:08:30 08:50:00	34,02
Phoenix	10,29	2	22	24	7,75	0,5382	29	25	09:09:25 09:09:50	182,25	13:10:20 16:12:35	33,6
Dallas	10,1	2	21	24	3,58	0,2488	15	20	3:27:50 3:28:10	243,08	09:17:05 13:20:10	32,81
Miami	8,15	2	19	24	3	0,2083	14	20	04:12:45 04:13:05	319,83	11:12:00 16:31:50	25,78
Honolulu	7,41	0	20	24	4,92	0,3414	17	30	21:53:10 21:53:40	232,83	07:58:00 11:50:50	21,32
San Juan	7,03	0	17	24	3,83	0,2662	16	20	01:30:55 01:31:15	263,92	17:46:25 22:10:20	18,4

Tabla 15: Valores típicos de los principales parámetros relacionados con la excedencia

	Mínimo	Máximo	PROMEDIO
Número promedio de satélites visibles	7,01	10,50	9,33
Número mínimo de satélites visibles	0,00	2,00	1,42
Número máximo de satélites visibles	17,00	23,00	20,42
Tiempo total de observación (horas)	24,00	24,00	24,00
Tiempo total de excedencia (min)	3,00	67,75	12,70
Porcentaje de excedencia (%)	0,21	4,70	0,88
Número de eventos	14,00	168,00	39,17

	Mínimo	Máximo	PROMEDIO
Duración del evento más largo (s)	20,00	115,00	35,42
Intervalo del evento más largo	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Duración máxima de cumplimiento (min)	112,58	319,83	185,09
Intervalo de cumplimiento más largo	No aplicable	No aplicable	No aplicable

Conclusiones de la simulación basada en el modelo de antena omnidireccional

A partir de la síntesis de las Tablas 6 y 7 para las doce ubicaciones, se pueden extraer las siguientes conclusiones estadísticas:

- ✦ En promedio, para el 80 % de las ubicaciones situadas entre los 18 y los 42 grados de latitud norte, durante 24 horas, por ubicación, se ha superado el nivel de la UIT 25 veces, con una duración promedio de los eventos de excedencia de 23 segundos, lo que representa un porcentaje de excedencia del 0,46 % por cada 24 horas.
- ✦ Las ubicaciones de alta latitud, Anchorage y Seattle, presentan una mayor ocurrencia de excedencia, debido principalmente a una geometría específica entre la longitud del satélite GEO utilizado (139° Oeste para SES-22 GEO), las longitudes de las ubicaciones terrestres y también la inclinación de los satélites LEO, que para valores elevados (por ejemplo, 51,9°), conduce a una alineación coplanaria casi perfecta que aumenta la alineación angular entre la dirección de la comunicación GEO y la dirección de transmisión LEO, lo que da lugar a una ocurrencia inesperadamente alta de excedencia. Este caso es teóricamente válido, considerando el modelo de antena isotrópica utilizado, aunque se espera que la alineación coplanaria y angular esté mucho más limitada por los límites del ángulo de direccionamiento del haz de la antena de matriz en fase del satélite LEO, como puede observarse en los resultados de la simulación del modelo de antena direccional de la página 47.