

Capítulo 6

Herramientas

Esta es la parte esencial de la tesis en la que se cumplen los objetivos en base a los cimientos teóricos que ya se han planteado. En base a las simulaciones y a la comparación de tipos de haces que se hizo en el capítulo 4, se formarán las conclusiones de la tesis.

6.1 Software

Se utiliza el siguiente software *Satsoft*™ y *Satellite Tool Kit*, STK™, en sus versiones de prueba, descarga y uso gratuito por tiempo limitado, ambos programas obtenidos de sus respectivas páginas web:

STK: <http://www.agi.com/>

Satsoft: <http://www.satsoft.com/default.htm>

Para el caso de STK sí se obtuvo licencia.

A continuación se muestra el desglose de las herramientas de cómputo.

6.1.1 Satellite Tool Kit versión 9

Desglose del software.

STK es un programa que contiene varios módulos especializados en distintos campos como son:

- Misión espacial.
 - En esta sección se encuentra la sección de nuestro interés: comunicaciones.
- C⁴ISR (*command, control, communications, computers, intelligence, surveillance, and reconnaissance*), Comando control, comunicaciones, computadoras, inteligencia, vigilancia y reconocimiento.
- Misiones aeronáuticas.
- Defensa para misiles.
- Sistemas electrónicos.

Los módulos estándar del software son:

- ✓ Analizador, estudios de comercio
- ✓ Posición de vehículos.
- ✓ Comunicaciones, análisis de radiofrecuencia e interferencia.
- ✓ Cobertura
- ✓ Radar.

Además existen módulos complementarios para tener análisis más completos, por ejemplo, se pueden agregar condiciones urbanas a los sistemas de comunicaciones y considerar efectos como la difracción. Esta tesis considera el módulo de comunicaciones el cual se describe a continuación.

STK/Communications:

- Satélites

Hay diferentes dispositivos espaciales que se pueden agregar, los satélites pueden ser de cualquier órbita, LEO, MEO, GEO, constelaciones de satélites, entre otros, se encuentra una base de datos de satélites comerciales, además la órbita se puede personalizar definiendo altura, inclinación y excentricidad.

- Diferentes modelos de transmisor y receptor

Para el caso de receptores existen diferentes modelos en los que se puede especificar: frecuencia, ancho de banda, antena, pérdidas por líneas de transmisión o usar medios ópticos, temperatura de ruido, polarización, diferentes tipos de filtros, ganancias de amplificador y pérdidas adicionales, receptores especiales par múltiples haces. Para el caso de transmisores se puede especificar frecuencia, ancho de banda, antena, PIRE, modulación, tipo de filtro, ganancias y pérdidas adicionales. Con la combinación de un receptor y un transmisor, se pueden modelar transpondedores.

- Diferentes modelos de antenas.

El programa cuenta con 42 modelos de antenas, ideal isotrópica, dipolo, antenas de apertura, reflector parabólico, etc., además se pueden importar patrones de antenas de otras fuentes, como SATSOFT. A cada una se pueden asignar sus parámetros, principalmente geométricos. Antenas con múltiples haces.

- Estaciones terrenas

Se pueden seleccionar que antena usa la estación para realizar enlaces, su locación, cuenta con una base de datos de ciudades del mundo.

- Contornos en 2D y 3D.

STK incluye un visor del mundo en 2D en los que se pueden observar los contornos de ganancia de la antena y en 3D el haz de la antena del satélite.

Además se puede observar al satélite en movimiento o la proyección de su órbita en la superficie terrestre. Se puede utilizar diferentes sistemas de coordenadas y unidades.

- Rendimiento de enlaces

Considerando las limitantes de los enlaces satelitales con los parámetros: E_b/N_0 , C/N_0 , BER; además toma en cuenta pérdidas atmosféricas, lluvia, interferencia o efecto Doppler. Se generan reportes sobre:

Potencia isotrópica recibida (RIP, *Received Isotropic Power*) del transmisor

$$RIP = PIRE - L_{\text{propagación}} \text{ [dBW]}$$

Densidad de flujo

$$I = PIRE - L_{\text{atmosféricas}} - 10 \log(4\pi R^2) \text{ [dBW/m}^2\text{]}$$

Relación portadora a ruido.

- La librería de comunicaciones permite¹:

Modelar antenas: posición, orientación, patrón de ganancia, etc. Procesamiento de señales: amplificadores, filtros, mezcladores, moduladores y demoduladores. Modelos estándares y personalizados de propagación. Presupuesto del enlace.

- Interfaz

La interfaz gráfica permite un fácil manejo del software.

- Limitaciones

Es un programa muy completo, sin embargo es necesario contar con licencia para el módulo de comunicaciones. La versión de prueba contiene estas funciones por tiempo limitado.

6.1.2 SATSOFT versión 2.7

Desglose del software.

Es una herramienta para el desarrollo de sistemas de comunicaciones vía satélite mediante el diseño, análisis y modelado de las antenas además de su

¹ <http://www.agi.com/products/by-product-type/software-development-kits/agi-components/communications-library/>

cobertura. La versión 2.7 fue publicada en diciembre de 2006. Principales funciones²:

- Evalúa diferentes coberturas y ganancias de las antenas.
- Se pueden desarrollar sistemas con haces moldeados y formar diseño de individuales y múltiples haces en el satélite.
- Los patrones de radiación de haces individuales obtenidos se pueden exportar a STK.
- Calcula los contornos de los parámetros directividad, PIRE, G/T, C/N.
- Base de datos de ciudades.

Funcionamiento:

Es una interfaz gráfica donde el usuario inserta los elementos del sistema de comunicaciones satelitales y modifica sus parámetros con barras de herramientas y menús contextuales. La página de internet proporciona información tutorial para su funcionamiento.

- Síntesis de la huella de cobertura

Rápido procesamiento en la síntesis de patrones de radiación para los diferentes tipos de haces.

Distribución de estaciones terrenas para crear una red en determinada cobertura.

Creación de tablas de datos para las posiciones de los haces y vértices de los polígonos de cobertura.

- Trazo de contornos

Contornos: directividad, PIRE, G/T, (C/N)_i, ángulos de elevación. Personalización de los contornos (color, estilo de línea, etc.).

Utiliza interpolación para reducir recursos del equipo de cómputo y tiempo de procesamiento.

- Tablas de rendimiento

El programa tabula los valores de los distintos parámetros ya mencionados para poder ser procesados en hojas de cálculos y ser exportados y utilizados por otros programas.

- Sistemas de coordenadas, mapas y objetos

Utiliza distintos sistemas de coordenadas: (u,v), (θ,ϕ), az/el para especificar el eje de radiación máxima de la antena o línea de vista.

² <http://www.stk.com/products/by-product-type/applications/stk/add-on-modules/satsoft/>

Mapa mundial en el que la Tierra se modela como un esferoide con los polos achatados. Tiene acceso a una base de datos de ciudades y sus respectivas coordenadas.

- Creación de polígonos de cobertura

Las regiones donde se elaboran los cálculos se delimitan por polígonos definidos por el usuario o importados de otra fuente. Estos se pueden digitalizar para ser guardados y utilizarlos posteriormente.

- Compatibilidad con STK

Se pueden importar y exportar los patrones de ganancia de las antenas.

- Modelos de antenas

Las características para cada modelo proporciona la opción de diseñar el ancho de haz deseado, con sus dimensiones y eficiencia, polarización, modo de alimentación, optimización e interpolación.

Haz Gaussiano para haces circulares y elípticos, reflector offset, arreglo de alimentador rectangular. Diseño de antenas con múltiples haces de flujo constante.

El modelo para el cálculo del ancho de haz difiere al manejado, se utiliza una aproximación más exacta. Sin embargo sigue siendo aceptada la expresión definida en esta tesis.

- Satélites

Se pueden modelar antenas para satélites GEO, LEO, MEO y constelaciones de satélite.

- Interfaz

La interfaz gráfica tiene todas las funciones de archivo: abrir, guardar; copiado de imágenes al portapapeles; opciones de zoom para visualizar cualquier zona geográfica.

La modificación de parámetros se da en cuadros de diálogo donde el usuario manipula los valores numéricos y para visualizar resultados se calcula el haz compuesto o el haz componente, dependiendo el caso.

Además incluye un registro de actividades y resultados donde es posible ver lo errores y las posibles soluciones.

- Limitaciones

Para el caso de la versión de prueba, no se permite guardar contornos de cobertura o patrones de radiación, sin embargo, esto contribuye al aprendizaje por la repetición de pasos. No calcula el patrón compuesto para diferentes reflectores. Es un software para el diseño de antenas en el satélite.

En el ANEXO de esta tesis se incluye un registro de las actividades realizadas con el fin de explicar el funcionamiento de los programas. Sin embargo, se recomienda la revisión de los manuales de ayuda para detalles específicos.

6.2 Simulaciones

6.2.1 STK

A continuación las simulaciones realizadas para comparar la cobertura de un sistema de comunicaciones vía satélite con un haz y múltiples haces. Los parámetros del enlace se miden en una estación localizada en el Distrito Federal, México para el enlace descendente. Se trabaja en referencia a los valores preestablecidos sin agregar atenuantes como lluvia u otros efectos.

Haz individual:

Satélite GEO, Posición 98° O.

Estación terrena ubicada en México DF.

Antena del satélite:

Frecuencia: 14.5 [GHz]

Ancho de haz: 6 [°]

Diámetro: 0.203252 [m]

Ganancia de haz principal: 27.1983 [dB]

Eficiencia: 55 %

Ganancia de haz posterior: -30 [dB]

Potencia 20 dBW

Modulación: BPSK, Tasa: 16 Mbps

Uso de las expresiones matemáticas descritas en esta tesis:

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{14.5 \times 10^9} = 0.020690 \text{ [m]}$$

$$D = 0.203252 \text{ [m]}$$

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{0.020690}{0.203252} = 7.13 \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$\eta = 0.55$$

$$G = 0.55 \left(\frac{\pi \times 0.203252}{0.020690} \right)^2 = 523.86$$

$$G_{dB} = 10 \log 523.86 = 27.192 \text{ [dB]}$$

Se puede constatar la funcionalidad de los modelos matemáticos. Para el caso de la aproximación del ancho de haz se nota una diferencia con respecto al programa.

Resultados

Huella:

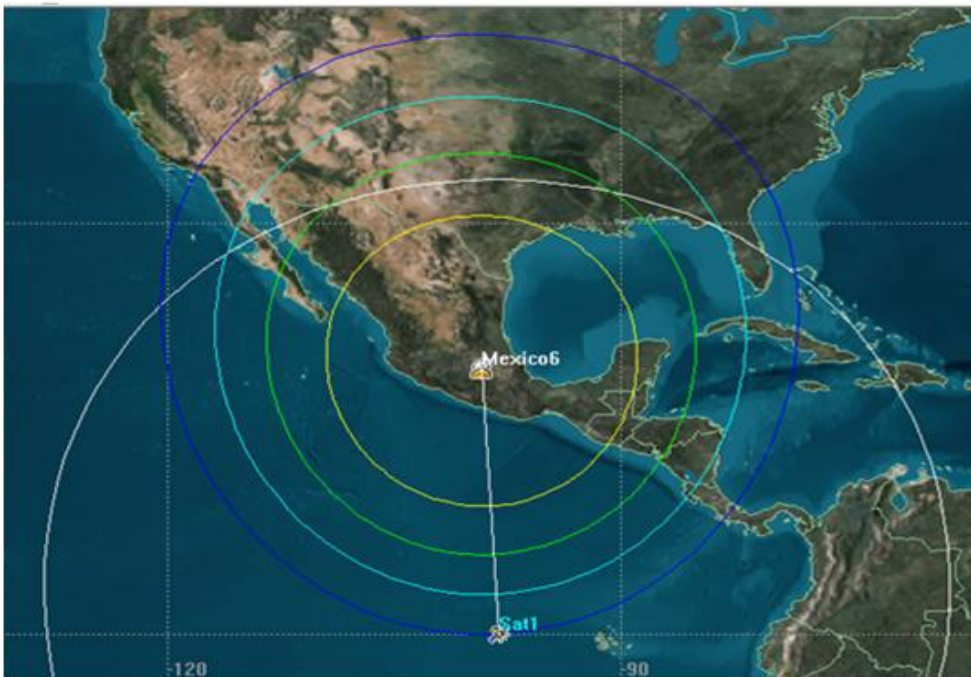


Figura 6.1 Contornos PIRE para un haz.

En el Distrito Federal se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 6.1 Cálculo de enlace.

Satellite-Sat1-Sensor-SensorSat1-Transmitter-TransmitterSat1-To-Facility-DF-Sensor-SensorDF-Receiver-ReceiverDF: Link Budget - Short Form		
Time (UTCG)	3 Dec 2010 18:00:00.000	
EIRP (dBW)	47.198	
Rcvd. Frequency (GHz)	14.500000	
Rcvd. Iso. Power (dBW)	-159.654	
Flux Density (dBW/m ²)	-114.970902	
g/T (dB/K)	19.935412	
C/No (dB*Hz)	88.880604	
Bandwidth (kHz)	32000.000	
C/N (dB)	13.8291	
Eb/No (dB)	16.8394	
BER	4.245603e-023	

Múltiples haces

Satélite GEO en la posición 98° O

Estación terrena ubicada en México DF

Misma antena para los 4 haces:

Parámetros de la antena:

Frecuencia: 14.5 [GHz]

Ancho de haz: 3 [°]

Diámetro: 0.406365 [m]

Ganancia de haz principal: 33.2159 [dB]

Eficiencia: 55 %

Ganancia de haz posterior: -30 [dB]

Potencia 20 dBW

Modulación: BPSK, Tasa: 16 Mbps

Orientación de los 4 haces:

Tabla 6.2 Orientación de los múltiples haces.

Haz	Azimut [°]	Elevación [°]
1	89.5	88.3
2	85.5	90
3	320	89
4	310	88.3

Resultados

Contornos PIRE individuales

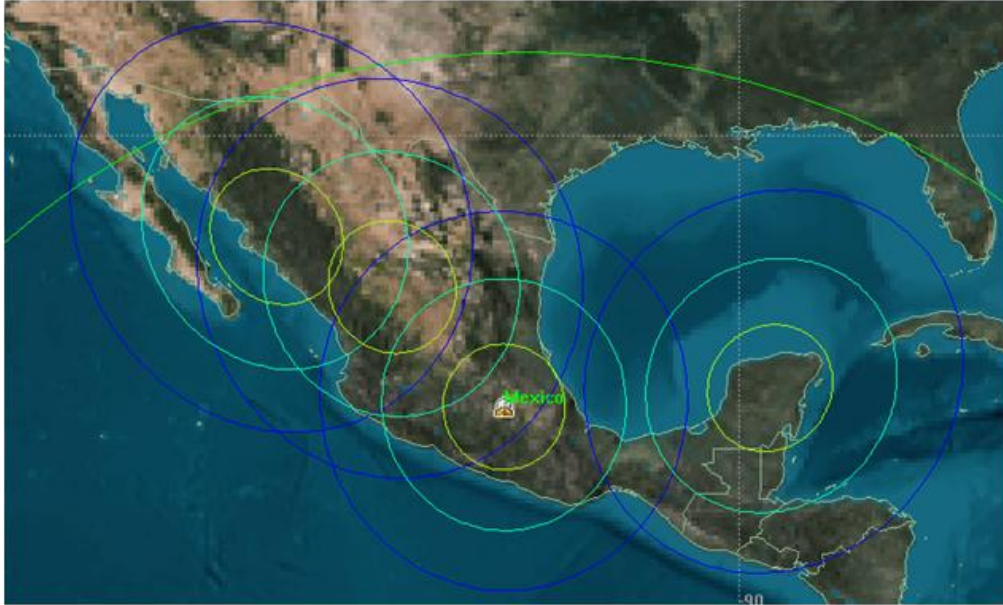


Figura 6.2 Contornos PIRE para 4 haces de ancho de haz de 3 [°].

Contorno de PIRE compuesto

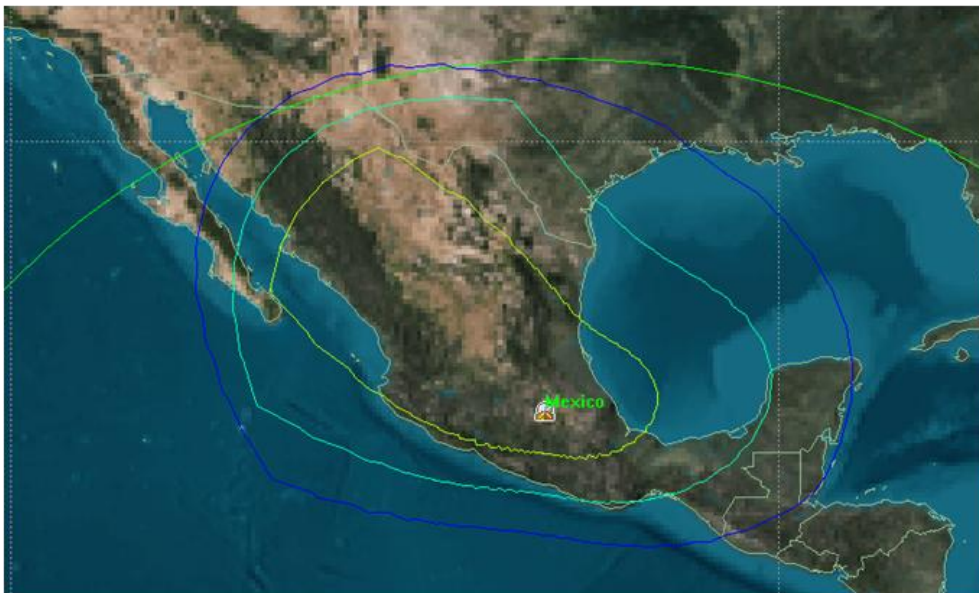


Figura 6.3 Contorno compuesto de PIRE para múltiples haces.

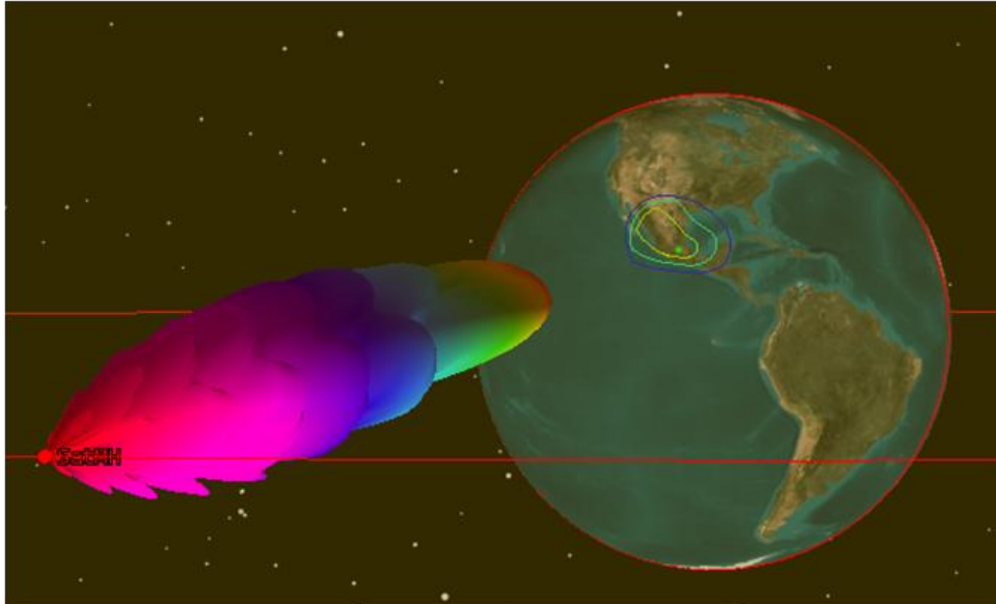


Figura 6.4 Haz compuesto para múltiples haces.

Resultados en la estación del Distrito Federal

Tabla 6.3 Cálculo de enlace

Satellite-SatMH-Sensor-SensorSatMH-Transmitter-TransmitterSatMH-To-Facility-Mexico-Sensor-SensorDF-Receiver-ReceiverDF: Link Budget - Short Form	
Time (UTCG)	3 Dec 2010 18:00:00.000
EIRP (dBW)	153.689
Rcvd. Frequency (GHz)	14.500000
Rcvd. Iso. Power (dBW)	-53.163
Flux Density (dBW/m ²)	-8.480059
g/T (dB/K)	16.413588
C/No (dB*Hz)	191.849623
Bandwidth (kHz)	32000.000
C/N (dB)	116.7981
Eb/No (dB)	119.8084
BER	1.000000e-030

En comparación a un haz se obtuvo un valor exorbitante para C/N_0 y BER, obteniendo un sistema sobrado, sin embargo, la idea es demostrar que se mejora el servicio incrementando estos valores.

Variación de ancho de haz

Para la cobertura del enlace descendente, en una estación, DF. Con potencia en el satélite de 30 [dB] y ancho de banda 32 MHz

Tabla 6.4 Comparación de uso de varios anchos de haz

Ancho de haz [°]	Diámetro [m]	PIRE _d [dBW]	(C/N ₀) _d [dBHz]
5	0.243869	58.781	96.941192
4	0.304801	60.718	98.878400
3	0.406365	63.216	101.376403
2	0.609509	66.737	104.897677
1	1.21897	72.757	110.917946
0.5	2.43792	78.778	116.938463

6.2.2 Satsoft

Se compara a continuación el uso de un solo haz y el uso de múltiples haces.

Haz individual

Parámetros:

Posición orbital: 98° O.

Antena: Modelo Reflector

Línea de vista: -100.544 °E, 21.571° N

Frecuencia = 14.25 [GHz]

Tamaño de apertura = 0.256939 [m]

Eficiencia = 43.61%

$\theta_{3dB} = 5$ [°]

Directividad³ = 28.07 [dB].

Utilizando las expresiones matemáticas para calcular estos parámetros definidos en esta tesis se verifican los valores:

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{14.25 \times 10^9} = 0.021053 [m]$$

³ En el programa Directividad es la ganancia de la antena.

$$D = 0.256939 \text{ [m]}$$

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{0.021053}{0.256939} = 5.74 \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$\eta = 0.4361$$

$$G = 0.4361 \left(\frac{\pi \times 0.256939}{0.021053} \right)^2 = 641.11$$

$$G_{dB} = 10 \log 641.11 = 28.069 \text{ [dB]}$$

El modelo para calcular el ancho de haz difiere, ya que el usado por el software es⁴:

$$\text{beamwidth} = 1.029f \cdot (1.0 - 0.212 \cdot \log_{10}(\text{edgil})) / \text{refdil}$$

Donde: *edgil* y *refdil* son valores determinados de acuerdo a la iluminación del reflector. El uso de directividad en el software es la ganancia que se definió en la tesis y la manera de calcularla.

Resultados:

Huella de un solo haz:

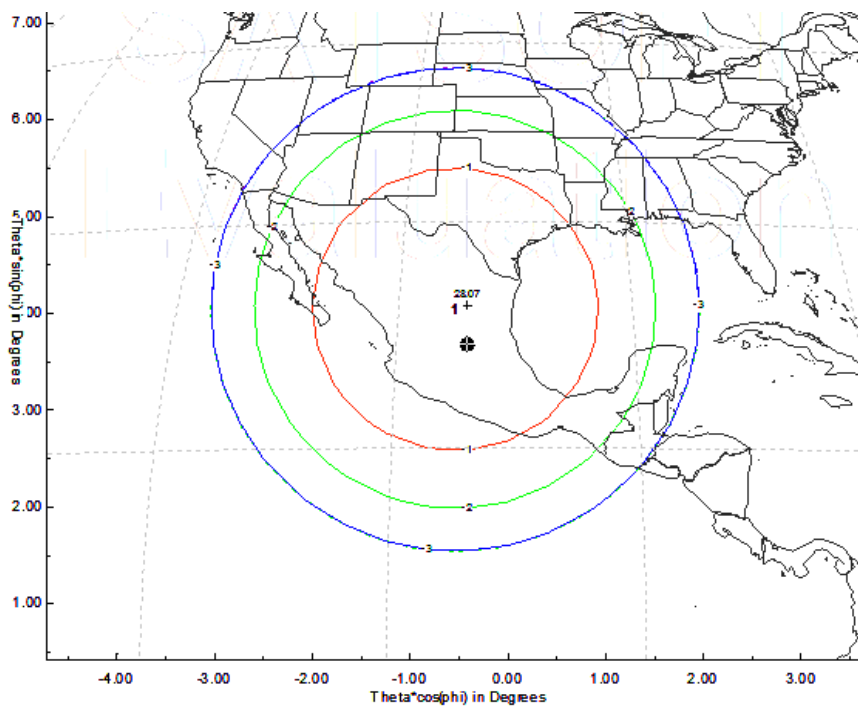


Figura 6.5 Contornos de ganancia con $\theta_{3dB} = 5[^\circ]$.

⁴ Tomado del manual de ayuda.

Con estaciones tres receptoras:

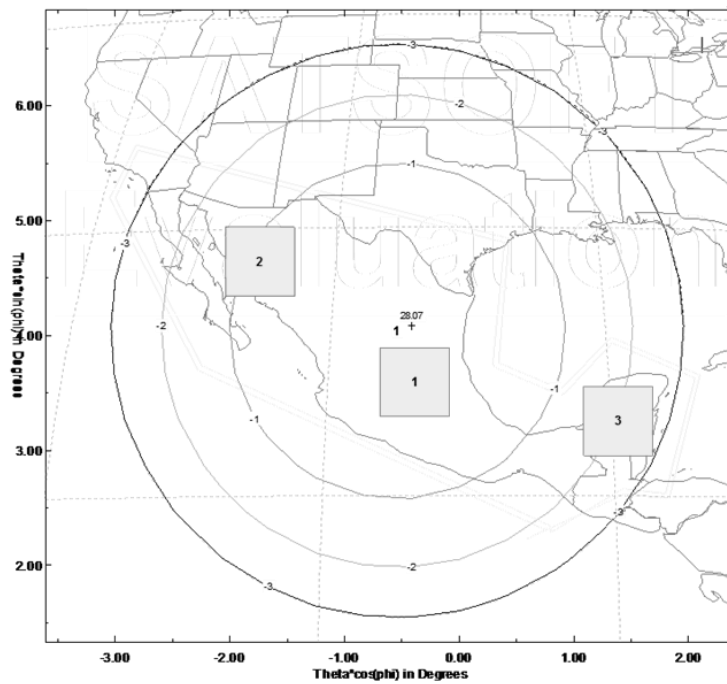


Figura 6.6 Contorno compuesto un haz de $\theta_{3dB} = 5$ [°].

El valor de ganancia deseado para las estaciones es de 30 [dB] por lo que ninguna lo obtiene:

Tabla 6.5

1 beams, 3 stations defined for this composite beam			
Maximum Possible Gain and Desired Gain at Each Station			
Station	Maximum Gain	Desired Gain	Station Type
1	27.97*	30.00	Contour
2	27.24*	30.00	Contour
3	26.03*	30.00	Contour

* Desired gain at this station is higher than the maximum possible gain at that point. This indicates that an additional compnent beam is required to cover the station, or that the station goal is set too high.

Composite Beam Computation Time 0.004000
Contouring Time 0.013000

Para obtener la ganancia deseada es necesario agregar haces.

Múltiples haces.

Parámetros:

Número de haces: 14

Posición orbital: -98° E.

Antena: Modelo Reflector

Línea de vista: -100.224°E , 21.283°N

Frecuencia = 14.25 [GHz]

Tamaño de apertura = 1.2847 [m]

Eficiencia = 43.60%

$\theta_{3\text{dB}} = 1 [^{\circ}]$

Directividad = 42.05 [dB].

Resultados:

Huella de los haces componentes (individual)

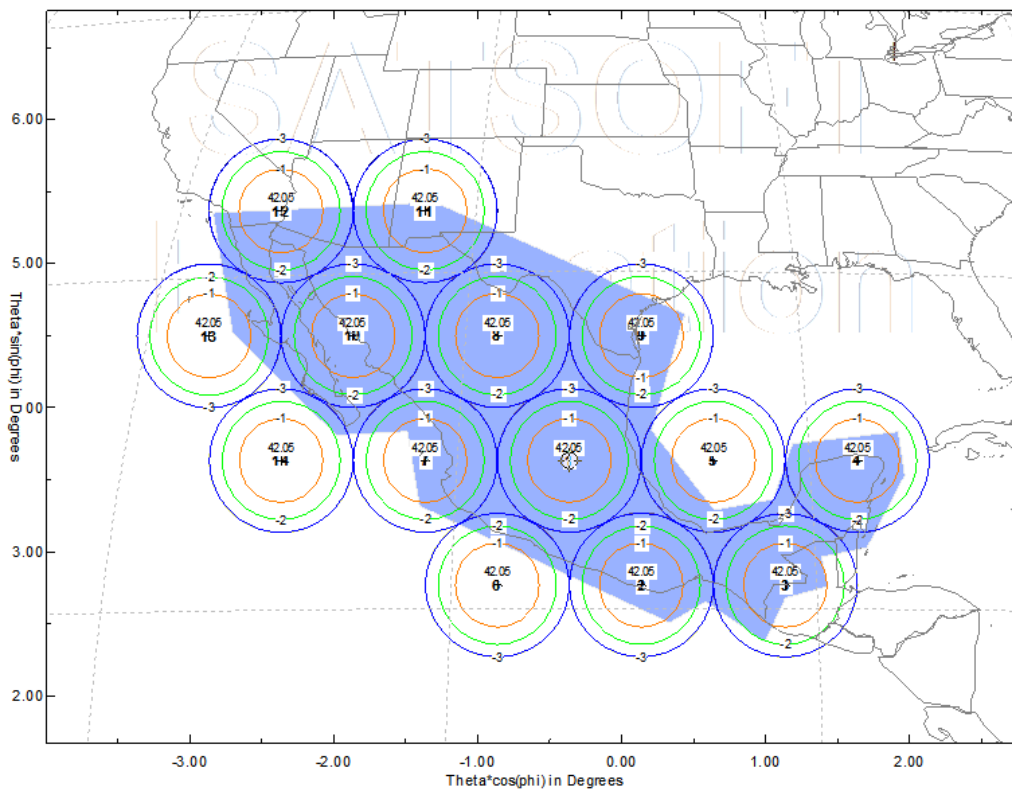


Figura 6.7 Arreglo de 14 haces con $\theta_{3\text{dB}} = 1 [^{\circ}]$.

Insertando una red de 18 estaciones podemos observar el contorno del haz compuesto (la suma de las huellas de todos los haces):

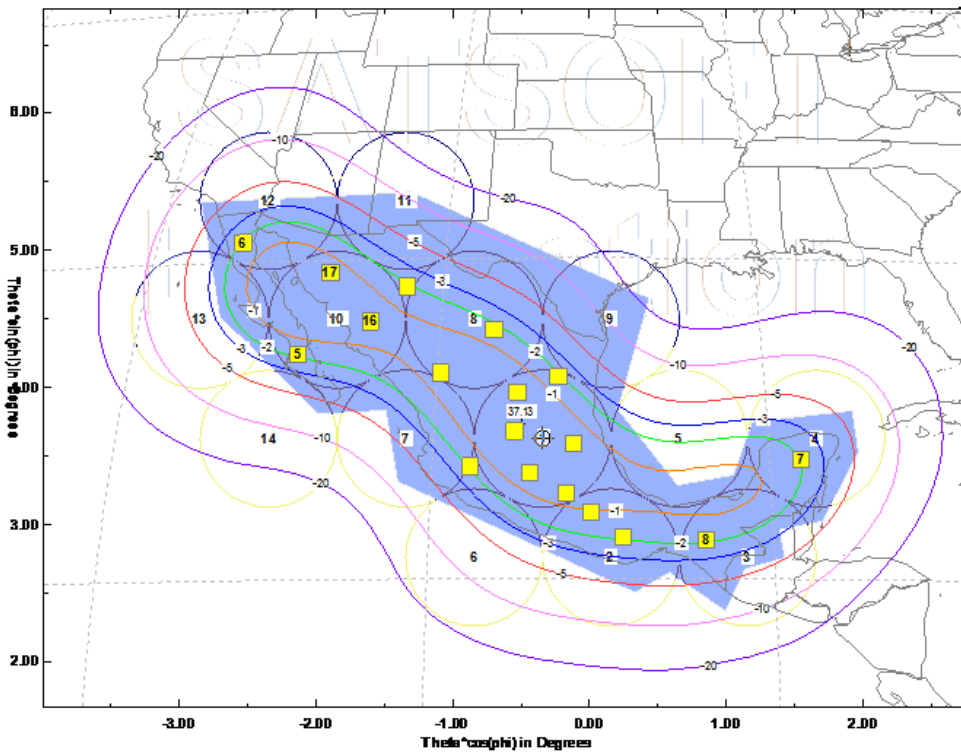


Figura 6.8 Contorno compuesto de 14 haces con $\theta_{3dB} = 1$ [°].

Registro de resultados:

Tabla 6.6

Station	Maximum Gain	Desired Gain	Station Type
1	42.85	30.00	Contour
2	42.92	30.00	Contour
3	42.77	30.00	Contour
4	42.91	30.00	Contour
5	42.82	30.00	Contour
6	42.54	30.00	Contour
7	42.61	30.00	Contour
8	42.77	30.00	Contour
9	42.84	30.00	Contour
10	42.81	30.00	Contour
11	42.92	30.00	Contour
12	42.82	30.00	Contour
13	42.83	30.00	Contour
14	42.88	30.00	Contour
15	42.92	30.00	Contour
16	42.84	30.00	Contour
17	42.79	30.00	Contour
18	42.91	30.00	Contour

Single-Mode Optimization Results:

Total power in distribution: 1.00
 Number of iterations: 285

Todas las estaciones alcanzan el valor deseado de ganancia.

Variando el ancho de haz obtenemos los valores de ganancia de la antena, tomando en cuenta una distribución de 10 estaciones, que requieren una ganancia deseada de 25 [dB], en el territorio del país como se muestra:

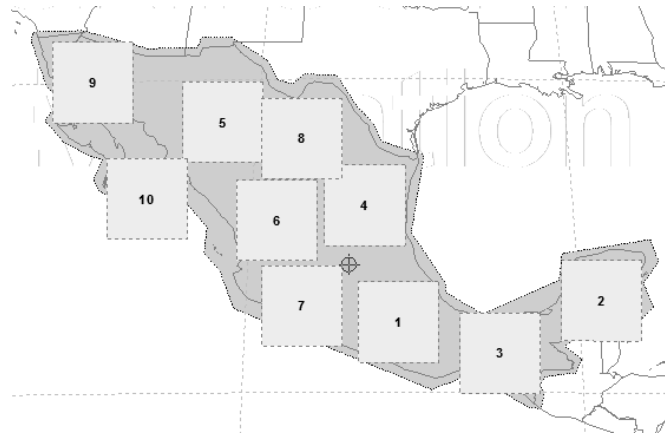


Figura 6.9 Distribución de estaciones.

Se observa que el margen de ganancia mínima aumenta al incrementar el número de haces, debido a haces más angostos. Además el patrón tiende a coincidir con el límite político de México.

Tabla 6.7 Cobertura con malla de haces.

Ancho de haz [°]	Número de haces	Directividad de haz componente [dB]	Tamaño del reflector [m]	Margen mínimo de directividad [dB]
5	1	28.07	0.26	0.89
4	2	30.01	0.32	2.51
3	5	32.51	0.43	4.96
2	6	36.03	0.64	7.46
1	14	42.05	1.29	10.53
0.5	35	48.07	2.57	13.36