



# Optimización técnico-económica de redes VSAT en las bandas Ku y Ka

C.L. Ordóñez-Romero, R. Neri-Vela, S. Landeros-Ayala, V. Altamirano-Guerrero,  
A. Malpica-Maury  
*División de Ingeniería Eléctrica y Departamento de Telecomunicaciones*  
*Facultad de Ingeniería, UNAM*  
*E-mail: cisarebbe@libero.it*

(recibido: julio de 2002; aceptado: enero de 2003)

## Resumen

El costo de una red satelital VSAT es función del número de terminales, la matriz de tráfico, la banda de frecuencias, las características del satélite y los parámetros de calidad esperados. La banda Ku es una tecnología altamente probada, empleada desde hace dos décadas en México y el mundo, pero la banda Ka apenas está surgiendo como una nueva opción para ofrecer servicios multimedia de banda ancha. Todavía existe poca información sobre los costos y las características técnicas de los equipos de radiofrecuencia necesarios para implementar una red en la banda Ka. Estos datos técnicos son proporcionados en el presente artículo y fueron logrados tras un largo proceso de búsqueda con proveedores internacionales. Dicha información fue empleada para elaborar un programa de computadora que optimiza redes VSAT en ambas bandas y los resultados obtenidos se proporcionan en forma gráfica. Estos datos pueden ser útiles para el diseño de redes satelitales de servicios multimedia en México o en otros países.

**Descriptores:** redes VSAT, enlaces satelitales, equipo de RF, estaciones terrenas, optimización de costos, banda Ku, banda Ka.

## Abstract

*The cost of a VSAT satellite network is a function of its number of terminals, traffic matrix, frequency band, satellite characteristics and the quality parameters of operation. Ku band is a well known technology, used for the past two decades in Mexico and all over the world, but the Ka band is just appearing as a new option to offer wide band multimedia services. There is still little information about costs and technical characteristics of radio frequency devices needed to implement a Ka band network. These valuable technical data are given in this paper which were obtained through a long searching process with international suppliers. This information was then used to make a computer program that optimizes VSAT networks in both bands, and the obtained results are given in graphic form. These data can be useful for the design of multimedia services satellite networks in México and other countries.*

**Keywords:** VSAT networks, satellite links, RF equipment, earth-stations, cost optimization, Ku band, Ka band.

## Introducción

Una VSAT es una estación terrena de servicio fijo por satélite (geoestacionario) que opera como terminal dentro de una red de información y es utilizada para una gran variedad de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones. Las redes VSAT se definen como redes bidireccionales de comunicación vía satélite para el intercambio punto-punto y punto-multipunto (*broadcasting*) de voz, video y datos. La topología en estrella mostrada en la figura 1 es la configuración más usual de estas redes.

La operación de la red consiste en la comunicación de una estación terrena maestra (M) con un número  $n$  de estaciones esclavas (E). Las esclavas no pueden establecer comunicación entre ellas, debido a que se comunican en forma exclusiva a través de la maestra. En general, el diámetro de la antena varía entre 0.9 m y 2.4 m para

estaciones esclavas y entre 2.4 m y 7 m para una estación maestra, dependiendo de la banda empleada.

Las tasas de transmisión manejadas por estas redes dependen de su aplicación y del tipo de información, que normalmente son datos y voz digitalizada. La tasa típica para un canal de voz varía entre 16 y 64 Kbps, siendo ésta última la de mejor calidad. Por su parte, la tasa de datos normalmente varía entre 128 y 2048 Kbps (UIT, 1994). Debido al funcionamiento de las redes de configuración en estrella, es de esperarse que el tráfico existente en el enlace maestra-esclava sea siempre mayor al de los enlaces esclava-maestra; es decir, se presenta lo que se llama flujo asimétrico de información. El acceso TDMA indicado en la figura 1 significa que para realizar la comunicación entre esclavas y maestra, se realiza una división de tiempo de tal manera que cada estación esclava recibe o transmite hacia la estación maestra exclusivamente en su ranura de

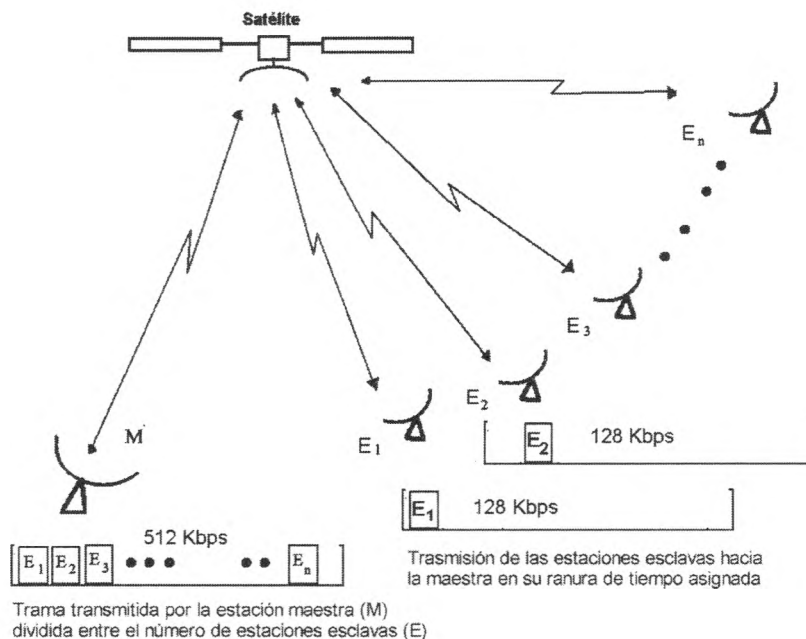


Figura 1. Ejemplo de una red VSAT en estrella con acceso TDMA

tiempo asignada. Aunque existen otras formas de acceso más económicas pero menos eficientes, como el ALOHA ranurado, el TDMA considerado en este trabajo brinda mayor confiabilidad.

Actualmente existen miles de redes VSAT en el mundo, casi todas ellas operan en la banda Ku y algunas en la banda C. En la tabla 1 se presentan las principales redes para el caso particular de México con datos actualizados a principios del 2002. Sin embargo, ya hay varios satélites de banda Ka como el Italsat 2, Hotbird 6, Koreasat 3, y a partir de fines del 2002, el ANIK F2; este último ha sido diseñado especialmente para la transmisión de altas tasas de datos en la banda Ka para servicios multimedia. Por lo tanto, es importante realizar un análisis comparativo técnico-económico entre bandas, ya que, sin duda, la banda Ka también será utilizada paulatinamente en América Latina a partir de esta década.

### Análisis

Los principales módulos o equipos de FI y RF que hay que tomar en cuenta para realizar un

cálculo preliminar se muestran en la figura 2. Estos elementos son: Modulador, amplificador de potencia (HPA o SSPA) y antena de la estación transmisora; antenas y transpondedor del satélite; y antena, amplificador de bajo ruido (LNA) y demodulador de la estación receptora. Existen diferentes tipos de modulación, pero la más común en transmisiones satelitales para datos y voz digitalizada es la modulación QPSK.

El HPA o SSPA, según el caso, es el elemento de microondas que proporciona la potencia necesaria para que la señal sea alimentada a la antena y llegue al satélite con un nivel adecuado. El parámetro conocido como PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) es obtenido multiplicando la potencia de salida del amplificador por la ganancia de la antena transmisora, es decir:

$$PIRE = P_T G_T \quad [W] \quad (1)$$

$$[PIRE] = [P_T] + [G_T] = 10 \log(P_T) + 10 \log(G_T) \quad [dBW] \quad (2)$$

donde  $P_T$  y  $G_T$  son respectivamente, la potencia de salida del amplificador en watts y

*Tabla 1. Principales redes VSAT que operan en México actualmente. Su mayor utilidad es para enlaces de datos y telefonía, pero algunas instituciones también las usan para telefonía rural (SCT) o Internet y distribución de video (Enlaces Integra)*

RED/USUARIO	NUMERO DE ESTACIONES	BANDA DE FRECUENCIAS
TELMEX	1000	C
TELMEX	690	Ku
SCT	600	Ku
ENLACES INTEGRA	400	Ku
BANRURAL	210	C
CAPUFE	100	C
AVANTEL	95	Ku
INVERLAT	60	Ku
SAINCO PEMEX	30	Ku

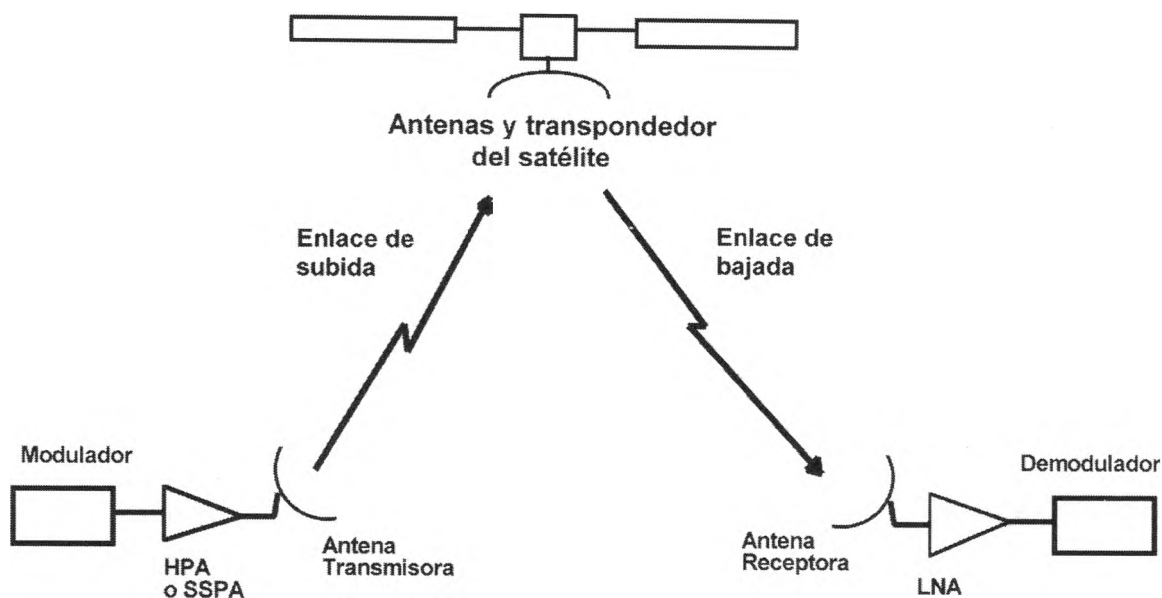


Figura 2. Diagrama de bloques del enlace satelital. No se incluyen los módulos de conversión de FI a microondas y viceversa, necesarios entre los amplificadores y el MODEM, ya que no afectan en ganancia o en temperatura de ruido al cálculo del enlace

la ganancia de la antena en valor absoluto en dirección hacia el satélite. Los corchetes indican que la cantidad ya está calculada en decibelios.

Hay varios factores que atenúan la señal, tanto en el trayecto de subida como en el de bajada, pero los más relevantes son la atenuación por propagación en el espacio libre y la atenuación por lluvia. Las pérdidas ocasionadas por desajuste de las antenas, absorción atmosférica y conectores, son del orden de 1 dB en total para cada trayecto. Para el cálculo de la atenuación  $L$  por propagación en el espacio libre se utiliza la siguiente fórmula:

$$[L_{e.l.}] = 92.44 + 20 \log(r_{km}) + 20 \log(f_{GHz}) \quad [dB] \quad (3)$$

en donde  $r$  es la distancia entre el satélite y la estación terrena (transmisora o receptora, según el caso), y  $f$  es la frecuencia.

Para la atenuación por lluvia, se puede utilizar el método propuesto por la CCIR (UIT, 1990) para las bandas Ku y Ka. Los pasos a seguir también se describen con ejemplos en Neri (2002). Para la banda Ka, también es posible emplear el método DAH (Dissanayake, 1997), (Landeros, 2002), que ha sido adoptado por la UIT desde fines de 1999. En la tabla 2 se muestran los márgenes de lluvia calculados por ambos métodos para una disponibilidad de 99.8 % y 99.5% para las bandas Ku y Ka, respectivamente, en las ciudades de Cozumel y México D.F. Se eligieron estas ciudades porque representan un enlace con las peores condiciones, tanto de potencia recibida por el satélite (ya que la ciudad de Cozumel se encuentra en las orillas de una supuesta huella de cobertura nacional para México) como la condición de atenuación máxima por lluvia (debido a la gran intensidad de mm/h de lluvia que ocurre en la zona de Cozumel), como se muestra en

la figura 3. De los resultados mostrados en la tabla 2 se observa que en la mayoría de los casos analizados, la atenuación por lluvia predicha por el modelo DAH es mayor que la calculada con el modelo convencional de la CCIR, aunque no parece ser una regla absoluta; en algunos casos la diferencia es muy poca (menos de 1 dB), en unos es de

casi 4 dB, y en otros vale cero o medio dB (Ku, 99.8%, enlace de bajada). Ante la ausencia de una variación o regla de correspondencia definitiva de estos valores, se decidió emplear los del método estándar de la CCIR para efectuar los cálculos de optimización aquí reportados.

Tabla 2. Márgenes de lluvia calculados

CIUDAD	DISPONIBILIDAD [%]	MODELO			
		DAH [dB]		CIR [dB]	
		ENLACE DE SUBIDA Ka: 30 GHz Ku: 14 GHz	ENLACE DE BAJADA Ka: 20 GHz Ku: 11 GHz	ENLACE DE SUBIDA Ka: 30 GHz Ku: 14 GHz	ENLACE DE BAJADA Ka: 20 GHz Ku: 11 GHz
MÉXICO DF	99.5 (Banda Ka)	7.83	3.34	3.94	2.61
COZUMEL	99.5 (Banda Ka)	13.65	5.95	12.88	3.99
MÉXICO DF	99.8 (Banda Ku)	3.94	1.71	2.10	1.71
COZUMEL	99.8 (Banda Ku)	6.55	3.14	7.24	2.47

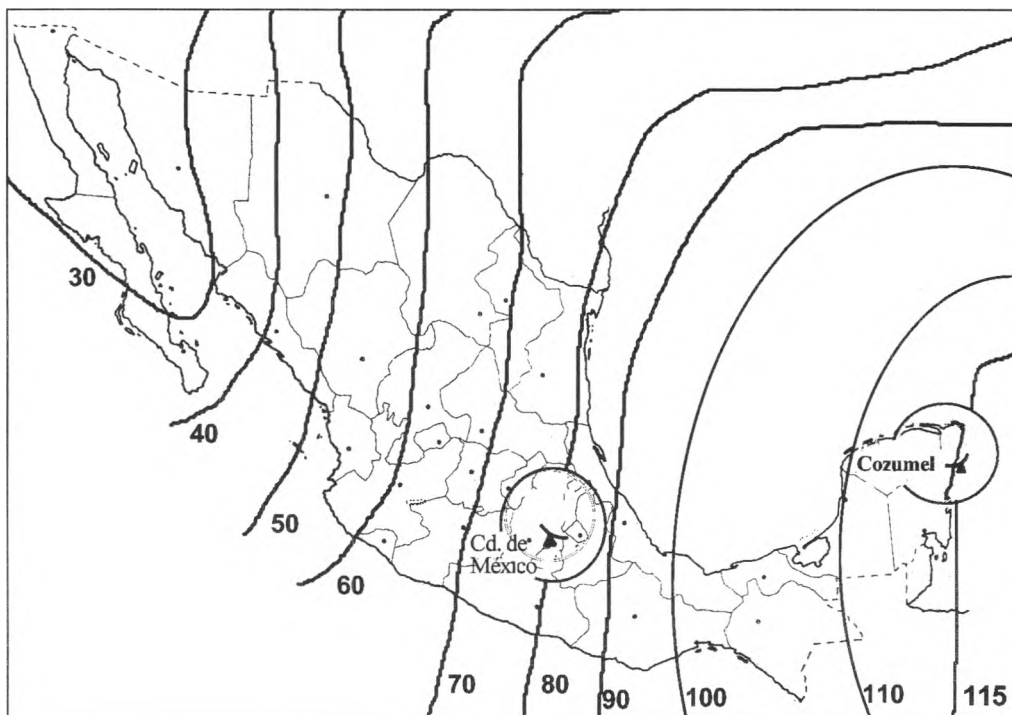


Figura 3. Enlace México DF-Cozumel con líneas de intensidad de lluvia en mm/h para 99.99% de disponibilidad en México, según curvas publicadas por la UIT. A partir de estos contornos es posible obtener la atenuación por lluvia para otras disponibilidades más bajas (Neri, 2002)

Para el enlace de bajada también se tienen que calcular las pérdidas por atenuación y lluvia, a la frecuencia correspondiente, pero en la estación receptora interesa además otro factor, que es la temperatura de ruido, ya que con ésta se calcula la figura de mérito  $G/T$ . También es de importancia en el satélite, sólo que en éste los valores son proporcionados por el operador del segmento espacial en forma de huellas de  $G/T$  (Figura 4) y ya no es necesario calcularlos. En el caso de las estaciones terrenas receptoras, debido a que hay una gran variedad entre ellas, el parámetro se calcula de la siguiente forma:

$$\left[ \frac{G_R}{T_S} \right] = [G_R] - 10 \log(T_S) \quad [\text{dB}/^\circ\text{K}] \quad (4)$$

donde  $[G_R]$  es la ganancia en decibelios de la antena en recepción, con relación a una antena isotrópica, y  $T_S$  es la temperatura total de ruido del sistema receptor, en grados Kelvin. Esta última se obtiene al sumar todas las temperaturas de ruido que intervienen en el trayecto de bajada de la señal referidas a la entrada del LNA:

$$T_S = T_A + T_C + T_{LNA} + T_{LL} \quad [^\circ\text{K}] \quad (5)$$

donde  $T_A$ ,  $T_C$ ,  $T_{LNA}$ ,  $T_{LL}$  son, respectivamente, la temperatura de ruido de la antena, de los conectores y guías de ondas, del amplificador de bajo ruido y de la lluvia. En condiciones de cielo despejado, la temperatura de ruido de la lluvia vale cero, ya que no hay atenuación por lluvia.

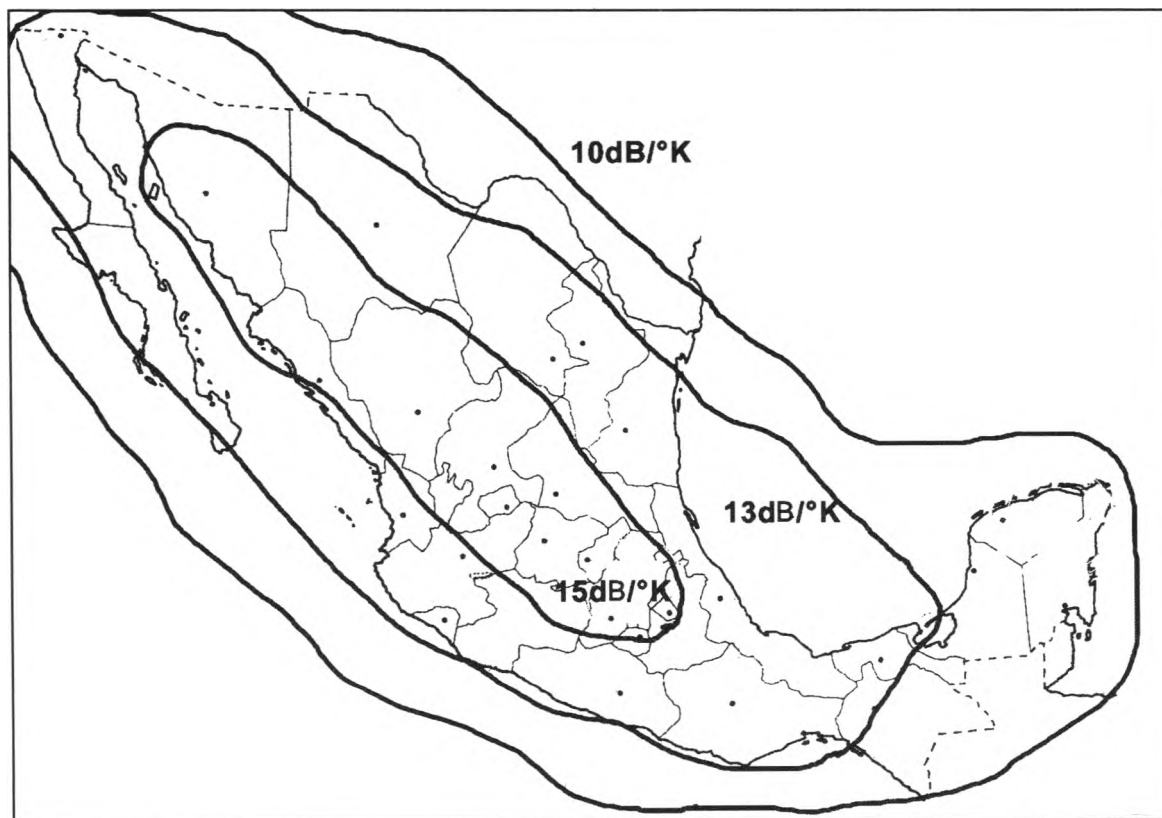


Figura 4. Ejemplo de una supuesta huella satelital de  $G/T$  en banda Ka con valores típicos de otros satélites en operación

Tomando en cuenta todo lo anterior, se realiza el cálculo de la relación portadora a densidad de ruido para el enlace de subida y de bajada con la siguiente expresión:

$$\left[ \frac{C}{N_o} \right] = [PIRE] + \left[ \frac{G_R}{T_s} \right] - [\sum \text{pérdidas}] - 10 \log(k) \quad [\text{dBHz}] \quad (6)$$

en donde  $k$  es la constante de Boltzmann e igual a  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ . Para el enlace de subida, la figura de mérito se obtiene de las huellas de G/T proporcionadas por el operador del satélite (Figura 4) y para el de bajada se utiliza el valor calculado con la ecuación (4). De forma análoga se trabaja con el PIRE: en el enlace de subida se usa el valor calculado con la ecuación (2) y para el

enlace de bajada se emplean las huellas de PIRE (Figura 5), también proporcionadas por el operador del satélite.

Finalmente, la relación total portadora a densidad de ruido del enlace (ignorando posibles interferencias que dependerían de cada caso en particular) desde una estación transmisora hasta una estación receptora es:

$$\left( \frac{C}{N_o} \right)_T = \frac{1}{\frac{1}{\left( \frac{C}{N_o} \right)_S} + \frac{1}{\left( \frac{C}{N_o} \right)_i} + \frac{1}{\left( \frac{C}{N_o} \right)_B}} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

donde  $(C/N_o)_S$  es la relación portadora a ruido del enlace de subida,  $(C/N_o)_B$  es la relación portadora a ruido del enlace de bajada y  $(C/N_o)_i$  se define como la relación

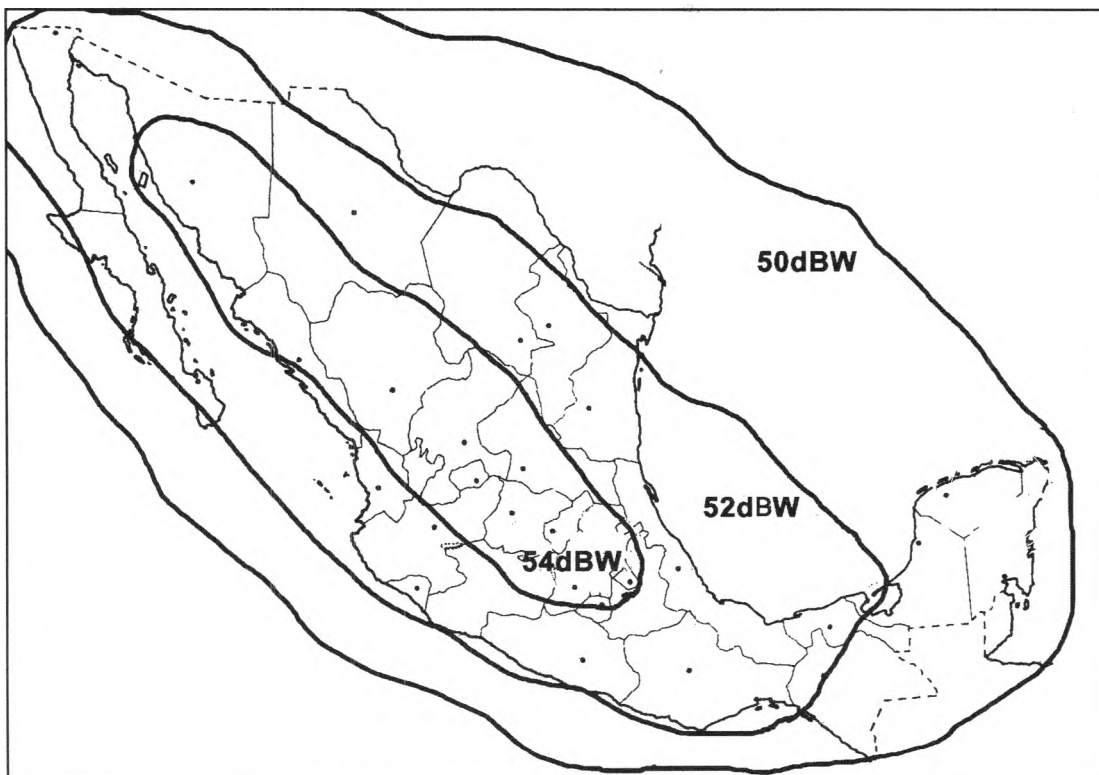


Figura 5. Ejemplo de una supuesta huella satelital de PIRE en banda Ka con valores típicos de otros satélites en operación

portadora a ruido de intermodulación, que es un parámetro de los transpondedores proporcionado por el fabricante del satélite.

Esta ecuación requiere que las relaciones portadoras a densidad de ruido no se encuentren en decibelios; por tal motivo es necesario convertir los valores obtenidos con la ecuación (6) de dBHz a Hz, y después de sustituir valores absolutos en la ecuación (7), el resultado final puede expresarse nuevamente en dBHz, obteniendo su logaritmo decimal y multiplicándolo por diez.

Una vez calculada la relación total portadora a densidad de ruido referida a la entrada del LNA de la estación terrena receptora por medio de la ecuación (7), la señal pasa por algunos otros dispositivos en serie con el demodulador, en cuya entrada se

exige un cierto valor de la relación energía por bit sobre densidad de ruido ( $E_b/N_0$ ), según la calidad deseada (probabilidad de error). Esta relación es (Roddy,2001):

$$\left[ \frac{E_b}{N_0} \right] = \left[ \frac{C}{N_0} \right] - [T.T] \quad [\text{dBHz}] \quad (8)$$

donde  $[T.T]$  es la tasa de transmisión en bits/seg convertida a decibelios y la dependencia entre la probabilidad de error BER (Bit Error Rate), el cociente  $E_b/N_0$  se muestra en la gráfica de la figura 6.

Siguiendo el procedimiento anterior se obtiene la relación portadora a densidad de ruido necesaria para demodular la señal con la calidad deseada, suponiendo un PIRE para el enlace de bajada igual al de las

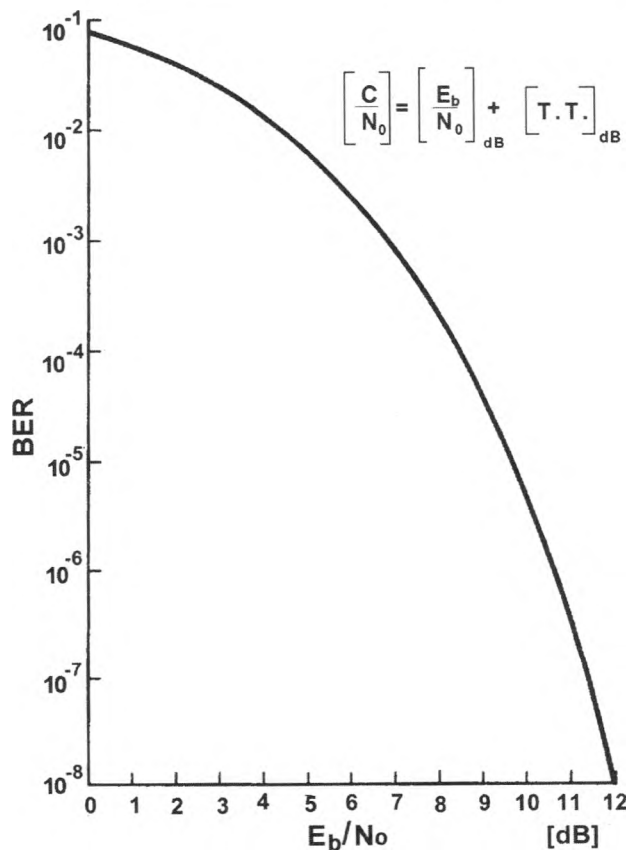


Figura 6. Relación entre la probabilidad de error y el cociente  $E_b/N_0$  para un demodulador QPSK



huellas de la figura 5. Sin embargo, se debe considerar que si el transpondedor del satélite es compartido por varias señales simultáneamente, hay que reducir dicho PIRE. La presencia de múltiples señales en un dispositivo no lineal provoca ruido de intermodulación, y por tal motivo el amplificador debe trabajar con un nivel menor al de saturación llamado back-off; esto mejora la relación portadora a densidad de ruido total, ya que el cociente  $(C/N_0)_i$  aumenta, tal como se aprecia en la figura 7.

### Programación y resultados

Lo anterior, resume el procedimiento matemático para calcular la calidad de un enlace de transmisión digital. A continuación se proporcionan resultados obtenidos para redes VSAT en las bandas Ku y Ka, utilizando las tasas de transmisión indicadas anteriormente en la figura 1, las huellas de PIRE y G/T de las figuras 4 y 5, los márgenes de atenuación por lluvia de la tabla 2 y las características y costos de los equipos de las

tablas 3,4,5 y 6. Los valores de PIRE y G/T mostrados en las figuras 4 y 5 son valores reales y típicos, similares a los utilizados por el Hotbird 6 de Eutelsat en la banda Ka. Se elaboró un programa de computadora (Altamirano, 2001) con el cual se realizaron múltiples simulaciones iterativas hasta obtener las configuraciones más económicas que a la vez cumplieran con los requerimientos técnicos.

En la figura 8 se muestra el comportamiento del costo total de la red con base al número de estaciones esclavas.

Estos costos no incluyen el equipo TDMA de la maestra, ya que para este estudio se ha supuesto un costo similar de dicho equipo de sincronía en ambas bandas. Se observa que conforme aumenta el número de estaciones en la red, el costo total se incrementa de forma lineal en la banda Ka, y para todos los casos, la red es más costosa que en la banda Ku. Esto se debe a que el costo de producción de dispositivos para la banda Ka es mayor; por ejemplo, en el caso de las

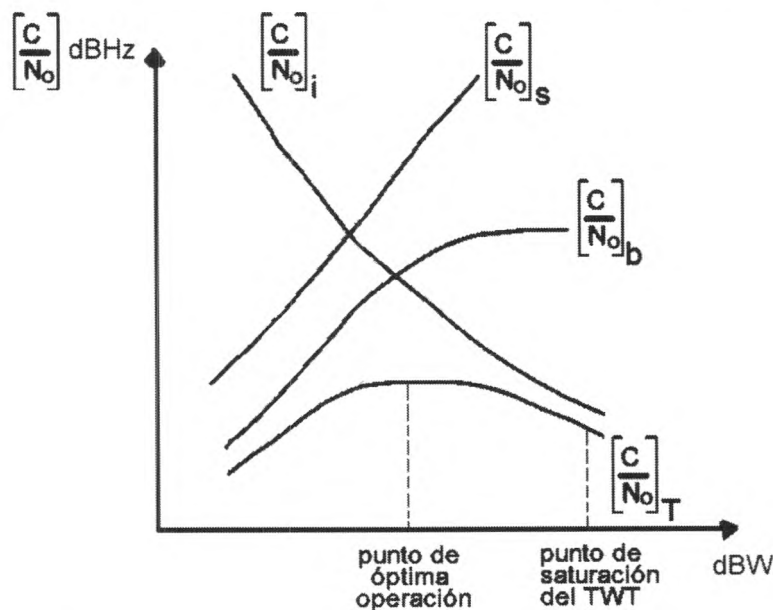


Figura 7. Curvas de  $(C/N_0)_S$ ,  $(C/N_0)_i$ ,  $(C/N_0)_B$  y  $(C/N_0)_T$  en función del back-off de entrada

antenas, éstas requieren una superficie casi perfecta, con desviaciones menores que un milímetro. En la tabla 7 se indican los parámetros de los equipos de modulación y radiofrecuencia que optimizan el costo de la red.

Como continuación de este estudio, se obtuvieron las configuraciones óptimas para distintas tasas de transmisión. En las figuras 9 y 10 se muestran las gráficas, para las bandas Ku y Ka respectivamente, que presentan el comportamiento del costo total

de la red en base a la tasa de transmisión de enlaces esclava-maestra, fijando la tasa del enlace maestra-esclava a 512Kbps. Este costo se va incrementando con la tasa, debido a que el enlace requiere antenas de mayor diámetro, amplificadores de mayor potencia, etc. El costo del ancho de banda del transpondedor aumenta en proporción a la tasa de transmisión, pero se considera que este aumento afecta de igual manera a las dos bandas y, por lo tanto, no está incluido en los costos de las figuras 9 y 10.

Tabla 3. Características de los modems QPSK considerados en este estudio. [Comtech: <http://www.comtechefdata.com>; Radyne ComStream: <http://www.radynecomstream.com>]

FABRICANTE Y MODELO	RANGO DE TASAS DE TRANSMISIÓN	$\frac{E_b}{N_0}$ PARA QPSK CON FEC DE 7/8	COSTO APROXIMADO [DÓLARES US]
Comtech SDM-9000	6 Mbps a 13 Mbps	7.8 @ $10^{-5}$ BER	30500
		8.6 @ $10^{-6}$ BER	
		9.3 @ $10^{-7}$ BER	
		9.9 @ $10^{-8}$ BER	
Comtech SDM-8000	4.8 Kbps a 9.312 Mbps	7.9 @ $10^{-5}$ BER	9000
		8.6 @ $10^{-6}$ BER	
		9.2 @ $10^{-7}$ BER	
		9.9 @ $10^{-8}$ BER	
Comtech SDM-300L	19.2 Kbps a 4.375 Mbps	7.0 @ $10^{-5}$ BER	4125
		7.8 @ $10^{-6}$ BER	
		8.4 @ $10^{-7}$ BER	
		9.2 @ $10^{-8}$ BER	
Comtech SDM-300A	2.4 Kbps a 5.0 Mbps	7.2 @ $10^{-5}$ BER	4125
		7.9 @ $10^{-6}$ BER	
		8.6 @ $10^{-7}$ BER	
		9.4 @ $10^{-8}$ BER	
Radyne ComStream CM601A	9.6 Kbps a 2.5 Mbps	8.0 @ $10^{-5}$ BER	4050
		8.8 @ $10^{-6}$ BER	
		9.4 @ $10^{-7}$ BER	
		10.0 @ $10^{-8}$ BER	
Radyne ComStream CM701A	9.6 Kbps a 4.375 Mbps	6.9 @ $10^{-5}$ BER	4050
		7.5 @ $10^{-6}$ BER	
		8.0 @ $10^{-7}$ BER	
		8.8 @ $10^{-8}$ BER	

Tabla 4. Características de las antenas consideradas en este estudio.[Prodelin: <http://www.tripointglobal.com>; Andrew: <http://www.andrew.com>]. Ángulo de elevación = el

FABRICANTE	BANDA/ DIÁMETRO	GANANCIA [dB]		TEMP. DE RUIDO [°K]	COSTO APROXIMADO, INCLUYENDO MONTAJE [DÓLARES US]
		R <sub>x</sub>	T <sub>x</sub>		
Prodelin1951 Offset elíptica	Ku / 0.95	39.7	41.2	43 @ 20° el 41 @ 30° el	264
Prodelin1194 offset	Ku / 1.8	45.2	46.7	38 @ 20° el 35 @ 30° el	764
Prodelin 1256 offset	Ku / 2.4	47.6	49.2	32 @ 20° el 28 @ 30° el 27 @ 40° el	2000
Prodelin 1388 offset gregoriana	Ku / 3.8	51.7	53.2	30 @ 20° el 26 @ 30° el 24 @ 40° el	15464
Andrew ES76K-1 gregoriana	Ku / 7.6	58.0	59.1	55 @ 10° el 41 @ 30° el 36 @ 50° el	56000
Prodelin 3067	Ka / 0.67	41.0	44.5	47 @ 20° el 44 @ 30° el	150
Prodelin 3098	Ka / 0.98	44.3	47.8	45 @ 20° el 42 @ 30° el	400
Prodelin 3120	Ka / 1.2	46.1	49.5	44 @ 20° el 41 @ 30° el	455
Andrew ES56 KA-1 gregoriana	Ka / 5.6	59.2	62.0	96 @ 10° el 64 @ 30° el 59 @ 50° el	126670

Tabla 5. Características de los amplificadores de alta potencia considerados en este estudio.[NEC: <http://www1n.mesh.ne.jp/necomscsd/sat/sat.html>; Xicom: <http://www.xicomtech.com>; VERTEXrsi: <http://www.tripointglobal.com>; Advantech: <http://www.globalnetworx.com>; Microwave CO: <http://www.sspamicrowave.com>; RF Amplifiers: <http://www.rfamplifiers.com>; Millimeter Wave: <http://www.cmp.cpii.com>; Spacek Labs Inc: <http://www.spaceklabs.com>]. SSPA= Amplificador de potencia de estado sólido, TWT= Tubo de ondas progresivas

FABRICANTE Y MODELO	BANDA / TIPO	POTENCIA MÁXIMA [Watts]	COSTO APROXIMADO [DÓLARES US]
RF Amplifiers HD12506	Ku / SSPA	0.02	980
Microwave – amps AM2	Ku / SSPA	0.5	1100
Advantech ARSA- K25	Ku / SSPA	25	12427

continúa...

Tabla 5. Características de los amplificadores de alta potencia considerados en este estudio. [NEC: <http://www1n.mesh.ne.jp/necomscsd/sat/sat.html>; Xicom: <http://www.xicomtech.com>; VERTEXrsi: <http://www.tripointglobal.com>; Advantech: <http://www.globalnetworx.com>; Microwave CO: <http://www.sspamicrowave.com>; RF Amplifiers: <http://www.rfamplifiers.com>; Millimeter Wave: <http://www.cmp.cpii.com>; Spacek Labs Inc: <http://www.spaceklabs.com>]. SSPA= Amplificador de potencia de estado sólido, TWT= Tubo de ondas progresivas (continuación...)

FABRICANTE Y MODELO	BANDA / TIPO	POTENCIA MÁXIMA [Watts]	COSTO APROXIMADO [DÓLARES US]
VERTEXrsi PKM14S040R	Ku / SSPA	40	23873
XICOM XT-50T1	Ku / TWT	70	30050
XICOM XTRD-200K Ku	Ku / TWT	125	36000
NEC LD7213L	Ku / TWT	300	45000
VERTEXrsi2100TK	Ku / TWT	650	64286
VERTEXrsi2100KKU	Ku / Klistrón	2500	68357
SPACEK LABS INC. SP2412-15-23	Ka / SSPA	0.25	1800
SPACEK LABS INC. SP2412-15-27	Ka / SSPA	0.5	2300
SPACEK LABS INC. SP268-20-29	Ka / SSPA	0.9	3100
RF Amplifiers HD18337	Ka / TWT	10	102500
RF Amplifiers HD18338	Ka / TWT	25	105000
XICOM XTD-120Ka	Ka / TWT	120	150296
MILIMETER WAVE VKA2400A	Ka / Klistrón	325	200000

Tabla 6. Características de los amplificadores de bajo ruido considerados en este estudio. [VERTEXrsi: <http://www.tripointglobal.com>; Microwave CO: <http://www.sspamicrowave.com>; Jca: <http://www.jcatech.com>; Miteq: <http://www.miteq.com>; Spacek Labs Inc: <http://www.spaceklabs.com>]

FABRICANTE Y MODELO	BANDA	TEMPERATURA DE RUIDO [°K]	COSTO APROXIMADO [DÓLARES US]
VERTEXrsi LKR12S90	Ku	90	1771
VERTEXrsi LKR12S70	Ku	70	3214
Microwave Amps AL16	Ku	170	1450
JCA 1218-300	Ku	263	2300

continúa...

Tabla 6. Características de los amplificadores de bajo ruido considerados en este estudio. [ VERTEXrsi: <http://www.tripointglobal.com>; Microwave CO: <http://www.sspamicrowave.com>; Jca: <http://www.jcatech.com>; Miteq: <http://www.miteq.com>; Spacek Labs Inc: <http://www.spaceklabs.com>] (continuación...)

FABRICANTE Y MODELO	BANDA	TEMPERATURA DE RUIDO [°K]	COSTO APROXIMADO [DÓLARES US]
JCA 714-201	Ku	627	1100
SPACEK LABS ISL224-18-3W	Ka	160	1850
MITEQ JSD3 1800 2600 21 8P	Ka	180	4200
MITEQ JSD4 18002600 26 8P	Ka	238	1750
MITEQ JSD3 1800 2600 30 8P	Ka	289	1500
JCA 1826-300	Ka	438	1150

Tabla 7. Parámetros de los equipos de modulación y radiofrecuencia que optimizan los costos indicados en la figura 8

PARÁMETRO	BANDA Ku		BANDA Ka	
	MAESTRA	ESCLAVA	MAESTRA	ESCLAVA
Diámetro de antena y modelo	2.4 m Prodelin 1256 offset	1.8 m Prodelin 1194 offset	5.6 m Andrew ES56 Ka-1 gregoriana	0.98 m Prodelin 3098
Potencia nominal del amplificador de potencia y modelo	70 Watts Xicom XT-50T1 TWT	0.5 Watts Microwave Amps AM2 SSPA	10 Watts RF Amps HD18337 TWT	0.9 Watts Spacek Labs SP268-20-29 SSPA
Temperatura de ruido del LNA	170°K Microwave Amps AL16	627°K JCA JCA714-201	438°K JCA JCA1826-300	438°K JCA JCA1826-300
Modelo del modem	Radyne Comstream CM701A	Radyne Comstream CM601A	Radyne Comstream CM701A	Radyne Comstream CM601A

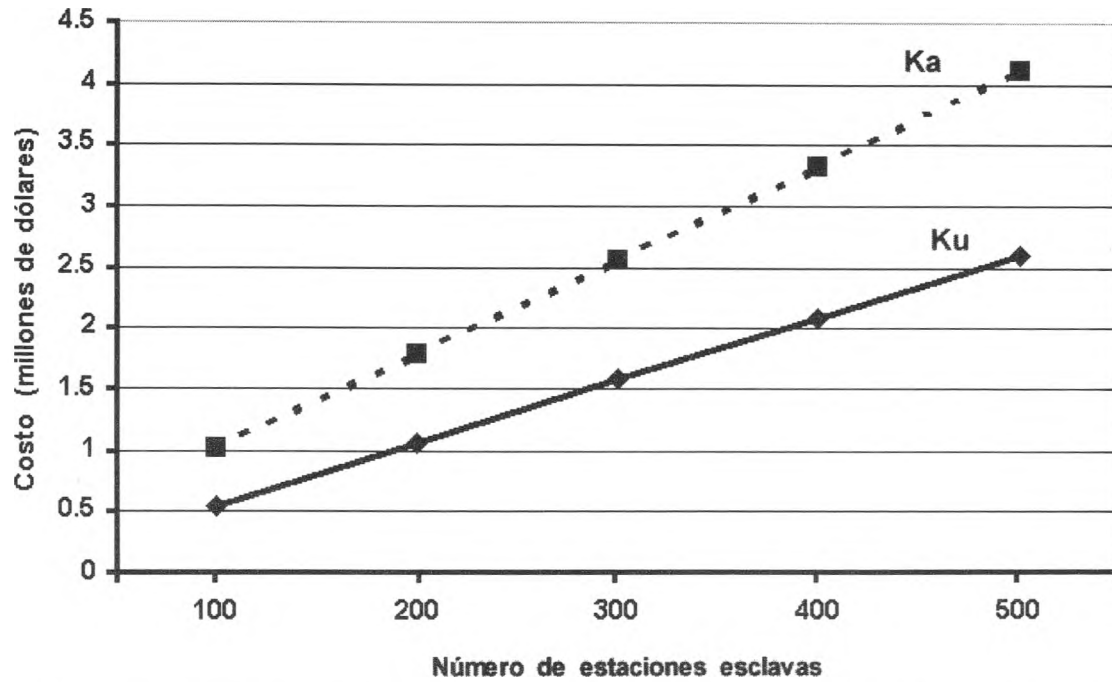


Figura 8. Gráfica que muestra el costo total de la red con base al número de estaciones esclavas idénticas en ambas bandas para una tasa fija de transmisión de 512 Kbps en el enlace maestra-esclava y 128 Kbps en el enlace esclava-maestra, con un BER de  $10^{-5}$

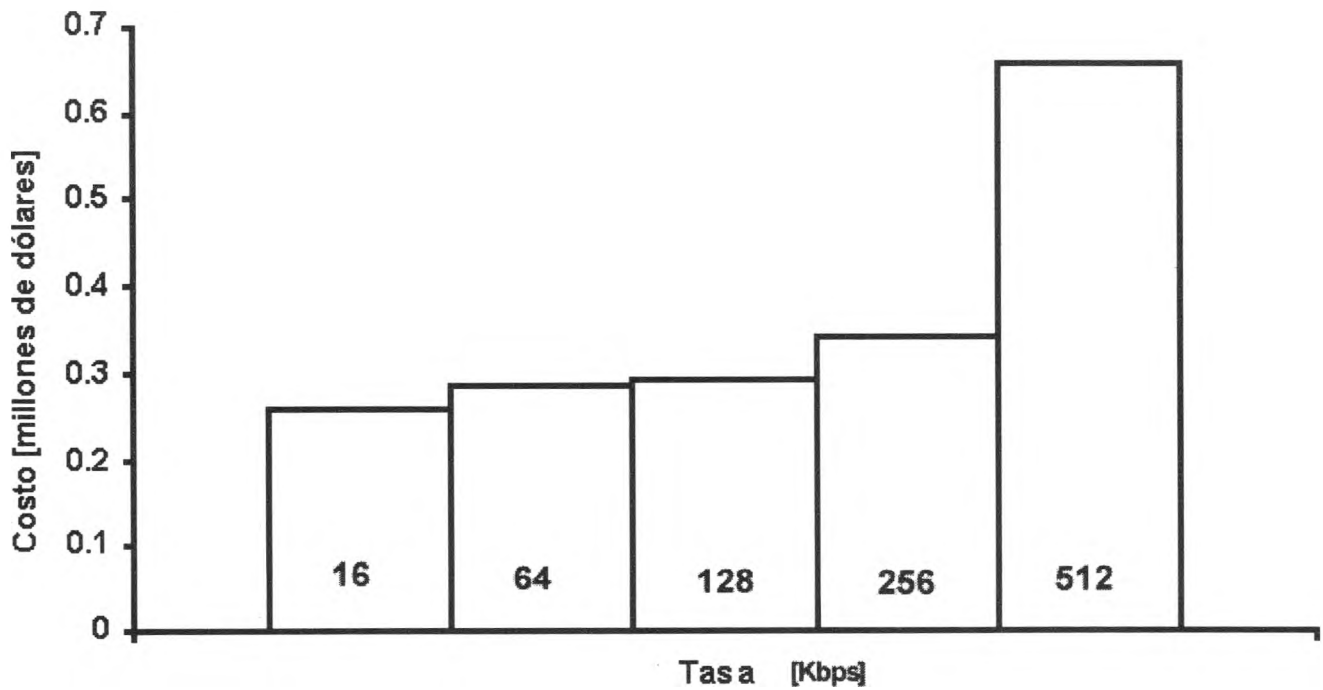


Figura 9. Gráfica que muestra el costo total de una red de 50 terminales esclavas en banda Ku para distintas tasas de transmisión del enlace esclava-maestra, fijando el enlace maestra-esclava en 512 Kbps y con un BER de  $10^{-5}$

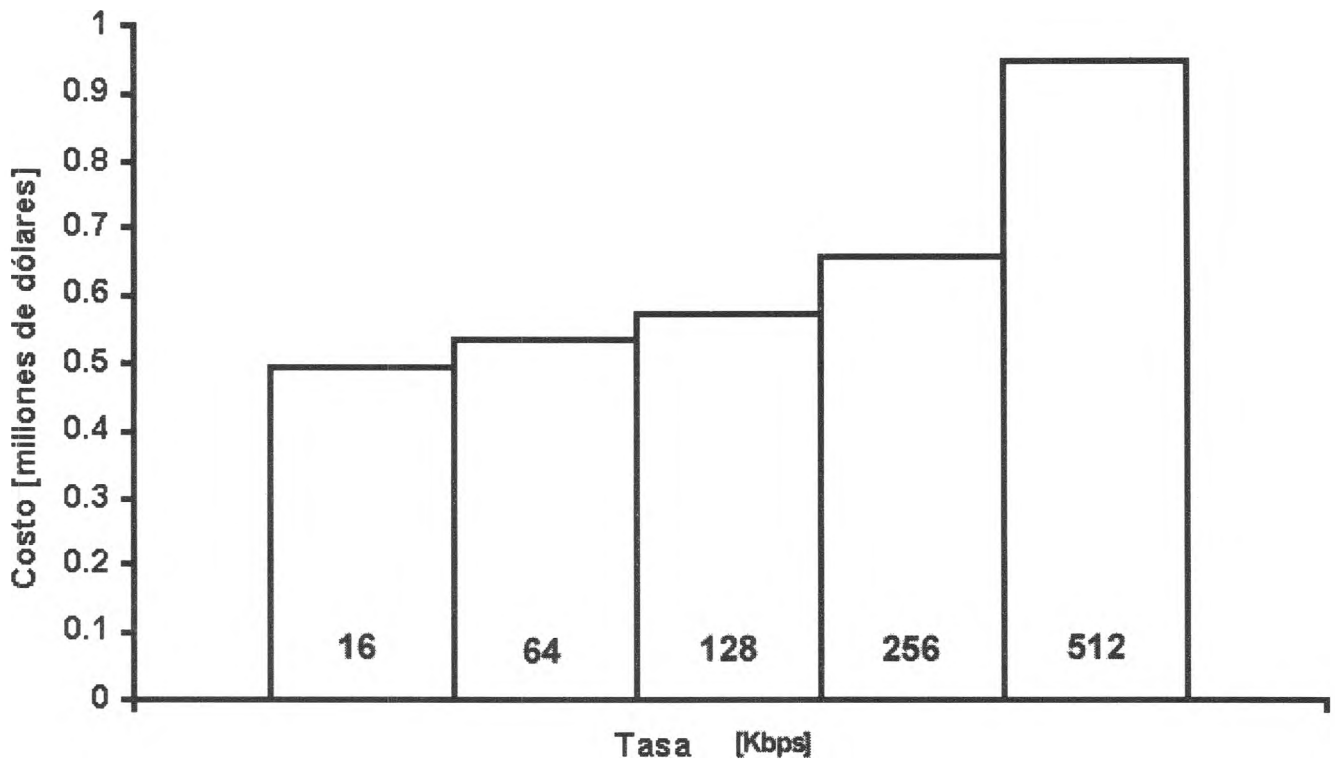


Figura 10. Gráfica que muestra el costo total de una red de 50 terminales esclavas en banda Ka para distintas tasas de transmisión del enlace esclava-maestra, fijando el enlace maestra-esclava en 512 Kbps y con un BER de  $10^{-5}$

## Conclusiones

Este artículo aporta información para sustentar la posible implementación de redes en la banda Ka en México y otros países con características de precipitación pluvial similares. Los resultados obtenidos indican que una red de configuración estrella en la banda Ka como la considerada en este estudio, es todavía muy cara en comparación a una en banda Ku. Esto se debe a que el costo del equipo disponible en la banda Ka resulta elevado en comparación con el de banda Ku, pero se espera que conforme exista una mayor demanda del espectro y de servicios en dicha banda, los costos irán disminuyendo, ya que la capacidad de la banda Ka para manejar servicios de banda ancha e Internet inalámbrico, con diámetros

de antena menores a los de otras bandas y una alta integración de componentes, la sitúa como una buena opción para múltiples aplicaciones.

## Referencias

- Altamirano-Guerrero V., Malpica-Maury A., y Ordóñez-Romero C.L. (2001). Comparación de cálculos y costos de enlaces satelitales con estaciones VSAT en las bandas Ku y Ka. Tesis de licenciatura en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- Dissanayake A.W., Allnut J.E. y Haidara F. (1997). A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and Other Impairments Along Earth-Space Paths.

- IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 10, pp.1547 - 1558.
- Landeros-Ayala, S., Neri-Vela, R., Cruz-Sánchez, H. y Hernández-Bautista H. (2002). Cálculo de atenuación por lluvia usando el modelo DAH y los diámetros de antena para banda Ka en México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. III, No.1, pp.9-18.
- Neri-Vela, R. (2002). *Comunicaciones por satélite*. Mc Graw Hill.
- UIT (1994). *Manual sobre sistemas y estaciones terrenas VSAT*. Suplemento No. 3, UIT, Ginebra, Suiza.
- UIT (1990). Reporte 564-4, UIT, Ginebra, Suiza.
- Roddy D. (2001). *Satellite Communications*. 3a edición, McGraw Hill.

---

### Semblanza de los autores

*César Leonardo Ordóñez-Romero*. Obtuvo su título de ingeniero en telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Realizó estudios de posgrado en la misma institución y recibió el grado de maestro en Ingeniería en 2003. Se desarrolla profesionalmente en las áreas de telecomunicaciones satelitales y aplicaciones tecnológicas del rayo láser. También es profesor de asignatura en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

*Rodolfo Neri-Vela*. Realizó los estudios de ingeniero mecánico electricista y se especializó en telecomunicaciones y electrónica en la Facultad de Ingeniería, UNAM. En 1976, obtiene su maestría en telecomunicaciones en la Universidad de Essex, Inglaterra, becado por el Consejo Británico. Tres años después, obtuvo el grado de doctor en radiación electromagnética aplicada por la Universidad de Birmingham, Inglaterra, como becario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). En 1985, se convirtió en el primer astronauta mexicano al participar en la misión 61-B de la NASA de los EU y orbitar la Tierra 109 veces. Actualmente imparte cátedra en el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería.

*Salvador Landeros-Ayala*. Egresó de la Facultad de Ingeniería, UNAM, con el título de ingeniero mecánico electricista en el área de comunicaciones. Cursó la maestría en ciencias de la ingeniería en telecomunicaciones en la Universidad de Pennsylvania, Estados Unidos; posteriormente, obtuvo el grado de doctor en ingeniería eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ha escrito artículos que se han presentado en congresos internacionales en Estados Unidos, Francia, España, Centro y Sudamérica. Fue miembro del Comité de Becas del CONACYT, director del Sistema de Satélites Nacionales y jefe de la División de Ingeniería Eléctrica. Actualmente es jefe de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

*Víctor Altamirano-Guerrero*. Obtuvo el título de ingeniero en telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente trabaja en una empresa de comunicaciones móviles.

*Alfonso Malpica-Maury*. Obtuvo el título de ingeniero en telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente trabaja en una empresa de comunicaciones móviles.