

Análisis de los esquemas de modcod del estándar DVB-RCS2 sobre HTS de Banda Ka en el Perú en condiciones de lluvia

Modcod schemes' analysis for DVB-RCS2 standard on Ka-Band HTS in Peru for rainy conditions

Henry W. Merino Acuña*, Christian Cheé Cucalón**

Fecha recepción: octubre 8 de 2014 - Fecha aceptado: Noviembre 11 de 2014

ABSTRACT

This paper shows the results of DVB-RCS2 standard evaluation for inbound satellite links between 2 Mbps and 10 Mbps in Peru, using Ka Band High Throughput Satellite. We perform predictive calculation for rain attenuation rates by mathematical models of recommendations P.618, P.838, P.837 from ITU, these results are used as input data for development of link budgets, in which the modulation schemes and existing coding from DVB-RCS2 standard are evaluated.

The research aims to anticipate operating levels in a satellite return link in Ka band with rain conditions, considering the need for deployment of broadband services on the Peruvian territory, in complement with terrestrial technologies.

Keywords: DVB-RCS2, HTS, Ka Band, Rain attenuation.

RESUMEN

El presente trabajo muestra el análisis del estándar DVB-RCS2 para enlaces de retorno satelital entre 2 Mbps y 10 Mbps sobre el territorio Peruano, mediante la utilización de satélites de alto rendimiento (HTS) de Banda Ka de órbita geoestacionaria. Se realiza el cálculo predictivo de los índices de atenuación por lluvia mediante los modelos matemáticos de las recomendaciones P.618, P.838 y P.837 de la ITU, luego se utilizan estos resultados para el desarrollo de los cálculos de enlace, en los cuales se evalúan los esquemas de modulación y codificación disponibles en el estándar.

La investigación tiene como principal objetivo prever los niveles de operación de un enlace de retorno satelital de Banda Ka en condiciones de lluvia, ante la necesidad de despliegue de servicios de banda ancha sobre el territorio Peruano, en complemento con las tecnologías terrestres.

Palabras clave: DVB-RCS2, HTS, Banda Ka, atenuación por lluvia

* Mg. Ing. de Telecomunicaciones, Pontificia Universidad Católica del Perú. E-mail: henry.merino@pucp.edu.pe

** MBA, Ing. Electrónico, Pontificia Universidad Católica del Perú. Docente de la PUCP, Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones. E-Mail: cchee@pucp.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

El creciente interés por los servicios de internet de banda ancha satelital a nivel mundial trajo como consecuencia que al cierre del 2013 la cantidad de subscriptores de servicios satelitales superen los 2 millones, en su mayoría demandados desde Norteamérica, y al 2020 se estima llegar a 5.8 millones de subscriptores [1]. Por otro lado, las posiciones orbitales que están sobre las poblaciones más densas se encuentran agotadas, y los nuevos lanzamientos de satélites en Bandas C, Ku y que incluyen Ka, corresponden al reemplazo de los que se encuentran actualmente en órbita debido al término de su vida útil. En ese sentido, se necesitan desarrollar tecnologías satelitales que permitan hacer eficiente el espacio orbital y el espectro disponible, es así que la orientación actual en la fabricación de los nuevos satélites se basa en el uso de la Banda Ka, ya que al operar con un rango de frecuencia más amplia y mayor a la de las Bandas C y Ku, permite diseñar satélites con capacidades muy superiores mediante la aplicación de técnicas como la reutilización de frecuencias.

Hoy en día, existen HTS de Banda Ka desplegados en Norteamérica como es el caso de Viasat-1 y Jupiter-1 con capacidades mayores a 100 Gbps, y en Europa por su parte con el satélite Kasat con una capacidad de 70 Gbps. En Sudamérica, el lanzamiento más reciente que incluye Banda Ka fue el del satélite Amazonas 3 operado por Hispasat, el cual se puso en órbita en mayo del 2013 en reemplazo del Amazonas-1 y cuya nueva capacidad adiciona nueve spots beams de Banda Ka en varias ciudades de Sudamérica. Existen otras iniciativas importantes para el despliegue de HTS con cobertura en la región, entre ellos se encuentran Global Xpress de Inmarsat a partir del segundo semestre 2014, EPIC-NG de Intelsat y el satélite D1 de Embratel, operado por StarOne, estos últimos con lanzamiento previsto en el año 2016.

Por otra parte, una de las principales dificultades que tiene la utilización de la Banda Ka,

es la degradación que sufren los servicios ante presencia de lluvias, es así que trabajos como [2] y [3] demuestran que la prestación de estos servicios tienen rangos de operación limitados en Europa, y en [4] hacen lo mismo para Norteamérica, a pesar de tener índices de lluvia más bajos que en Sudamérica. Por su parte ANATEL en [5] hace un estudio de los niveles de atenuación y disponibilidad que se obtienen en el territorio brasileño.

Ante esta dificultad, diversos fabricantes de tecnología satelital han adoptado técnicas de mitigación de atenuación por lluvia para los enlaces de retorno, como es el caso de la modulación y codificación adaptativa, sin embargo, éstas técnicas son las mismas que se aplican en los servicios de Bandas C y Ku, por lo cual es de vital importancia identificar los parámetros que permitan obtener niveles de servicio aceptables para la prestación de servicios de Banda Ka en cada una de las ciudades del Perú.

II. ESTÁNDAR DVB-RCS2

Es un estándar abierto propuesto por la ETSI [6] que permite la comunicación satelital de dos vías, es comúnmente utilizado por los fabricantes de tecnología satelital para las comunicaciones de retorno. Las características más relevantes son las siguientes:

- Opera con MF-TDMA (Multi-Frequency Time Division Multiple Access) como tecnología de acceso al medio, para los enlaces de retorno.
- Soporta modulación BPSK, QPSK, 8PSK, 16 QAM
- Soporta técnicas de codificación Convolutiva y Turbo-código de 8 estados.
- Operación con modulación y codificación adaptativa.
- Los datos pueden ser encapsulados en paquetes fijos ATM o MPEG.

La Tabla I muestra los esquemas de modulación y codificación analizados en los cálculos de enlace.

Tabla 1. C/N Requerido por esquema de Modcod

| Mod | Cod | Eficiencia Espectral | Es/No requerido | C/N requerido |
|------|-----|----------------------|-----------------|---------------|
| QPSK | 1/3 | 0.61 | 0.0 | -0.41 |
| QPSK | 1/2 | 0.93 | 2.3 | 1.82 |
| QPSK | 2/3 | 1.30 | 3.9 | 3.22 |
| QPSK | 3/4 | 1.47 | 5.0 | 4.30 |
| QPSK | 5/6 | 1.64 | 6.1 | 5.38 |
| 8PSK | 2/3 | 1.75 | 8.2 | 7.99 |
| 8PSK | 3/4 | 1.98 | 9.3 | 9.06 |
| 8PSK | 5/6 | 2.19 | 11.0 | 10.78 |

III. PREDICCIÓN DE ATENUACIÓN POR LLUVIA

Intensidad de Lluvia (mm/h)

Sin duda, la lluvia ocasiona el mayor efecto de atenuación que existe en la propagación de los sistemas satelitales, aunque este fenómeno de atenuación se presente escaso en frecuencias

Tabla 2. Intensidad de lluvia por ciudad

| Ciudad | 0.001% | 0.01% | 0.1% | 1% | 5% |
|------------------|--------|--------|-------|------|------|
| Moquegua | 28.90 | 9.22 | 2.52 | 0.00 | 0.00 |
| Tacna | 38.35 | 11.99 | 3.23 | 0.01 | 0.00 |
| Arequipa | 41.07 | 13.01 | 3.54 | 0.14 | 0.00 |
| Ica | 51.52 | 16.07 | 3.81 | 0.14 | 0.00 |
| Lima | 51.11 | 17.46 | 4.89 | 0.70 | 0.00 |
| Piura | 66.09 | 24.94 | 6.62 | 1.21 | 0.00 |
| Chiclayo | 68.81 | 25.64 | 6.13 | 0.89 | 0.00 |
| Trujillo | 73.94 | 29.54 | 7.49 | 1.38 | 0.00 |
| Puno | 75.20 | 30.53 | 7.86 | 1.51 | 0.00 |
| Tumbes | 83.19 | 36.57 | 9.84 | 2.09 | 0.03 |
| Abancay | 90.93 | 42.52 | 11.66 | 2.48 | 0.22 |
| Huancavelica | 93.14 | 43.74 | 11.27 | 2.10 | 0.00 |
| Cerro de Pasco | 96.15 | 46.05 | 11.77 | 2.08 | 0.00 |
| Huaraz | 97.08 | 47.00 | 12.37 | 2.28 | 0.07 |
| Cusco | 96.00 | 47.16 | 14.05 | 3.28 | 0.64 |
| Ayacucho | 99.29 | 48.92 | 13.16 | 2.45 | 0.15 |
| Huancayo | 99.40 | 49.02 | 13.20 | 2.45 | 0.15 |
| Cajamarca | 107.86 | 56.03 | 15.32 | 2.42 | 0.07 |
| Huánuco | 114.07 | 61.87 | 18.73 | 3.12 | 0.37 |
| Puerto Maldonado | 123.60 | 70.27 | 22.50 | 2.81 | 0.11 |
| Moyobamba | 127.58 | 73.92 | 24.62 | 2.72 | 0.03 |
| Chachapoyas | 127.39 | 74.11 | 25.93 | 3.79 | 0.50 |
| Pucallpa | 147.37 | 92.94 | 39.84 | 3.94 | 0.11 |
| Iquitos | 166.53 | 111.81 | 57.54 | 9.04 | 0.43 |

bajas, el impacto crece de forma drástica a partir de los 10 GHz que afectan a las Bandas Ku y Ka.

Para nuestro análisis, hemos extraído la información de intensidad media de lluvia en mm/h con base en la recomendación ITU P.837-6. Esta recomendación provee estadísticas de lluvia, dividiendo la tierra en regiones y asignando una tasa de lluvia a cada una en intervalos de 1.125° para la latitud y longitud [7, 8]. Además, contiene una base de datos recolectados durante 40 años por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM).

Cabe mencionar que esta información contiene un margen de error indefinido, a pesar que trabajos como [9], [10] y [11] muestran que los resultados medidos son comparables con la recomendación ITU en países como España, Nigeria, Malasia y el Sudeste asiático, existen otros trabajos como [12] y [13] donde se muestra que los resultados medibles difieren para la República de Korea y Colombia. En ese sentido, se recomienda utilizar esta recomendación, sólo de no estar disponible estadísticas locales que contengan el índice de pluviosidad en un tiempo de integración de 1 minuto para el 0.01% del año medio.

Atenuación específica (dB/Km)

El tamaño de las gotas de lluvia, en muchas ocasiones es comparable con la longitud de onda, la cual se contrasta con la pérdida de energía y, por ende, con la atenuación en el enlace. La atenuación específica determina la atenuación en decibeles que se tiene por cada kilómetro en el trayecto del enlace. Por tal motivo, es necesario realizar un análisis a fin de predecir, de forma cuantitativa, los efectos que se pueden ocasionar sobre el territorio peruano, sobretodo porque se tiene una geografía muy variada con alturas que van desde 30 hasta los 4330 msnm. La atenuación específica, γ_R , se calcula a partir de valores conocidos de intensidad de lluvia R, mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (1)$$

Los valores de los coeficientes k y α están relacionados con la geometría de la gota y el ángulo de inclinación [14], y se determinan en función de la

frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1 000 GHz según las recomendaciones de la ITU 838-3 [15]. Para el caso de la Banda Ka, en la que se utiliza polarización circular, utilizaremos las siguientes ecuaciones para la obtención de los coeficientes K_c y α_c .

$$k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau \quad (2)$$

$$k_c =$$

$$= \frac{\alpha_c [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2k} \quad (3)$$

Los valores de K_H , α_H , K_V y α_V son los coeficientes de polarización horizontal y vertical respectivamente, extraídos de [15]

Los resultados de atenuación específica (en dB/km) siguen el mismo patrón de comportamiento de la intensidad de lluvia. Las ciudades con menor atenuación corresponden a localidades costeras como Moquegua, Tacna, Arequipa, Ica, Lima, Chiclayo y Piura, con una atenuación menor a 6 dB/km para la frecuencia de 30 GHz de Banda Ka, mientras que las localidades con mayor atenuación siguen siendo las zonas de la selva como Puerto Maldonado, Moyobamba, Chachapoyas, Pucallpa e Iquitos, este último con la mayor atenuación, que alcanza casi 19 dB/k, en la misma frecuencia.

Las zonas costeras sufren un incremento considerable de atenuación específica a medida que utiliza frecuencias más altas, y va en aumento a medida que se tenga una mayor intensidad de lluvia. La ciudad de Moquegua, por ejemplo, tiene la tasa más baja con un máximo de 1.85 dB/km y la más alta en esta zona es Trujillo, con una tasa de 5.5 dB/km para una frecuencia de 30 GHz de Banda Ka.

En la Fig. 1. se observa una comparación de la atenuación específica entre las bandas de frecuencia C, Ku y Ka. Se aprecia que la atenuación específica es casi despreciable a frecuencias bajas como las que se utilizan en la Banda C, de

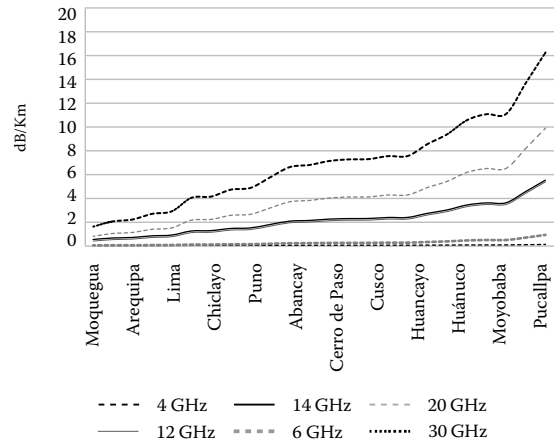


Figura 1. Atenuación específica para las Bandas C, Ku y Ka

4 GHz y 6 GHz, para los enlaces descendente y ascendente respectivamente, aun considerando localidades en las que se tiene un alto índice de intensidad de lluvia como el caso de Iquitos. Esto, en cambio, no sucede con la Banda Ka, que opera a 20GHz y 30GHz, puesto que la atenuación específica crece drásticamente a medida que la intensidad de lluvia se ve afectada.

Cálculo de atenuación por lluvia (dB)

En un enlace satelital, las señales son atenuadas a medida que se propagan a través del aire, en especial en el trayecto donde exista lluvia. La atenuación dependerá de la distancia proyectada a partir de la altura de la lluvia en relación con el piso y del ángulo de inclinación de la antena.

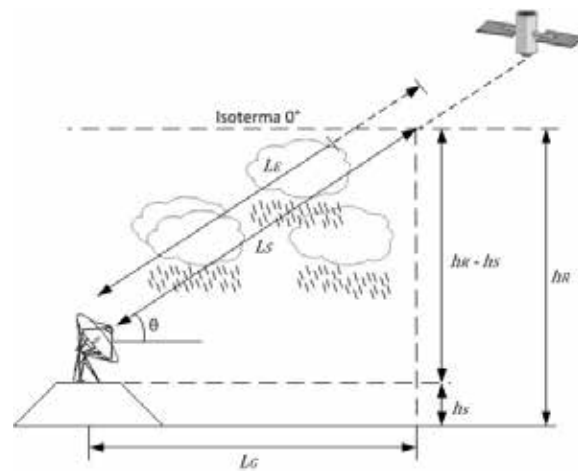


Figura 2. Enlace entre la estación terrestre y el satélite.

Donde:

- h_R : Altura efectiva de lluvia (km)
- h_S : Altitud de la estación terrestre (km)
- L_S : Longitud del trayecto oblicuo (km)
- θ : Ángulo de elevación (grados)
- L_G : Longitud de proyección horizontal (km)
- L_E : Longitud efectiva (km)

Calculamos la atenuación por lluvia con base en la recomendación ITU 618-9 [16]. Este modelo de predicción utiliza la tasa de lluvia a 0.01% de probabilidad para la estimación de atenuación, $A_{0,01}$, y luego se aplica un factor de ajuste para predecir otras probabilidades. Los rangos utilizables en este modelo van desde 4 GHz hasta 55 GHz y de 0.001 - 5% de probabilidad de lluvia.

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad (4)$$

La Tabla 3 muestra los valores calculados para la Altura de lluvia, Longitud de trayecto oblicuo,

Proyección horizontal y Longitud efectiva por ciudad, calculados a partir de la recomendación ITU 618-9.

Con la atenuación determinamos la atenuación estimada para otros porcentajes de año medio en el rango de 0,001% hasta el 5%, a partir de la siguiente ecuación.

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-\left(0,655+0,033 \ln(p)-0,045 \ln(A_{0,01})-\beta(1-p) \sin \theta\right)} \quad (5)$$

En la Fig. 3. podemos apreciar, de forma gráfica, los resultados del cálculo de atenuación para 30 GHz, se aprecia que para probabilidades de lluvia de 0.5%, 1% y 5%, la atenuación por lluvia es menor a 10 dB, con excepción de las localidades de la selva en la que se llega hasta 21 dB de atenuación, para el caso de Iquitos a 0.5%. Para probabilidades de lluvia menores a 0.5%, la atenuación se vuelve muy grande, especialmente

Tabla 3. Distancias proyectadas

| Ciudad | Altura de Lluvia (Km) | Trayecto Oblicuo (Km) | Proyección Horizontal (Km) | Longitud Efectiva (Km) |
|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|
| Moquegua | 5.44 | 4.39 | 1.73 | 6.66 |
| Tacna | 5.54 | 5.44 | 2.19 | 7.95 |
| Arequipa | 5.44 | 3.35 | 1.30 | 5.07 |
| Ica | 5.18 | 5.23 | 2.11 | 7.52 |
| Lima | 5.31 | 5.75 | 2.28 | 8.02 |
| Piura | 5.00 | 5.44 | 2.19 | 7.08 |
| Chiclayo | 5.19 | 5.63 | 2.24 | 7.21 |
| Trujillo | 5.26 | 5.68 | 2.23 | 6.97 |
| Puno | 5.49 | 1.76 | 0.64 | 2.64 |
| Tumbes | 5.06 | 5.49 | 2.16 | 6.45 |
| Abancay | 5.22 | 3.00 | 1.08 | 3.92 |
| Huancavelica | 5.11 | 1.55 | 0.58 | 2.19 |
| Cerro De Pasco | 5.32 | 1.08 | 0.40 | 1.56 |
| Huaraz | 4.93 | 1.98 | 0.75 | 2.71 |
| Cusco | 5.12 | 1.84 | 0.64 | 2.53 |
| Ayacucho | 5.17 | 2.62 | 0.97 | 3.38 |
| Huancayo | 5.05 | 1.95 | 0.72 | 2.64 |
| Cajamarca | 5.04 | 2.51 | 0.95 | 3.18 |
| Huánuco | 5.11 | 3.45 | 1.25 | 3.96 |
| Puerto Maldonado | 4.96 | 4.98 | 1.51 | 5.07 |
| Moyobamba | 4.80 | 4.18 | 1.43 | 4.38 |
| Chachapoyas | 4.88 | 2.71 | 0.98 | 3.16 |
| Pucallpa | 4.89 | 5.01 | 1.61 | 4.62 |
| Iquitos | 4.80 | 4.87 | 1.27 | 4.46 |

para las ciudades de la Selva y algunas localidades costeras como Tumbes.

Para el caso de 20 GHz, Fig. 4, si bien la atenuación por lluvia disminuye, ésta sigue siendo muy alta para las localidades de la Selva considerando una probabilidad de lluvia de 0.1% a menos, llegando a un nivel máximo de 54 dB en la ciudad de Iquitos a 0.001%. Estos resultados implican una reducción en la disponibilidad del enlace satelital, la cual no puede ser controlable frente a atenuaciones tan altas.

Se ha considerado tanto para 20 GHz como para 30 GHz, el límite máximo de atenuación referencial en 10 dB, a fin de desarrollar los cál-

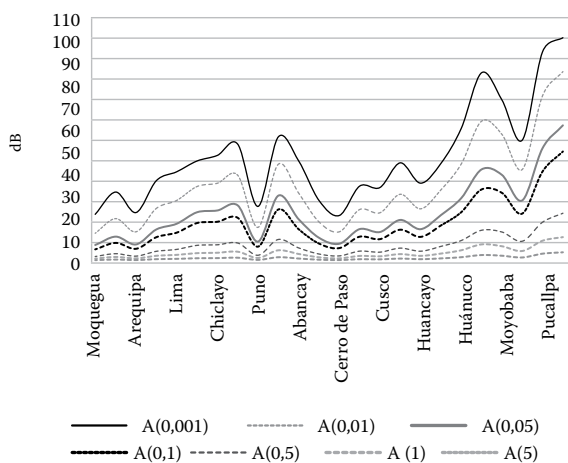


Figura 3. Comparación de atenuación vs probabilidad de lluvia sobre un enlace de 30 GHz.

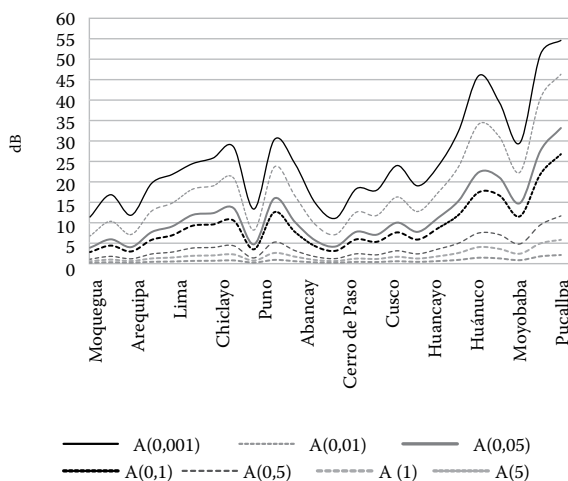


Figura 4. Comparación de atenuación vs probabilidad de lluvia sobre un enlace de 20 GHz.

culos de enlace y poder analizar los esquemas de modulación y codificación que podemos aplicar para salvaguardar la disponibilidad del enlace satelital.

IV CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DE ENLACE

A. Especificaciones técnicas del satélite

Puesto que aún no se dispone de un HTS con cobertura total en Sudamérica, se utilizó la órbita del satélite Amazonas 3 y el plan de frecuencia del satélite Kasat [17] para efectos del análisis, para los demás datos se consideraron valores típicos de HTS disponibles en el mercado, los cuáles se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. especificaciones técnicas del satélite

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Longitud | -61° Este |
| Banda de Operación: | Ka |
| Frecuencia ascendente Gateway | 29.23 GHz |
| Frecuencia descendente de Gateway | 19.54 GHz |
| Frec. ascendente de terminal remoto | 29.88 GHz |
| Frec. descendente de terminal remoto | 20.08 GHz |
| Polarización | Circular |
| Ancho de banda del Beam | 237.00 MHz |
| Atenuador de Posición (ATP) | 9.0 dB |
| Input Back Off (IBO) | 4.00 dB |
| Output Back Off (OBO) | 3.00 dB |
| Densidad de Flujo de Potencia (SFD) | -92.00 dBW/m ² |
| Figura de Merito Satélite (G/T) | 19.00 dB/K |
| PIRE de saturación Beam | 62.00 dBW |
| Relación C/I Satélite Adyacente | 24.00 dB |
| Relación C/I Intermodulación | 22.50 dB |
| Relación C/I por Polarización Cruzada | 22.50 dB |

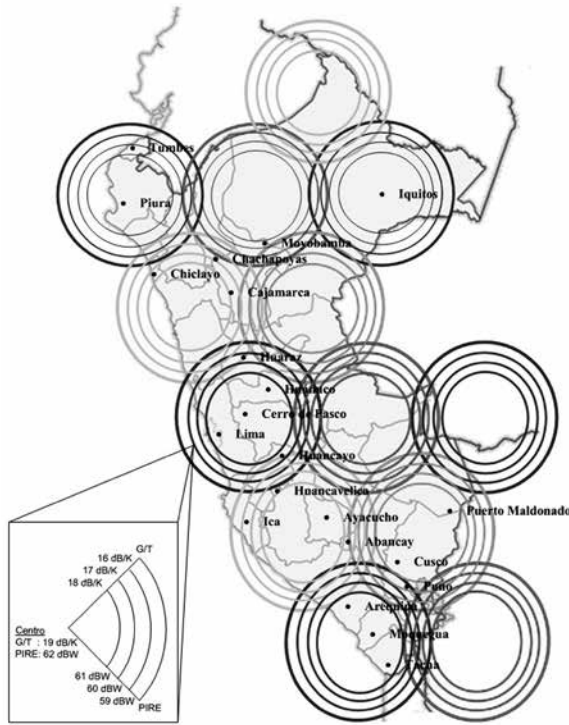


Figura 5. Arreglo de spot beams en el territorio peruano.

B. Especificaciones de PIRE y Figura de Mérito G/T del Satélite

Se elaboró un arreglo de Beams con un patrón de cuatro colores. Cada spot beams tiene un radio de 250 km desde el centro hasta la cobertura de -3dBW. Se consideraron 4 niveles de potencia de PIRE que van desde los 62 dBW hasta los 59 dBW en escalones de -1 dBW. Lo mismo para el parámetro G/T, que va desde los 19 dB/K hasta los 16 dB/K, ver Fig. 5.

C. Especificaciones técnicas de la estación terrena y del terminal remoto

Para la cadena de RF se consideraron las especificaciones del fabricante SatCom Technologies, tanto para la estación terrena como para el terminal remoto. Por otro lado, se consideraron valores típicos para las pérdidas del HPA y del tramo Antena HPA.

V. EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN ALCANZADOS

Los cálculos de enlace fueron realizados en base a un tamaño de portadora de 2, 4, 6, 8 y 10 Mbps y un margen de enlace con una provisión por degradaciones adicionales de 0.5 dB.

$$\text{MargendeEnlace} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Alcanzado}} - \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Req.}} - 0.5\text{dB} \quad (6)$$

Donde C/N es la relación de portadora a densidad de potencia de ruido alcanzado y requerido.

A. Esquemas de modulación y codificación alcanzados

La Tabla 6 muestra el margen de enlace y el modcod máximo alcanzado por cada ciudad para portadoras de retorno de 2, 4, 6, 8 y 10 Mbps en un escenario con lluvia en ambos extremos del enlace. De esta Tabla extraemos en las Figuras 6-10 los niveles máximos alcanzados por tamaño de portadora. Para citar un ejemplo, en la Fig. 9 se muestra que para una portadora de retorno de 8Mbps, sólo el 13% de ciudades puede operar con un modcod de hasta 8PSK 2/3, mientras que

Tabla 6. especificaciones de rf de la estación terrena y terminal remoto

| Parámetro | Estación Terrena | Terminal remoto |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|
| Tipo | Cassegrain | Offset |
| Diámetro | 8.1 m | 0.74 m |
| Polarización | Circular | Circular |
| Ganancia de antena en transmisión | 64.7 dBi | 45.3 dBi |
| Ganancia de antena en recepción | 62.1 dBi | 42.1 dBi |
| Temperatura total del sistema | 111.0 °K | 90.0 °K |
| Potencia del HPA | 200 W | 2 W |
| Pérdidas tramo Antena HPA | 1.0 dB | 0.5 dB |

el 8% de ciudades alcanza sólo un modcod de QPSK 1/2 como máximo. Del mismo modo, para las demás gráficas.

Se observa que a medida que aumentamos el tamaño de la portadora, se requiere una modulación y codificación más robusta, tendiendo a incrementar la utilización de modulación QPSK.

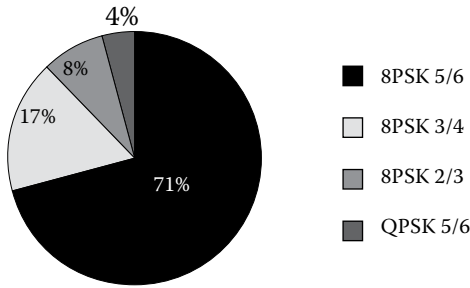


Figura 6. Modcods para una portadora de 2 Mbps

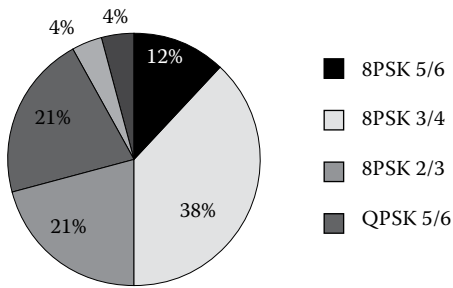


Figura 7. Modcods para una portadora de 4 Mbps

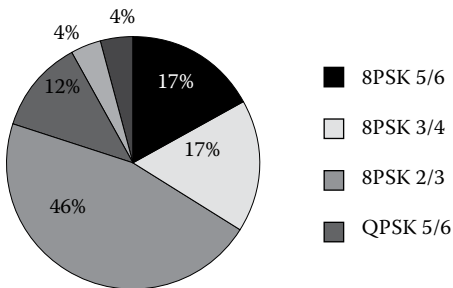


Figura 8. Modcods para una portadora de 6 Mbps

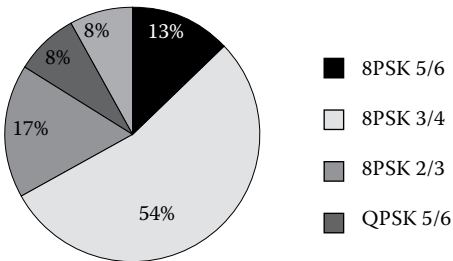


Figura 9. Modcods para una portadora de 8 Mbps

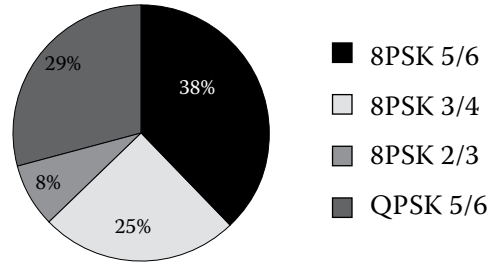


Figura 10. Modcods para una portadora de 10 Mbps

En el caso de una portadora de 2Mbps observamos que el 96% de ciudades podrá utilizar una modulación de 8PSK, mientras que para una portadora de 4Mbps la utilización de 8PSK se reduce a 71%, para una portadora de 6Mbps llega a 34% y para una portadora de 8Mbps sólo el 13% de ciudades operan con 8PSK. La operación de una portadora de 10Mbps es el peor caso del análisis realizado, puesto que la operación se da únicamente con modulación QPSK.

B. Disponibilidad de servicio alcanzada

La Fig. 11 muestra la distribución de la disponibilidad alcanzada por cada tamaño de portadora en el total de ciudades. La lectura de resultados para una portadora de retorno de 2Mbps indica que un 18% de ciudades puede operar con una disponibilidad de hasta 99.5% como máximo, mientras que un 17% de ciudades puede llegar hasta 99.4% de disponibilidad, otro 40% de ciudades operan hasta 99%, un 4% de ciudades operan hasta 98.9% y el 21% restante puede operar a una disponibilidad máxima de 98.5%, del mismo modo para las demás portadoras.

Los resultados para las portadoras con tamaño de 2Mbps y 4Mbps muestran que el máximo valor alcanzado es de 99.5% principalmente en las ciudades con climas secos como Arequipa, Tacna y Moquegua, mientras que las ciudades con menor índice de disponibilidad se encuentran en la Selva Peruana como es el caso de Iquitos, Pucallpa, Puerto Maldonado y Chachapoyas, llegando a 98.5% de disponibilidad, el escenario cambia cuando se opera con portadoras de retorno de 6, 8 y 10 Mbps, donde es necesario reducir la disponibilidad hasta 97.5% para lograr la operatividad de los servicios.

Se recomienda operar servicios de hasta 4 Mbps como máximo en el enlace de retorno para las zonas con altas tasas de precipitación como es el caso de la Selva Peruana. Caso contrario se puede operar bajo las mismas condiciones de diseño, pero con los esquemas de modulación menos eficientes y con una disponibilidad muy baja. En caso de necesitar una mayor disponibilidad global, se podrá dar con la reducción del tamaño de la portadora hasta 512 Kbps y con una mejora en el sistema de RF, sin embargo la mayor disponibilidad que podremos alcanzar será de 99.5 - 99.7% puesto que la atenuación se vuelve inoperable con márgenes de atenuación por lluvia más pequeños.

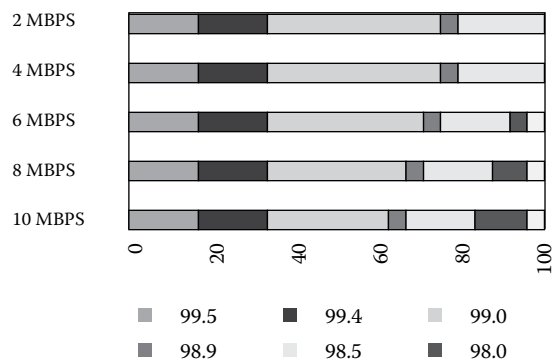


Figura 11. Disponibilidad alcanzada vs tamaño de portadora

Tabla 6. Margen de enlace y modcod alcanzado en las portadoras dvb-rs2, en condiciones de lluvia

| N° | Ubicación | 2 Mbps | | 4 Mbps | | 6 Mbps | | 8 Mbps | | 10 Mbps | |
|----|------------------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|---------|----------|
| | | Margen | ModCod | Margen | ModCod | Margen | ModCod | Margen | ModCod | Margen | ModCod |
| 1 | Moquegua | 1.966 | 8PSK 5/6 | 0.644 | 8PSK 5/6 | 1.068 | 8PSK 3/4 | 0.921 | 8PSK 2/3 | 2.174 | QPSK 5/6 |
| 2 | Tacna | 1.493 | 8PSK 5/6 | 1.413 | 8PSK 3/4 | 0.242 | 8PSK 3/4 | 1.974 | QPSK 5/6 | 1.169 | QPSK 5/6 |
| 3 | Arequipa | 1.921 | 8PSK 5/6 | 0.579 | 8PSK 5/6 | 0.988 | 8PSK 3/4 | 0.831 | 8PSK 2/3 | 2.076 | QPSK 5/6 |
| 4 | Ica | 0.411 | 8PSK 5/6 | 0.598 | 8PSK 2/3 | 1.161 | QPSK 5/6 | 0.755 | QPSK 3/4 | 0.495 | QPSK 2/3 |
| 5 | Lima | 0.638 | 8PSK 5/6 | 0.913 | 8PSK 2/3 | 1.517 | QPSK 5/6 | 0.453 | QPSK 5/6 | 0.883 | QPSK 2/3 |
| 6 | Piura | 0.121 | 8PSK 5/6 | 0.205 | 8PSK 2/3 | 0.723 | QPSK 5/6 | 0.294 | QPSK 3/4 | 0.239 | QPSK 1/2 |
| 7 | Chiclayo | 0.950 | 8PSK 5/6 | 0.639 | 8PSK 3/4 | 0.043 | QPSK 2/3 | 0.982 | QPSK 5/6 | 0.817 | QPSK 3/4 |
| 8 | Trujillo | 0.922 | 8PSK 3/4 | 1.340 | QPSK 5/6 | 0.487 | QPSK 3/4 | 0.177 | QPSK 1/2 | 1.267 | QPSK 5/6 |
| 9 | Puno | 1.297 | 8PSK 5/6 | 1.130 | 8PSK 3/4 | 0.612 | 8PSK 2/3 | 1.606 | QPSK 5/6 | 0.787 | QPSK 5/6 |
| 10 | Tumbes | 0.505 | 8PSK 2/3 | 0.645 | QPSK 3/4 | 0.563 | 8PSK 2/3 | 1.552 | QPSK 5/6 | 0.732 | QPSK 5/6 |
| 11 | Abancay | 0.753 | 8PSK 5/6 | 0.369 | 8PSK 3/4 | 1.702 | QPSK 5/6 | 0.647 | QPSK 5/6 | 0.467 | QPSK 3/4 |
| 12 | Huancavelica | 1.405 | 8PSK 5/6 | 1.286 | 8PSK 3/4 | 0.795 | 8PSK 2/3 | 1.808 | QPSK 5/6 | 0.997 | QPSK 5/6 |
| 13 | Cerro De Pasco | 1.884 | 8PSK 5/6 | 0.526 | 8PSK 5/6 | 0.924 | 8PSK 3/4 | 0.757 | 8PSK 2/3 | 1.996 | QPSK 5/6 |
| 14 | Huaraz | 0.587 | 8PSK 5/6 | 0.842 | 8PSK 2/3 | 1.437 | QPSK 5/6 | 0.369 | QPSK 5/6 | 0.795 | QPSK 2/3 |
| 15 | Cusco | 1.032 | 8PSK 5/6 | 0.757 | 8PSK 3/4 | 0.179 | 8PSK 2/3 | 1.130 | QPSK 5/6 | 0.971 | QPSK 3/4 |
| 16 | Ayacucho | 0.799 | 8PSK 5/6 | 0.431 | 8PSK 3/4 | 1.776 | QPSK 5/6 | 0.724 | QPSK 5/6 | 0.547 | QPSK 3/4 |
| 17 | Huancayo | 0.820 | 8PSK 5/6 | 0.461 | 8PSK 3/4 | 1.811 | QPSK 5/6 | 0.761 | QPSK 5/6 | 0.586 | QPSK 3/4 |
| 18 | Cajamarca | 0.384 | 8PSK 5/6 | 0.563 | 8PSK 2/3 | 1.122 | QPSK 5/6 | 0.714 | QPSK 3/4 | 0.680 | QPSK 1/2 |
| 19 | Huánuco | 0.864 | 8PSK 2/3 | 0.397 | QPSK 5/6 | 0.316 | QPSK 1/2 | 1.552 | QPSK 5/6 | 0.732 | QPSK 5/6 |
| 20 | Puerto Maldonado | 0.826 | 8PSK 3/4 | 1.222 | QPSK 5/6 | 0.362 | QPSK 3/4 | 0.045 | QPSK 1/2 | 0.673 | QPSK 1/2 |
| 21 | Moyobamba | 0.767 | 8PSK 3/4 | 1.145 | QPSK 5/6 | 0.279 | QPSK 3/4 | 0.468 | QPSK 3/4 | 0.421 | QPSK 1/2 |
| 22 | Chachapoyas | 0.784 | 8PSK 5/6 | 0.413 | 8PSK 3/4 | 1.754 | QPSK 5/6 | 0.701 | QPSK 5/6 | 0.524 | QPSK 3/4 |
| 23 | Pucallpa | 0.302 | 8PSK 3/4 | 0.569 | QPSK 5/6 | 0.759 | QPSK 5/6 | 0.951 | QPSK 2/3 | 0.280 | QPSK 1/2 |
| 24 | Iquitos | 1.795 | QPSK 5/6 | 0.701 | QPSK 1/2 | 0.889 | QPSK 5/6 | 0.469 | QPSK 3/4 | 0.422 | QPSK 1/2 |

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados de disponibilidad, se concluye que el nivel máximo alcanzado para portadoras entre 2 y 10Mbps, es de 99.5% en las zonas costeras, mientras que la disponibilidad más baja es de 97.5% en ciudades de la Selva peruana cuyo índice de precipitación por lluvia es mayor. Los resultados cambian si acortamos el tamaño de la portadora hasta 4 Mbps, aquí el nivel máximo de disponibilidad se mantiene en 99.5%, sin embargo, el nivel mínimo alcanza 98.5%, por lo que se recomienda dar servicios de hasta un máximo de 4 Mbps en localidades tropicales.

Es posible mejorar la disponibilidad máxima para ubicarla entre 99.5% y 99.7% considerando una portadora de retorno de 512 Kbps y 1 Mbps en algunas ciudades. Sin embargo, no fue objeto de estudio mayor análisis con estos tamaños de portadora considerando la proyección a mediano plazo de la banda ancha satelital en el Perú, y además, que en el mercado internacional ya se ofrecen servicios con planes de hasta 20/6 Mbps, como es el caso de Tooway en Europa.

Debido a los valores de disponibilidad que pueden alcanzar los servicios bajo los supuestos analizados, se recomienda orientarlos sólo al Sector Residencial, Pyme y Educación, pues el sector Empresarial y Gobierno requiere, en la mayoría de casos, de un grado de disponibilidad mayor a 99.6% como promedio, a pesar que no exista un nivel mínimo de disponibilidad regulado. Como solución a estos dos sectores, se plantea compensar el enlace con una mejora en el sistema de RF de la estación remota, considerando una antena de diámetro mayor a 0.9 metros y un transmisor de 3W.

Respecto a la velocidad de transmisión, se recomienda operar con un tamaño de portadora de hasta 4 Mbps para obtener mayor eficiencia, pues más del 70% de ciudades pueden operar con una modulación 8PSK y codificación 5/6 y 3/4, las más eficientes disponibles en el estándar DVB-RCS2, incluso en presencia de lluvias. La transmisión con portadoras entre 6 y 10 Mbps también es operable, sin embargo, los esquemas

que predominan son menos eficientes que en las portadoras de menor tamaño, ya que su operación se da mayoritariamente con modulación QPSK.

En un trabajo futuro se validarán los resultados en la cobertura de Banda Ka existente sobre el norte de Perú. Actualmente no es posible debido a que ningún operador presta servicios sobre dicha cobertura.

VII. REFERENCIAS

- [1] Broadband Satellite Markets, 11th Edition, Northern Sky Research, Wilmington, DE, 2012.
- [2] X. Deplancq and F. Cornet, "Link Budget Analysis for New Satellite Telecommunications Systems," Centre National D'Etudes Spatiales, Toulouse, HG, OMB 0704-0188, Jul. 2005.
- [3] E. Albery et al., "Adaptive Coding and Modulation for the DVB-S2 Standard Interactive Applications: Capacity Assessment and Key System Issues," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 4, pp 61 – 69, Aug. 2007.
- [4] J. Petranovich, "Mitigating the Effect of Weather on Ka-band High-Capacity Satellites", ViaSat Inc., Carlsbad, CA, Mar. 2012.
- [5] A. Linhares, "Atenuação Devido a Chuvas nas Bandas Ka, Ku e X," Agencia Nacional de Telecomunicações, Brasília, DF, Rep. RFCEE/SRE, May. 2012.
- [6] "Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2), Part 1: Overview and System Level specification," European Telecommunications Standards Institute, Paris, Tech. Spec. TS-101-545-1 V1.1.1, May. 2012.
- [7] C. Pereira, "Atenuação e Taxa de Precipitação: Estudo de Variabilidade em Aveiro," M.S. Tese, Dep. Electrónica, Telecomunicações e Informática, Univ. de Aveiro, Baixo Vouga, 2009.
- [8] "Características de la precipitación para establecer modelos de propagación," Interna-

- tional Telecommunication Union, Geneva, GVA, Rec. UIT-R P.837-6, 2012.
- [9] J. S. Mandeep and J. E. Allnutt, "Rain Attenuation Predictions at Ku-Band in south east Asia countries," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 76, pp. 65–74, 2007.
- [10] A. García et al., "Experimento de propagación en Banda Ka en Madrid," en *Simposium Nacional de la URSI*, Santander, Cantabria, 2009.
- [11] Y. Abayomi and N. H. Haji, "Rain Attenuation Modelling and Mitigation in the Tropics: Brief Review," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, No. 6, pp. 748-757, Dec. 2012
- [12] D. Y. Choi et al., "Comparison of Measured Rain Attenuation in the 12.25 GHz Band with Predictions by the ITU-R Model," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, no 415398, 2012.
- [13] E. Sabogal, "Tasa de lluvia 1-min para Bogotá, Colombia," *Rev. Tecnol. Univ. del Bosque*, vol. 10, No. 1, Jun. 2011.
- [14] L. Fermín y M. Simancas, "Pronóstico de la atenuación por lluvia en las comunicaciones satelitales mediante métodos de regresión," *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, vol. 9, No. 3, pp. 23-35, Dic. 2010.
- [15] "Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción," *International Telecommunication Union*, Geneva, GVA, Rec. UIT-R P. 838-3, 2012.
- [16] "Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio," *International Telecommunication Union*, Geneva, GVA, Rec. UIT-R P. 618-9, 2012.
- [17] *Altervista* (2013), *Eutelsat Kasat Frequency Plan* [Online]. Disponible: <http://frecuencyplansatellites.altervista.org/>