

## INFORME UIT-R SA.2098

**Modelos matemáticos de ganancia de antenas de estación terrena de gran apertura del servicio de investigación espacial para utilizar los análisis de compatibilidad en que interviene un gran número de fuentes de interferencia distribuidas**

(2007)

## **1 Introducción**

Se han llevado a cabo estudios de compatibilidad entre estaciones terrenas del servicio de investigación espacial (SIE) y sistemas fijos de alta densidad en las bandas 31,8-32,3 GHz y 37-38 GHz.

Uno de los parámetros fundamentales que debe definirse para determinar el nivel de interferencia que puede aparecer en estaciones terrenas del SIE es el diagrama de antena que hay que utilizar en los cálculos. En la Recomendación UIT-R F.699 figura un diagrama de radiación de envolvente de crestas para sistemas inalámbricos fijos y en la Recomendación UIT-R F.1245 aparece un diagrama de radiación que representa los niveles medios de los lóbulos laterales para sistemas de radioenlaces punto a punto con visibilidad directa. El diagrama de la Recomendación UIT-R F.699, cuando se aplica únicamente a ángulos polares superiores a  $1^\circ$ , es el mismo diagrama que figura en la Recomendación UIT-R SA.509. Los diagramas de radiación de envolvente de crestas para estaciones terrenas que funcionan en el servicio fijo por satélite (SFS) figuran en las Recomendaciones UIT-R S.580 y UIT-R S.465 y en la Recomendación UIT-R S.1428 aparece un diagrama de radiación que representa los niveles medios de los lóbulos laterales de las estaciones terrenas del servicio fijo por satélite. Este Informe compara el comportamiento de estos diagramas e introduce un nuevo modelo.

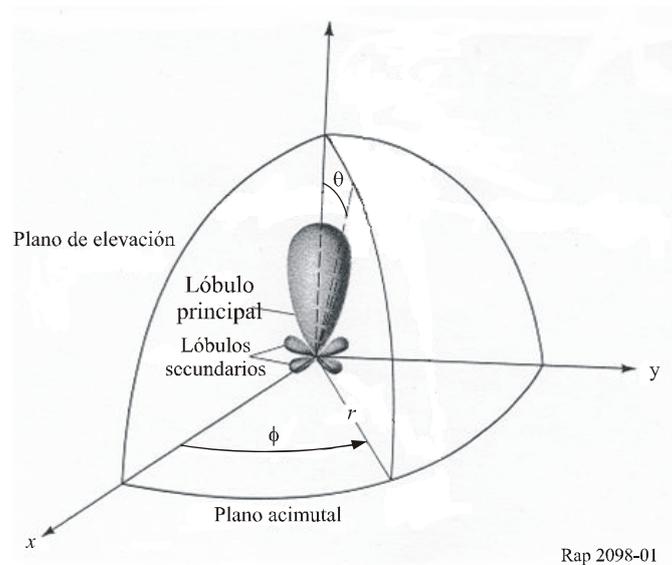
En los diagramas reales y realistas intervienen muchos factores demasiado complicados y distintos como para tenerlos exactamente en cuenta en un simple cálculo teórico. Por ejemplo, la posición de los nulos y crestas en las regiones de los lóbulos laterales varía en función de la carga gravitacional de la antena, de los vientos, etc. y se representa más adecuadamente mediante una envolvente. A lo largo de los años se han sugerido muchos modelos de diagrama para antenas de reflector de gran tamaño (véase, por ejemplo, la Recomendación UIT-R F.1245-1 – Modelo matemático de diagramas de radiación media y diagramas conexos para antenas de sistemas de radioenlaces punto a punto con visibilidad directa para aplicarlo en ciertos estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia en la gama de frecuencias de 1 GHz a unos 70 GHz, la Recomendación UIT-R SA.509-2 – Diagrama de radiación de referencia de una antena de estación terrena de los servicios de investigación espacial y de radioastronomía, para uso en los cálculos de interferencia y en los procedimientos de coordinación, y la Recomendación UIT-R SA.1345 – Métodos para predecir los diagramas de radiación de antenas de gran tamaño utilizadas en los servicios de investigación espacial y de radioastronomía y [Jamnejad, 2003]).

Un método sencillo pero eficaz de caracterizar un diagrama de antena real consiste en utilizar un modelo que se basa en muchos resultados teóricos y experimentales y proporcionar un límite o envolvente superior y/o inferior para la antena, que puede aplicarse fácilmente a muchas situaciones. De forma ideal, como se indica en la Recomendación UIT-R F.1245, basándose en la

definición de directividad de una antena el modelo de ganancia  $G$  expresado en dB debe obedecer la ecuación para la relación de ganancia media,  $g_a$ :

$$g_a = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi g(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1$$

en la que  $\theta$  es el ángulo polar desde el eje de puntería y  $\varphi$  es el ángulo de acimut, como se representa en la siguiente figura:



Para un diagrama con simetría circular la ecuación se reduce a:

$$g_a = \frac{1}{2} \int_0^\pi g(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1$$

Normalmente, los modelos de ganancia se representan mediante el parámetro  $G$  expresado en dB; dicho parámetro está ligado a la relación de ganancia  $g$  mediante la fórmula:

$$G(\theta, \varphi) = 10 \log(g(\theta, \varphi))$$

o

$$g(\theta, \varphi) = 10^{\frac{G(\theta, \varphi)}{10}}$$

En los modelos que normalmente se proponen en los textos técnicos, como se utiliza una envolvente de límite superior o alguna otra aproximación en vez del diagrama real, los valores de ganancia media calculados a partir de las anteriores integrales son mucho mayores que la unidad (o mayores que 0 dB). Sin embargo, pueden utilizarse como una verificación de validez para evaluar la precisión general del modelo comparado con el diagrama de antena real. Generalmente, un valor inferior o próximo a 2 (menos de 3 dB) proporcionaría una aproximación razonable.

En este documento se evalúa el lado izquierdo, lo que supone realizar la integral numérica de un cierto número de modelos de ganancia con simetría circular y se proporcionan gráficos sobre la variación de su valor en función de los parámetros de antena, tales como la frecuencia y el diámetro de apertura.

## 2 Modelos de ganancia

En todos los modelos que figuran a continuación, los valores de ganancia se especifican en dB, los ángulos se especifican en grados y:

$D$ : diámetro de la apertura principal de la antena (m)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{0,3}{f \text{ GHz}}, \text{ longitud de onda (m)}$$

En este documento se consideran únicamente grandes aperturas con una relación  $D/\lambda > 100$ .

### a) Modelo de la Recomendación UIT-R F.699-7

La Recomendación UIT-R F.699-7 propone el siguiente diagrama de radiación (máxima envolvente) para la gama de frecuencias 1-70 GHz:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 \quad \text{para } 0 < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{para } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 32 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{para } \theta_r \leq \theta < 48^\circ$$

$$G(\theta) = -10 \quad \text{para } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

Obsérvese que si  $\theta_r$  es  $1^\circ$ , el modelo de ganancia de la Recomendación UIT-R F.699-7 definido de  $1^\circ$  a  $180^\circ$  es igual al modelo de la Recomendación UIT-R SA.509.

Con:

$$G_{max} = 10 \log \left( \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right)$$

$$G_1 = 2 + 15 \log_{10} \left( \frac{D}{\lambda} \right)$$

$$\theta_m = 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-1} \quad \text{grados}$$

$$\theta_r = 15,85 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{para } D/\lambda > 100$$

b) **Modelo de la Recomendación UIT-R RA.1631**

Francia ha propuesto utilizar el modelo que figura en la Recomendación UIT-R RA.1631. No se trata de una envolvente de crestas sino de un diagrama medio definido por:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 \quad \text{para } 0^\circ < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{para } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 29 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{para } \theta_r \leq \theta < 10^\circ$$

$$G(\theta) = 34 - 30 \log_{10}(\theta) \quad \text{para } 10^\circ \leq \theta < 34,1^\circ$$

$$G(\theta) = -12 \quad \text{para } 34,1^\circ \leq \theta < 80^\circ$$

$$G(\theta) = -7 \quad \text{para } 80^\circ \leq \theta < 120^\circ$$

$$G(\theta) = -12 \quad \text{para } 120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

con:

$$G_{max} = 20 \log \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)$$

$$G_1 = -1 + 15 \log_{10} \left( \frac{D}{\lambda} \right)$$

$$\theta_m = 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-1} \quad \text{grados}$$

$$\theta_r = 15,85 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{grados,} \quad \text{o } \theta_r = 10^{1,28k^2 - 0,08k} \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6k} \quad \text{grados}$$

$$\theta_r = 15,85 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{grados, para } k = 1$$

c) **Modelo de la Recomendación UIT-R F.1245-1**

La Recomendación UIT-R F.1245-1 propone el siguiente diagrama de radiación medio para la gama de frecuencias 1-40 GHz y provisionalmente para la gama 40-70 GHz:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 \quad \text{para } 0^\circ < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{para } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 29 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{para } \theta_r \leq \theta < 48^\circ$$

$$G(\theta) = -13 \quad \text{para } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

con:

$G_{max}$ : ganancia de cresta

$$G_1 = 2 + 15 \log_{10} \left( \frac{D}{\lambda} \right)$$

$$\theta_m = 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-1}$$

$$\theta_r = 12,02 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6}$$

d) **El modelo Jp (envolvente de crestas)**

Se trata de un nuevo modelo que proporciona la envolvente de crestas para todas las gamas de frecuencia de interés. Es similar al de la Recomendación UIT-R F.699 con algunas modificaciones que se refieren a las áreas siguientes:

- i) La anchura del haz principal del diagrama puede variar en cierta medida basándose en varios parámetros de la antena tales como iluminación de la apertura, bloqueo, errores en la superficie, etc. La anchura de haz a potencia mitad de un lado se define como  $\theta_{hp} = 0,5 C_{hp} / (D/\lambda)$ , donde la constante  $C_{hp}$  tiene un valor aproximado comprendido entre 65 y 71. Para lograr un modelo más preciso, este parámetro puede variar de acuerdo con el tipo y la calidad de la antena utilizada. En este caso se ha seleccionado un valor de  $C_{hp} = 69$  a fin de lograr la compatibilidad con la Recomendación UIT-R F.699.
- ii) La zona plana del diagrama se ajusta a un valor más realista que normalmente no depende de las dimensiones de la antena o de la longitud de onda sino que se trata de una función complicada de la iluminación de la apertura y el bloqueo. Se utiliza un valor de 17 dB que puede ajustarse en caso necesario.
- iii) Se tiene en cuenta la eficacia del diagrama a la hora de determinar el valor de cresta así como la pendiente del diagrama del modelo, en contraposición con otros modelos que consideran una pendiente de valor fijo. La eficacia del diagrama es una combinación de la eficacia en la iluminación de la apertura, de la eficacia del bloqueo, de la eficacia del desbordamiento y de la eficacia debida a errores en la superficie. La eficacia se separa en una componente de tolerancia de la superficie que depende directamente de la frecuencia y el resto se agrupa en una componente distinta que depende en mayor o menor medida de la frecuencia.
- iv) Se introduce una zona de plataforma elevada 5 dB en la región del lóbulo de extremo lejano plano del diagrama, en la gama de  $80^\circ$  a  $120^\circ$ , para tener en cuenta los posibles efectos de desbordamiento del receptor principal cuya altura y emplazamiento exactos varían con  $F/D$  (relación entre la longitud focal y el diámetro) y con otros parámetros de diseño de la antena reflectora. En raras ocasiones esta plataforma está sujeta a las disposiciones de la Nota 2 que aparece más adelante.

Por consiguiente, el diagrama del modelo viene dado por:

$$\begin{aligned}
 G(\theta) &= G_0 - 3 \left( \frac{\theta}{\theta_{hp}} \right)^2 && \text{para } 0^\circ \leq \theta \leq \theta_1 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 && \text{para } \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 - G_2 \log_{10} \left( \frac{\theta}{\theta_2} \right) && \text{para } \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{para } \theta_3 < \theta \leq 80^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 + 5 && \text{para } 80^\circ < \theta \leq 120^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{para } 120^\circ < \theta \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 G_0 &= 10 \cdot \log_{10} \left[ \eta_a \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] - 4,343 \left( \frac{4\pi h_{rms}}{\lambda} \right)^2 \\
 G_1 &= 17 \\
 G_2 &= 27 + 10 \left[ \log_{10}(\eta_a) - \log_{10} \left( 60 \frac{h_{rms}}{\lambda} \right) \right] \\
 G_3 &= -10 \\
 \theta_{hp} &= 0,5 \frac{C_{hp}}{(D/\lambda)} \quad (65 \leq C_{hp} \leq 70, \text{ valor nominal} = 69) \\
 \theta_1 &= \theta_{hp} \sqrt{\frac{G_1}{3}} \\
 \theta_2 &= \theta_{hp} 10^{\frac{G_1}{G_2}} \sqrt{\frac{G_2}{36}} \\
 \theta_3 &= \theta_2 10^{\frac{G_0 - G_1 - G_3}{G_2}}
 \end{aligned}$$

El valor  $\eta_a$  se refiere a la eficacia de la antena relacionada con el diagrama (iluminación de la apertura, desbordamiento, bloqueo, etc.) excluyendo la eficacia asociada a la tolerancia de la superficie. Obsérvese que en este modelo la ganancia en el eje de puntería disminuye con  $\eta_a$ , pero la pendiente de la ganancia,  $G_2$ , en la gama de ángulos entre  $\theta_2$  y  $\theta_3$  aumenta con  $\eta_a$ . Ello refleja la realidad física de que una disminución de la ganancia de cresta debe ir acompañada con un aumento en las regiones de los lóbulos laterales. Esta característica no viene incorporada en otros modelos.

NOTA 1 – La pérdida de ganancia debida a la tolerancia de la superficie se incluye por separado como función de  $h_{rms}$ , tolerancia de la superficie, que también afecta a la pendiente del modelo de diagrama. La gama válida de tolerancias de la superficie utilizada en las siguientes fórmulas es:

$$\frac{1}{60} \leq \frac{h_{rms}}{\lambda} \leq \frac{1}{15}$$

Cualquier valor de  $h_{rms}/\lambda$  por encima de 1/15 debe sustituirse por 1/15; cualquier valor por debajo de 1/60 debe sustituirse por 1/60.

Por consiguiente, pueden utilizarse los valores de 1/60 para una antena de buena calidad, 1/30 para una antena de calidad media y 1/15 para una antena de baja calidad.

NOTA 2 – En algunos casos poco frecuentes, para errores en la superficie grande,  $\theta_3$  puede rebasar el valor de  $80^\circ$  y se produce una superposición de la región inclinada del lóbulo lateral con la parte plana en la región de  $80^\circ$ - $120^\circ$ . En esos casos, debe seleccionarse el máximo valor de ambos en cada ángulo.

e) **El modelo Ja (valor medio)**

Además de la envolvente de crestas, puede definirse una envolvente media de la ganancia para cualquier ángulo determinado en la región del lóbulo lateral, lo cual es significativo en el sentido siguiente. Supóngase un cierto número de antenas orientadas con un ángulo fijo en relación al eje de puntería. Como las antenas no son idénticas pueden tener sus lóbulos laterales desplazados de tal forma que para una antena la cresta de un lóbulo cae en una dirección determinada mientras que para otra antena puede haber un nulo en esa dirección y el diagrama de una tercera antena puede presentar en esa dirección un valor comprendido entre la cresta y el nulo, etc. Por consiguiente, presumiblemente puede utilizarse un valor medio para la ganancia en esa dirección determinada que consiste en la media de todos esos valores comprendidos entre el nulo y el valor de cresta. Sucede que para un lóbulo determinado con un nulo muy abrupto, este valor medio es aproximadamente 3 dB inferior al valor de cresta del lóbulo (normalmente menos si los nullos no son abruptos y presentan un cierto valor). Si se supone que el modelo de envolvente de crestas toca todos los puntos de cresta de los lóbulos, la envolvente media es paralela a esta envolvente pero debajo de ella unos 3 dB.

De acuerdo con esto, se obtiene un modelo para una envolvente «media» mediante una simple modificación del modelo anterior aumentando el valor de  $G_1$  en 3 dB, reduciendo el valor de  $G_3$  en 3 dB y modificando el valor de  $\theta_2$  en consecuencia. Deben tomarse las debidas precauciones al aplicar este modelo a situaciones particulares de interés. Puede expresarse como:

$$\begin{aligned}
 G(\theta) &= G_0 - 3 \left( \frac{\theta}{\theta_{hp}} \right)^2 && \text{para } 0^\circ \leq \theta \leq \theta_1 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 && \text{para } \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 - G_2 \log_{10} \left( \frac{\theta}{\theta_2} \right) && \text{para } \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{para } \theta_3 < \theta \leq 80^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 + 5 && \text{para } 80^\circ < \theta \leq 120^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{para } 120^\circ < \theta \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

donde:

$$G_0 = 10 \log_{10} \left[ \eta_a \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] - 4,343 \left( \frac{4\pi h_{rms}}{\lambda} \right)^2$$

$$G_1 = 20$$

$$G_2 = 27 + 10 \left[ \log_{10}(\eta_a) - \log_{10} \left( 60 \frac{h_{rms}}{\lambda} \right) \right]$$

$$G_3 = -13$$

$$\theta_{hp} = 0,5 \frac{C_{hp}}{(D/\lambda)} \quad (65 \leq C_{hp} \leq 70, \text{ valor nominal} = 69)$$

$$\theta_1 = \theta_{hp} \sqrt{\frac{G_1}{3}}$$

$$\theta_2 = \theta_{hp} 10^{\frac{G_1-3}{G_2}} \sqrt{\frac{G_2}{36}}$$

$$\theta_3 = \theta_2 10^{\frac{G_0-G_1-G_3}{G_2}}$$

Todas las notas para el modelo Jp se aplican igualmente al modelo Ja.

### 3 Análisis numérico y resultados

Para calcular, representar y comparar diversos modelos de ganancia y su ganancia «promediada», se han escrito unos pocos programas MATLAB muy fáciles de utilizar y que proporcionan un método sencillo de añadir nuevos modelos para el análisis y la representación gráfica. Los siguientes resultados se han obtenido mediante estos programas.

Cada gráfico de las Figs. 1-6 (a, b, c) muestra varios diagramas para comparación. Incluyen la envolvente de crestas de la Recomendación UIT-R F.699-7 (que para ángulos por encima de 1° es la misma que el modelo que aparece en la Recomendación UIT-R SA.509), el modelo de envolvente media de la Recomendación UIT-R F.1245-1, el modelo de envolvente media de la Recomendación UIT-R RA.1631 y, por último, un nuevo modelo de envolvente de crestas propuesto, «Jp», obtenido a partir del modelo que aparece en la Recomendación UIT-R F.699.

*Comparación para  $D/\lambda = 1\,000$  (por ejemplo, una antena de 34 m funcionando en las proximidades de 8,4 GHz)*

Los gráficos de las Figs. 1-3 se han trazado para una antena con un diámetro de 1 000 longitudes de onda, correspondiente a una apertura de 34 m de diámetro funcionando cerca de la banda de 8,4 GHz que es ampliamente utilizada en la investigación de espacio lejano. Se representan los diagramas de acuerdo a los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «baja», «media» y «buena», correspondiente a un valor eficaz de tolerancia de la superficie de 1/15, 1/30 y 1/60 de la longitud de onda, respectivamente. Los casos a), b) y c) se refieren a una representación lineal, lineal ampliada y logarítmica del ángulo variable en el eje horizontal.

*Comparación para  $D/\lambda = 4\,000$  (por ejemplo, una antena de 34 m funcionando en las proximidades de las bandas de 32 y 37 GHz)*

Las Figs. 4-6 corresponden a los casos para antenas cuyo diámetro es 4 000 longitudes de onda lo que supone antenas con 34 m de diámetro funcionando en las proximidades de las bandas de 32 y 37 GHz en las que se plantea el tema de la compartición entre la investigación de espacio lejano y los sistemas del servicio fijo de alta densidad (HDFS).

### **Comportamiento dependiente de la tolerancia de la superficie**

Como puede verse para los modelos propuestos Jp y Ja, los comportamientos de la ganancia del haz principal y de las regiones de los lóbulos laterales cambia al variar la tolerancia de la superficie. En los modelos Jp y Ja, se supone un valor inicial de la eficacia de la apertura de  $\eta_a = 0,8$ , sin incluir los efectos de la tolerancia de la superficie. Se trata de un valor típico para la combinación de la eficacia de la apertura y el desbordamiento para un decrecimiento gradual nominal en el borde de 10-11 dB. Este valor inicial se multiplica por un factor de tolerancia de la superficie para obtener un valor neto de la eficacia de la apertura de la antena. Este factor de tolerancia de la superficie aparece incluido en las fórmulas y para los casos de calidad «baja», «media» y «buena» es de 0,5, 0,9 y 1,0, respectivamente. La eficacia neta de la apertura para los tres casos es, por consiguiente, 0,4, 0,7 y 0,8 respectivamente. Obsérvese que esta eficacia de la apertura debe multiplicarse por otros factores de pérdidas, tales como las pérdidas en la bocina de alimentación, para obtener la eficacia global de la antena. En el caso de otros modelos no se considera explícitamente la tolerancia de la superficie. Para estos modelos, en todos los casos se supone una eficacia de la apertura de 0,7.

Entre las antenas de gran apertura utilizadas para la investigación de espacio lejano por la Deep Space Network de la NASA, por ejemplo, la tolerancia de la superficie en las antenas de 34 m puede caracterizarse como «buena» a 8,4 GHz y 2,3 GHz, «media» a «buena» a 32 GHz y potencialmente «media» a 37 GHz cuando se implementa. La tolerancia de la superficie de las antenas de 70 m puede caracterizarse como «buena» a 8,4 GHz y 2,3 GHz y potencialmente «baja» a 32 GHz si se implementa.

### **Ganancia promediada para todos los ángulos**

Las Figs. 7-9 (a, b) muestran una comparación de la ganancia promediada para todos los ángulos de acuerdo con las ecuaciones indicadas anteriormente y para los modelos discutidos, utilizando los modelos de antena de calidad «baja», «media» y «buena» para los casos Jp y Ja. Los casos a) y b) proporcionan la ganancia promediada en dB y en escala lineal, respectivamente. Como puede observarse los modelos Jp y Ja son coherentes a lo largo de toda la gama de valores de  $D/\lambda$  (relación entre el diámetro de la antena y la longitud de onda). Para un mayor valor de dicha relación  $D/\lambda$ , cercano a 4 000, el caso «media» muestra una ganancia media más baja y los casos «buena» muestran una ganancia media mucho más baja que los otros modelos.

Las Figs. 10 (a, b) muestran un conjunto de gráficos similares para el caso de la antena de 34 m (con un valor eficaz del error en la superficie de 0,25 mm) a lo largo de la gama de frecuencias entre 1 y 40 GHz. Las figuras muestran que el modelo Jp (valor de cresta) proporciona una relación de ganancia media mejor que la Recomendación UIT-R F.699 y, de forma similar, el modelo Ja (valor medio) proporciona una relación de ganancia media mejor que los modelos de ganancia media de las Recomendaciones UIT-R F.1245 y UIT-R RA.1631 para todas las frecuencias.

Las Figs. 11 (a, b) muestran los gráficos correspondientes para la antena de 70 m (con un valor eficaz de error en la superficie de 0,60 mm) para la gama de frecuencias de 1 a 35 GHz. Como puede observarse, para la antena de 70 m de la red de espacio lejano a 32 GHz, la relación de ganancia media es algo superior que en los otros modelos debido al comportamiento de esta antena a frecuencias muy elevadas y al intento de este modelo de proporcionar una buena adaptación a

diagramas con lóbulos laterales más elevados, que otros modelos no presentan. Si fuese conveniente utilizar esta antena para esas altas frecuencias debería mejorarse la tolerancia de la superficie.

### **Comparación con los diagramas de radiación teóricos para diversas longitudes de correlación de error en la superficie**

Las Figs. 12 (a, b, c) incluyen los diagramas teóricos de una apertura circular calculados utilizando para esos diagramas una aproximación de la función Lambda (función de Bessel normalizada), que también incluye el efecto de la tolerancia de la superficie utilizando las fórmulas de Ruze [Ruze, 1966]. Se han incluido varios diagramas teóricos correspondientes a diversas «longitudes de correlación» para los errores en la superficie. Estas figuras, calculadas para un valor de  $D/\lambda$  de 4 000, demuestran que los modelos Jp y Ja proporcionan una mejor envolvente que el modelo de la Recomendación UIT-R F.699-7. En los diagramas teóricos calculados, se ha utilizado una relación de bloqueo de 0,1, una iluminación del campo de apertura de la forma  $E = (1 - c) + c(1 - r^2)^n$  con una iluminación en el borde de  $ET = 10$  dB,  $c = 1 - 10^{(-ET/20)}$ , y un factor de pendiente  $n = 1$ .

La Fig. 12a compara los diagramas de ganancia para una antena de calidad «baja» con un valor eficaz de error en la superficie igual a  $(1/15)$  de  $\lambda$ . El modelo Jp es una envolvente superior muy próxima a todas las curvas teóricas correspondientes a varias hipótesis de longitudes de correlación. Sin embargo, el modelo de envolvente de crestas de la Recomendación UIT-R F.699-7 es rebasado de forma significativa por las curvas de ganancia teórica para varios casos de longitudes de correlación y ángulos de desplazamiento superiores a  $1^\circ$ . También es rebasado en algunos casos para ángulos de desplazamiento comprendidos entre  $0,05^\circ$  y  $0,1^\circ$ . Los modelos de «ganancia media», en las Recomendaciones UIT-R F.1245 y UIT-R RA.1631, son rebasados aún más por el modelo teórico, como cabía esperar.

La Fig. 12b muestra la comparación para una antena con una tolerancia en la superficie «media». Puede observarse que las diferencias son más pequeñas y que tanto el modelo Jp como el modelo de la Recomendación UIT-R F.699-7 son envolventes superiores válidas salvo para pequeñas violaciones que se producen en el caso más desfavorable. El modelo de la Recomendación UIT-R F.699 empieza a rebasar el modelo Jp para ángulos comprendidos entre  $0,1^\circ$  y  $10^\circ$ .

En la Fig. 12c con una tolerancia de la superficie de la antena «buena», se observa que el modelo Jp sigue siendo una envolvente superior válida para las curvas de ganancia teórica en todos los casos salvo en los casos más desfavorables de longitud de correlación de error en la superficie. El modelo de la Recomendación UIT-R F.699 rebasa el modelo Jp en unos 5 dB entre  $0,1^\circ$  y  $30^\circ$ . Incluso los modelos de ganancia media, Recomendaciones UIT-R F.1245 y UIT-R RA.1631, rebasan el modelo Ja en unos 2 dB.

## **4 Modelo de ganancia media**

### **Modelo de ganancia media basada en el modelo Ja**

En las regiones angulares comprendidas entre  $0,1^\circ$  y  $50^\circ$  el diagrama de radiación de una antena oscila tal como aparece reflejado en los diagramas teóricos indicados anteriormente. Una envolvente de crestas en esta región sobreestimaría la ganancia de antena para muchos ángulos. En un estudio de compatibilidad en que intervengan muchas fuentes de interferencia distribuidas a lo largo de todos los ángulos en esta región es conveniente reducir la ganancia de la envolvente para minimizar la tendencia en la estimación de la interferencia combinada. Como se discute en § 2, caso e), el valor medio en esta región puede considerarse aproximadamente 3 dB inferior a los niveles de cresta de la oscilación.

Como no se conoce el diagrama de radiación de la antena de la estación terrena en particular y debido a que los modelos de envolvente de crestas tales como el modelo Jp son prácticamente la

envolvente mínima de la clase de antenas consideradas, es razonable disminuir los niveles de ganancia del modelo  $J_p$  en 3 dB en la región especificada y utilizar el resultado como un «diagrama de ganancia media» en esta región. Este «diagrama de ganancia media» seguiría siendo superior para ciertos ángulos que las ganancias medias del diagrama de radiación real, si fuesen conocidas.

Este «diagrama de ganancia media» obtenido a partir del modelo de envolvente  $J_p$  se incluye en las comparaciones representadas en las Figs. 1 a 12.

### **Desviación de la ganancia con respecto al diagrama medio**

Los 3 dB reducidos entre  $0,1^\circ$  y  $50^\circ$  pueden considerarse como una medición del nivel de incertidumbre, o tolerancia, del diagrama de ganancia de antena utilizado en la simulación estadística de Monte Carlo. Ante la ausencia de datos sobre la distribución de esta clase de antenas se sugiere que la variación con respecto a la ganancia media sea una distribución Gaussiana, con un valor de  $3\text{-}\sigma$  igual a 3 dB.

## **5 Conclusión**

Se propone un modelo de ganancia matemático,  $J_p$ , que representa una envolvente de la clase de antenas de gran apertura actualmente utilizadas en las estaciones terrenas del SIE. Este modelo tiene en cuenta el efecto de la tolerancia de la superficie sobre la distribución de la ganancia en el haz principal y en los lóbulos laterales. Incluye la eficacia de la apertura en una forma en que afecta tanto a la región de cresta como a la región de lóbulos laterales. Se ha demostrado que tiene propiedades superiores a los modelos existentes en muchos aspectos.

También se propone un modelo de «ganancia media»,  $J_a$ , para poder realizar una estimación más precisa de la interferencia combinada procedente de un gran número de fuentes de interferencia distribuidas mediante simulación estadística (Monte Carlo). Igualmente se proporciona para utilizarlo en la simulación un sencillo modelo que describe la incertidumbre en la desviación con respecto al diagrama de ganancia media.

Para una antena típica de 34 m o 70 m para investigación de espacio lejano que funciona en la banda de 2,3 GHz o de 8,4 GHz, el modelo  $J_p$  (valor de cresta) proporciona una envolvente más cercana que el modelo de envolvente de la Recomendación UIT-R F.699-7 y una mejor relación de ganancia media, y el modelo  $J_a$  (valor medio) proporciona una aproximación más cercana y una mejor relación de ganancia media que los modelos de ganancia media de las Recomendaciones UIT-R F.1245 y UIT-R RA.1631. Lo mismo puede decirse para una antena de 34 m que funcione en la banda de 32 GHz o de 37 GHz.

Teniendo en cuenta todas las variaciones e incertidumbres de los diagramas de radiación entre las antenas, y el hecho de que el modelo  $J_p$  propuesto es una envolvente superior más cercana basada en principios físicos, debe utilizarse en todos los estudios de compatibilidad y de compartición que empleen un solo diagrama de ganancia de antena determinístico. El modelo de ganancia media,  $J_a$ , debe usarse únicamente cuando existe un elevado número de fuentes de interferencia distribuidas que aparecen en una amplia gama de ángulos con respecto al eje de puntería.

## **6 Referencias**

- JAMNEJAD, V. [Marzo 8-13, 2003] Simple gain probability functions for large reflector antennas of JPL/NASA. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana.
- RUZE, J. [Abril, 1966] Antenna tolerance theory-A review. *Proc. IEEE*, Vol. 54, p. 633-640.

FIGURA 1a

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a antenas de calidad «baja»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal)

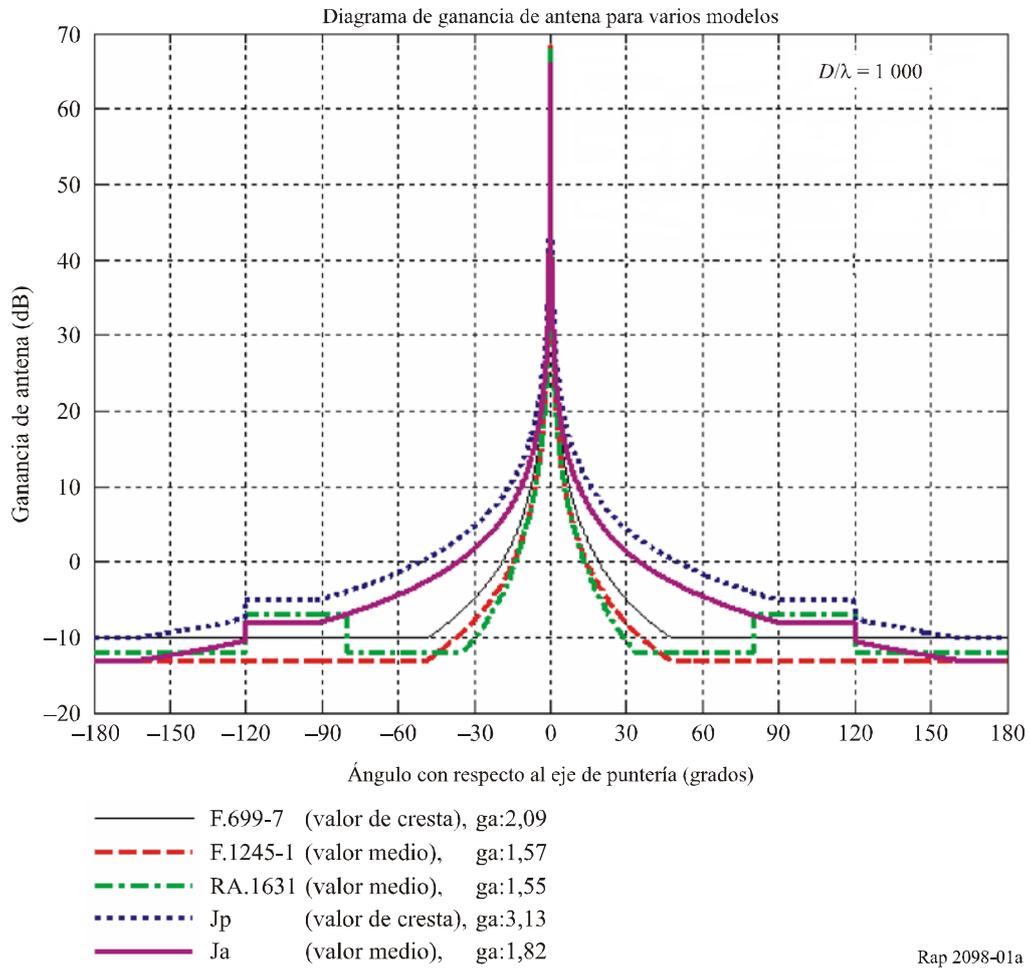


FIGURA 1b

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\ 000\ \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a antenas de calidad «baja»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15)\ \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal ampliada)

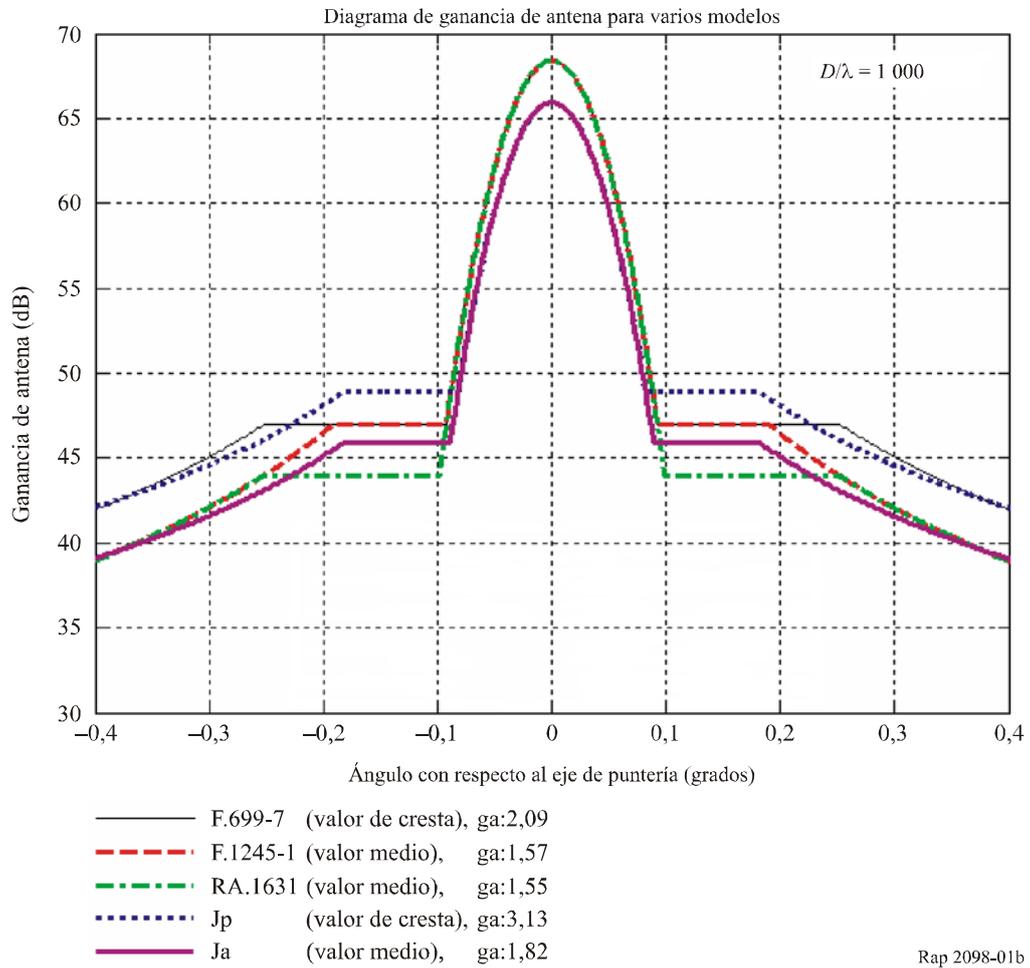


FIGURA 1c

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a antenas de calidad «baja»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala logarítmica)

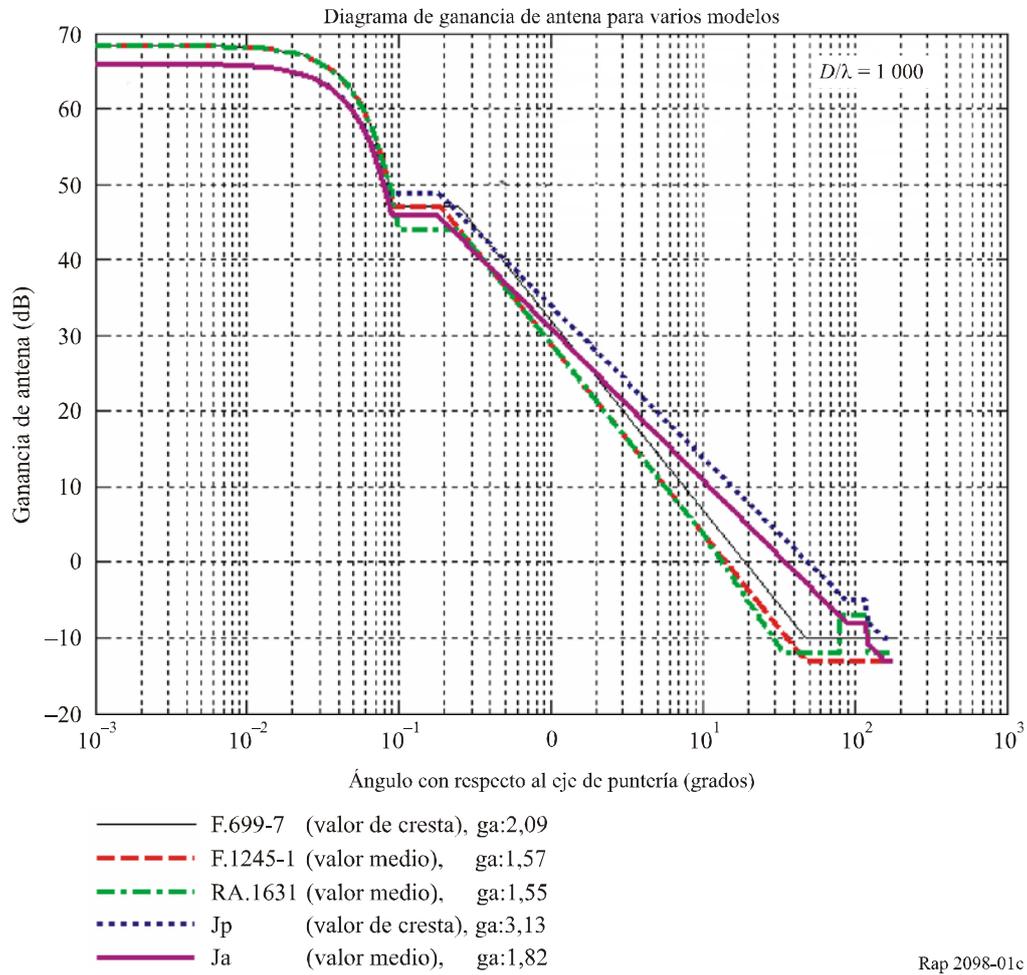
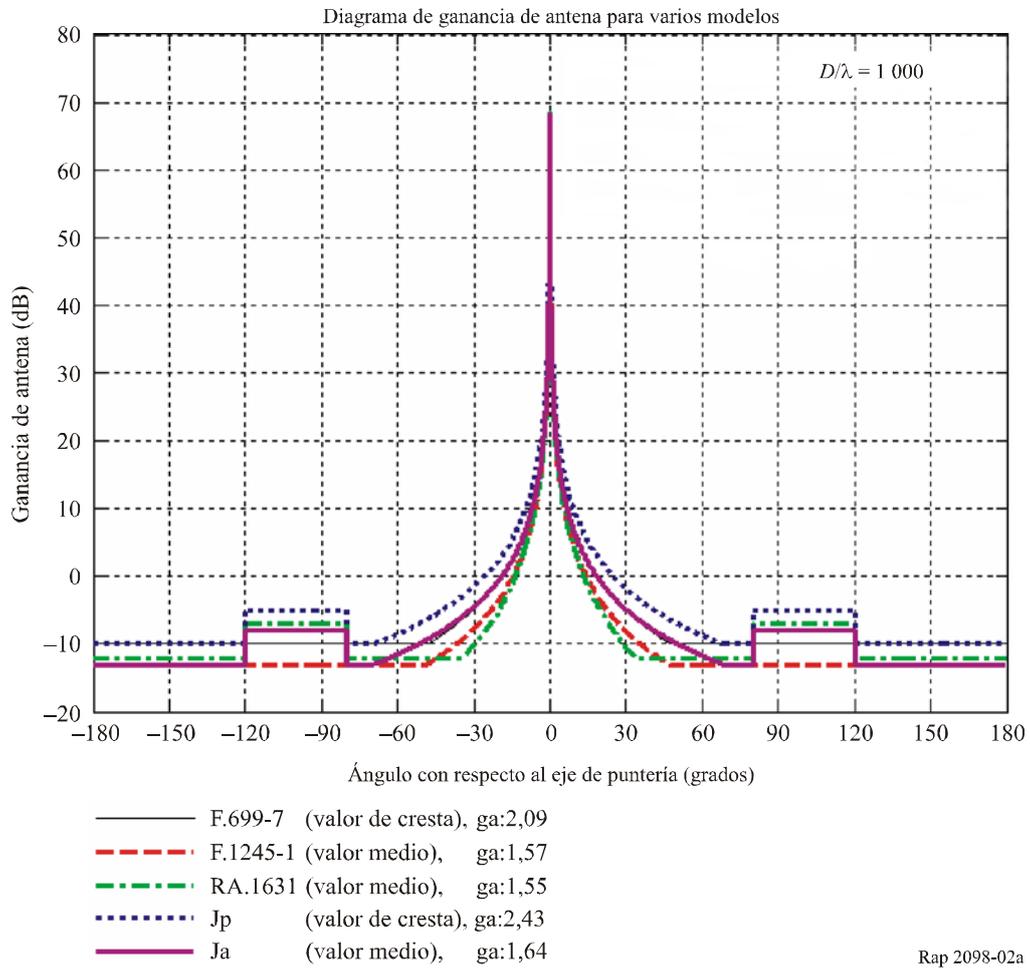


FIGURA 2a

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\ 000\ \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «media»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30)\ \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal)



Rap 2098-02a

FIGURA 2b

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\ 000\ \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «media»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30)\ \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal ampliada)

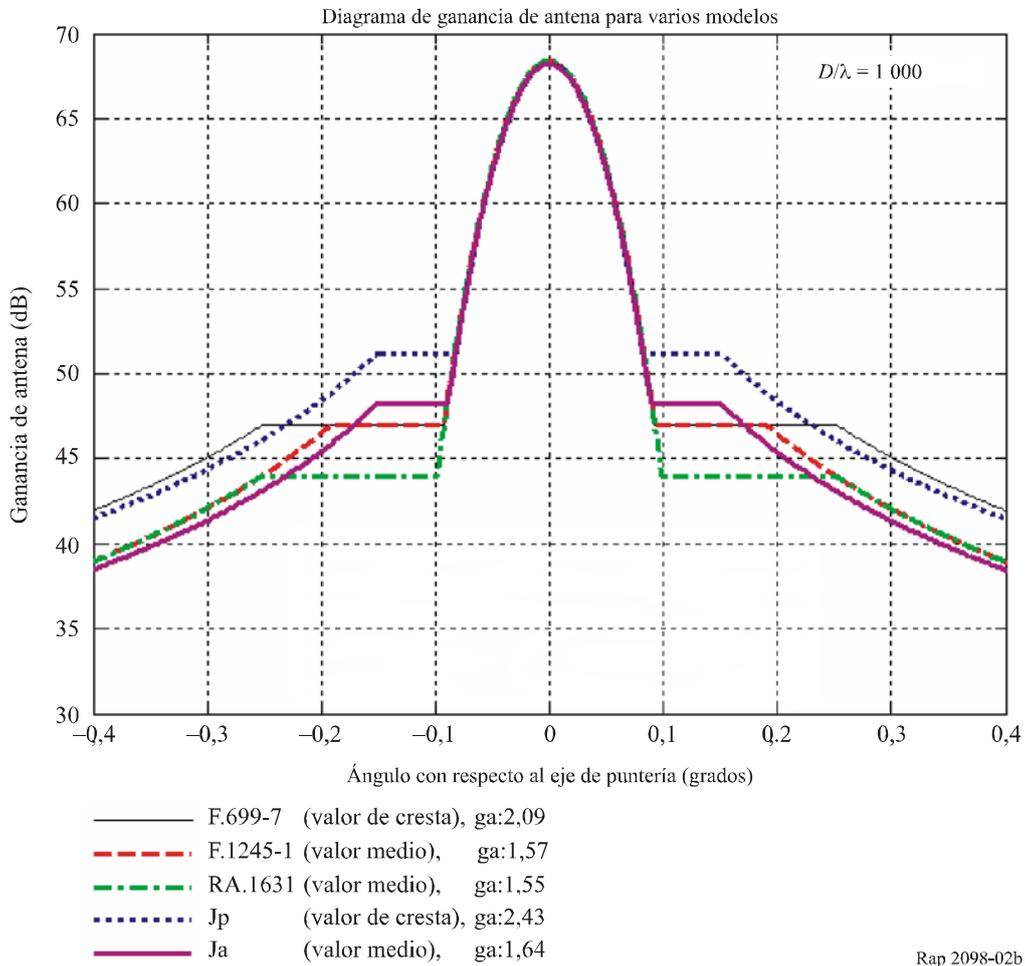


FIGURA 2c

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «media»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala logarítmica)

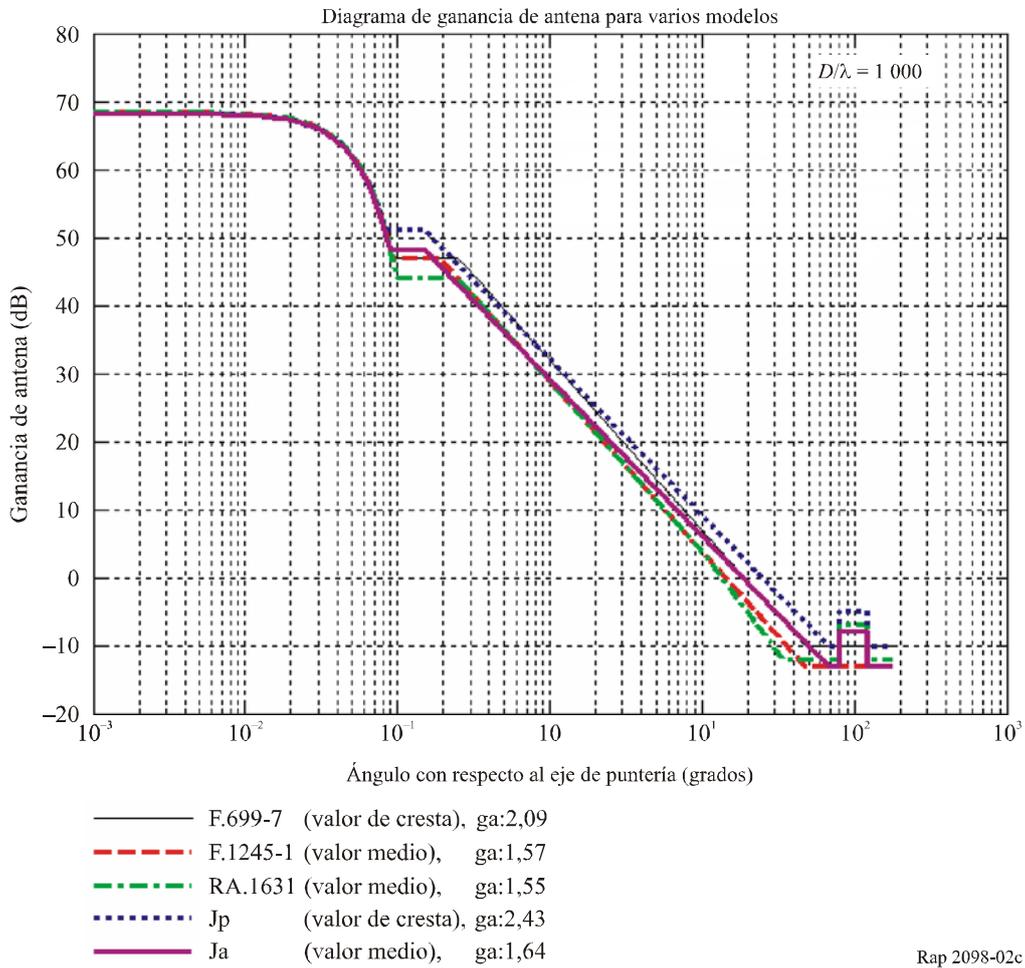


FIGURA 3a

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «buena»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal)

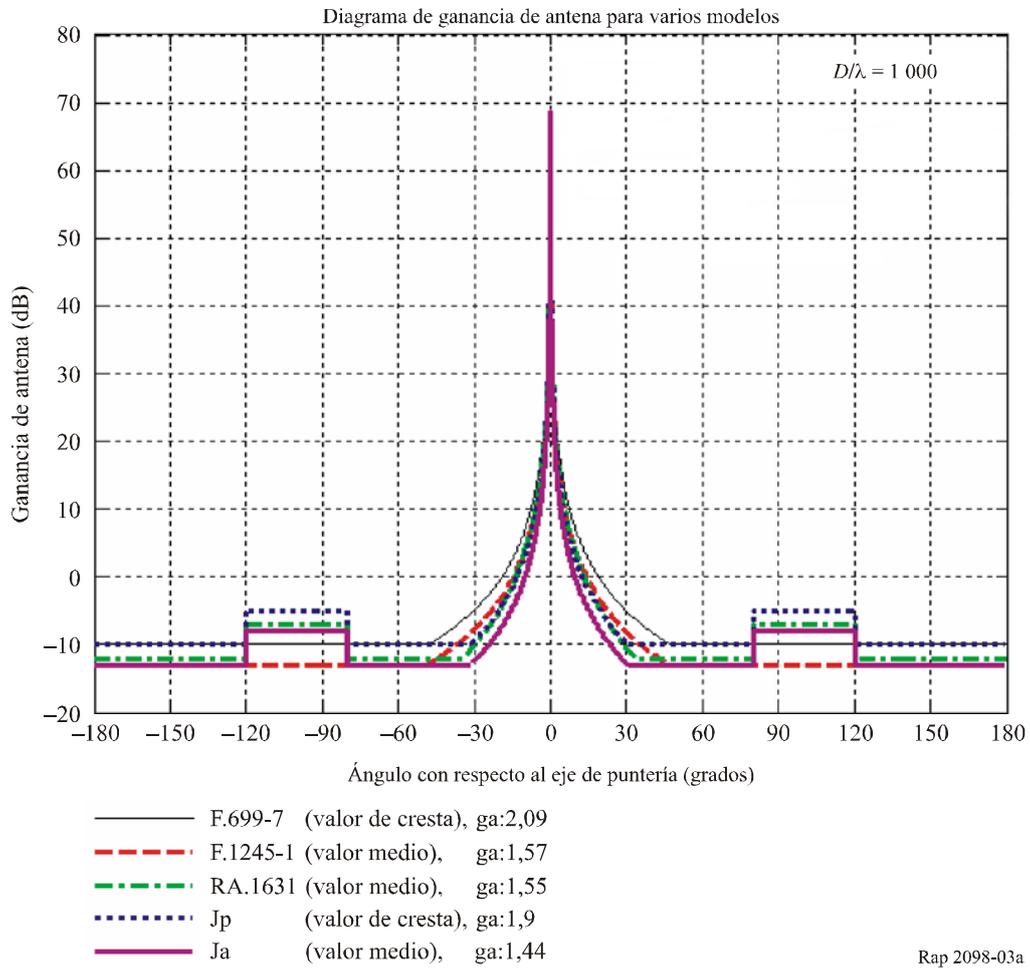


FIGURA 3b

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\ 000\ \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «buena»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60)\ \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal ampliada)

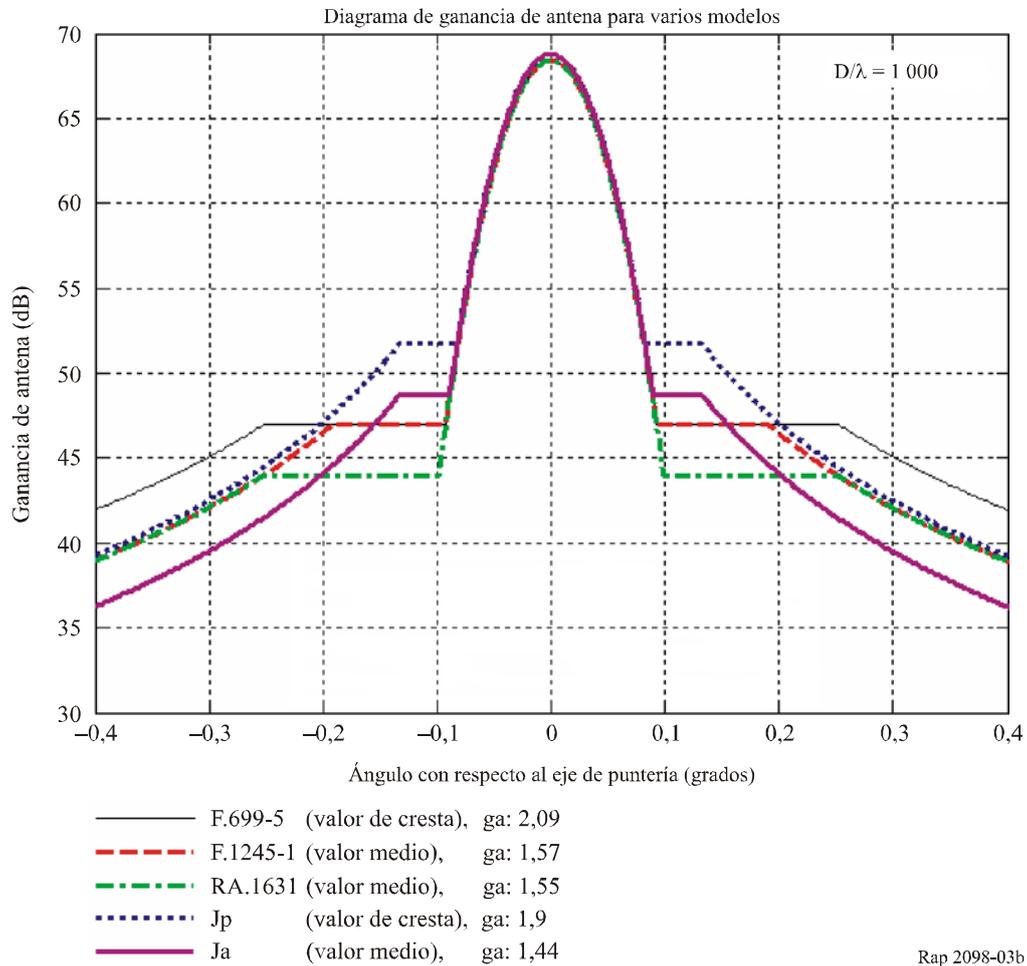


FIGURA 3c

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 1\ 000\ \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «buena»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60)\ \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala logarítmica)

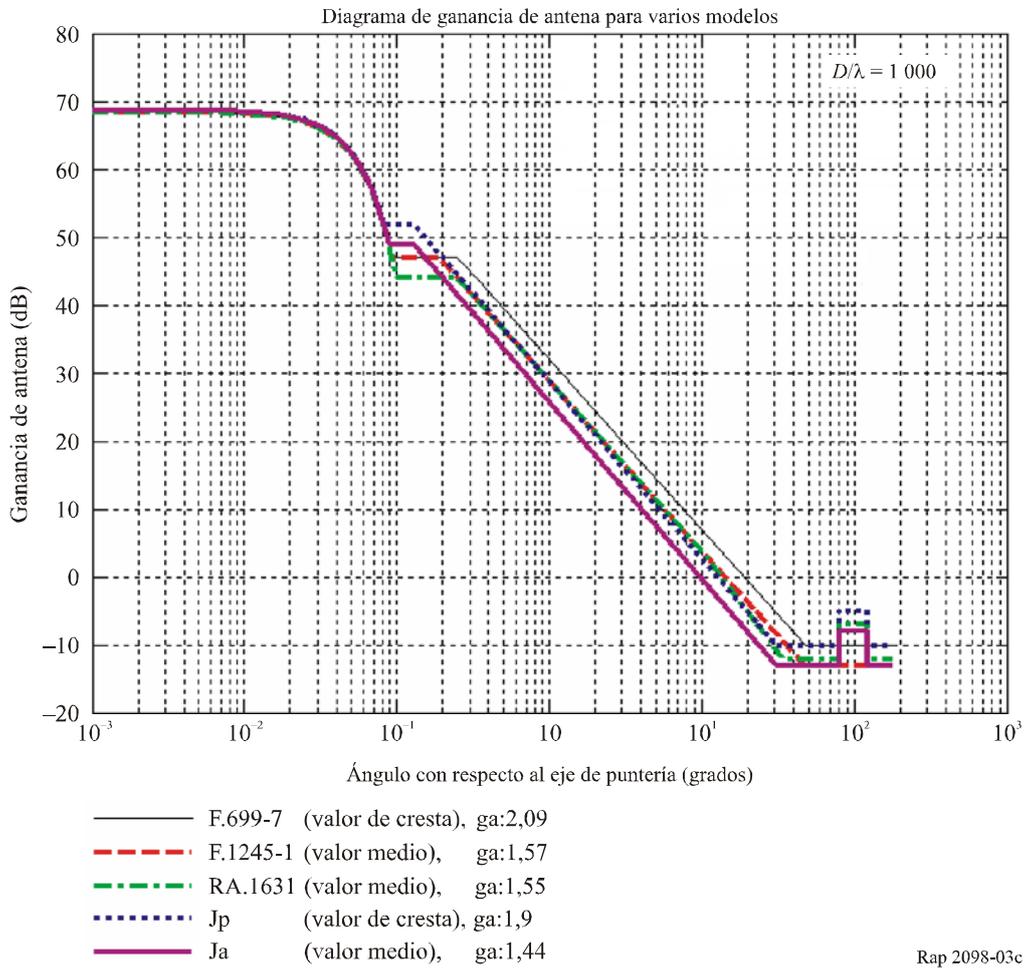
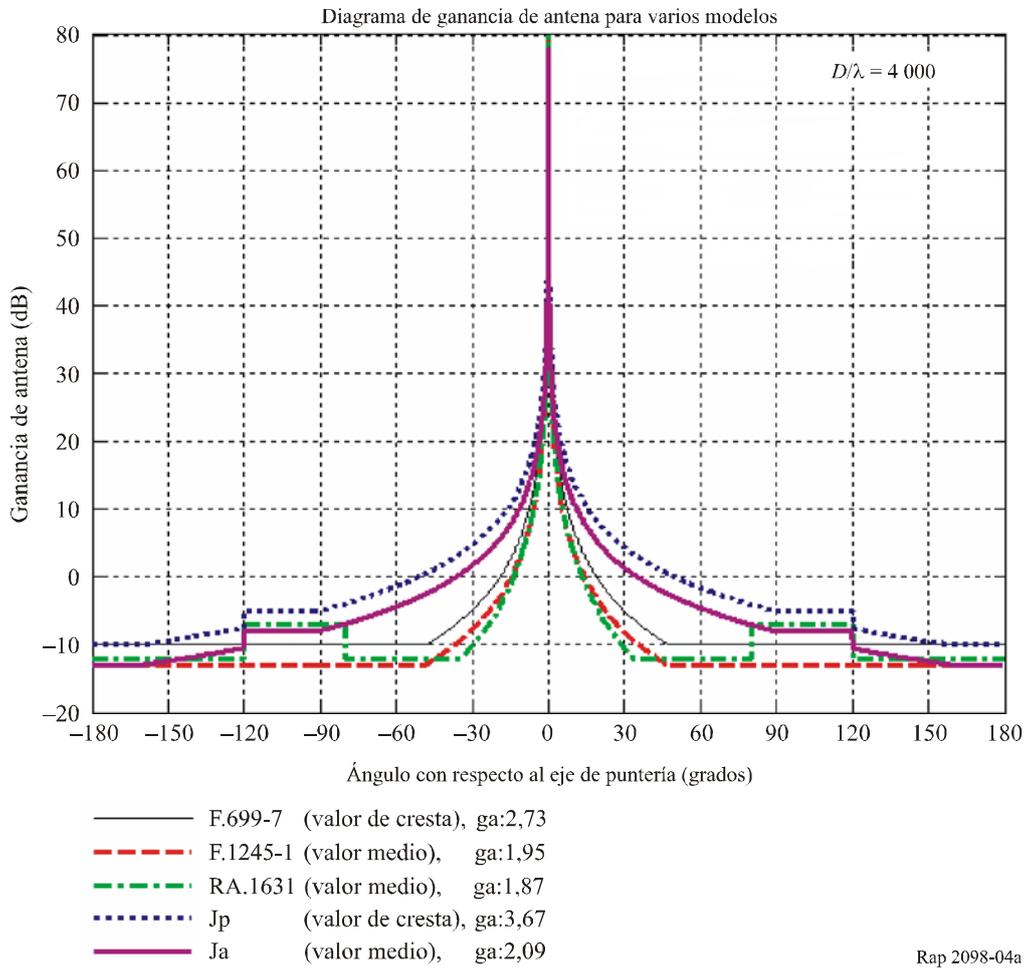


FIGURA 4a

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\ 000\ \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a antenas de calidad «baja»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15)\ \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal)



Rap 2098-04a

FIGURA 4b

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a antenas de calidad «baja»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal ampliada)

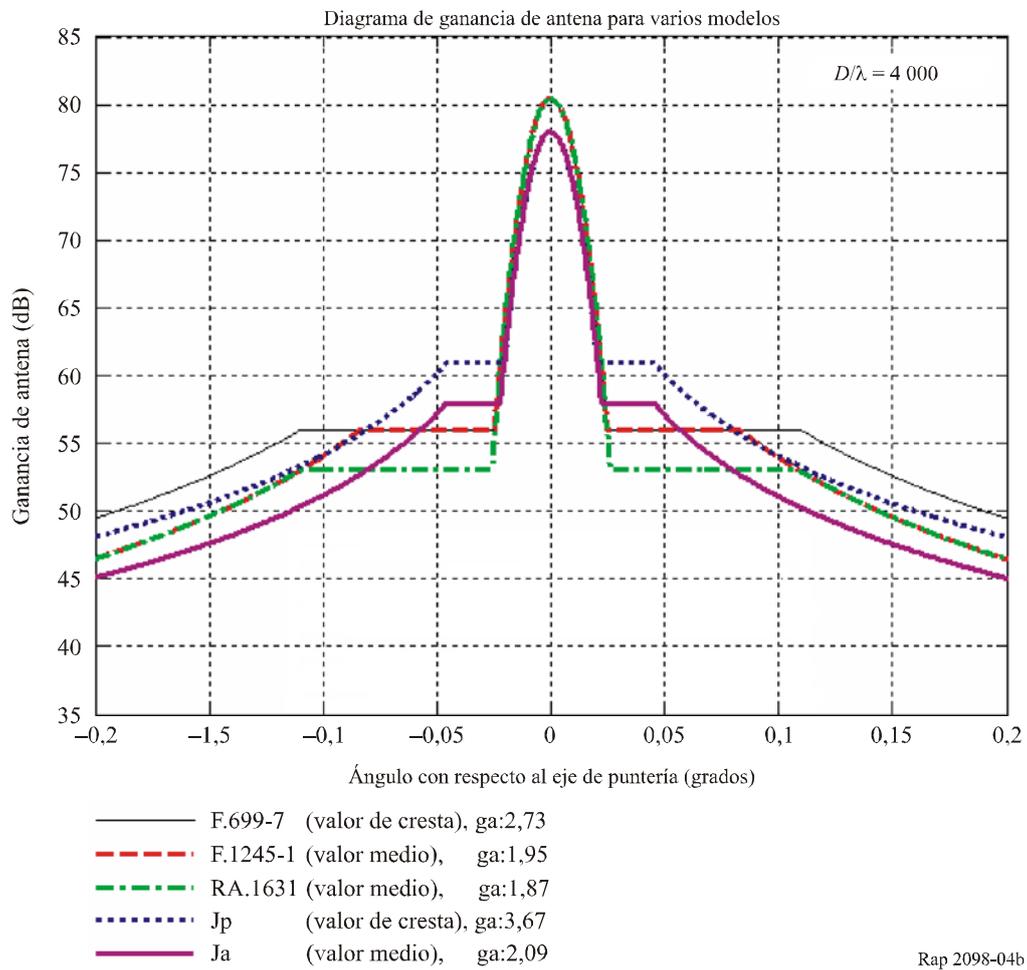


FIGURA 4c

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a antenas de calidad «baja»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala logarítmica)

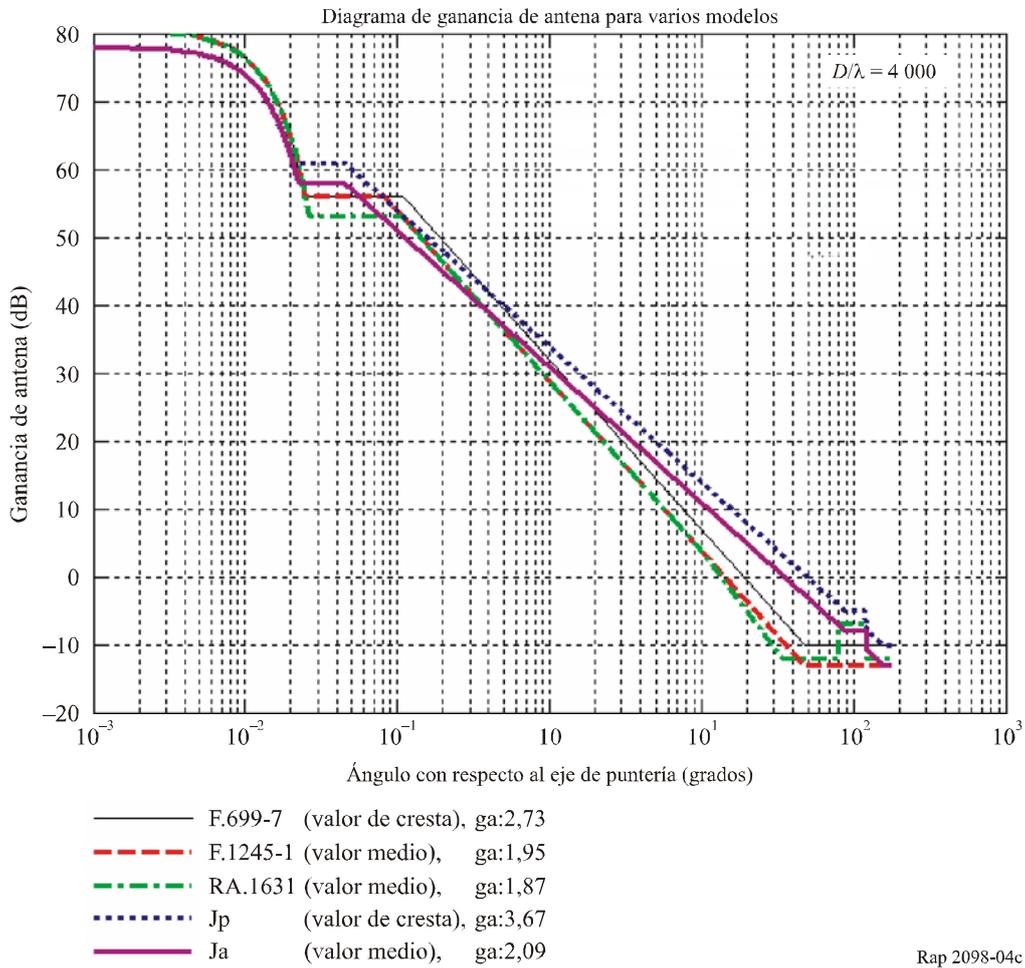
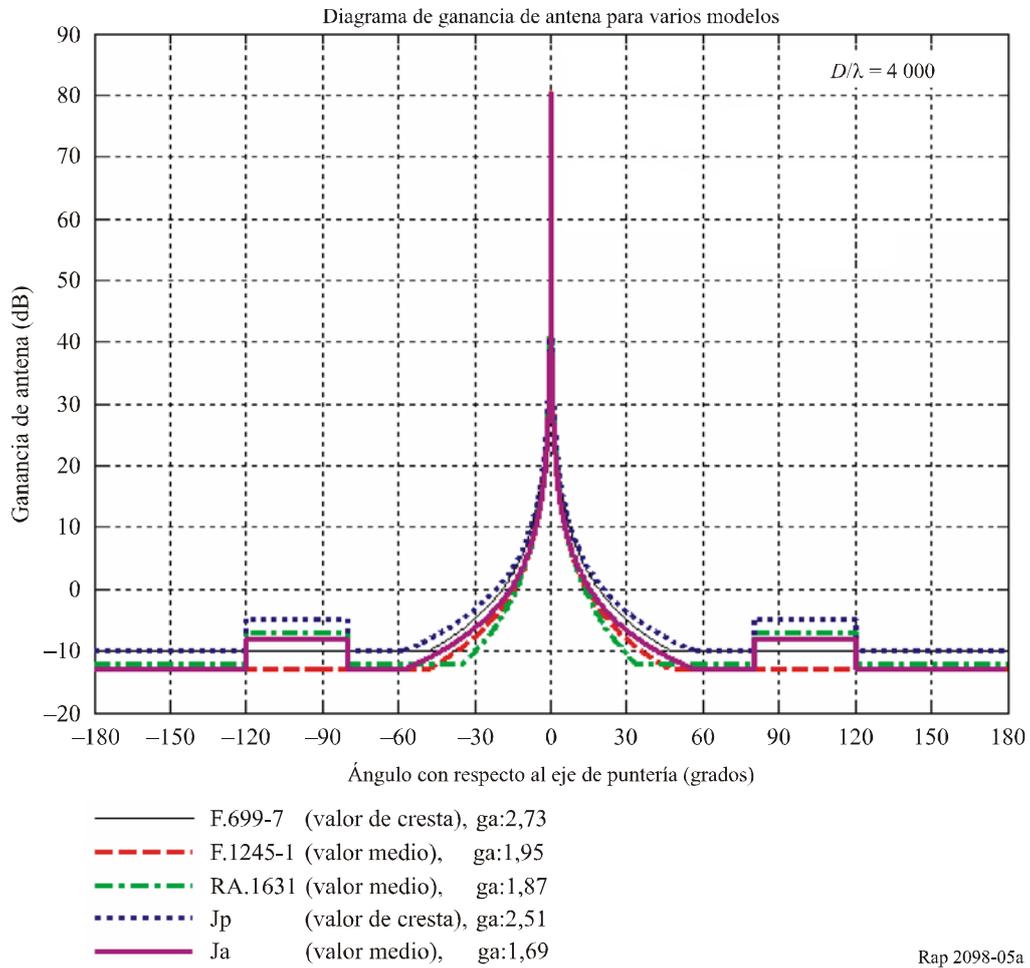


FIGURA 5a

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «media»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal)



Rap 2098-05a

FIGURA 5b

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «media»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal ampliada)

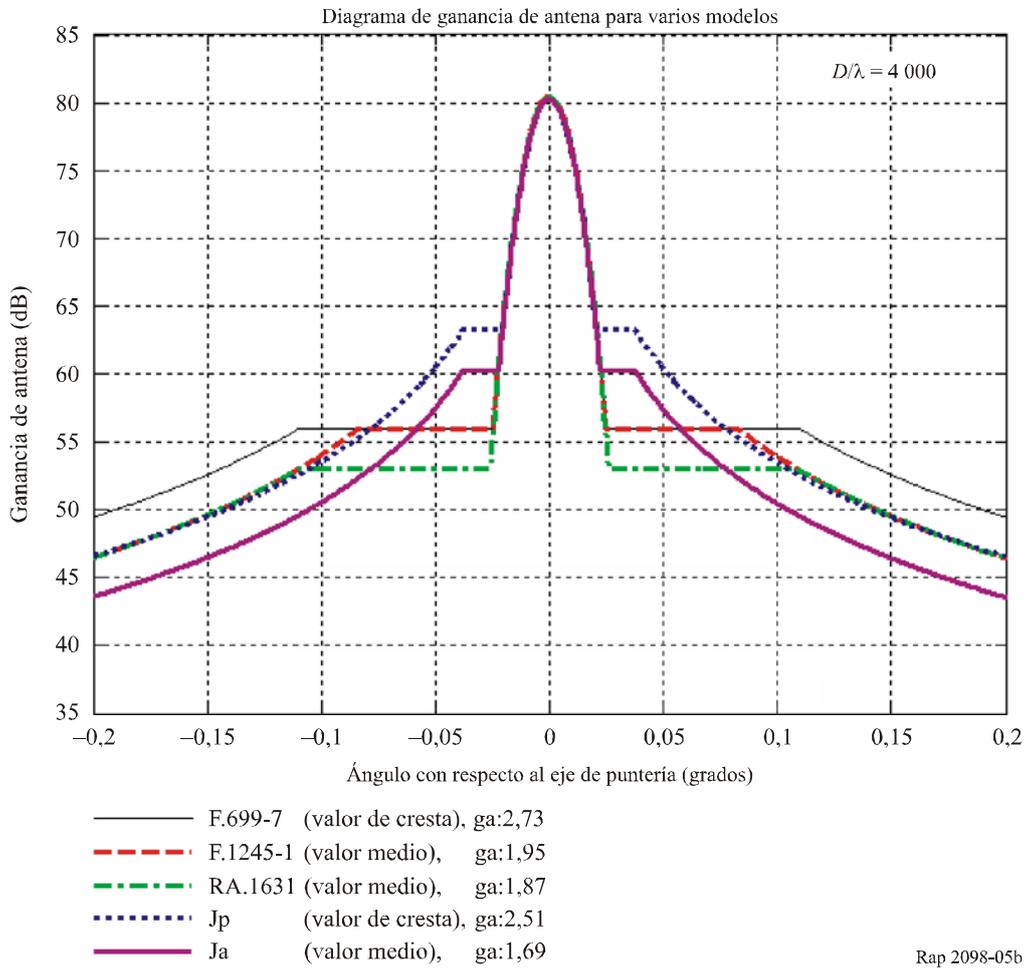


FIGURA 5c

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «media»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala logarítmica)

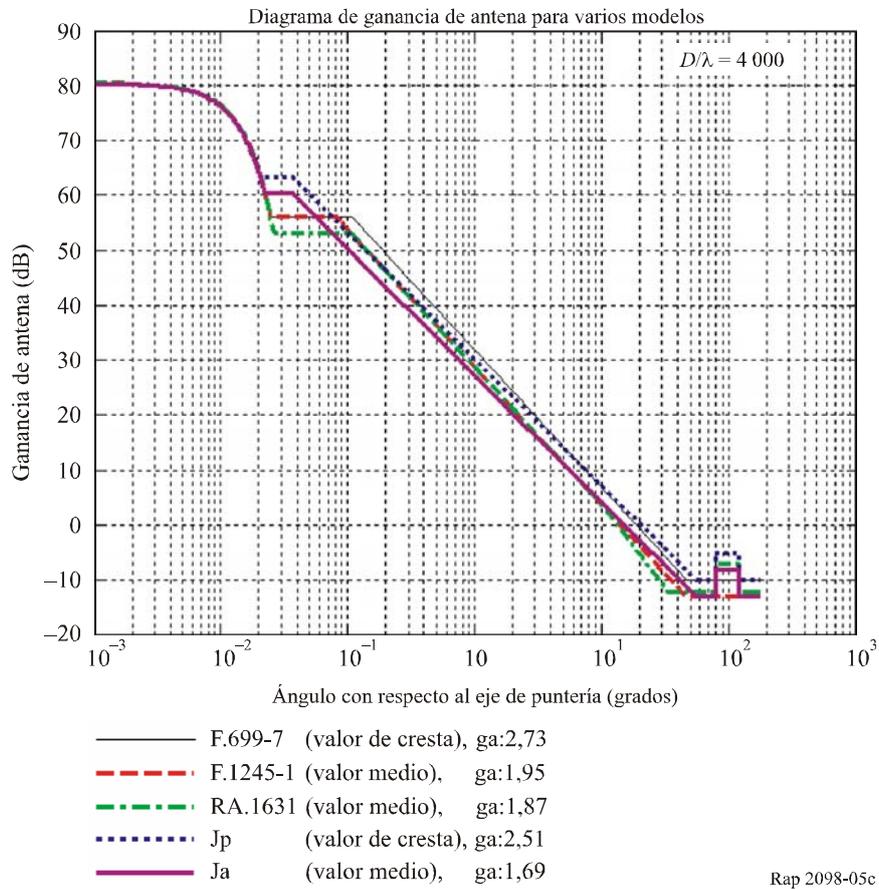


FIGURA 6a

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000 \lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «buena»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60) \lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal)

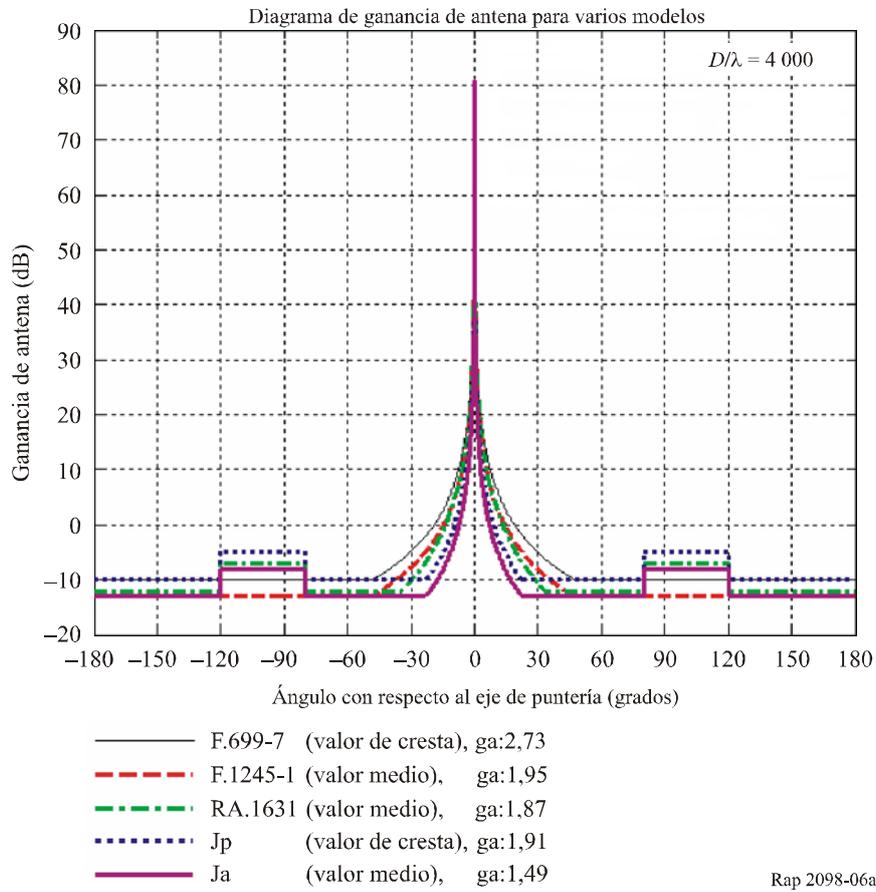


FIGURA 6b

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «buena»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala lineal ampliada)

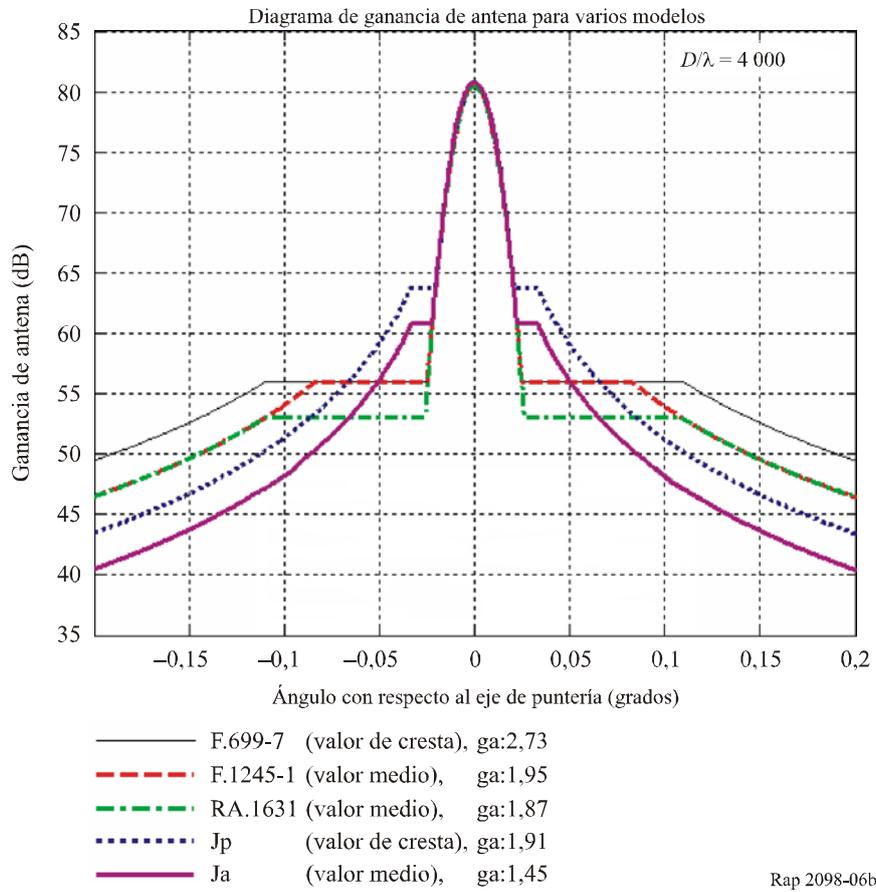


FIGURA 6c

Comparación de los modelos de diagrama de ganancia para un diámetro de antena  $D = 4\,000\lambda$ .  
 Los modelos Jp y Ja corresponden a una antena de calidad «buena»  
 con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60)\lambda$   
 (Eje de ángulos en escala logarítmica)

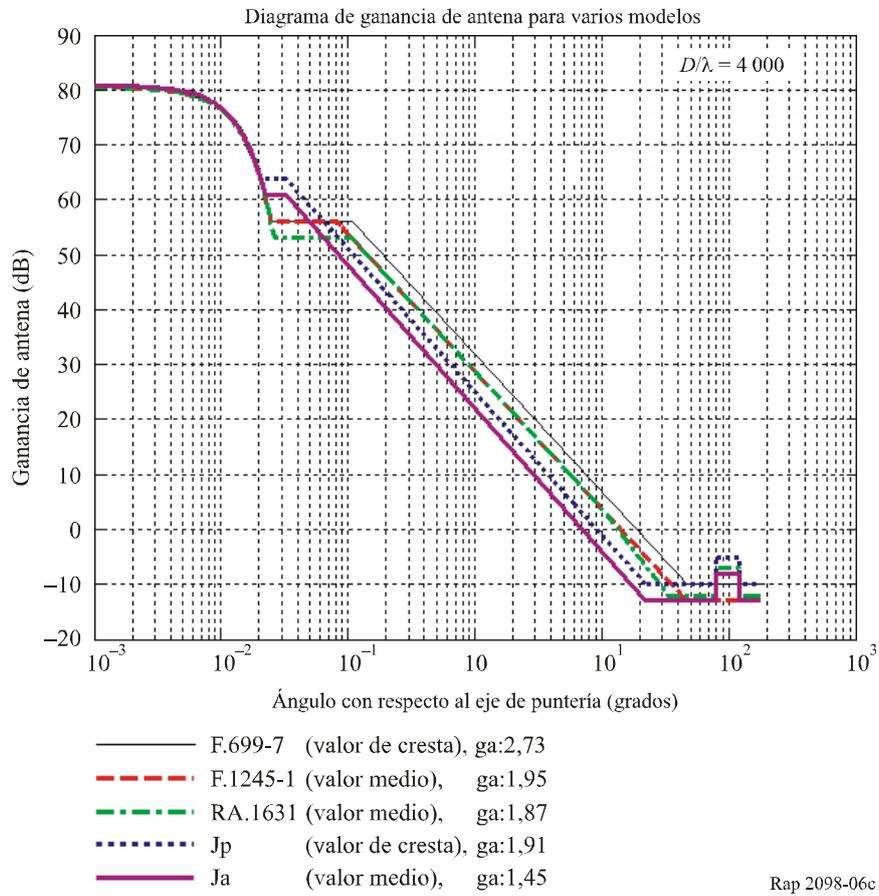


FIGURA 7a

Comparación de ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «baja» con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15) \lambda$   
(Ganancia promediada (dB))

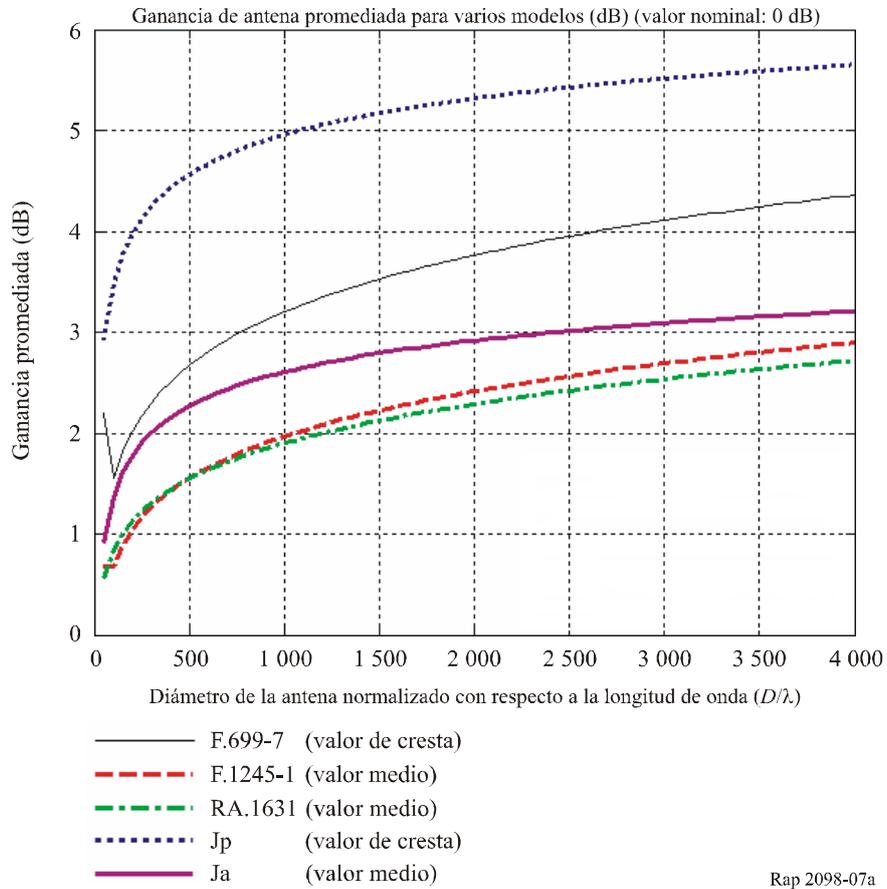


FIGURA 7b

Comparación de ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «baja» con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/15) \lambda$  (Ganancia promediada lineal)

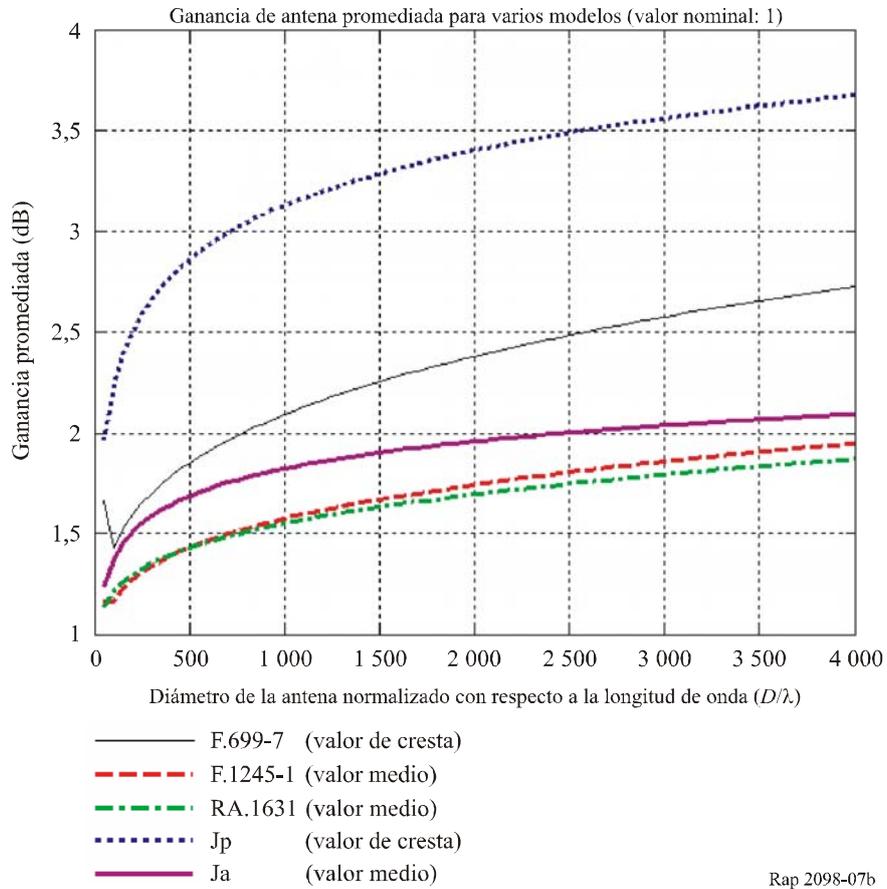


FIGURA 8a

Comparación de ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «media» con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30) \lambda$   
(Ganancia promediada (dB))

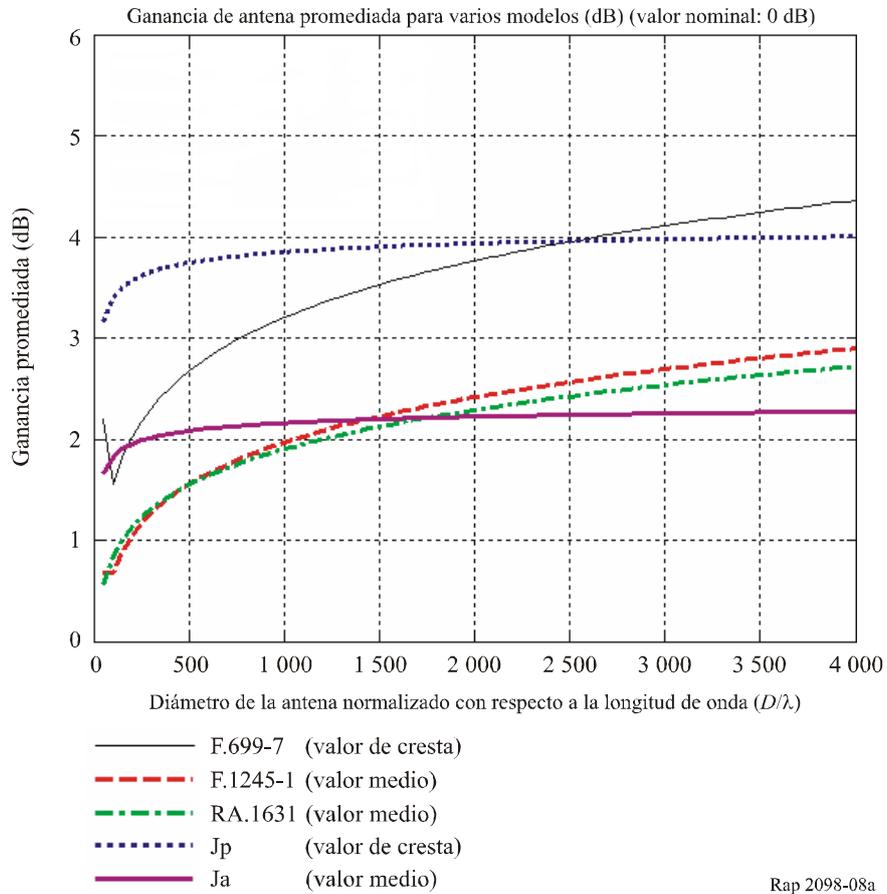


FIGURA 8b

Comparación de ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «media» con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/30) \lambda$  (Ganancia promediada lineal)

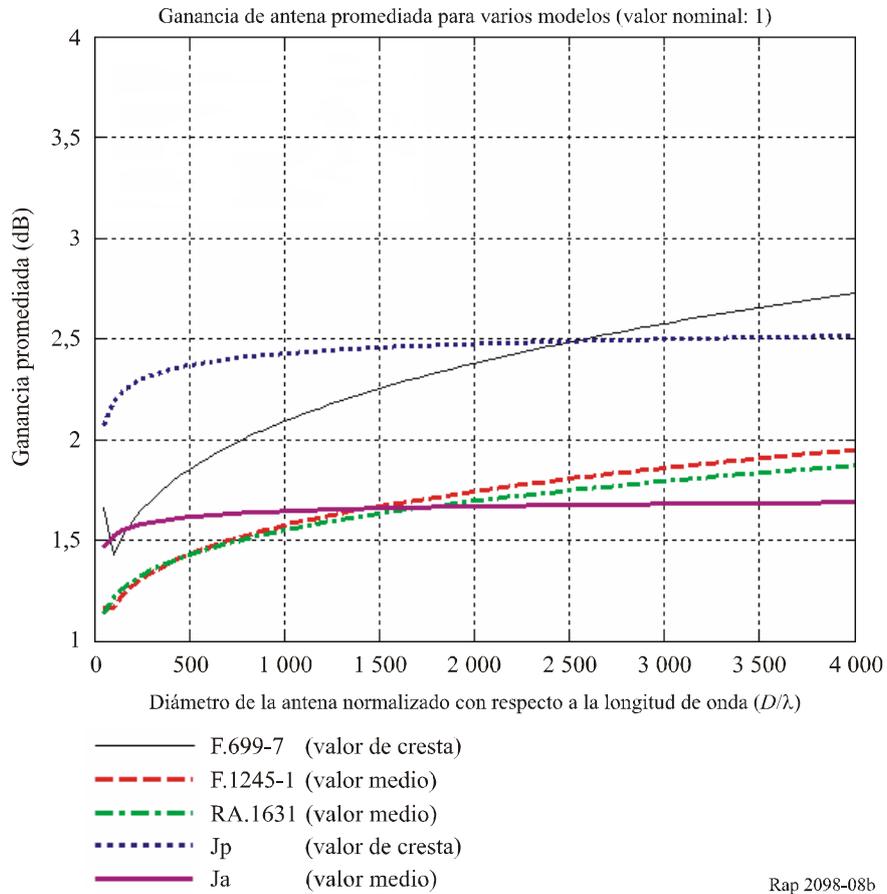


FIGURA 9a

Comparación de ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «buena» con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60) \lambda$   
(Ganancia promediada (dB))

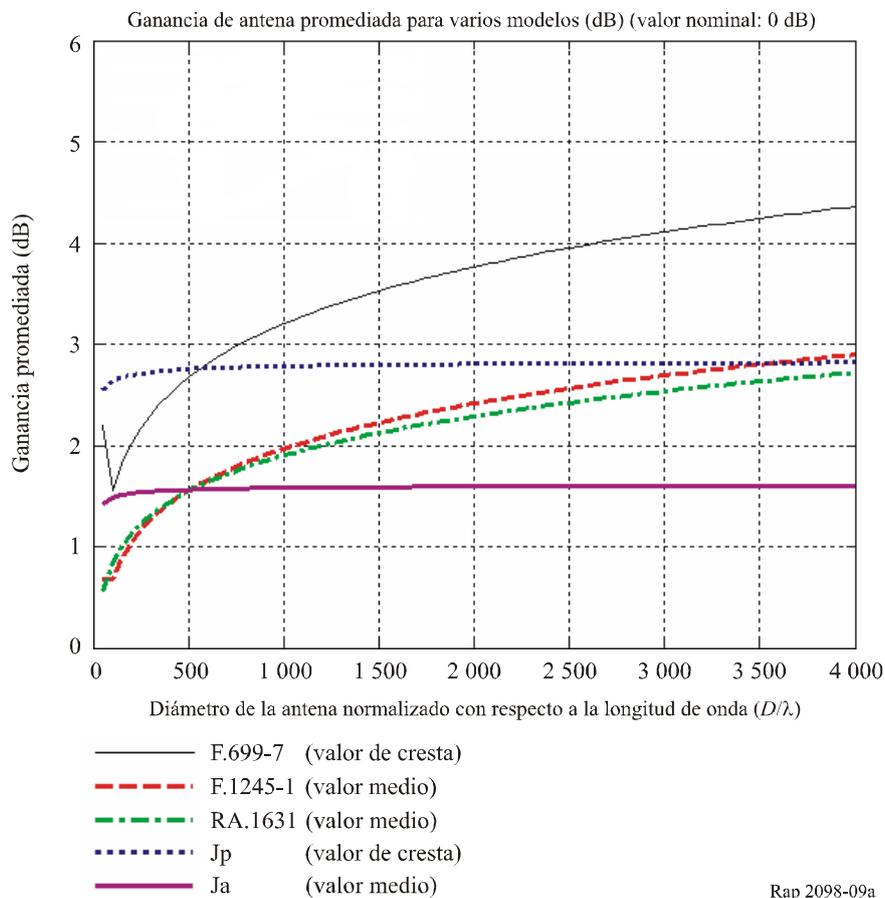


FIGURA 9b

Comparación de ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para antenas de calidad «buena» con un error en la superficie  $h_{rms} = (1/60) \lambda$  (Ganancia promediada lineal)

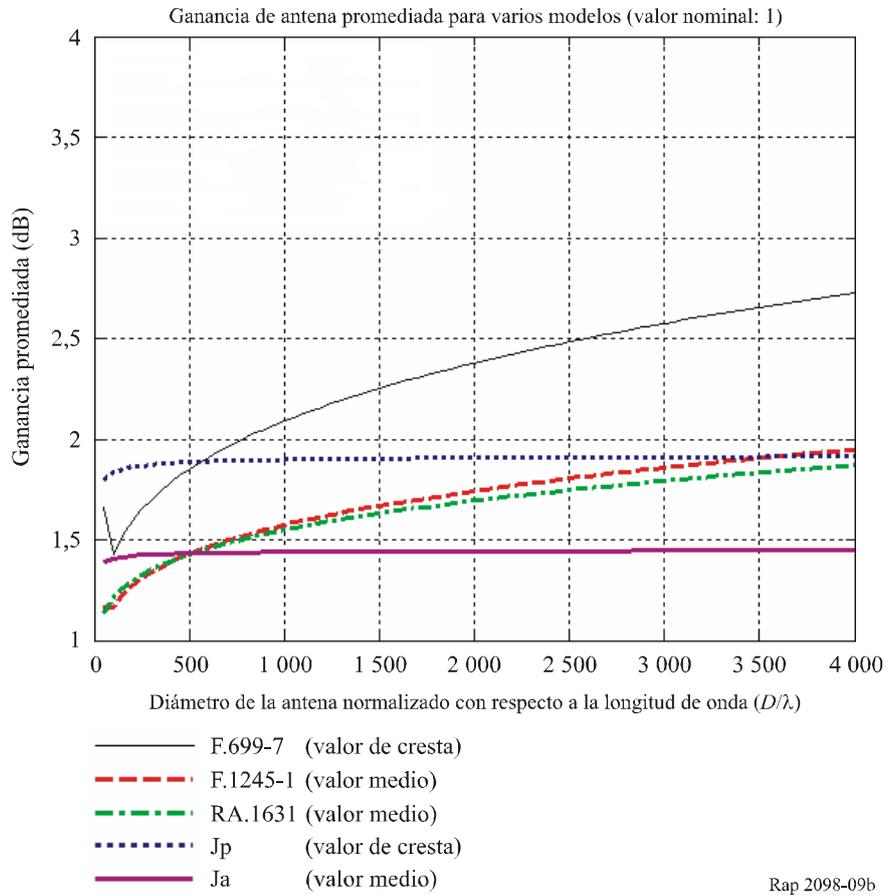


FIGURA 10a

Comparación de la ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de 34 m con un error en la superficie  $h_{rms} = 0,25$  mm (Ganancia promediada (dB))

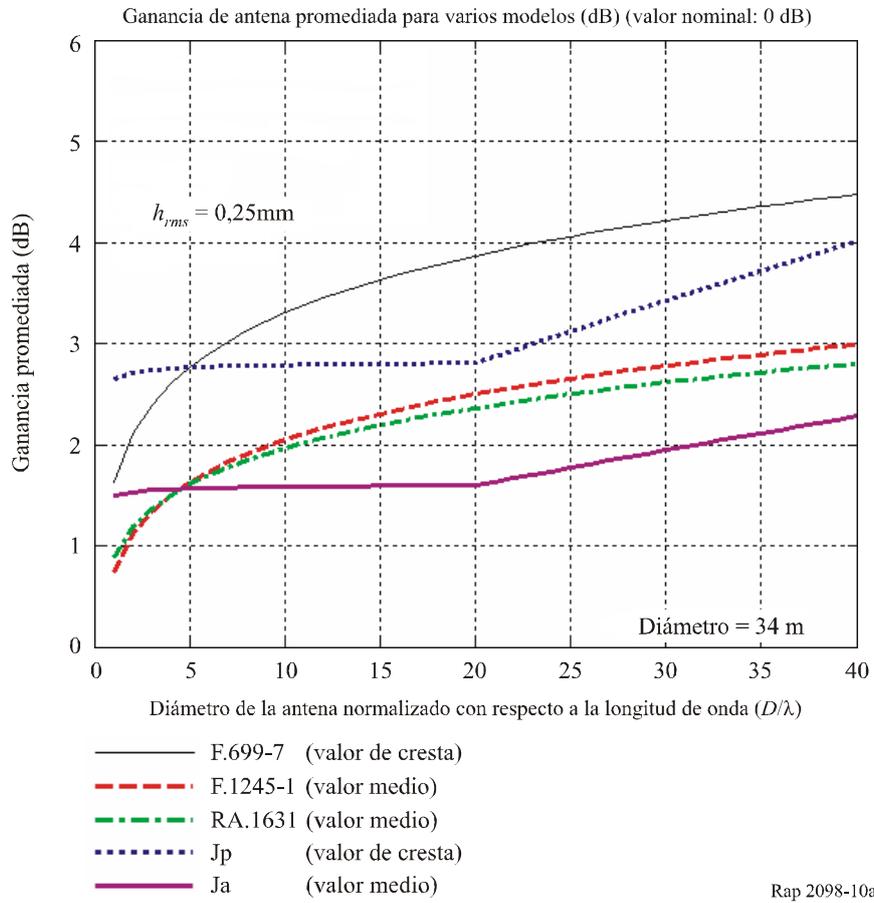


FIGURA 10b

Comparación de la ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de 34 m con un error en la superficie  $h_{rms} = 0,25$  mm (Ganancia promediada lineal)

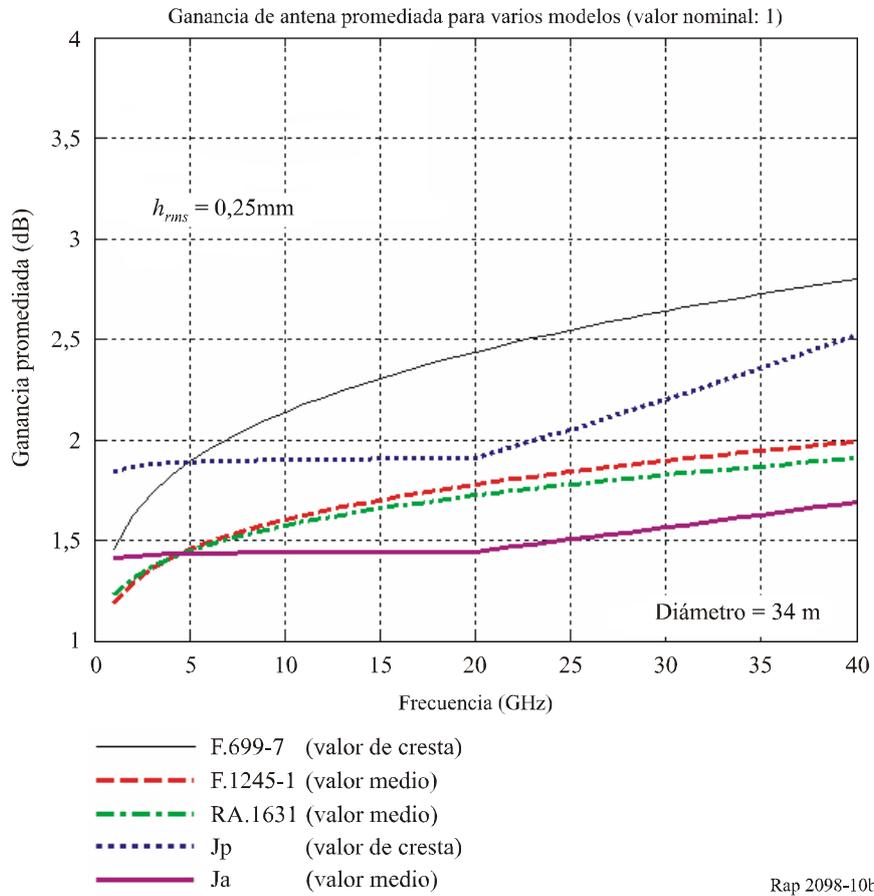


FIGURA 11a

Comparación de la ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de 70 m con un error en la superficie  $h_{rms} = 0,60$  mm (Ganancia promediada (dB))

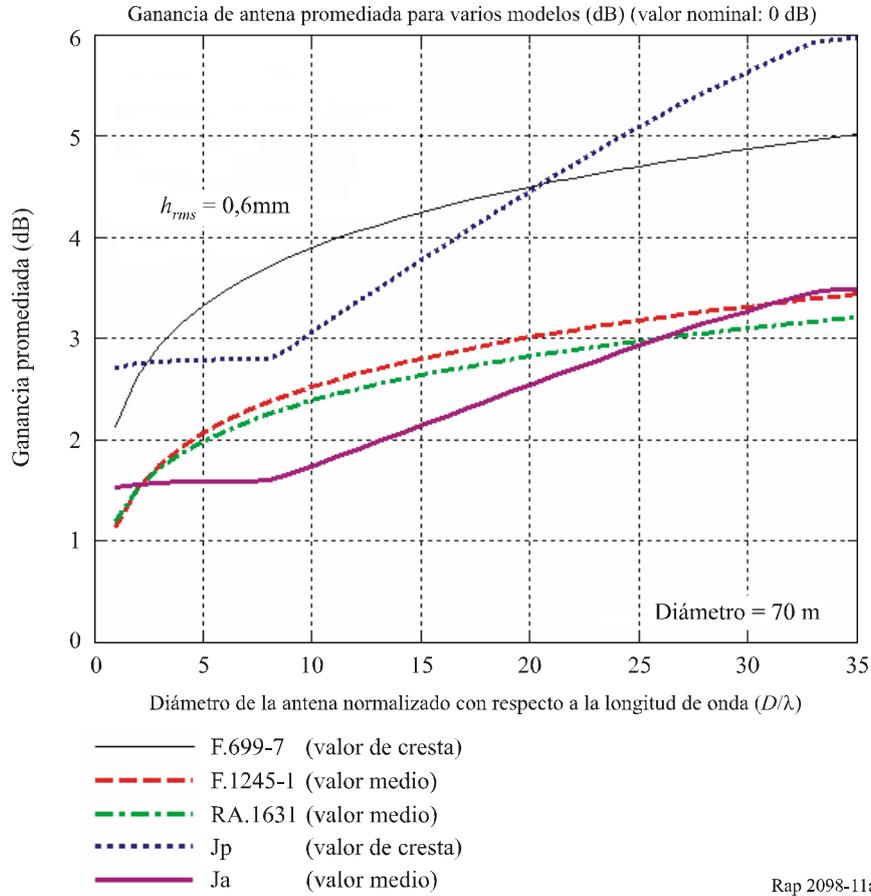


FIGURA 11b

Comparación de la ganancia promediada para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de 70 m con un error en la superficie  $h_{rms} = 0,60$  mm (Ganancia promediada lineal)

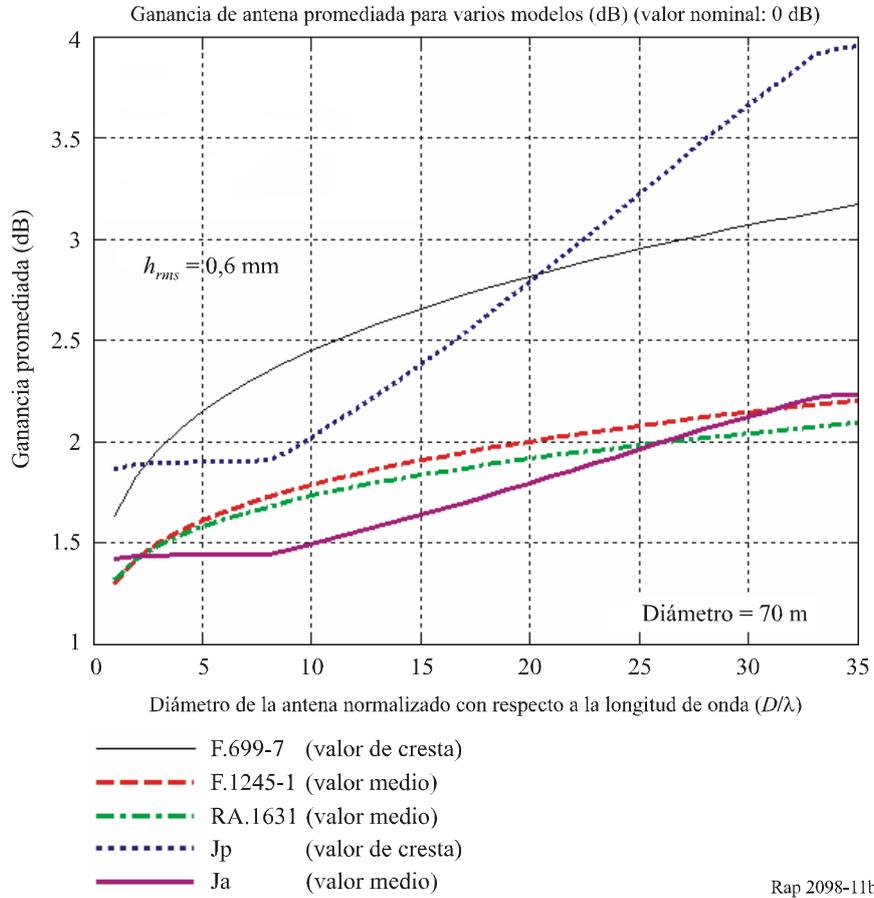


FIGURA 12a

Comparación de la ganancia media para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de calidad «baja» con un error en la superficie  $h_{rms} = 1/15 \lambda$ . Incluye el diagrama teórico calculado con varias longitudes de correlación distintas ( $c\lambda = 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160$ )

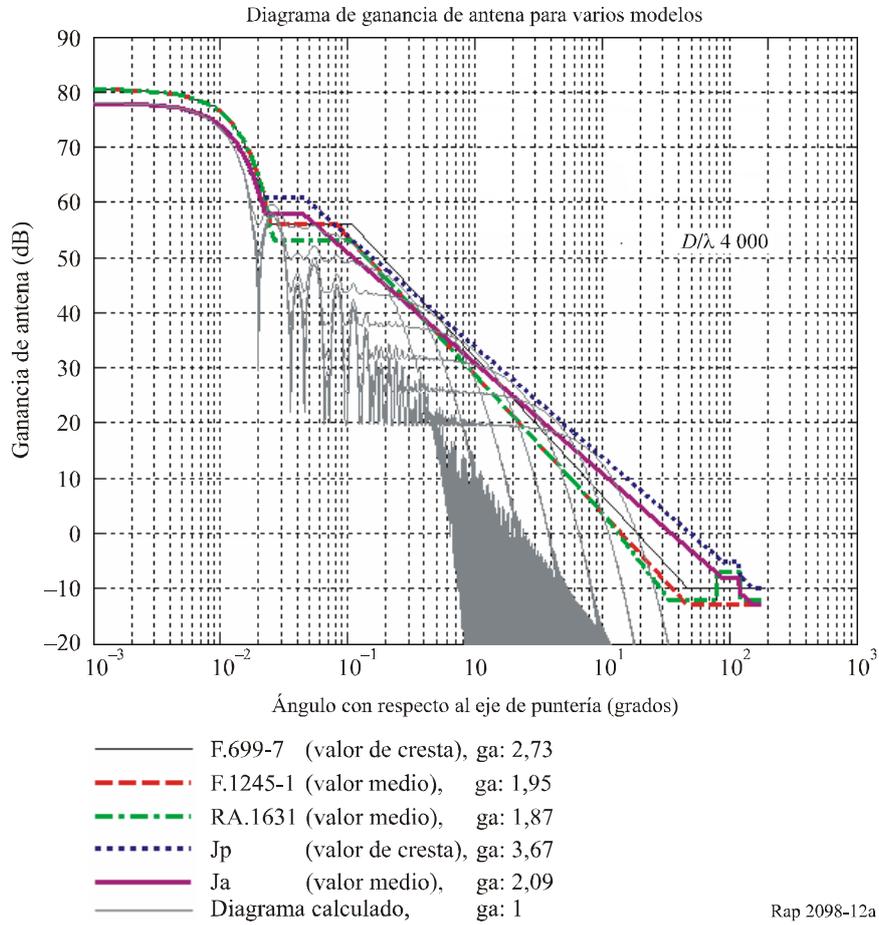
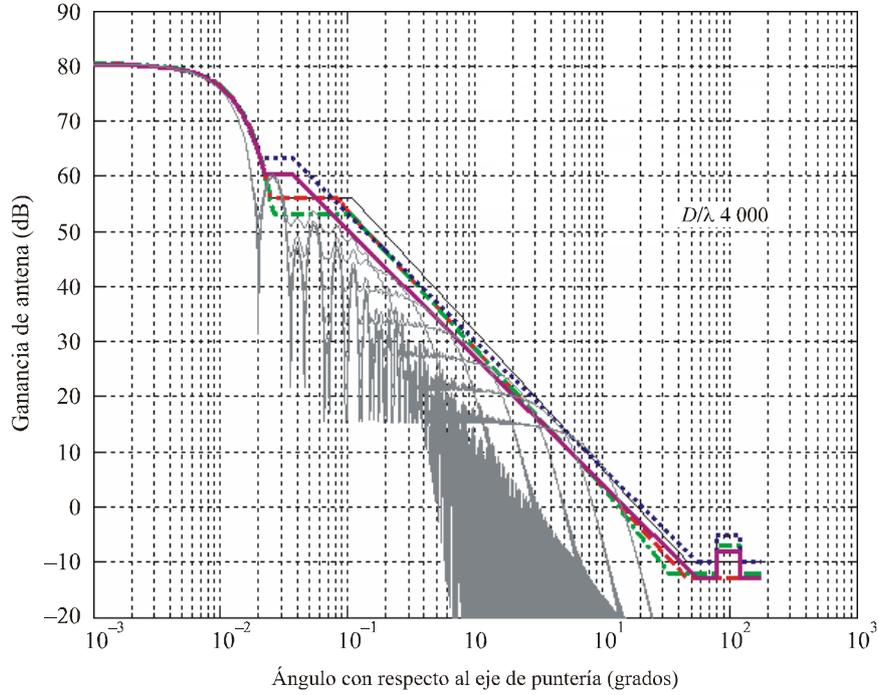


FIGURA 12b

Comparación de la ganancia media para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de calidad «media» con un error en la superficie  $h_{rms} = 1/30 \lambda$ . Incluye el diagrama teórico calculado con varias longitudes de correlación distintas ( $c\lambda = 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160$ )

Diagrama de ganancia de antena para varios modelos



- F.699-7 (valor de cresta), ga: 2,73
- - - F.1245-1 (valor medio), ga: 1,95
- - - RA.1631 (valor medio), ga: 1,87
- · · Jp (valor de cresta), ga: 2,51
- Ja (valor medio), ga: 1,69
- Diagrama calculado, ga: 1

Rap 2098-12b

FIGURA 12c

Comparación de la ganancia media para distintos modelos, con los modelos Jp y Ja para una antena de calidad «buena» con un error en la superficie  $h_{rms} = 1/60 \lambda$ . Incluye el diagrama teórico calculado con varias longitudes de correlación distintas ( $c\lambda = 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160$ )

