

UNIVERSIDAD ATÓNOMA DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



# **CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE SISTEMAS W-CDMA EN DIFERENTES MICROCELDAS**

**-PROYECTO FIN DE CARRERA-**

**Autor: Guillermo Colmena Muñoz  
MARZO 2008**

# **CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE SISTEMAS W-CDMA EN DIFERENTES MICROCELDA**

Autor: Guillermo Colmena Muñoz  
Tutor: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y  
Comunicaciones Ópticas  
Dpto. Ingeniería Informática  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid

# PROYECTO FIN DE CARRERA

**Título:** Contribución al estudio de la capacidad de sistemas W-CDMA en diferentes microceldas

**Autor:** D. Guillermo Colmena Muñoz

Tutor: D. Bazil Taha Ahmed

**Tribunal:**

**Presidente:** Antonio Aguilar Morales

**Vocal:** Jorge López de Vergara

**Vocal Secretario:** Bazil Taha Ahmed

**Fecha de lectura:**

**Calificación:**

## **Resumen**

---

El principal objetivo de este proyecto es estudiar la contribución de la capacidad del número de usuarios en micro-celdas del tipo Cigar-Shaped, T-Shaped y Cross-Shaped para sistemas W-CDMA y realizar un breve estudio en macro-celdas. Todas ellas se utilizarán en vías de comunicación, en el caso de Cross-Shaped, también habrá una aplicación en ciudades. Analizándolas detenidamente de forma individual, se describirá de forma detallada cual es su verdadero comportamiento. Fundamentalmente, será de vital importancia analizar las pérdidas ocasionadas, ya sea por el sistema o por la presencia de otros usuarios que generan interferencias.

## **Abstract**

---

The principal aim of this project is to study capacity the uplink in micro-cells of the type Cigar-shaped, T-shaped and Cross-shaped for systems W-CDMA and to realize a brief study of capacity in macro-cells. All of them will be in use in routes of communication, in case of Cross-shaped microcells; also there will be an application in cities. Analyzing them held up of individual form, it will be described of detailed form which is his real behaviour. Fundamentally, it will be of vital importance to analyze the propagation losses, already be for the system or for the presence of other users who generate interferences.

# Agradecimientos

---

En primer lugar, quería agradecer a Bazil Taha Ahmed, que siempre me ha deseado toda la suerte del mundo para su realización, por su gran ayuda, interés y por su disposición durante todo el curso.

También quería dar mis agradecimientos a Juan Bonillo Molina, por toda su dedicación y apoyo durante toda la carrera y su constante sentido del humor que me ha permitido sobrellevar el trabajo de una forma más agradable.

A todos los compañeros de mi promoción por tener ese sentido del compañerismo y por su ayuda.

Finalmente, destacar a mis padres y mi hermana que han buscado siempre la manera de prestarme todo su apoyo y cariño a lo largo de toda la carrera.

# Prólogo

---

## Motivación

La motivación de este proyecto es conseguir analizar los diferentes comportamientos respecto a la capacidad de número de usuarios que se presentan en diferentes casos bajo estudio.

El análisis está enfocado para W-CDMA, una tecnología muy extendida, en la actualidad, utilizada en los últimos estándares de telefonía móvil.

Fundamentalmente, se pretende contrastar los diferentes comportamientos en función del tipo de micro-celda utilizada y de la región que se va a tomar como estudio: carreteras, ciudades, vías de tren, túneles y metro.

## Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en calcular la capacidad del número de usuarios y estudiar los diferentes escenarios que puedan darse en la vida real.

Para ello, se tendrá en cuenta el tipo de información que queramos transmitir (voz, datos, datos y voz simultáneamente). Este último aspecto será muy relevante debido a que el conjunto de parámetros utilizados en las fórmulas sufrirán ligeras variaciones.

Una vez se hallan calculado y se hayan obtenido los diferentes resultados, se procederá a un análisis de los parámetros más importantes: radio de cobertura, punto de corte, exponentes de propagación, nivel de lóbulos secundarios, etc.

Todos estos factores serán necesarios analizarlos debido a que estos parámetros, a su vez variarán en función del tipo de microcelda utilizada y de la región bajo estudio, siendo mencionados estos elementos en el apartado anterior.

Finalmente, se puede resumir en los siguientes apartados:

Estudio de la contribución de la capacidad del número de usuarios para los diferentes tipos de microceldas:

- Cigar-Shaped;
- T-Shaped;
- Cross-Shaped en autopistas;
- Cross-Shaped Full Squared Cell en ciudades;
- Cross-Shaped Half Square Cell en ciudades.

Estudio de la contribución de la capacidad del número de usuarios para macroceldas

Estudio de la contribución de la capacidad del número de usuarios para diferentes escenarios:

- Autopistas;
- Ferrocarril;
- Ciudades;
- Túneles;
- Metro;
- Zonas rurales.



El análisis se llevará a cabo teniendo en cuenta el tipo de información a transmitir:

- Voz;
- Datos;
- Voz y Datos.

Finalmente, se tendrá el tipo de celda utilizada, generalmente, estará enfocado al estudio de microceldas.

Se hará un análisis en función del uso de:

- Microceldas;
- Macrocelas.

# **"CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE SISTEMAS W-CDMA EN DIFERENTES MICROCELDA"**

Guillermo Colmena Muñoz  
Universidad Autónoma de Madrid.  
Escuela Politécnica Superior.  
[Guillermo.Colmena@estudiante.uam.es](mailto:Guillermo.Colmena@estudiante.uam.es)

## **ÍNDICE**

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Agradecimientos.....	3
Prólogo.....	4
1. Introducción: Conceptos básicos de CDMA.....	11
1.1 Multiacceso radio en comunicaciones móviles.....	11
1.2 Espectro ensanchado.....	14
1.3 Tipos de técnicas.....	14
1.4 Espectro ensanchado por secuencia directa.....	15
1.5 Ventajas de las técnicas de espectro ensanchado.....	17
1.6 Receptor Rake.....	22
1.7 Subsistemas de sincronismo y estimación de canal.....	24
1.8 Estructura del sistema.....	26
1.9 Características de las redes celulares CDMA.....	31
2. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) en autopistas .....	43
2.1 Introducción.....	43
2.2 Control de potencia.....	44
2.3 Modelo de propagación.....	44
2.4 Análisis del Uplink.....	45
2.5 Conexión del usuario a la estación base.....	48

2.6 Análisis genérico (Sin limitación de potencia).....	53
2.6.1 Análisis numérico para voz.....	53
2.6.2 Análisis numérico para datos.....	61
2.6.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	65
2.7 Análisis para sistema con limitación de potencia máxima.....	70
2.7.1 Análisis numérico para voz.....	71
2.7.2 Análisis numérico para datos.....	78
2.7.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	83
3. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) en servicio de trenes.....	92
3.1 Introducción.....	93
3.2 Modelo de propagación.....	93
3.3 Conceptos de CDMA relacionados con el caso bajo estudio.....	98
3.4 Análisis numérico genérico para el mejor caso.....	99
3.5 Análisis numérico para el peor caso.....	101
3.5.1 Análisis numérico para voz.....	103
3.5.2 Análisis numérico para datos.....	109
3.5.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	114
4. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas en forma cruciforme (Cross-Shaped), para microcélulas en forma de T (T-Shaped) en autopistas y para microcélulas con forma cruciforme (Cross-Shaped) en ciudades.....	119
4.1 Estudio para micro células en forma de T (T-Shaped) en autopistas.....	119
4.1.1 Introducción.....	120
4.1.2 Modelo de propagación.....	120
4.1.3 Análisis numérico para voz.....	126
4.1.4 Análisis numérico para datos.....	131
4.1.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)....	134
4.2 Estudio para microcélulas en forma cruciforme (Cross-Shaped) en autopistas.....	140
4.2.1 Introducción.....	141

4.2.2 Modelo de propagación.....	141
4.2.3 Análisis numérico para voz.....	147
4.2.4 Análisis numérico para datos.....	152
4.2.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)....	156
4.3 Estudio para microcélulas en forma cruciforme (Cross-Shaped) en ciudades.....	161
4.3.1 Introducción.....	162
4.3.2 Análisis numérico para micro células del tipo Half Square Cell.....	163
4.3.2.1 Análisis numérico para voz.....	163
4.3.2.2 Análisis numérico para datos.....	168
4.3.2.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	172
4.3.3 Análisis numérico para microcélulas del tipo Full Square Cell.....	175
4.3.3.1 Análisis numérico para voz.....	175
4.3.3.2 Análisis numérico para datos.....	179
4.3.3.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	183
4.3.3.4 Capacidad de Número de Usuarios de voz en función de la colocación de los usuarios en el sector.....	186
5. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas con forma de puro (Cigar-Shaped) en túneles para automóviles y servicio de metro.....	190
5.1 Estudio para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) en túneles para automóviles.....	191
5.1.1 Introducción.....	191
5.1.2 Modelo de propagación.....	193
5.1.3 Análisis numérico para voz.....	198
5.1.4 Análisis numérico para datos.....	202
5.1.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	206
5.1.6 Análisis de diferentes casos para la voz en función de las curvas.....	210

5.1.7	Análisis de diferentes casos para datos en función de las curvas.....	220
5.1.8	Análisis de diferentes casos para datos y voz simultáneamente en función de las curvas.....	226
5.2	Estudio para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) en servicio de metro.....	232
5.2.1	Introducción.....	232
5.2.2	Modelo de propagación.....	233
5.2.3	Análisis numérico para voz.....	238
5.2.4	Análisis numérico para datos.....	244
5.2.5	Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	249
6.	Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para macrocélulas.....	254
6.1	Introducción.....	254
6.2	Desvanecimientos multitrayecto en radioenlaces.....	255
6.3	Fórmulas utilizadas.....	257
6.4	Análisis numérico para voz.....	259
6.5	Análisis numérico para datos.....	262
6.6	Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos).....	265
7.	Conclusiones.....	268
	Bibliografía.....	270
	Código utilizado.....	272
	Anexo1 Presupuesto.....	281
	Anexo2 Pliego de condiciones.....	282

# 1. Introducción Conceptos Básicos de CDMA

## 1.1 Multiacceso radio en comunicaciones móviles

Sabemos que toda emisión radioeléctrica implica la ocupación del volumen tridimensional en tiempo, espacio y frecuencia. Por motivos de interferencia mutua en entornos multiusuario, los volúmenes espectrales de las distintas radiocomunicaciones deben ser disjuntos. La función de multiacceso radio tiene por objeto compatibilizar la utilización de esos volúmenes por parte de los usuarios mediante la división entre los mismos de una o más de las variables de espacio, frecuencia o tiempo, lo que ha dado lugar a las técnicas de multiacceso, que se clasifican en función de la variable distribuida. Así en el acceso múltiple por división de espacio, SDMA (Space Division Multiple Access), característico de los sistemas celulares, se regulan las comunicaciones simultáneas que utilizan la misma frecuencia mediante su separación espacial. En el acceso múltiple por división de frecuencia, FDMA (Frequency Division Multiple Access), se efectúa la separación de las comunicaciones simultáneas que se producen en una misma zona mediante la asignación de frecuencias portadoras diferentes. Por último, en el acceso múltiple por división en el tiempo, TDMA (Time Division Multiple Access), se realiza la separación asignando distintos intervalos de tiempo a las comunicaciones que utilizan una frecuencia común en una misma zona. Estas técnicas de multiacceso se utilizan de forma combinada interviniendo, en todo caso, el SDMA. Por ejemplo, en los sistemas de telefonía móvil analógica de primera generación se usa SDMA/FDMA. En los de telefonía móvil digital (Segunda Generación: GSM) se emplea SDMA/FDMA/TDMA.

La separación espacial, necesaria para la reutilización de un recurso escaso como son las frecuencias radioeléctricas, no garantiza una inmunidad total frente a interferencia sino, únicamente, un control sobre esta perturbación, que se plasma en la superación de un valor umbral de la denominada relación protección cocanal, definida como el cociente señal deseada/perturbación cocanal:  $C/(I+N)$  donde C es la potencia de la señal deseada e I y N

representan las potencias de interferencia y de ruido, respectivamente. Como consecuencia, en los sistemas celulares, la relación distancia de reutilización / radio celular:  $D/R$  debe rebasar un valor mínimo del que depende, también el patrón de reutilización celular o número de emplazamientos que utilizan frecuencias diferentes.

En sistemas celulares trisectorizados el patrón es de la forma  $N/3N$  donde  $N$  es el número de ubicaciones ("sites") y  $3N$  el número de sectores, por lo que se requieren  $3N$  juegos de frecuencias distintas. En virtud de la geometría hexagonal utilizada para la planificación teórica de las redes móviles se tiene la fórmula (1.1):

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (1.1)$$

Para la telefonía móvil analógica, la relación de protección es igual a 18dB, lo que conduce a  $N=7$  y  $D=4.6R$ , siendo necesario habilitar 21 grupos de frecuencias diferentes. En GSM, gracias a la robustez digital frente a las interferencias, la relación de protección es de 9dB, lo cual permite que sea  $N=4$  y  $D= 3.64R$ . Es más aplicando funcionalidades específicas de GSM puede conseguirse  $N=3$  y  $D/R=3$  bastando 9 juegos de frecuencias para la red celular. Como se ve, la eficiencia espectral, o, alternativamente la capacidad, es función del patrón de reutilización.

La tecnología de acceso múltiple por división de código, CDMA (Code Division Multiple Access), se basa en un presupuesto totalmente diferente de los expuestos anteriormente. Aquí no solamente es posible, sino que se efectúa la superposición total de los volúmenes radioeléctricos producidos por los usuarios. Es decir, pueden transmitir simultáneamente, desde la misma zona y utilizando idéntica frecuencia portadora, con ocupación de la misma anchura de banda. En consecuencia, se genera una intensa interferencia mutua, por conjunto de señales mutuamente interferentes. Ello se realiza asignando a cada comunicación un código único, llamado secuencia código, que se combina con la información transmitida. De aquí, el nombre de esta técnica: división o distribución del código. Este conjunto de códigos constituye el recurso utilizado para la separación de diferentes comunicaciones

simultáneas que llegan al receptor. El código de cada usuario debe poderse distinguir de los códigos de otros usuarios, así como de versiones retardadas de sí mismo que se originan a causa de la propagación multitrayecto.

De lo anterior se deduce una primera ventaja de esta tecnología de multiacceso: todos los usuarios de una misma celda y de celdas contiguas pueden usar la misma frecuencia portadora. Suele denominarse a esta característica principio de reutilización y conlleva obviamente, una optimización en el uso del espectro radioeléctrico, la cual es muy conveniente dada la carestía de frecuencias existente.

En CDMA deben afrontarse y resolverse dos problemas fundamentales:

1. Separabilidad de las recepciones mediante los códigos de dirección de los usuarios.
2. Detección de las señales en un entorno de elevada interferencia.

La primera cuestión ha suscitado numerosos trabajos de investigación para el hallazgo de familias de códigos idóneos para su uso en CDMA. La resolución del segundo problema se ha cometido aplicando ideas de la moderna Teoría de Transmisión Digital, que auspician la transmisión de la información utilizando una gran anchura de banda y reducida densidad espectral de potencia, mediante la técnica del espectro ensanchado. De este modo, las señales CDMA vienen a ser un subconjunto del conjunto de señales de espectro ensanchado. En consecuencia, seguidamente, se efectuará una descripción del conjunto de señales de espectro ensanchado. En consecuencia, seguidamente, se efectuará una descripción general de estas señales, su generación y propiedades más reveladoras para aplicarlas después al multiacceso CDMA.



## 1.2 Espectro ensanchado

Se conocen como sistemas de espectro ensanchado aquéllos en los que el ancho de banda de las señales transmitidas es mucho mayor que el mínimo necesario para transportar la información. En este proceso de ensanchamiento, interviene una secuencia denominada código, secuencia de ensanchamiento o firma, que es independiente de la señal de información. Para recuperar esta última en el receptor es necesario conocer la secuencia código utilizada. El interés de los sistemas de espectro ensanchado reside en que a cambio de esa mayor ocupación espectral se consiguen importantes ventajas respecto a los sistemas convencionales.

El acceso múltiple por división de código se basa en la utilización de SS. Las señales se transmiten simultáneamente en la misma frecuencia portadora, y pueden separarse en el receptor gracias a las propiedades derivadas del ensanchamiento espectral. Las ventajas del acceso CDMA en sistemas móviles celulares respecto a las técnicas clásicas FDMA (Frequency Division Multiple Access) o TDMA (Time Division Multiple Access) se derivan de la mejor adaptación de las señales de espectro ensanchado a este tipo de entornos.

## 1.3 Tipos de técnicas

Existen varios tipos de técnicas de espectro ensanchado, que dan lugar a otras tantas variantes de CDMA:

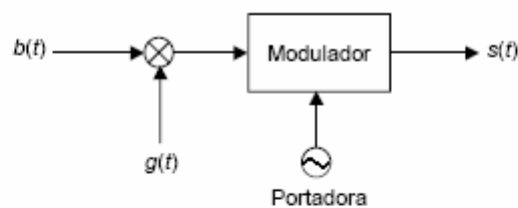
Técnicas de saltos en frecuencia (Frequency Hopping, FH), en las que la frecuencia de la portadora cambia con el tiempo según un patrón establecido.

Técnicas de salto de tiempo (Time Hoping, TH), en las que se varía el intervalo de transmisión dentro de una estructura de trama temporal.

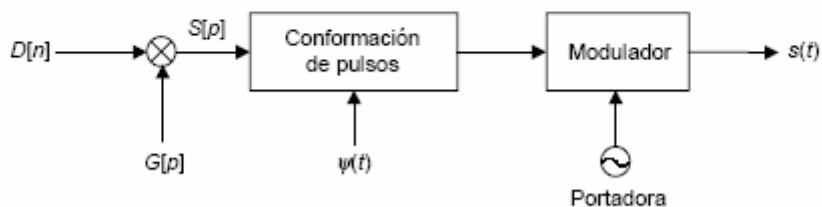
Técnicas de secuencia directa (Direct Sequence, DS), basadas en la multiplicación de la secuencia de bits original por una secuencia digital (chips) de velocidad mucho mayor.

Técnicas Multiportadora (Multi-Carrier, MC), en las que a partir de cada símbolo se genera un conjunto de chips, cada uno de los cuales modula una subportadora de frecuencia diferente.

La modalidad de secuencia directa es la más utilizada en sistemas de comunicaciones móviles CDMA, por lo que en lo sucesivo se considerará únicamente ésta. El proceso de ensanchamiento lo podemos apreciar en la Figura (1.1).



(a) Ensanchamiento DS mediante multiplicación de formas de onda



(b) Ensanchamiento DS mediante multiplicación de secuencias

**Figura 1.1: Transmisor DS-SS B-PSK**

## 1.4 Espectro ensanchado por secuencia directa

**Transmisor** El ensanchamiento por secuencia directa puede representarse mediante multiplicación directa de las formas de onda o mediante multiplicación

digital de secuencias bipolares de diferente velocidad. Se utilizará mejor el segundo caso por ser más próxima a la realización física.

$D[n]$  denota la secuencia de bits, con una velocidad de bit  $1/T_b$  y  $G[p]$  la secuencia código, con una velocidad de chip  $C$  veces mayor  $1/T_c$ , de modo que  $T_b = CT_c$ . La secuencia ensanchada  $S[p]$  se obtiene a partir de la fórmula (1.2):

$$S[p] = G[p]B\left[\frac{p}{C}\right] \quad (1.2)$$

Y la señal transmitida paso bajo equivalente viene indicada por la expresión (1.3):

$$s(t) = A \sum S[p] \Psi(t - pT_c) \quad (1.3)$$

Siendo  $A$  un factor de amplitud y  $\psi(t)$  el pulso de chip, que determina la forma del espectro de la señal.

**Factor de ensanchamiento y ganancia de procesamiento** Al número de chips por bit,  $C$ , se le llama factor de ensanchamiento, porque determina la relación entre el ancho de banda de la señal original  $d(t)$  y el correspondiente a la señal ensanchada  $s(t)$ , suponiendo en ambos casos la misma forma de modulación, Este factor se conoce también como ganancia de procesamiento, pues, bajo condiciones muy generales, representa la mejora de la relación señal/interferencia que es posible obtener mediante el uso de espectro ensanchado.

Usualmente, se emplea el término de “ganancia de procesamiento” con un significado más general, dado por la relación entre el ancho de banda de la señal ensanchada y la velocidad binaria de la señal original. La ganancia de procesamiento así entendida es un concepto menos preciso que el factor de ensanchamiento, ya que depende del criterio utilizado para definir el ancho de banda. No obstante, esta definición más general es útil en el análisis y descripción de los sistemas de espectro ensanchado y CDMA. En lo sucesivo se entenderá la ganancia de procesamiento como relación entre ancho de banda y velocidad binaria.

**Receptor** El receptor para señales de espectro ensanchado no difiere en esencia del empleado en sistemas convencionales. En un canal con ruido aditivo gaussiano blanco el receptor óptimo (coherente) es un filtro adaptado a la forma de onda esperada. En el caso de señales de espectro ensanchado, suponiendo que la señal recibida es una versión no distorsionada de la transmitida (canal sin dispersión), el filtro adaptado se puede descomponer en dos etapas: una multiplicación por la señal código  $g(t)$ , que deshace el ensanchamiento llevado a cabo en transmisión, seguida de una demodulación convencional, para el caso de BPSK. Análogamente a lo que sucedía en el transmisor, la recepción puede llevarse a cabo de forma equivalente mediante un filtro adaptado al pulso de chip seguido de una multiplicación, en tiempo discreto, por la secuencia código  $G[p]$ . Debe resaltarse que para poder llevar a cabo la multiplicación por la señal o secuencia código en recepción es necesario disponer de una réplica de la misma, sincronizada con la señal recibida.

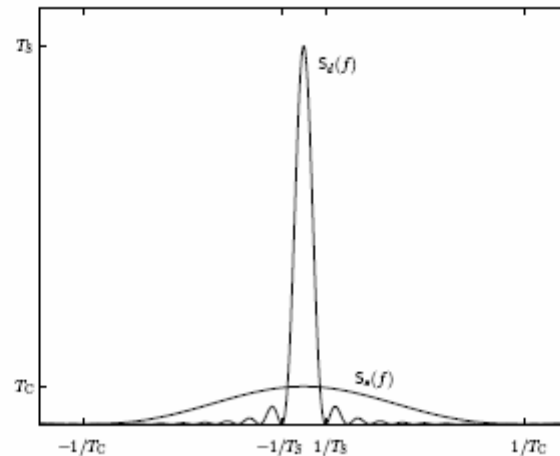
En canales con dispersión temporal, el filtro adaptado a la forma de onda recibida se realiza mediante un receptor RAKE, que aproxima la forma de onda esperada mediante varias ramas con diferentes retardos.

## 1.5 Ventajas de las técnicas de espectro ensanchado

### - Reducción de la densidad espectral de potencia

Como consecuencia del proceso de ensanchamiento espectral, la potencia de la señal se distribuye en una banda mucho mayor que la ocupada por la señal original, lo cual hace que la densidad espectral de potencia disminuya. Debido a la reducción de densidad de potencia, un receptor no autorizado tendrá dificultad para detectar la presencia de la señal, pues quedará enmascarada por el ruido de fondo presente en el medio. Mientras que una señal de banda estrecha, se observa en un analizador de espectros como un pico en torno a la frecuencia portadora, la señal de espectro ensanchado es mucho más difícil de detectar. El destinatario, en cambio, si puede, con el conocimiento de la secuencia código, recuperar la señal. Esta propiedad de

baja probabilidad de detección (Low Probability of Intercept, LPI) confiere a las señales de espectro ensanchado un elevado nivel de seguridad.



**Figura 1.2: Densidades espectrales en DS-SS**

En la Figura (1.2), se puede apreciar el espectro de la señal original y la misma señal ensanchada con un ancho de banda de  $1/T_c$  la inversa del periodo de chip. El ensanchamiento permitirá solucionar diversos problemas entre ellos el de posibles interferencias.

#### - Privacidad

La señal de información sólo puede ser recuperada si se tiene conocimiento de la secuencia código. Esto dificulta las escuchas no intencionadas, lo que constituye otra ventaja de este tipo de comunicaciones.

#### - Protección frente a interferencias

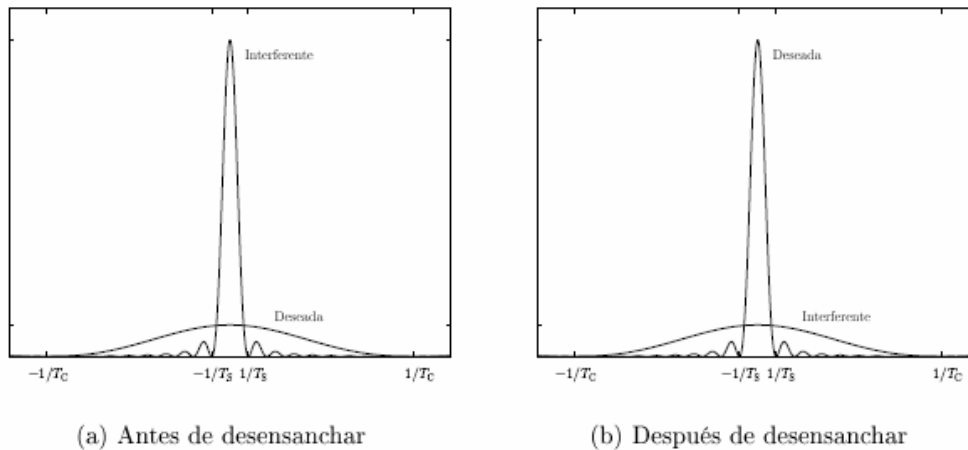
**Interferencias de banda estrecha** Considérese un sistema con modulación y ensanchamiento BPSK y pulsos de chip rectangulares, en el que se recibe la señal transmitida  $s(t) = A e^{j\Phi} d(t)g(t)$  acompañada de una señal interferente de banda estrecha  $i(t)$ . La fase  $\Phi$  de la señal útil puede considerarse nula, ya que el receptor (coherente) se engancha en fase a esta señal. En cada intervalo de señalización, el receptor con filtro adaptado, multiplica la señal recibida por la forma de onda o patrón esperado,  $g(t)$ , integra durante el periodo de símbolo considerado y toma la parte real (componente en fase) del resultado,

obteniendo la variable de decisión. La operación de multiplicación por  $g(t)$  produce el desensanchamiento de la señal deseada. Por el contrario, para la interferencia actúa como un ensanchamiento. Así, como resultado de este proceso, se obtiene la superposición de la señal deseada desenganchada y la interferencia ensanchada.

Habitualmente, se emplean secuencias código de apariencia aleatoria. Se utilizan para ello secuencias pseudoaleatorias (Pseudo-Noise, PN), que siendo reproducibles en el receptor, presentan un comportamiento estadístico similar al de una secuencia de variables aleatorias binarias equiprobables e independientes. Para una secuencia código de este tipo, considerando pulsos de chip rectangulares, y suponiendo (como ocurre siempre en la práctica) que la secuencia de bits de información tiene el mismo tipo de comportamiento aleatorio.

La señal total es procesada por un filtro adaptado a la señal deseada desenganchada, cuyo efecto es rechazar la mayor parte de la interferencia debido a que actúa para ésta como un filtro paso bajo (en el modelo paso bajo equivalente). Se obtiene así un grado de rechazo frente a la potencia de interferencia aproximadamente igual a la relación entre los anchos de banda antes y después de desenganchar, esto es, el factor de ensanchamiento  $C$ .

En general, si la secuencia código no tiene el comportamiento aleatorio mencionado antes, el grado de rechazo depende de la forma de la secuencia (en ese caso el análisis anterior únicamente sería aplicable de forma aproximada).



**Figura 1.3: Rechazo a interferencias en banda estrecha**

En la Figura (1.3), podemos observar como gracias al fenómeno de ensanchamiento, en el proceso de recuperación la señal interferente deja de afectar al sistema distribuyéndose por todo el espectro y disminuyendo la densidad espectral de la señal interferente.

Las interferencias que recibe el sistema pueden ser accidentales o intencionadas. Debido a la protección frente a interferencias inherente a las señales de espectro ensanchado, estos sistemas son muy difíciles de perturbar, y por tanto, muy seguros. Esta característica, junto con las de baja probabilidad de detección y privacidad, explica que las primeras aplicaciones de este tipo de sistemas surgieran en el campo de las comunicaciones militares.

**Interferencias de banda ancha** En general, para señales interferentes de banda ancha, la reducción de interferencia puede ser diferente de la que se tiene frente a señales no deseadas de banda estrecha. Se tienen los siguientes casos:

Para interferencias de ancho de banda similar al de la señal ensanchada,  $1/T_c$ , la señal interferente  $i(t)$  se mantiene ensanchada al multiplicar por  $g(t)$  en el receptor, y por tanto, es filtrada en el mismo, reduciendo su efecto sobre la señal deseada. El resultado es similar al que se obtiene en señales de banda estrecha. Para secuencias código aleatorias, es aplicable el mismo tipo de análisis que allí. En general, para una secuencia

código arbitraria, el rechazo de la interferencia será mayor o menor en función de las formas de onda. En el grado de rechazo, influyen tanto la forma de  $g(t)$  como la de la señal interferente  $i(t)$ , a través de la función de correlación cruzada entre las mismas (recuérdese que la operación básica que lleva a cabo el receptor es una correlación entre la señal recibida y la forma de onda esperada).

Si la señal no deseada tiene un ancho de banda mucho mayor que el de la señal ensanchada, es decir, es aproximadamente equivalente a ruido blanco, la multiplicación por  $g(t)$  no implica ninguna protección, ya que las características espectrales de dicho ruido no se ven modificadas en este proceso. La utilización de espectro ensanchado no proporciona ninguna protección frente al ruido blanco.

#### **- Resolución temporal y protección frente a multitrayecto**

En los canales de propagación encontrados en sistemas de comunicaciones móviles siempre está presente el fenómeno de multitrayecto, de modo que la señal recibida consiste en una superposición de réplicas de la señal transmitida con diferentes fases, amplitudes, retardos y desplazamientos Doppler. En sistemas convencionales estos ecos se combinan, dando lugar a variaciones importantes en el nivel recibido (desvanecimientos) y, en algunos casos, interferencia entre símbolos, con lo cual se degrada la calidad de recepción. Pero si se utilizan señales con una resolución temporal suficientemente fina, pueden separarse y combinarse coherentemente las componentes debidas al multitrayecto, reduciendo considerablemente estos dos problemas. Las señales de espectro ensanchado resultan especialmente indicadas para este fin.

Supóngase que al receptor llega la señal transmitida  $s(t)$  acompañada de una réplica retardada de la misma,  $Bs(t - \zeta)$ . Ésta constituye una interferencia  $i(t)$  de banda ancha para el desalineamiento  $\zeta$ . Esta dependencia pone un límite a la protección frente al multitrayecto: si los ecos se reciben muy próximos, con  $\zeta$  del orden del periodo de chip  $T_c$  o menor, la función de autocorrelación toma valores elevados y dichos ecos no pueden separarse, por lo que producirán fluctuaciones de nivel según interfieran de forma constructiva



o destructiva. Para que la autocorrelación entre los dos sea pequeña y por tanto, sean separables, éstos deben estar suficientemente espaciados en el tiempo. De acuerdo con esto, la resolución temporal, o capacidad de aislar componentes multitrayecto retardadas entre sí, viene determinada por  $T_c$ , es decir, por el ancho de banda de la señal.

## 1.6 Receptor RAKE

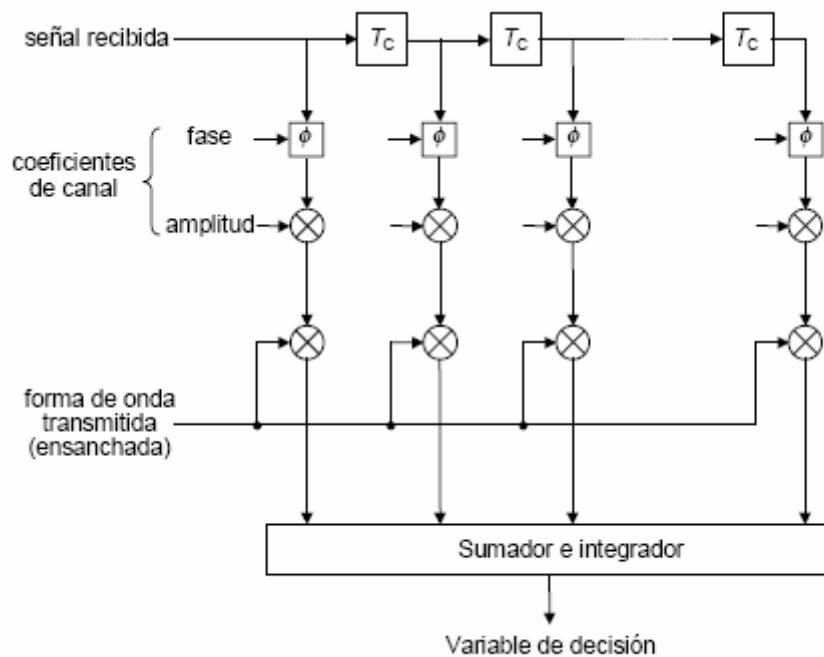
Debido a los fenómenos de multitrayecto y variación temporal, la forma de onda recibida es una versión distorsionada de la señal transmitida. Dado que el receptor óptimo es un filtro adaptado a la forma de onda recibida, éste debe adaptarse a las características del canal. El receptor RAKE, propuesto en 1958, lleva a cabo esta tarea. Además de cómo filtro adaptado a la forma de onda recibida, este tipo de receptor puede interpretarse como un sistema de diversidad por combinación, en el que las réplicas multitrayecto producidas por el canal pueden separarse en componentes con una resolución del orden del periodo de chip (realmente, la separación entre dichas componentes no es total, sino que existe un cierto grado de interferencia, determinado por las características de autocorrelación de la secuencia código utilizada). El receptor RAKE permite así combatir el efecto perjudicial del multitrayecto aprovechando las características de las señales de espectro ensanchado.

### - Estructura del receptor

Para su realización práctica, el filtro adaptado a la señal multitrayecto recibida se puede aproximar mediante un conjunto de réplicas con retardos múltiples del periodo de chip  $T_c$ . Esta discretización de los retardos está justificada por el ancho de banda limitado de la señal transmitida (teorema de muestreo), o equivalentemente por la resolución temporal finita con que el receptor puede distinguir las componentes multitrayecto.

La aproximación de la forma de onda recibida mediante una suma de componentes equiespaciadas exige estimar la amplitud y fase, o coeficiente de canal, correspondientes a cada una. Cada componente representa en realidad una réplica o un conjunto de réplicas recibidas con retardos similares, y que por

tanto, se detectan como una sola. El receptor RAKE consta de un conjunto de  $M$  ramas, en cada una de las cuales se calcula la correlación de la señal recibida con una réplica retardada de la forma de onda ensanchada. Las salidas de las  $M$  ramas se combinan para obtener la variable de decisión. La combinación consiste en compensar los desfases relativos y realizar una suma ponderada por la amplitud con que se recibe cada componente (se da más peso a las componentes que se reciben con mayor nivel), utilizando el conocimiento (estimación) de los coeficientes de canal. Esto sugiere la segunda interpretación mencionada, según la cual el receptor RAKE es un sistema de diversidad de orden  $M$  con combinación óptima (Maximal Ratio Combining, MRC), en el que diferentes réplicas de la señal se separan en virtud de las propiedades de auto-correlación de los códigos utilizados.



**Figura 1.4: Receptor RAKE**

En la Figura (1.4), podemos apreciar el verdadero comportamiento de un receptor RAKE, podemos ver como las diferentes réplicas mencionadas anteriormente se suman y en función del resultado se toma la decisión final.

## 1.7 Subsistemas de sincronismo y estimación de canal

En todo sistema de comunicaciones digitales, el receptor basado filtro adaptado debe incluir circuitos de recuperación de portadora y de sincronismo de símbolo. El primero es necesario para conocer la frecuencia y fase de la portadora, de modo que pueda hacerse una demodulación coherente. El segundo determina el instante en el que se muestrea la salida del correlador o filtro adaptado, que debe coincidir con el final del periodo de símbolo. En sistemas de espectro ensanchado en general, debe existir además un subsistema de sincronismo de código que permita alinear la señal código en el receptor con la señal recibida, de modo que pueda llevarse a cabo el desensanchamiento de ésta.

El proceso de sincronización de la señal código generada localmente con señal ensanchada recibida suele realizarse en dos etapas:

### - Etapa de adquisición, o sincronismo grueso

Se consigue una alineación con un error del orden del periodo de chip  $T_c$ . El funcionamiento de esta etapa se basa en las propiedades de autocorrelación de las secuencias código utilizadas y requiere que éstas se transmitan sin modulación, utilizando una secuencia de símbolos de entrenamiento conocidos por el receptor.

### - Etapa de seguimiento, o sincronismo fino

Trata de mantener el error de alineación lo más pequeño posible; habitualmente se realiza mediante un bucle de realimentación, que compara las dos señales y corrige las desviaciones entre ambas. Esta etapa sólo funciona correctamente si el error de entrada está acotado y comprendido en un margen reducido, normalmente  $\pm T_c/2$ . De ahí la necesidad de la etapa de adquisición.

Debe destacarse que el sincronismo de chip debe llevarse a cabo antes que la recuperación de portadora ( y por tanto de forma no coherente), ya que sin el sincronismo de chip no es posible desenganchar para elevar la relación señal/ruido a los niveles adecuados para recuperación de portadora y demodulación.

El receptor debe incluir también un subsistema de estimación de canal que proporcione los valores necesarios (estimados) de los coeficientes de canal que permiten llevar a cabo la combinación MRC de las salidas de las ramas. Para ello se utilizan normalmente símbolos piloto (conocidos por el receptor) intercalados en la señal. En los periodos entre símbolos piloto puede utilizarse la estimación correspondiente al grupo de símbolos más reciente o bien un método guiado por decisión que actualiza la estimación utilizando la información proporcionada por el demodulador para los símbolos de información. Es habitual, además, la realización de un filtrado de las estimaciones, con objeto de disminuir en lo posible el ruido de estimación, manteniendo una capacidad de seguimiento suficiente para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno de propagación.

#### **- Consideraciones prácticas**

La resolución temporal, a la hora de separar las componentes multitrayecto recibidas, está limitada por el periodo de chip, o por la anchura de banda. La utilización de receptores RAKE resulta útil siempre que la dispersión temporal del canal sea comparable o mucho mayor que el periodo de chip, pues sólo de esta forma el receptor puede reconocer componentes diferentes. Por ejemplo, en sistemas WCDMA (Wideband CDMA) el ancho de banda es del orden de 5 MHz, mientras que IS95 es de 1,25 MHz. El primero tiene por tanto mayor resolución temporal.

En ocasiones se emplea un tipo de receptor RAKE ligeramente distinto del que se ha descrito, en el cual los retardos entre ramas no son fijos sino adaptables en función de las características de actividad multitrayecto que presente el canal. Para ello se utiliza una rama adicional, denominada buscador, cuya misión es identificar (mediante correlación) retardos para los cuales existe una componente de señal significativa, que se asigna a una de las ramas demoduladoras. Ésta es la configuración empleada en el sistema IS-95, con tres (enlace descendente) o cuatro (Ascendente) ramas principales y un buscador. Obsérvese que la capacidad del receptor para distinguir réplicas multitrayecto está limitada en cualquier caso por la anchura de banda de la señal ensanchada.

Otra diferencia se deriva del uso que se hace de este receptor en sistemas celulares CDMA. Estos sistemas además de detectar las componentes multitrayecto de la señal deseada, se emplea para dar el sustento al mecanismo de traspaso con continuidad (sofá-hand-off) en el enlace descendente. Cuando el móvil se encuentra en situación de traspaso, diferentes ramas se encargan de detectar la señal transmitida desde bases distintas. Esto es equivalente a una situación de "multitrayecto artificial", en la que las réplicas de la señal no son producidas por el entorno de propagación, sino que proceden de estaciones base diferentes. En este caso, la secuencia código utilizada debe ser diferente en ramas asignadas a estaciones base distintas, y la separación entre las señales se logra gracias a las propiedades de correlación cruzada de los códigos. Evidentemente, el número máximo de bases desde las cuales el móvil puede recibir está limitado por el número de ramas del receptor.

## 1.8 Estructura del sistema

Existen dos formas de remodular una señal deseada en un sistema CDMA:

- Utilizando un receptor RAKE, o filtro adaptado a la señal deseada. Este enfoque, conocido como detección monousuario, se basa en el hecho de que el filtro adaptado es la forma óptima de demodular una señal en presencia de ruido blanco gaussiano, y equivale por tanto a considerar la superposición de señales interferentes como un ruido con estas características. Es un enfoque subóptimo, ya que demodula cada señal independientemente de las demás.
- Realizando una detección conjunta de todas las señales, a partir de las salidas de un banco de filtros adaptados a cada una de ellas. Esta forma de demodulación, denominada detección multiusuario, aprovecha y explota la estructura existente en las señales interferentes para mejorar la demodulación. Los receptores multiusuario pueden ser óptimos o subóptimos, según el procesamiento que se aplique sobre las salidas del banco de filtros.

Es importante destacar que el canal influye sobre la forma de señal transmitida a través de los fenómenos de variación temporal y multitrayecto. Para los demás usuarios, las señales se generan de la misma manera y se envían también a través del canal, de modo que la señal total a la salida de éste es la superposición de:

- La señal deseada, atenuada y distorsionada en su recorrido por el canal;
- Señales interferentes de los demás usuarios, que han sufrido un proceso similar en su paso por el canal;
- Ruido térmico, tanto captado por la antena como originado en el propio receptor.

#### **- Sistema CDMA con receptor monousuario**

En el receptor, el bloque “demodulador” desengancha y remodula la señal recibida. Estas operaciones se llevan a cabo mediante un receptor RAKE. El bloque secuencia código sincronizada con la señal recibida, para su utilización en el proceso de desensanchamiento.

#### **- Un sistema con receptor multiusuario**

Se diferencia del anterior en la estructura del receptor, el cual realiza una demodulación conjunta de todas ellas. Para ello requiere el conocimiento, y la sincronización de las secuencias código de todos los usuarios.

En los sistemas CDMA actuales, es habitual la utilización de receptores monousuario. La pérdida de prestaciones asociada se justifica por la falta de madurez tecnológica de las técnicas de detección multiusuario. Las técnicas de detección multiusuario se encuentran en una fase de desarrollo teórico y construcción de prototipos. Es de esperar que en los próximos años sean aplicadas a los sistemas celulares CDMA, con el consiguiente aumento de capacidad. Debido a su complejidad, el empleo de estas técnicas se prevé principalmente para el enlace ascendente, en que en cualquier caso la estación base debe demodular las señales de todos los usuarios; y sólo para las señales de usuarios asignados a esa base, ya que la incorporación de las señales de

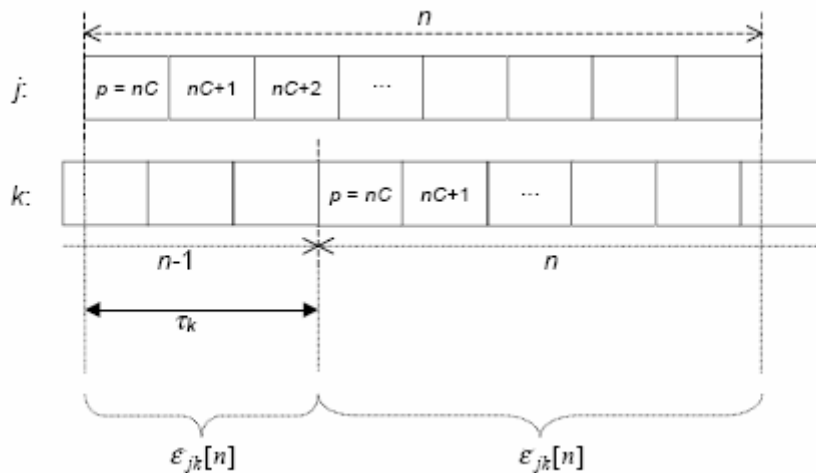
otras células exigiría una coordinación entre estaciones base y no supondría una mejora sustancial, al recibirse con niveles más reducidos.

### - Tipos de secuencias código

En general, en un sistema no ortogonal existe un término de interferencia por acceso múltiple  $I_j[n]$  no nulo. El valor de este término viene determinado por las secuencias código, secuencias de información y amplitudes de los usuarios interferentes, así como sus fases y retardos relativos al usuario de referencia. Los retardos serán aleatorios excepto en sistemas síncronos, en los que se fuerza que sean nulos. Análogamente, las fases relativas serán aleatorias, al igual que los bits de cada usuario. Los únicos aspectos del sistema sobre los que se puede actuar para controlar la interferencia son las amplitudes y secuencias código de los usuarios. Por el momento, se supondrán las amplitudes fijas; más adelante se discutirán los valores más adecuados para las amplitudes y la forma de alcanzar esos valores en un sistema real. A continuación, se comentan brevemente los aspectos relacionados con las secuencias código.

Existen dos criterios generales de diseño para las secuencias código en sistemas no ortogonales:

- Utilizar secuencias código cuasiortogonales, de forma que los términos  $\epsilon_{jk}[n]$  de interferencia tomen valores reducidos para cualesquiera retardos  $\tau_k$  y bits  $D_k[n-1]$  y  $D_k[n]$ .
- Elegir las secuencias código como secuencias pseudoaleatorias. En este caso no se tiene control sobre los valores de los términos de interferencia  $\epsilon_{jk}[n]$ , y sólo pueden considerarse estadísticamente.



**Figura 1.5** Secuencias código

En la Figura (1.5), se pone de manifiesto lo mencionado en los dos puntos anteriores de forma gráfica.

#### - Ganancia por asincronismo de chip

En el caso de un sistema síncrono  $\tau_k=0$ . El resultado anterior es aplicable tomando  $\gamma=1$  independientemente de la forma del pulso de chip. En el caso asíncrono, en cambio, se tiene  $\gamma<1$ , por lo que el sincronismo de chip implica un aumento de la interferencia; para pulsos rectangulares, el factor de aumento es de  $3/2$ . La conclusión es que el asincronismo de chip produce una ganancia respecto al caso síncrono igual según el factor  $\gamma$  calculado anteriormente. Este resultado puede interpretarse teniendo en cuenta que el asincronismo de chip da lugar a pulsos más estrechos en el tiempo respecto a un sistema con los pulsos de chip alineados, y por tanto, un ensanchamiento espectral adicional.

Problema cerca-lejos Las amplitudes de las señales deseadas e interferentes influyen de manera importante en la probabilidad de error obtenida. Un usuario que se reciba con un nivel excesivo producirá un aumento de la interferencia y por tanto, una degradación para los restantes usuarios. Este efecto se conoce como el problema cerca-lejos.

Para un sistema en el que todos los usuarios transmiten con la misma velocidad binaria, es fácil ver que a partir de las probabilidades de error se igualan cuando todos los usuarios se reciben con la misma amplitud. Visto de



otra forma, si imponemos la condición de que la probabilidad de error que experimentan los usuarios en el sistema no debe superar un cierto valor objetivo PB, el número de usuarios que pueden ser atendidos simultáneamente es máximo cuando todas las amplitudes recibidas son iguales. Por este motivo, en sistemas CDMA no ortogonales con receptor monousuario es fundamental controlar la amplitud de las señales recibidas de modo que se logren los valores objetivos. En general, en un sistema con múltiples clases de servicio, la solución óptima para las amplitudes será diferente, pero en cualquier caso queda clara la necesidad de controlar estos valores para asegurar unas condiciones de funcionamiento adecuadas. Esta necesidad implica un control muy estricto de las potencias de transmisión de los usuarios. Además, en un entorno celular el mecanismo de control debe ser dinámico para adaptarse a las condiciones cambiantes de propagación (desvanecimientos) y carga del sistema (entradas y salidas de usuarios).

## 1.9 Características de las redes celulares CDMA

La utilización de CDMA es la interfaz radio conlleva un conjunto de particularidades que distinguen a estos sistemas de los clásicos basados en FDMA o TDMA.

### - Control de potencia

El control de potencia es imprescindible en sistemas CDMA con receptores convencionales (monousuario), para evitar que la señal deseada sea enmascarada por otras señales recibidas con una amplitud mucho mayor (efecto cerca-lejos), en cualquier caso es necesario controlar la potencia de transmisión de cada señal, de modo que todas se reciban con un nivel objetivo, el cual depende de las características de cada comunicación (velocidad binaria, calidad deseada) y de las condiciones de propagación (dispersión temporal y ensanchamiento Doppler).

Los algoritmos de control de potencia pueden estar formados en medidas de potencia recibida o de relación señal/ruido (ruido + interferencia) (Signal to Interferente Ratio, SIR). La segunda opción es más complicada en cuanto a análisis y realización práctica, debido a que introduce una realimentación positiva entre las potencias transmitidas, pero en general, resulta más adecuada, ya que permite compensar las fluctuaciones de la señal deseada y de la interferencia.

En los sistemas celulares CDMA, el control de potencia se estructura en tres niveles o mecanismos diferenciados:

1. **Control de potencia en bucle abierto:** el receptor (estación base o móvil) estima la atenuación de propagación midiendo la potencia de la señal recibida, y en función de esa estimación determina la potencia de transmisión.
2. **Control de potencia en bucle cerrado:** la estimación en bucle abierto supone implícitamente que la atenuación es igual en ambos sentidos de transmisión. Sin embargo, cuando se utilizan frecuencias diferentes en los dos enlaces (FDD), debido a la selectividad en

frecuencia asociada a la propagación multitrayecto, las atenuaciones instantáneas en los dos sentidos son, en general, diferentes. La forma de corregir esta diferencia consiste en un proceso de realimentación negativa: el receptor (base o móvil) compara la SIR con el valor de referencia (determinado por el bucle externo), y según el resultado de la comparación ordena al transmisor (móvil o base respectivamente) incrementar o reducir la potencia. Habitualmente, estas correcciones se llevan a cabo en escala logarítmica con un paso fijo comprendido entre 0.5dB y 2dB por un periodo de orden de 1ms. Para enviar las órdenes de control de potencia se utilizan uno o varios bits reservados para este fin en cada periodo del bucle.

3. **Bucle externo:** este bucle determina, en función de las condiciones de propagación (dispersión temporal y dispersión Doppler), la SIR que debe utilizarse como valor de referencia en el control en bucle cerrado para lograr la calidad deseada. El ajuste de este valor de referencia se realiza estimando la calidad de la señal recibida y comparando con la calidad deseada.

El grado de importancia del control de potencia para el correcto funcionamiento del sistema depende del enlace considerado y del tipo de duplexión empleada:

- El control de potencia es más importante en el enlace ascendente que en el descendente. La razón es que en este último las señales multiplexadas transmitidas por una estación base se desvanecen simultáneamente, y por tanto, el control de potencia sólo debe contrarrestar el efecto de los desvanecimientos en la señal deseada (que pueden provocar una degradación en la calidad, si la señal llega a ser comparable al nivel de ruido) y los desvanecimientos de las señales de otras bases, que son independientes de la señal deseada. En cambio, en el enlace ascendente, el control debe contrarrestar, además de los dos tipos de variaciones anteriores, las fluctuaciones de nivel de las demás señales originadas dentro de la célula, ya que, al ser transmitidas desde lugares diferentes, dichas señales experimentan desvanecimientos independientes respecto a la deseada.

- El control de potencia es más sencillo en el caso de TDD que en FDD, ya que el uso de la misma frecuencia en los dos sentidos de transmisión implica que el desvanecimiento multitrayecto afecta de igual manera a ambos, y por tanto, la atenuación instantánea es la misma. De acuerdo con esto, en TDD únicamente aparecerán diferencias de atenuación entre los dos sentidos si la separación dúplex es grande comparada con el tiempo de coherencia del canal (velocidad de desplazamiento de los móviles elevadas). Como consecuencia, para TDD con tiempos de coherencia no muy pequeños puede prescindirse de control en bucle cerrado.

En el enlace descendente, cuando un móvil se encuentra en situación de traspaso, todas sus bases “activas”, es decir, todas aquellas que le están atendiendo, pueden transmitir señal destinada a dicho móvil. En caso de que este enlace utilice bucle cerrado (como sucede en UMTS), todas las bases implicadas deben recibir e interpretar las órdenes de control de potencia enviadas por el móvil. Para lograr un tiempo de respuesta pequeño en el bucle cerrado, las bases deben interpretar dichas órdenes de manera independiente unas de otras. En estas condiciones, los errores de demodulación pueden originar el fenómeno conocido como deriva de potencia (*power drifting*), según el cual las potencias medias transmitidas por cada base empiezan a divergir, alejándose excesivamente una de otra. Esta divergencia es perjudicial, ya que reduce la mejora por diversidad y dificulta el traspaso. Para evitarla, en UMTS se ha propuesto un mecanismo denominado *bucle de ajuste*, consistente en aplicar correcciones a las potencias transmitidas con un periodo mucho mayor que el asociado al bucle cerrado. Con ello se evita el fenómeno de deriva de potencia sin degradar el funcionamiento del bucle cerrado.

El sistema IS95 utiliza control de potencia en bucle abierto y en bucle cerrado en el enlace descendente, y bucle externo, abierto y cerrado en el ascendente. En el enlace descendente, la actualización se hace cada 20 ms en pasos de 0.5 dB, con un rango limitado a 12 dB. El control en el enlace ascendente es más rápido, con un periodo de 1.25 ms y un paso en torno a 1 dB. En el modo FDD del sistema UMTS, se utiliza control en bucle cerrado y

bucle externo, en ambos enlaces. En TDD se emplea control en bucle abierto y bucle externo en el enlace ascendente, y control en bucle cerrado y bucle externo en el enlace descendente. El control en bucle cerrado se lleva a cabo con un periodo de actualización de 0.667 ms y un paso de 0.5-2 dB en FDD. En TDD, el periodo depende de la asignación de intervalos en la trama temporal y el paso varía entre 1 y 3 dB.

### **- Compartición automática de carga**

La limitación por interferencia permite compartir los recursos radioeléctricos entre las células de manera eficiente y automática. En un sistema limitado por dimensiones con asignación rígida de canales, si una célula (o sector) B está en situación de congestión (todos los canales ocupados), cualquier intento de comunicación en B deberá ser rechazado, aunque existan canales libres en una célula vecina B'. Las técnicas de asignación dinámica de canales tratan de aliviar este problema, permitiendo una compartición o préstamo de canales entre células. Sin embargo, la utilización en B de un canal libre B' puede incidir negativamente en las demás células vecinas de B, lo que le resta flexibilidad a este mecanismo. En CDMA, en cambio, la compartición de los recursos se logra de forma natural: si la carga de B' disminuye, la interferencia a B también lo hará, con lo que B podrá aceptar más comunicaciones. En otras palabras, la situación de poca carga de B' beneficia a B.

Como consecuencia de esto, el número de canales en una célula no es fijo, sino que depende de la carga de las demás células del sistema.

Esta característica se puede interpretar en términos de un compromiso entre capacidad y cobertura ("cell breathing"): la cobertura de una célula depende de su carga, de tal forma que las células más cargadas "se encogen" cediendo parte de su carga a las células vecinas, con lo cual se logra un reparto más uniforme de la misma.

La compartición automática de carga, o compromiso capacidad-cobertura, implica una mayor capacidad, ya que hace un uso más eficiente de los recursos de la red celular, y constituye una de las ventajas fundamentales

de CDMA. Desde el punto de vista del diseño de la red, no obstante, supone mayor complejidad en las tareas de planificación radio y dimensionamiento.

### **- Protección entre los desvanecimientos por multitrayecto**

La utilización de señales de SS permite una elevada resolución temporal en el proceso de detección. Utilizando secuencias código con propiedades de autocorrelación adecuadas pueden separarse réplicas de la señal cuyas diferencias de retardo sean del orden del periodo de chip o mayores. Se utiliza para ello, un receptor Rake, que además lleva a cabo una combinación coherente de las componentes detectadas. Con ello se logra una cierta protección frente al efecto perjudicial del multitrayecto, ya que únicamente las réplicas con retardos comprendidos dentro de un intervalo de resolución (detectadas como una componente única) pueden interferir destructivamente. El grado de protección aumenta al disminuir el periodo de chip, ya que mejora la resolución temporal.

### **- Multiplexación de servicios**

Considérese una secuencia de bits que es ensanchada mediante multiplicación por una secuencia código pseudoaleatoria de velocidad  $N$  veces mayor. Es fácil ver que, para una velocidad de chip fija, la apariencia (características estadísticas y espectrales) de la señal ensanchada es independiente de la velocidad binaria antes de ensanchar. Esta propiedad permite combinar fácilmente servicios de diferentes velocidades binarias en la interfaz radio.

Por otro lado, en el caso de servicios de tasa binaria variable, el elevado ancho de banda utilizado permite multiplexar un gran número de comunicaciones en el enlace descendente. En estas condiciones, la ley de los grandes números implica una menor variabilidad de la velocidad binaria agregada, que redundará en una mayor eficiencia del sistema (*statistical multiplexing*).

## - Codificación de muy baja tasa.

El empleo de CDMA por una secuencia directa abre la posibilidad de utilizar técnicas de codificación de canal mucho más potentes que las usadas en sistemas tradicionales. En un sistema clásico (de banda estrecha), el empleo de un código de canal de tasa  $r$  aumenta la velocidad de transmisión en el canal, y por tanto el ancho de banda necesario, en un factor  $1/r$ . Por el contrario, en un sistema CDMA por secuencia directa, la independencia de las características espectrales de la señal ensanchada respecto de la velocidad binaria antes de ensanchar permite utilizar mecanismos de codificación de canal de muy baja tasa.

**La codificación de canal no aumenta el ancho de banda** Si tenemos una secuencia de bits de fuente  $B[m]$ , con velocidad binaria  $1/T_B$ , sobre la que se aplica un código de canal de tasa  $r$ , obteniéndose una secuencia codificada

$D[n]$  a velocidad binaria  $\frac{1}{rT_B}$ . Esta secuencia se multiplica por una secuencia

código  $G[p]$  a la velocidad de chip  $1/T_C$ . En total, la secuencia fuente ha sido

ensanchada en un factor  $N = \frac{T_B}{T_C}$ , que se puede expresar como producto de

- El inverso de la tasa de codificación,  $\frac{1}{r}$ , que representa el “ensanchamiento” llevado a cabo por el proceso de codificación de canal:
- El factor de ensanchamiento por secuencia directa aplicado sobre la señal codificada donde se cumple la igualdad  $C = \frac{rT_B}{T_C}$ .

De esta forma, es evidente que la codificación de canal no aumenta el ancho de banda como un sistema clásico, sino que simplemente reduce el factor de ensanchamiento por secuencia directa en un factor de  $r$ . En otras palabras, al aplicar codificación de canal se sustituye ensanchamiento por secuencia directa por “ensanchamiento” asociado a la codificación. Se puede interpretar la secuencia código como una portadora digital capaz de transportar una secuencia de bits de periodo múltiplo de  $T_C$ .

### - Ensanchamiento por secuencia directa visto como codificación de canal

Considérese la secuencia de bits  $D[n]$ , obtenida aplicando un código de canal de tasa  $r$  sobre la secuencia de bits de fuente  $B[m]$ . Conceptualmente, el ensanchamiento por secuencia directa según un factor  $C$  que experimenta  $D[n]$  puede descomponerse en dos pasos:

1. Repetición de los bits en un factor  $C$ , que aumenta la velocidad binaria de

$$\frac{1}{rT_B} \text{ a } \frac{C}{rT_B} = \frac{1}{T_C} \quad (1.4)$$

2. Multiplicación chip a chip por la secuencia código.

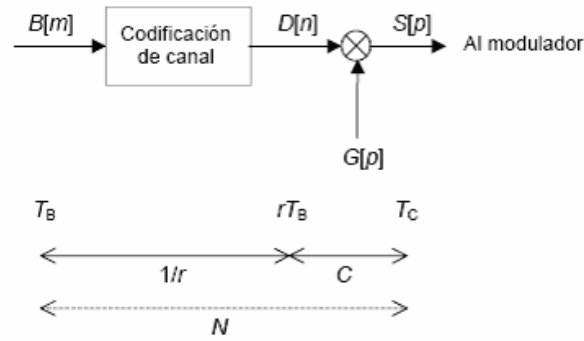
Esta interpretación en dos etapas equivale a expresar (1) definiendo una secuencia auxiliar  $D_r[p]$  de la siguiente forma:

$$D_r[p] = D\left[\frac{p}{C}\right] \quad (1.5)$$

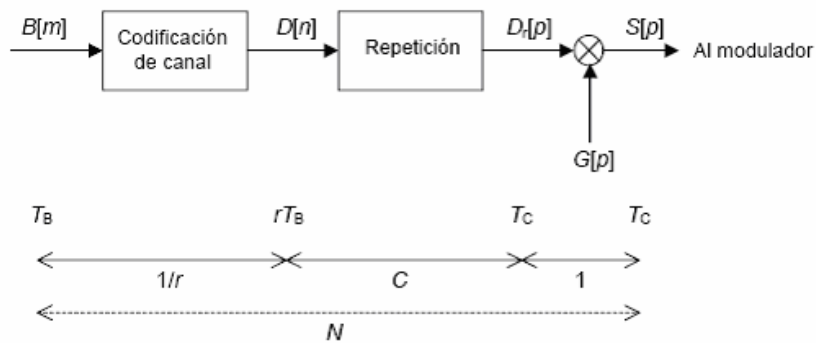
$$S[p] = D_r[p]G[p] \quad (1.6)$$

Desde esta perspectiva, el ensanchamiento por secuencia directa equivale a una segunda etapa de codificación, consistente en un simple código de repetición de tasa  $1/C$ . Este código de repetición y la etapa anterior de codificación de canal propiamente dicha constituyen un código concatenado de tasa  $r/C=1/N$ . De acuerdo con esta interpretación, las prestaciones pueden mejorarse sustituyendo la etapa de repetición, o el código concatenado, por códigos de canal más potentes. Puede concluirse que siempre es ventajoso, en términos de probabilidad de error, sustituir ensanchamiento por secuencia directa por codificación de canal, utilizando códigos de menor tasa, hasta llegar al caso extremo en que  $r=1/N$  y  $C=1$  (velocidad de los bits codificados igual a la de chip). A este procedimiento se le denomina ensanchamiento por código. (*code spreading*).

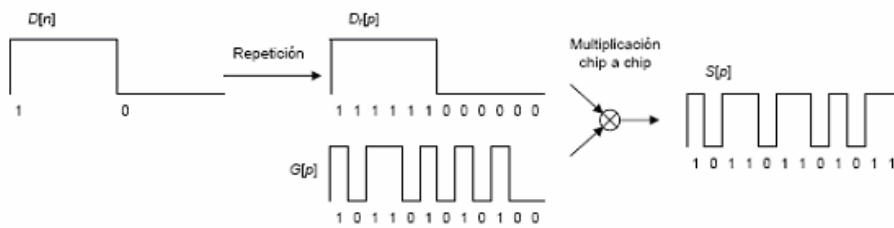




(a) Diagrama de bloques



(b) Representación equivalente



(c) Secuencias que intervienen en (b)



(d) Sistema clásico sin codificación de canal



(e) Sistema clásico con codificación de canal



(f) Sistema CDMA sin codificación de canal

**Figura 1.6: Mecanismos de traspaso (Umbrales relativos)**

En la Figura (1.6), puede observarse claramente a través del diagrama de transición los pasos seguidos para llevarse a cabo la codificación. Mientras que en las señales que aparecen al final de la figura, se muestra como es la señal en el dominio temporal y frecuencial realizándose una comparativa entre la utilización de codificación de canal y la ausencia de su utilización en el sistema.

Debe observarse, sin embargo, que algunas de las características del proceso de recepción, en la forma en que éste se lleva a cabo habitualmente, dependen del ensanchamiento espectral por secuencia directa, ya que se basan en las propiedades de correlación de las señales recibidas. Tal es el caso de la ortogonalización de canales, la sincronización de código o separación de las réplicas multitrayecto en el receptor RAKE. Conforme se reduce el ensanchamiento por secuencia directa (a favor de la codificación de canal), el funcionamiento de estas técnicas se va degradando, al hacerlo las propiedades de correlación de las señales. La solución pasa por modificar dichas técnicas de acuerdo con el proceso global de ensanchamiento que sufre la señal, es decir, incorporar en las mismas la estructura de la codificación de canal.

### - Códigos de canal utilizados en sistemas CDMA

En los sistemas de comunicaciones móviles digitales es habitual la utilización de un código corrector y un código detector de errores, que suelen ser de tipo convolucional y bloque respectivamente.

En el enlace descendente del sistema IS95, se utiliza un código convolucional de tasa  $\frac{1}{2}$  ó  $\frac{3}{4}$ , dependiendo del canal considerado, junto con un código bloque de redundancia cíclica (*Cyclic Redundancy Check*, CRC). Éste último sirve, además de como detector de errores, para discriminar la velocidad de información en los canales de tráfico (la cual varía dinámicamente con la actividad del hablante, en el caso de transmisión de voz). En el enlace ascendente, se emplea un código convolucional de tasa  $\frac{1}{3}$  ó  $\frac{1}{2}$  y un código CRC. Se utiliza además una modulación de 64 símbolos ortogonales en el tiempo basada en secuencias de Walsh.

En UMTS se emplean, dependiendo del canal de transporte, códigos convolucionales de tasa  $\frac{1}{2}$  ó  $\frac{1}{3}$  o turbo-códigos de tasa  $\frac{1}{3}$ , y además CRC.

### - Planificación de sistemas celulares CDMA

#### - Diferencias respecto a la planificación clásica

En general, el objetivo de la planificación radio de una red celular es determinar el número, ubicación y parámetros radioeléctricos de las estaciones base que permiten dar servicio adecuadamente, en términos de cobertura, capacidad y calidad, a una determinada zona.

El proceso de planificación radio de sistemas celulares CDMA presenta diferencias importantes respecto a la planificación clásica, esto es, de sistemas limitados por dimensiones. El origen de estas diferencias es que, debido al carácter limitado por interferencia de CDMA, los aspectos de cobertura y capacidad están íntimamente relacionados. El límite de capacidad, o de cobertura, se produce cuando la interferencia producida en el sistema supera un valor máximo tolerable. De este modo, la “carga” que un usuario supone

para el sistema (capacidad) está representada por la interferencia que éste produce sobre los demás, la cual es dependiente de la posición (cobertura). Este hecho, que constituye (junto al principio de diversidad de interferencia) la base de gran parte de las ventajas de los sistemas CDMA sobre los convencionales, conlleva, no obstante, una mayor complejidad en el diseño y planificación de la red. Así, mientras que en sistemas convencionales, se pueden calcular de forma independiente la cobertura y la capacidad de cada célula (la primera viene determinada por los parámetros de los equipos y las características de propagación, mientras que la segunda depende únicamente del número de canales de tráfico de los que disponga), en CDMA ambas características deben analizarse conjuntamente, debido a la dependencia entre ambas.

#### **- Etapa de planificación**

La relación entre capacidad y cobertura complica notablemente la planificación. Los métodos de planificación clásicos basados en balances de enlace, no describen adecuadamente la variación dinámica de la cobertura con la carga de la red, siendo necesario en la mayoría de los casos recurrir a la simulación. Como consecuencia, la planificación de sistemas CDMA se suele llevar a cabo en dos etapas: para un dimensionamiento inicial, es habitual la utilización de balances de enlace en los que algunos parámetros se obtienen externamente mediante simulación o medidas de otras redes; posteriormente, puede realizarse una planificación detallada basada en simulación.

En la primera etapa, se fija la carga prevista para cada célula y se determina la atenuación compensable, que se utiliza para determinar la cobertura de cada estación base. Esta etapa puede realizarse mediante tablas de balances de enlace y herramientas informáticas de planificación clásicas, y proporciona un resultado aproximado. En concreto, los siguientes aspectos se modelan en el balance de enlace mediante parámetros obtenidos externamente, a partir de medidas o simulaciones:

- El efecto de la interferencia producida por las demás células de sistema sobre una dada;
- La ortogonalidad parcial en el enlace descendente;

- El porcentaje de potencia que es necesario reservar para canales de control y para móviles en traspaso en el enlace descendente;
- La relación entre la potencia media por usuario y la potencia transmitida a un usuario situado en el borde de la célula en el enlace descendente;
- Efectos del bucle cerrado de control de potencia.

El análisis del enlace descendente es más complicado que el del ascendente, debido a la dependencia de los parámetros indicados con la posición de los móviles.

En la segunda etapa se evalúa mediante simulación el resultado de la planificación aproximada anterior, y si es necesario se realizan ajustes o modificaciones. Esta etapa permite un análisis más detallado sobre el comportamiento de la red con unos parámetros de planificación determinados, incluyendo los efectos de la variación aleatoria de la carga en la red, el funcionamiento no ideal del control de potencia y la mezcla de diferentes tipos de tráfico.

## **2. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) en autopistas**

### **2.1 Introducción**

Para la realización del estudio nos basaremos en el estándar CDMA. Este se caracteriza por tener interferencia limitada, así que reduciendo las interferencias conseguiremos incrementar la capacidad. Existen tres técnicas para reducir las interferencias: Control de Potencia (PC), que es esencial para el Uplink y puede duplicar la capacidad de DownLink, monitoreo de la actividad de voz, que puede incrementar la capacidad en un 50% y la sectorización que puede duplicar la capacidad de las macroceldas utilizando tres sectores.

Sabemos que la forma de una microcelda urbana sigue el patrón de la forma de una calle; fundamentalmente serán micro celdas con forma de Cigar-Shaped (forma de cigarro coloquialmente dicho).

Las características que describen las microceldas utilizadas en entornos rurales para autopistas son las siguientes:

- El número de sectores direccionales de las micro celdas Cigar-Shaped es dos y se utiliza una antena direccional en cada sector.
- Cada sector tiene un rango de 1 a 1.5 km.
- La velocidad del usuario en zonas rurales puede alcanzar los 120 km/h (El usuario podrá desplazarse en coche o en tren).

Para demostrar el rendimiento de la utilización de CDMA en microceldas de autopistas o carreteras en zonas urbanas, se recurrió a un modelo que no tenía en cuenta la varianza intracelular de la interferencia.

Para el estudio de la capacidad en carreteras en zonas rurales, se utilizará WCDMA (wide band code division multiple access). Un modelo de propagación a seguir es aquel formado por dos pendientes con diferentes exponentes de propagación  $s_1$  y  $s_2$ , en el que se tiene en cuenta el fenómeno de shadowing. Se asume una distribución de los usuarios uniforme. Para

interferencia intracelular consideramos varianza cero y un control de potencia perfecto. Para interferencia extracelular se asume control imperfecto de potencia.

## 2.2 Control de Potencia

El control de potencia es imprescindible en CDMA cuando se utiliza el receptor convencional de correlación o el filtro adaptado a la señal deseada, para evitar que ésta resulte afectada en exceso por la interferencia producida por señales recibidas con más intensidad (efecto cerca-lejos) puesto que la potencia emitida por un usuario para su enlace es interferencia para los demás.

El objetivo del control de potencia es que, en el enlace ascendente móvil-base, las señales se reciban con un nivel similar e igual a un valor objetivo que depende de la calidad requerida para cada comunicación y las condiciones de propagación. El control de potencia debe asegurar un equilibrio entre la interferencia producida y sufrida (la interferencia siempre es bilateral).

Si un móvil llega con alto nivel a la base, la calidad de su comunicación será muy buena, pero interferirá en exceso y producirá una merma de la calidad de recepción de otros móviles.

El algoritmo de control de potencia puede estar basado en la medida de potencia recibida o en la relación señal/interferencia. Esta última opción es más efectiva, por lo que es la que se utiliza habitualmente.

## 2.3 Modelo de propagación

Es un modelo basado en la propagación sobre la tierra plana en el que están presentes dos exponentes de propagación diferentes, en los cuales, para cada uno de los dos tramos, se dará el valor medio de pérdidas de propagación más el efecto de shadowing que se presenta por una distribución log-normal.

El exponente de propagación del primer tramo se denomina  $s_1$  y está presente hasta el punto de corte conocido también como  $R_b$ , a partir de este punto pasamos a hablar del exponente de propagación  $s_2$ .

Como veremos a lo largo de todo el desarrollo del PFC, las pérdidas ocasionadas serán un aspecto muy relevante en el estudio de la capacidad del número de usuarios. A ello hay que añadir el estudio de la región de cobertura (llamado también  $R$  en los numerosos análisis llevados a cabo).

En primer lugar basándonos en las fórmulas (2.1) y (2.2), hablaremos de las pérdidas básicas de propagación [3].

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + \xi_1 \quad \text{si } r \leq R_b \quad (2.1)$$

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + \xi_2 \quad \text{si } r > R_b \quad (2.2)$$

Las pérdidas básicas y  $R_b$  vienen dadas por las siguientes fórmulas:

$$L_b(dB) = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10s_1 \log_{10}(R_b) \quad (2.3)$$

$$R_b \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (2.4)$$

$h_b$  es la altura de la antena de la estación base.

$h_m$  es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\xi_1$  y  $\xi_2$  son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente. A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar para microceldas del tipo Cigar-Shaped:

$$s_1 = 1.5 \text{ a } 2.5$$

$$s_2 = 3.5 \text{ a } 4.5$$

$$\sigma_1 = 2.5 \text{ a } 3.5 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 5.5 \text{ a } 6.5 \text{ dB}$$

## 2.4 Análisis de Uplink

El esquema a seguir para la realización de los cálculos está basado en un modelo formado por cinco celdas, donde se hace un análisis detenidamente de la capacidad en el Uplink. Es importante destacar que cada microcelda controla la potencia transmitida de cada uno de los usuarios.



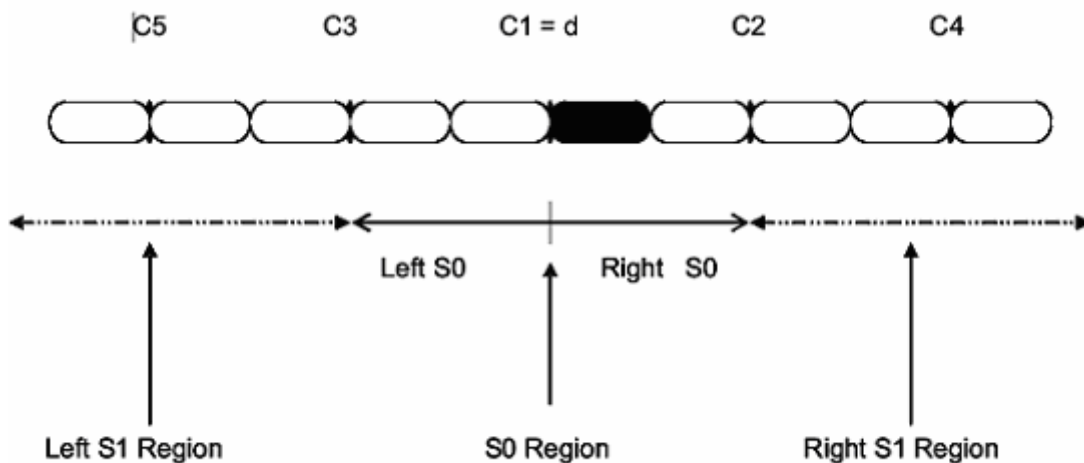
Para mayor claridad, dividiremos la interferencia total en dos grandes bloques [3]:

- Interferencia intracelular.
- Interferencia extracelular.

El rango de cada sector o región de cobertura vendrá definido por el parámetro R. Para la realización de los siguientes cálculos, se utilizará la notación de  $r_{im}$  y  $r_{id}$ , siendo  $r_{im}$  la distancia de la estación base bajo estudio al móvil, y  $r_{id}$  la distancia de la estación base interferente al móvil.

Asumimos que cada usuario se conecta a una de las dos estaciones base más cercanas que le proporcione mejores características. Se asume una densidad uniforme de usuarios que sigue la siguiente fórmula  $d = \frac{N_u}{R}$ .

Presumimos de una probabilidad de desbordamiento del 1% y que la capacidad de los sectores es calculada para esta probabilidad.



**Figura 2.1: Modelo de interferencia formado por 5 microceldas.**

Con estas dos Figuras (2.1) y (2.2), se pretende explicar de una manera más clara la situación en la cual nos encontramos. En cada uno de los diez sectores, el diagrama de radiación estará formado por un lóbulo principal y lóbulos secundarios, que se medirán con el parámetro de nivel de lóbulos secundarios.

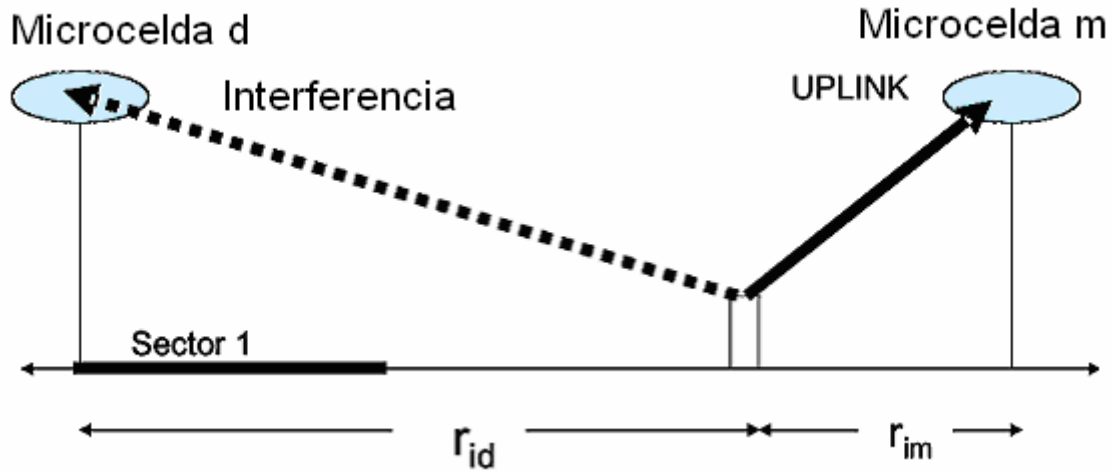


Figura 2.2: Microcelda “d” a la que generará interferencia y Microcelda “m” con la que establecerá comunicación.



Figura 2.3: Ejemplo de autovía donde se puede llevar a cabo el estudio

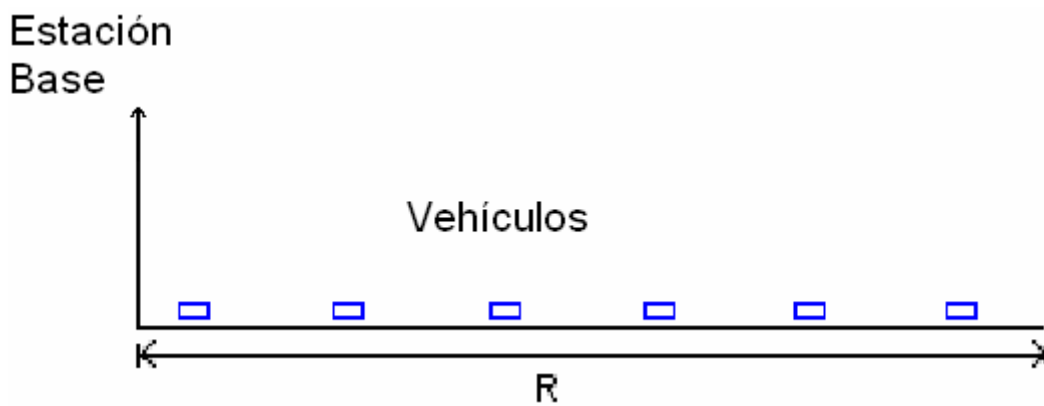


Figura 2.4: Distribución de vehículos colocados separadamente

En nuestros cálculos tendremos en cuenta que pueda existir más de un carril para cada sentido de desplazamiento como podemos observar en una de las figuras anteriores.



**Figura 2.5: Entornos rurales donde el tráfico cursado es menor**

Los lugares modelo bajo estudio se pueden observar en las Figuras (2.3) y (2.5).

La situación a analizar sería aquella en la cual existen tres carriles o dos en cada sentido por el cual puedan circular vehículos. En este tipo de carreteras la capacidad de número de usuarios no tiene porqué ser tan alta, traduciéndose en una inversión menor que la que se pueda realizar en una autopista.

## 2.5 Conexión del usuario a la estación base

A continuación se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. En el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco microceldas.

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (2.5)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces por la expresión (2.6)

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_2 - s_1)} \left( \frac{r_{im}^{s_1}}{r_{id}^{s_2}} \right) \quad (2.6)$$

- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces por la expresión (2.7)

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_1 - s_2)} \left( \frac{r_{im}^{s_2}}{r_{id}^{s_1}} \right) \quad (2.7)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces por la expresión 2.8

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (2.8)$$

$\xi_{id}$  y  $\xi_{im}$ , poseen las relaciones de:

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_2$
- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_2$

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) = \begin{cases} 1, \rightarrow L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, \rightarrow \text{resto} \end{cases} \quad (2.9)$$

Se asume una densidad uniforme de usuarios en cada sector  $\rho_s = \frac{N_u}{R}$  [3].

Cabe destacar, que las medidas más utilizadas serán la esperanza y la desviación estándar.

Para el servicio s el valor de esperanza de la interferencia ocasionada por la parte derecha de la región S0 viene dada por la fórmula (2.10)

$$E[I_{S0}]_r \approx \alpha_s \rho_s \int_{s0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) dr \quad (2.10)$$

donde a su vez la expresión (2.11) es:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right] = \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1 / L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

$\beta = \left( \frac{\ln 10}{10} \right)$ , siendo  $\alpha$  el factor de actividad (0.63 para voz y 1.0 para datos).

A continuación hallaremos una relación para  $\sigma^2$  en las fórmulas (2.12), (2.13) y (2.14):

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad (2.12)$$

- Cuando  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  o  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad (2.13)$$

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_2$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \quad (2.14)$$

La función  $Q(x)$  vale

$$Q(x) = \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv / \sqrt{2\pi} \quad (2.15)$$

A continuación, se hará un análisis detenido de la esperanza referida a las interferencias intercelulares e intracelulares como medida de estas.

El valor de esperanza de la interferencia ocasionada por la parte derecha de la región S1.

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s1} L(r_{id}, r_{im}) E[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}] dr \quad (2.16)$$

Por lo tanto

$$E[I]_{r,s} = E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s} \quad (2.17)$$

La señal de interferencia de la parte izquierda de las zonas S0 y S1 llega a la antena del sector bajo estudio gracias a los lóbulos secundarios. Por eso la expresión (2.18) viene dada por:

$$E[I]_{\text{int } er, s} = E[I]_{r, s} (1 + SII) \quad (2.18)$$

Potencia interferente intercelular:

$$E[P]_{\text{int } er, s} = P_{r, s} E[I]_{\text{int } er, s} \quad (2.19)$$

Potencia interferente intracelular:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} (1 + Sll) \quad (2.20)$$

Potencia interferente final:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (2.21)$$

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^M E[P_{intf}]_{t,s} \quad (2.22)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación expresaremos las fórmulas correspondientes a la varianza directamente relacionadas con la desviación estándar [3].

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} dr \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right]^2 = \\ &= e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (2.24)$$

Donde las expresiones (2.25 y (2.26) se utilizarán en las fórmulas posteriores:

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (2.25)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (2.26)$$

La varianza de señal interferente debido a la región S<sub>1</sub> para la fórmula (2.27):

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}\right]^2 - q \alpha_s^2 E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}\right] \right\} dr$$

Varianza de la interferencia intercelular:

$$\text{var}[I]_{inter,s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\} (1 + Sll) \quad (2.28)$$

Varianza de interferencia intracelular:

$$\text{var}[I]_{int ra,s} = Nu (1 + Sll) (p \alpha_s - q \alpha_s^2) \quad (2.29)$$

Varianza de interferencia total:

$$\text{var} [I]_{t,s} = \text{var} [I]_{\text{inter},s} + \text{var} [I]_{\text{intra},s} \quad (2.30)$$

Varianza de la potencia total interferente:

$$\text{var}[P]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (2.31)$$

La varianza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$\text{var}[P_{\text{int f}}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (2.32)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

Por otra parte, exponemos la fórmula correspondiente a la probabilidad de desbordamiento de vital importancia en cada uno de los estudios realizados a lo largo de todo el proyecto [3].

$$P_{out} = Q \left[ \frac{E(P)_{t,s|N_u = N_{uMEDIO}} - E(P)_{t,s|N_u = N}}{\sqrt{\text{var}(P)_{t,s|N_u = N}}} \right] \quad (2.33)$$

Finalmente, el factor F que representa el valor de relación entre la interferencia intercelular e intracelular viene dado por la fórmula (2.34):

$$F = \frac{\text{Interferencia Intercelular}}{\text{Interferencia Intracelular}} = \frac{E[P]_{\text{inter},s}}{E[P]_{\text{intra},s}} \quad (2.34)$$

**Parámetros utilizados:**

$$G_{pvoz}=256$$

$$G_{pdataos}=26.66$$

$$SLL=-15 \text{ dB}$$

$$\text{freq} = 1950 \text{ MHz}$$

$$\alpha_{voz} = 0.63$$

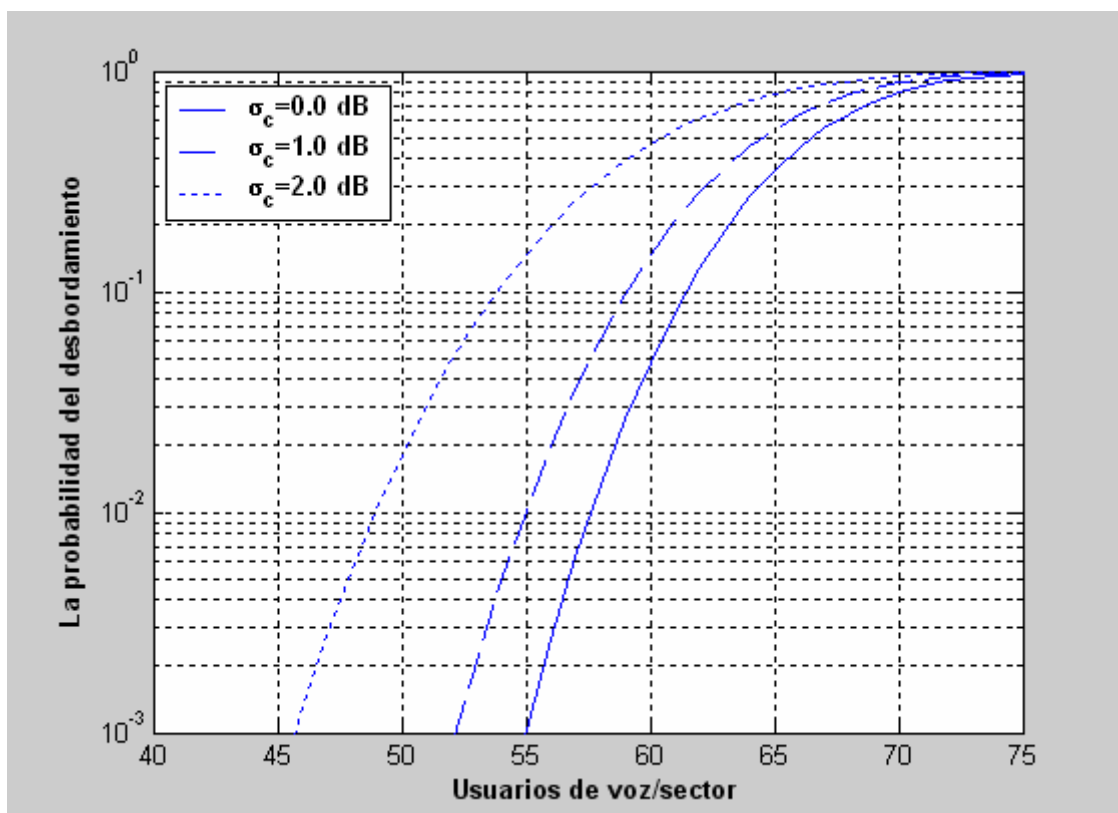
$$\alpha_{datos} = 1.0$$

$$s_1=2.0;$$

$$s_2=4.0;$$

$$\sigma_1=3.0;$$

$$\sigma_2=6.0;$$

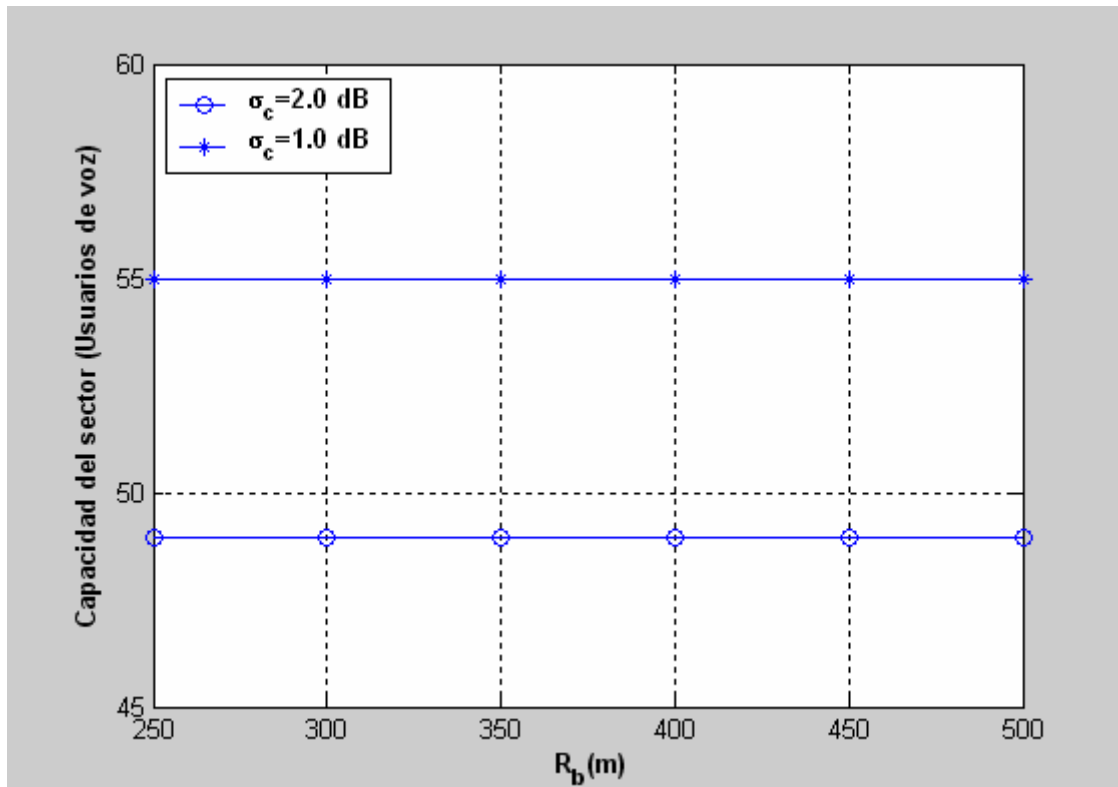
**2.6 Análisis genérico (Sin limitación de potencia máxima)****2.6.1 Análisis numérico para voz**

**Figura 2.6: Probabilidad de desbordamiento del sector en sistema sin limitación de potencia máxima**



Si analizamos la Figura (2.6), podremos observar como conforme  $\sigma_c$  es mayor, la capacidad en cuanto a número de usuarios será menor. Esto se debe a que el control de potencia establecido en el Uplink se empeora conforme este término aumenta.

El resultado obtenido se consigue considerando un sistema sin limitación de potencia lo cual, se va a ver traducido en una mayor capacidad respecto al sistema posterior en el cual, se limitará la potencia máxima. Por tanto, lo hemos estudiado con el fin de comprobar que se produce un aumento de la capacidad, pero puede implicar un uso excesivo de potencia que se puede traducir en interferencias y en un uso menos eficiente de los recursos disponibles.

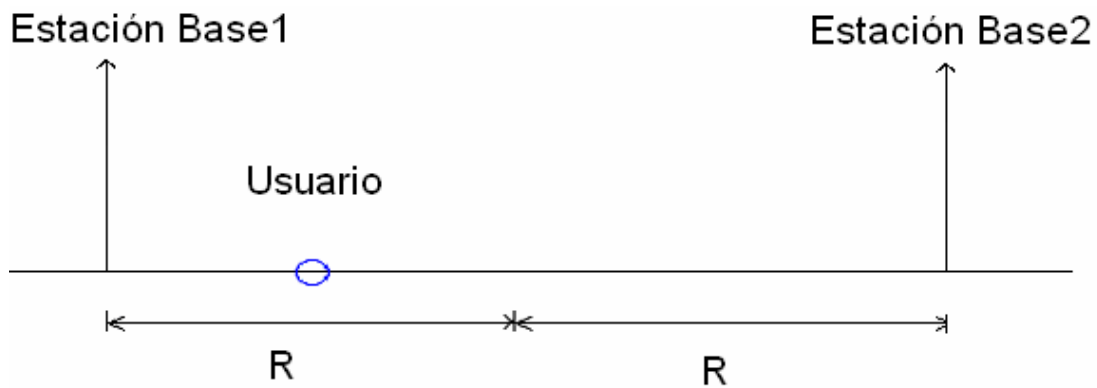


**Figura 2.7: Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia máxima en función del punto de corte**

Podemos observar desde otro enfoque en la Figura (2.7), como un incremento de  $\sigma_c$  vuelve a reducir la capacidad en la celda bajo estudio. Por otra parte, la capacidad no varía aunque el valor del punto de corte se vea incrementado.

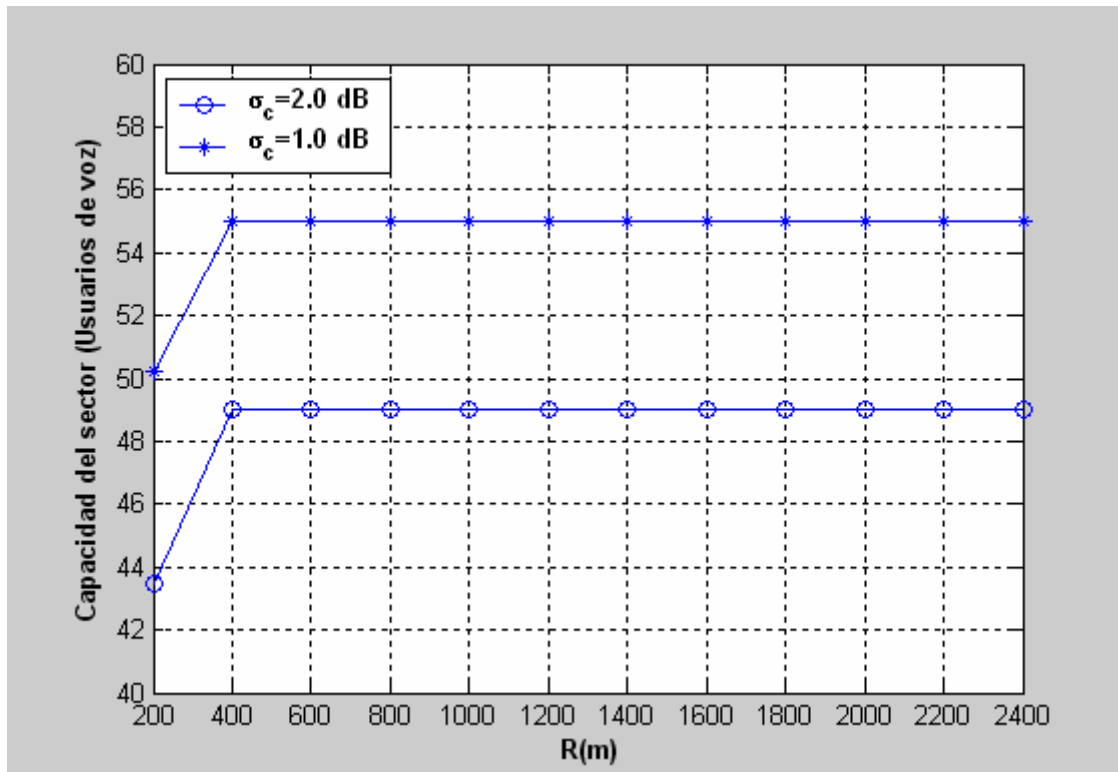
Cuando se llevaron a cabo las mediciones, el número de usuarios oscilaba en  $\pm 0.01\%$  de diferencia entre un punto y otro, aspecto relevante que en la gráfica apenas se puede apreciar.

La situación por la cual la capacidad permanece invariante se debe a que el punto de corte posee un valor inferior a la mitad del radio de trabajo de 1000 metros.



**Figura 2.8: Representación para un usuario entre dos estaciones base**

Como podemos observar en la Figura (2.8),  $R$  corresponde al radio de cobertura de la célula bajo estudio. Los usuarios se encontrarán dentro de un área para un  $R$  establecido, que a continuación iremos variando para observar los efectos producidos. Un valor de la región de cobertura mayor que el punto de corte dará unos valores de capacidad mayores.



**Figura 2.9: Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia máxima en función de la región de cobertura**

Nuevamente, en la Figura (2.9), se puede observar como para una desviación sigma mayor la capacidad en cuanto a número de usuarios desciende significativamente.

Por otra parte, podemos apreciar como para un radio entre 200 y 400 metros la capacidad aumenta linealmente y como al llegar a los 400 metros aproximadamente se estabiliza obteniéndose un resultado bastante similar para un radio de 2000 metros que de 400 metros.

En cálculos sucesivos, en los que se tenga en cuenta una limitación de potencia, los resultados esperados en cuanto a capacidad serán algo diferentes.

Hasta ahora, se ha analizado un caso teórico en el cual la limitación de potencia no se tiene en cuenta. Un cálculo teórico más realista será tenerlo en cuenta.

En este apartado, se han modificado los dos coeficientes de propagación, en dos gráficas diferentes con el fin de ver como afectan cada uno de ellos por separado.

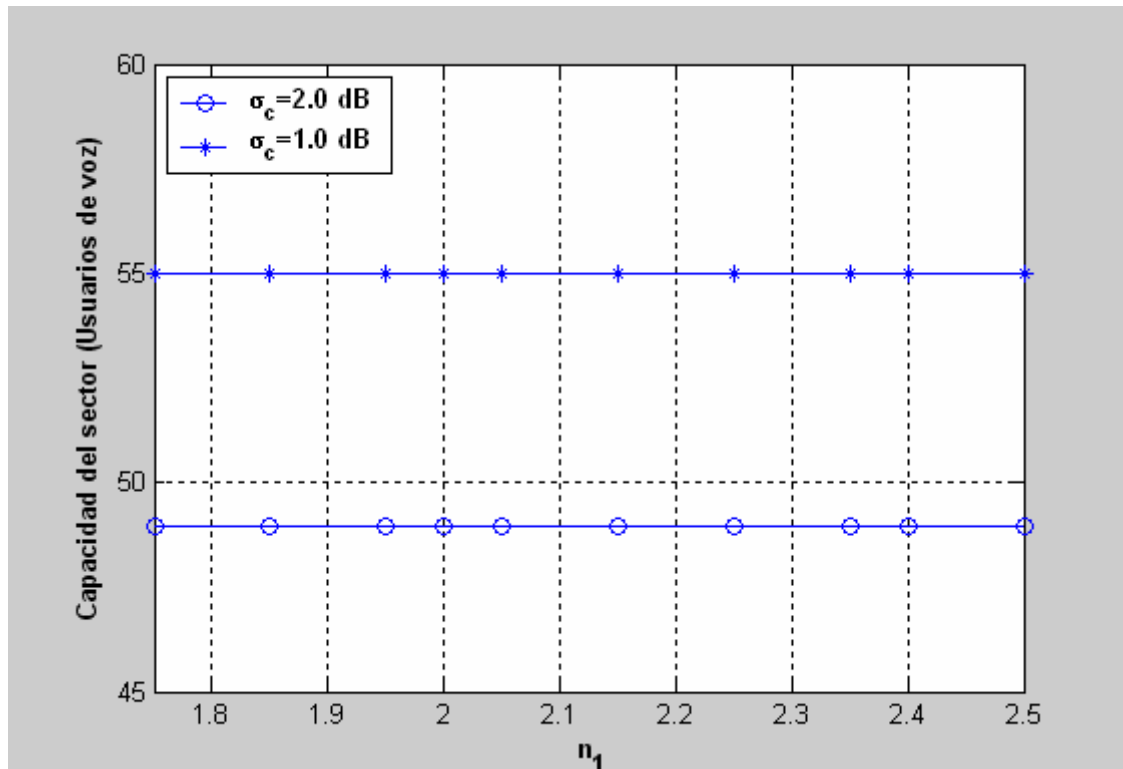


Figura 2.10: Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia máxima en función del exponente de propagación  $n_1$

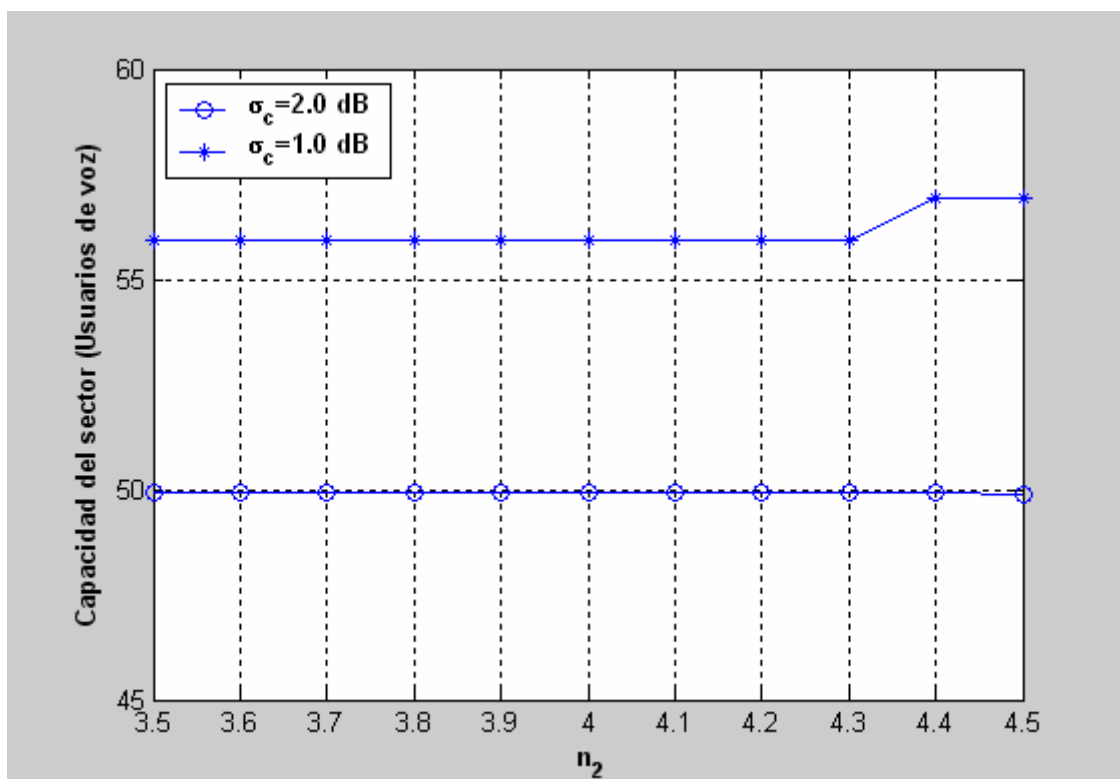
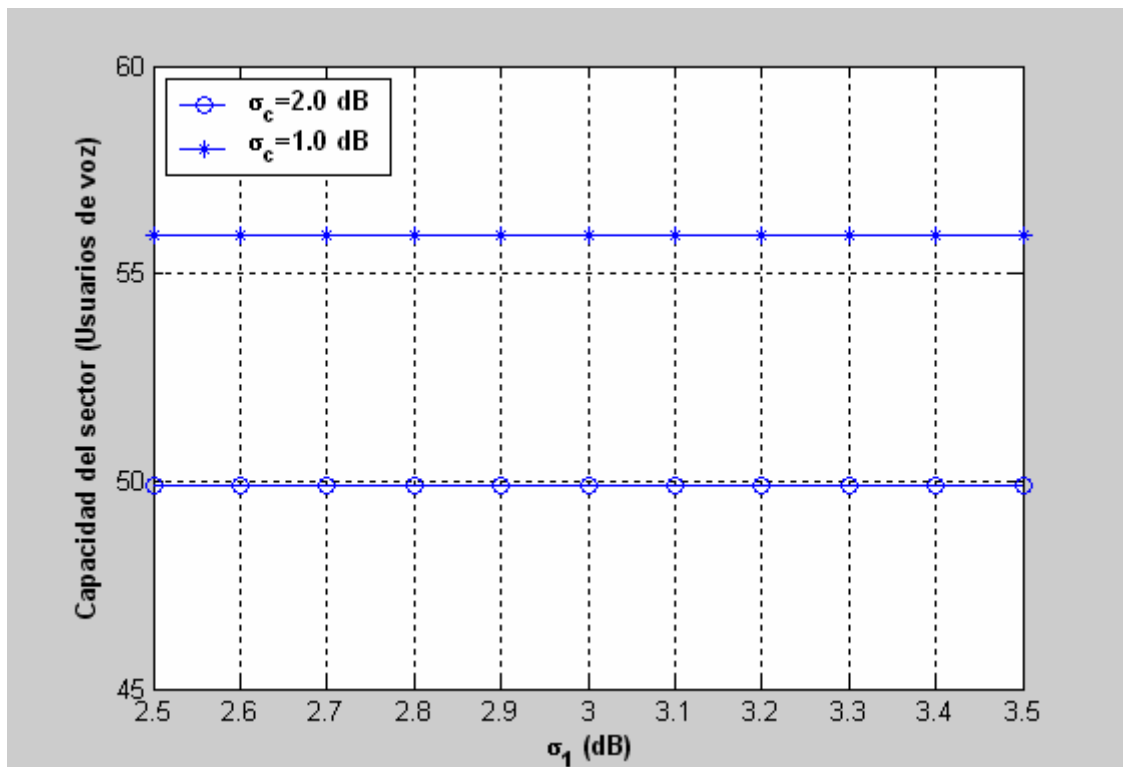


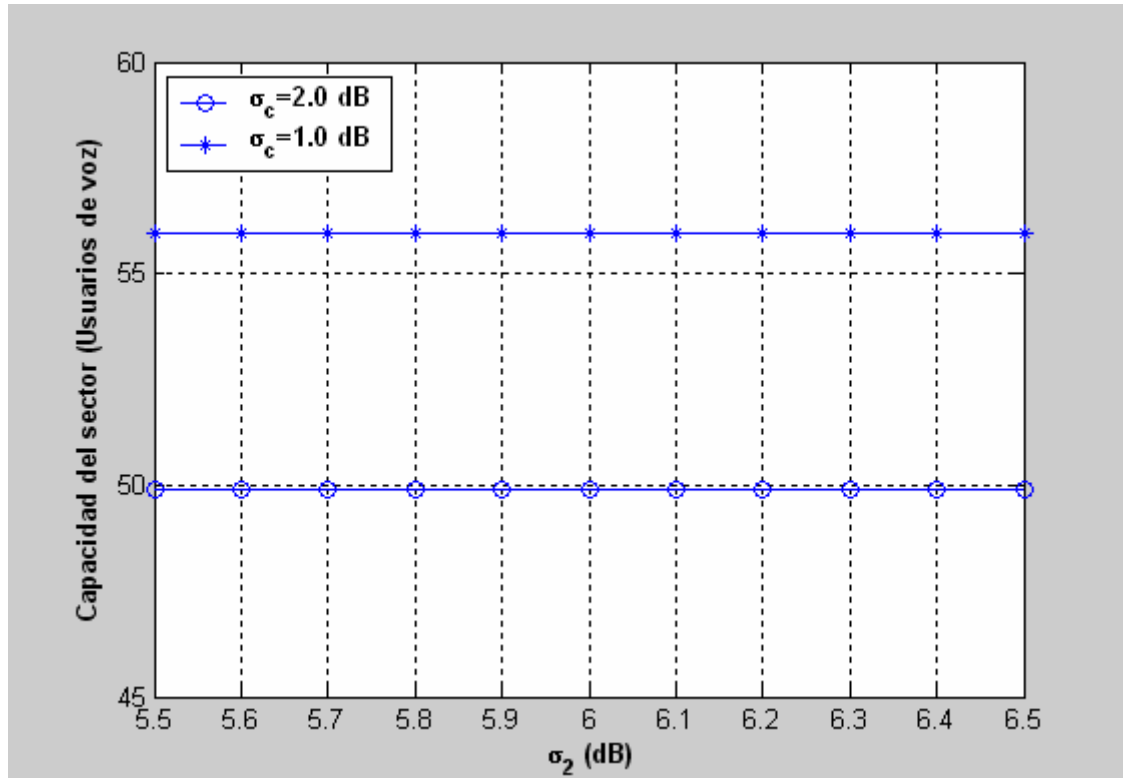
Figura 2.11: Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia máxima en función del exponente de propagación  $n_2$

Como podemos observar, el coeficiente de propagación en el vacío no afecta a la capacidad de número de usuarios de la célula bajo estudio. No obstante, si miramos la Figura (2.11) veremos que a partir de  $n_2$  igual a 4.4 se produce una ligera mejora en el sistema. Este coeficiente de propagación corresponde al medio donde se esta propagando la señal; en el caso de la telefonía, el parámetro oscila en el intervalo  $\in [3.5,4.5]$  .

Esta situación estará presente, generalmente, en muchos de los análisis bajo estudio realizados durante la consecución del proyecto.

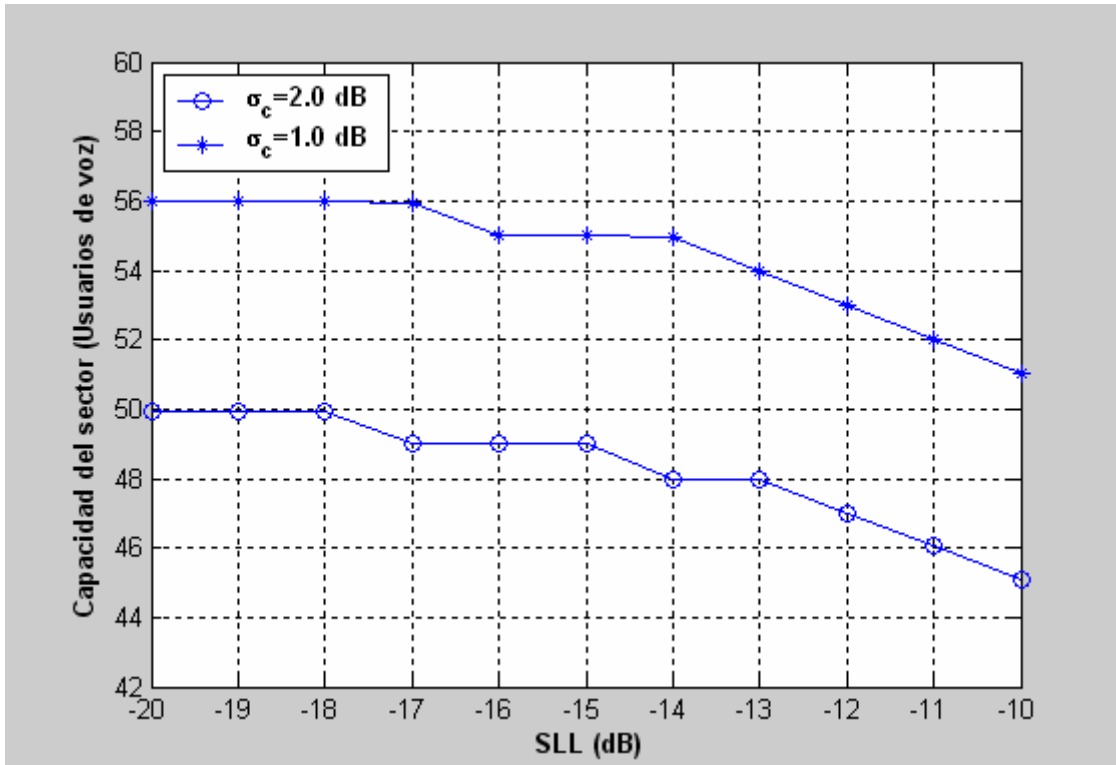


**Figura 2.12:** Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia en función de  $\sigma_1$



**Figura 2.13: Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia en función de  $\sigma_2$**

Podemos observar en las Figuras (2.12) y (2.13) que la variación de este parámetro no va a influir en la capacidad del uplink en la microcelda bajo estudio. Para el estudio, se ha realizado en un rango dinámico de 1 dB.



**Figura 2.14: Capacidad del uplink del sector en sistema sin limitación de potencia en función del SLL**

Como era de esperar, conforme el nivel de lóbulos secundarios aumenta, afecta a la capacidad del sector disminuyendo el número de usuarios que pueden ser atendidos en la celda bajo estudio. Ambas gráficas son muy parecidas en cuanto a la forma a seguir.

Podemos observar como para una sigma mayor, el nivel de lóbulos secundarios influye antes. Este aspecto se puede apreciar para SLL= -17 dB. Por tanto, a nivel práctico interesará disminuir este parámetro lo máximo posible con el fin de afectar lo menos posible a la capacidad de número de usuarios en el sistema.

Cuanto menor sea el valor de este término, mejor comportamiento del sistema tendremos. Por tanto, interesará alcanzar una SLL lo más pequeña posible.

Por otra parte, en las representaciones, podremos observar como conforme aumentamos el radio de cobertura, la capacidad se verá favorablemente incrementada. Otro aspecto importante es que si disminuimos el nivel de lóbulos secundarios SLL, la capacidad se verá también incrementada.

## 2.6.2 Análisis numérico para datos

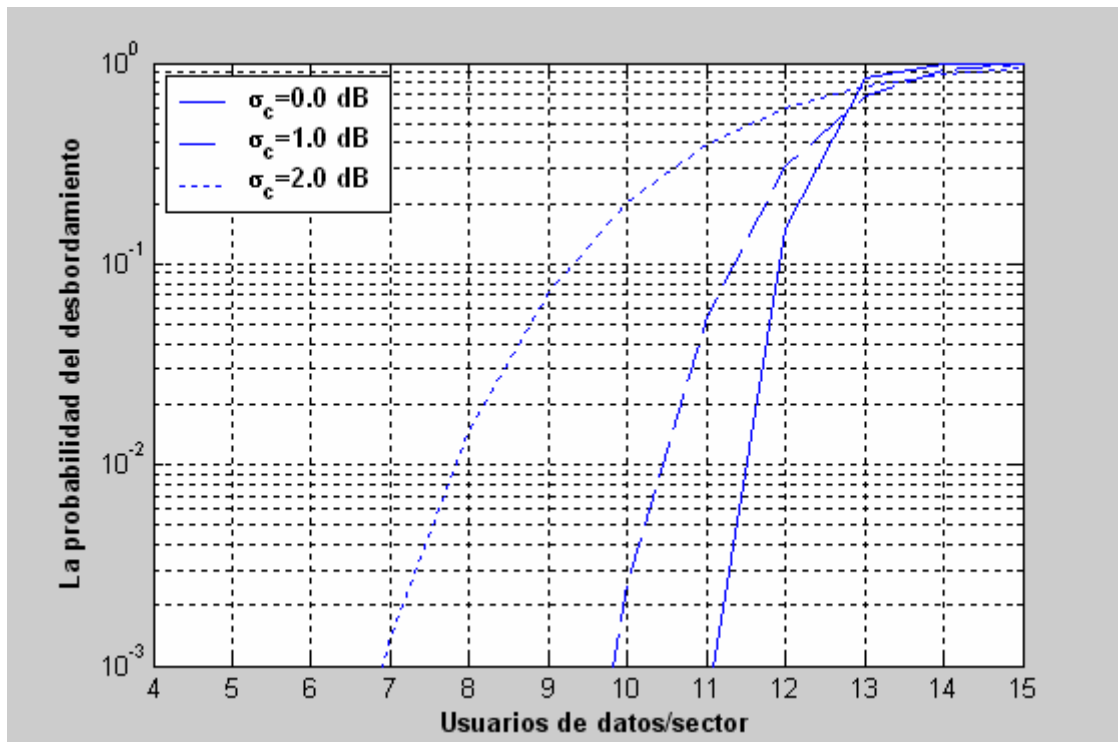


Figura 2.15: Probabilidad del desbordamiento

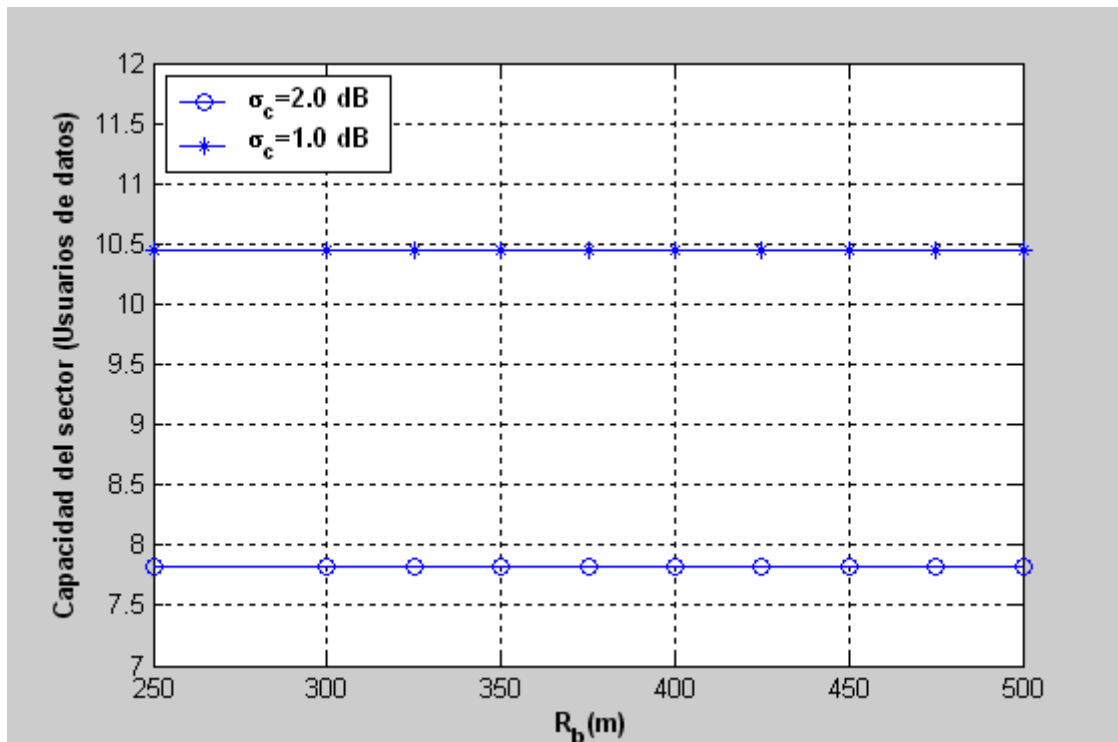
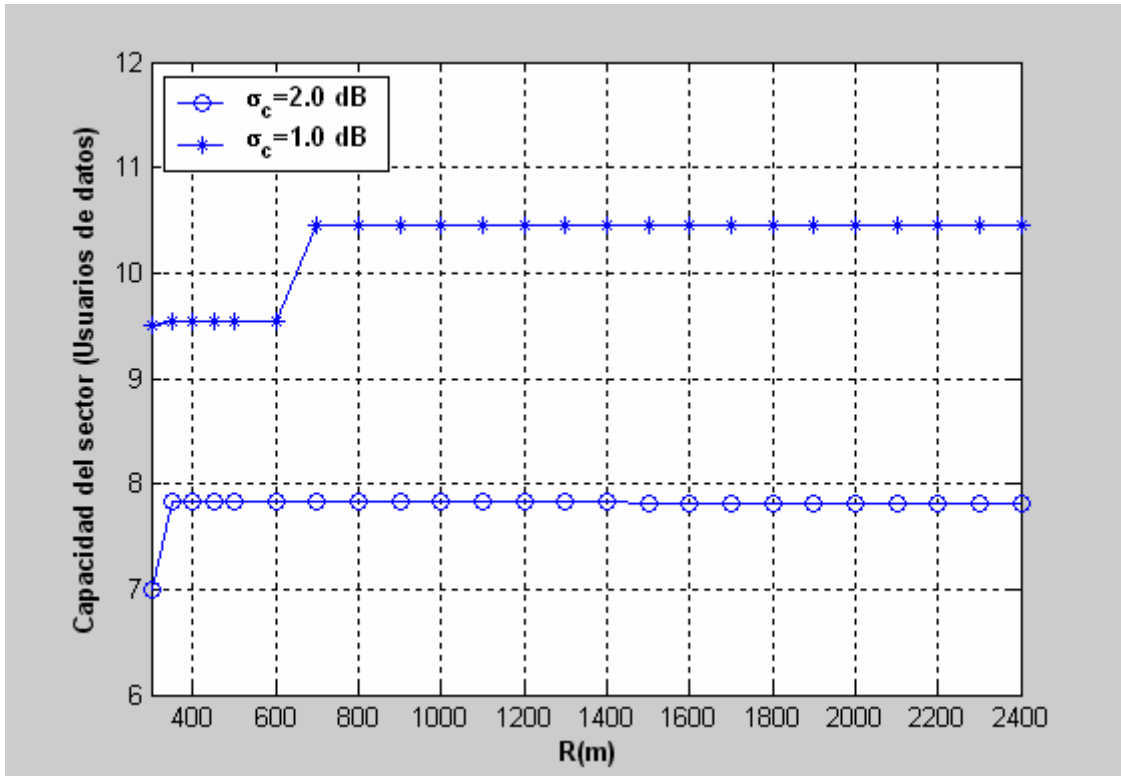


Figura 2.16: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte





**Figura 2.17: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

Como podemos observar en la Figura (2.17), se aprecia para una desviación igual a 1dB un comportamiento algo diferente estabilizándose el valor de la región de cobertura mucho más por encima del valor que posee el punto de corte (300 metros). Por término general, se estabilizará aproximadamente 50 o 100 metros por encima del valor del punto de corte.

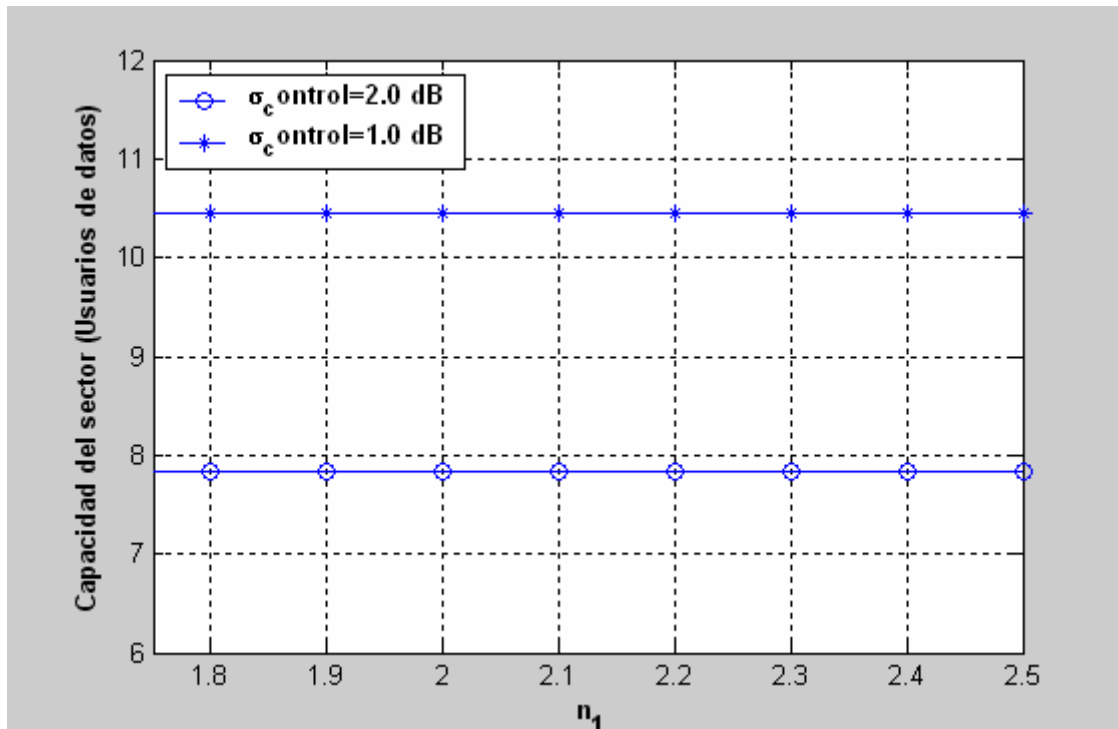


Figura 2.18: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

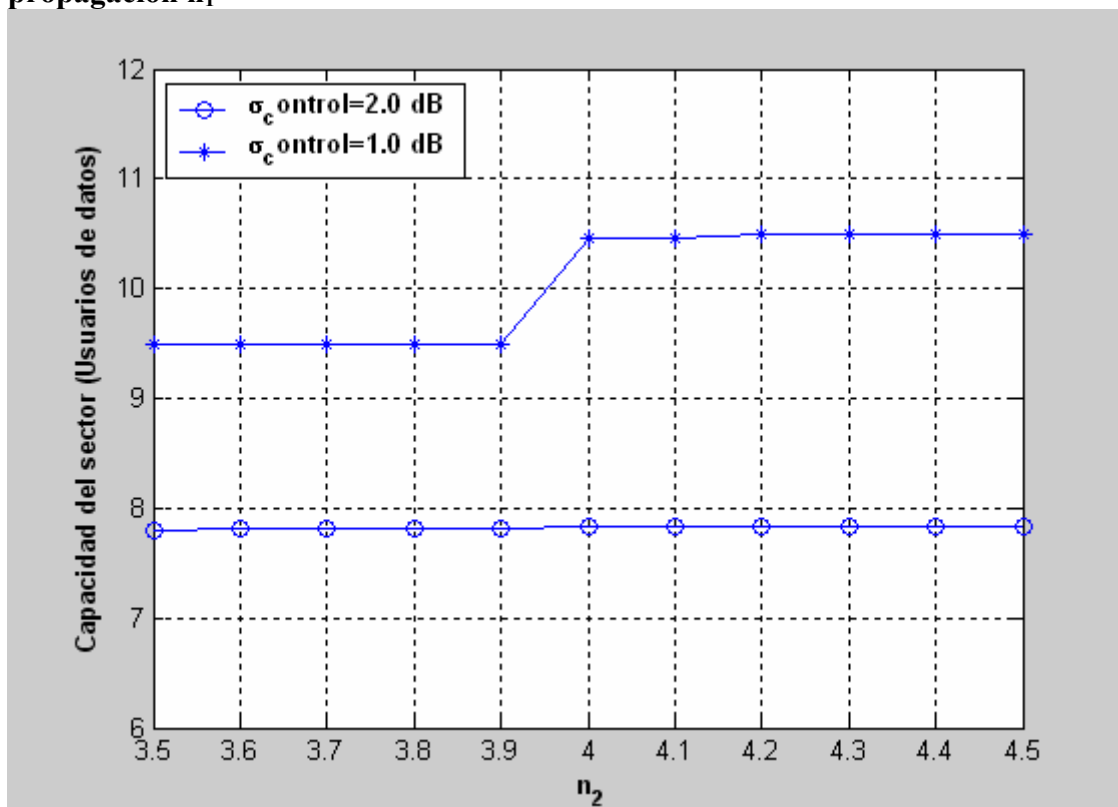


Figura 2.19: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

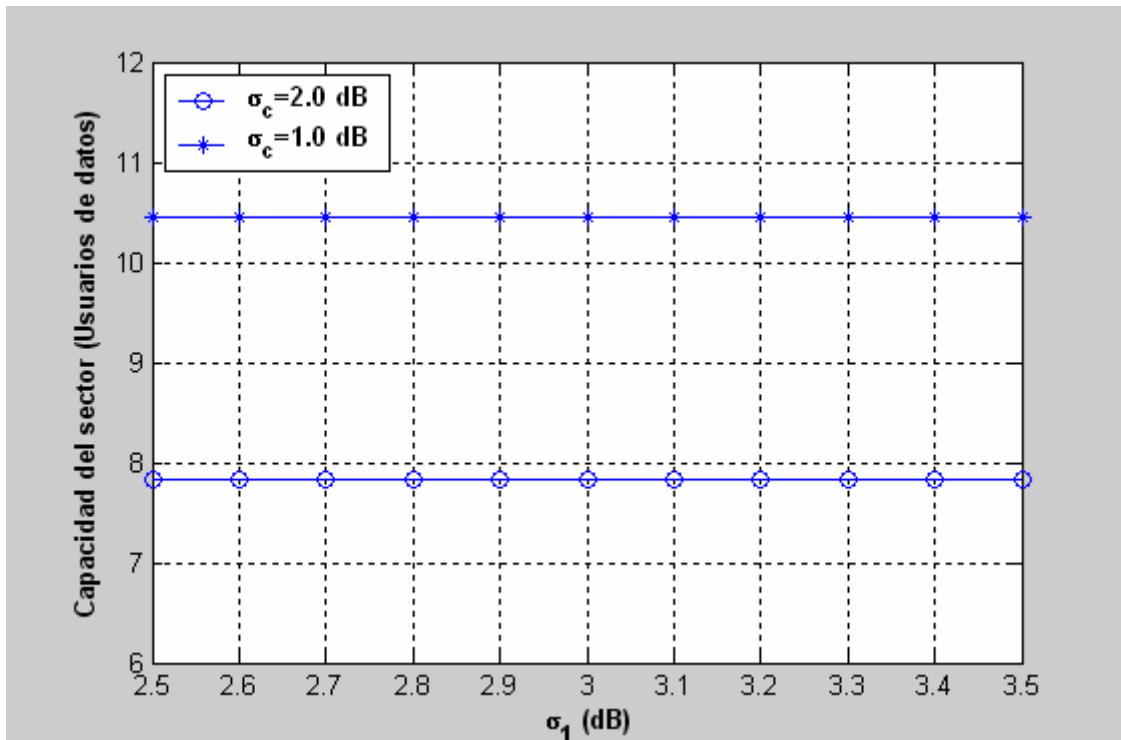


Figura 2.20: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$ .

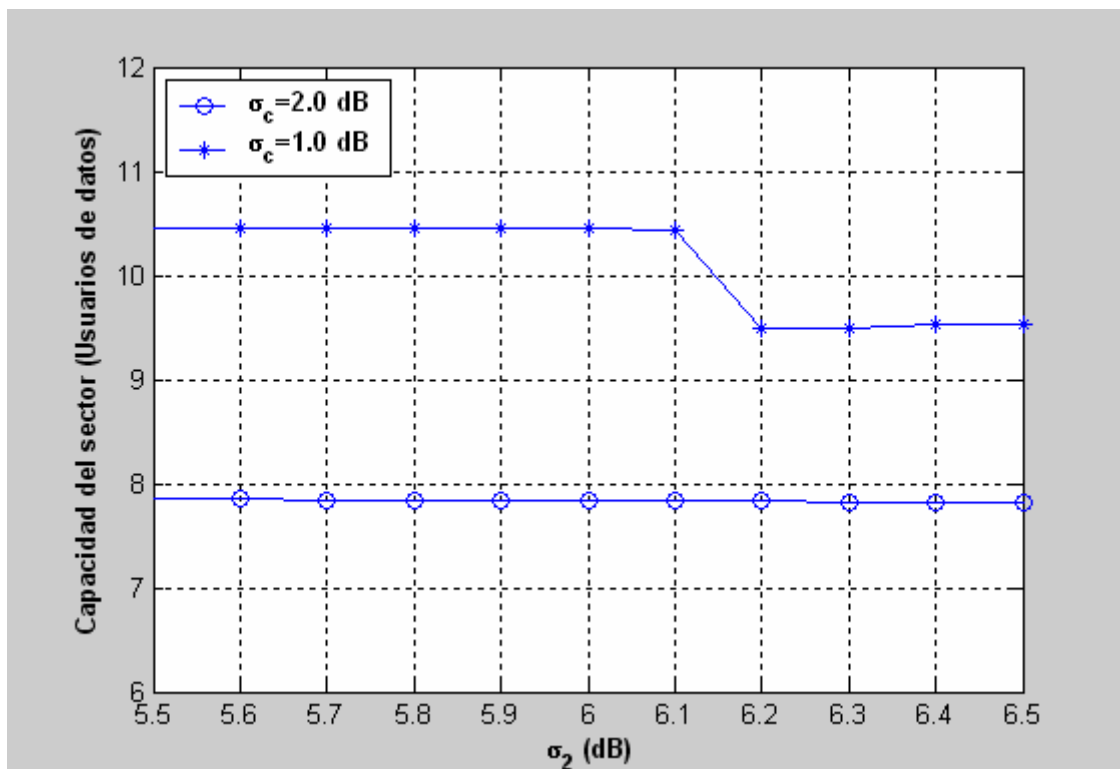
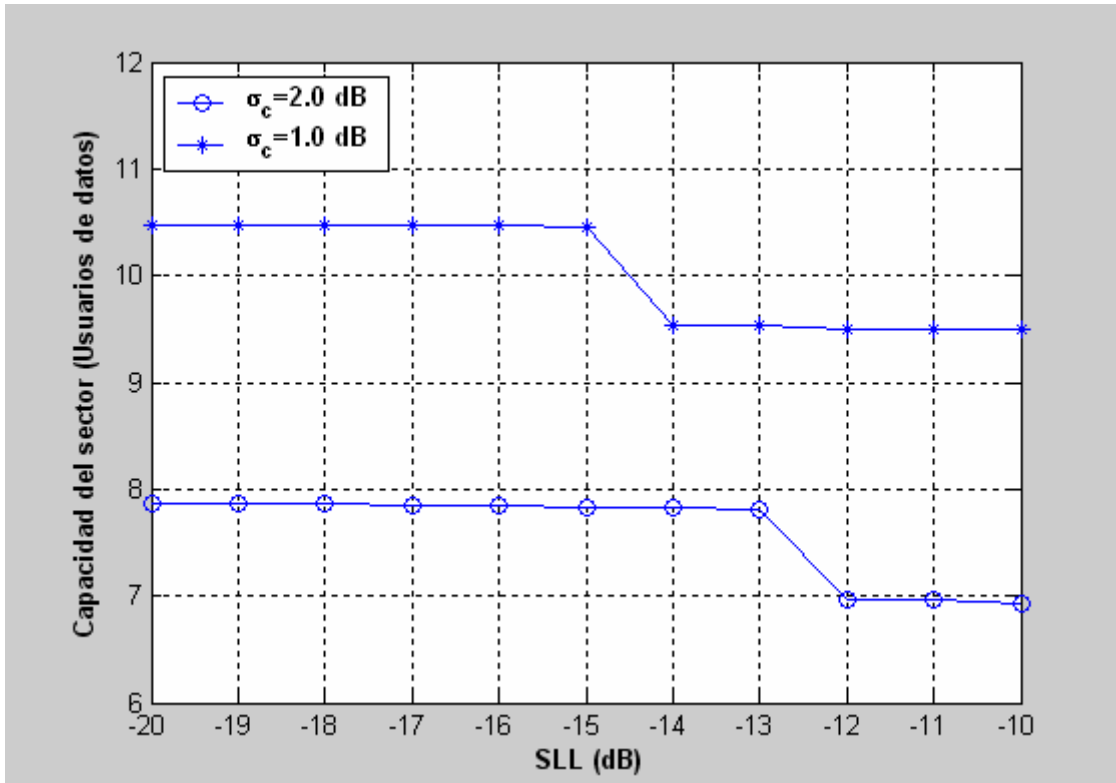


Figura 2.21: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_2$ .



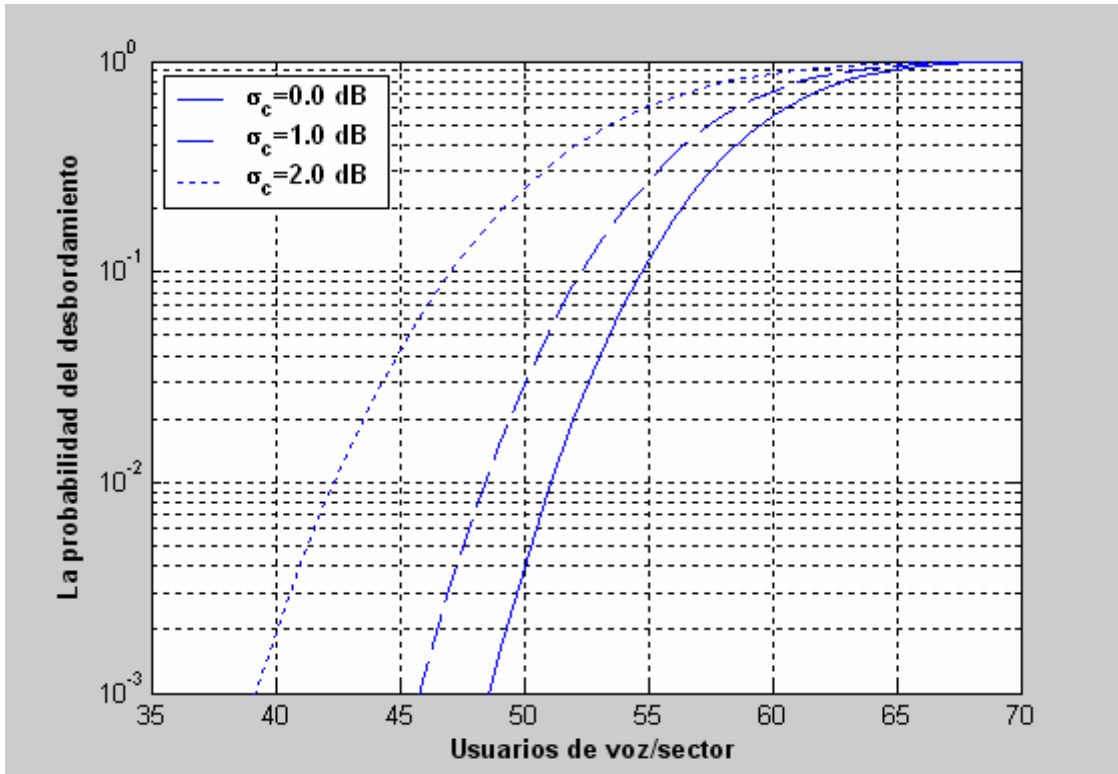
**Figura 2.22: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**

Como se puede apreciar en la Figura (2.22), el nivel de lóbulos secundarios tenderá a provocar un descenso de la capacidad conforme este aumenta. Por regla general basándose en las fórmulas estudiadas anteriormente, este parámetro podrá provocar variaciones de hasta un 12% en la capacidad del sistema bajo estudio.

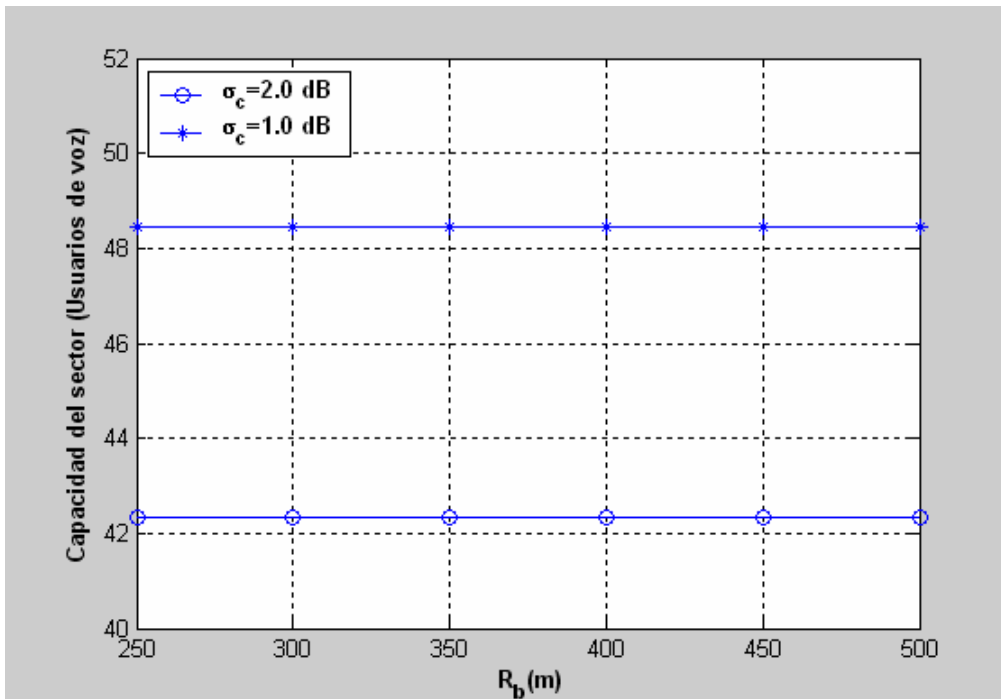
### 2.6.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

En este estudio, se plantea la posibilidad de dar dos servicios de forma simultánea al usuario. Para ello, será necesario recurrir a una fórmula que difiere someramente de las mencionadas anteriormente.

A continuación trataremos de desarrollar brevemente las expresiones utilizadas para extraer las conclusiones y las figuras posteriores. En primer lugar, para comprender los siguientes desarrollos, ver fórmulas (2.19), (2.20) y (2.21):



**Figura 2.23: Probabilidad del desbordamiento del uplink del sector existiendo 5 usuarios de datos**



**Figura 2.24: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

Nuevamente, volvemos a apreciar un comportamiento bastante regular al producirse una variación en el punto de corte en la Figura (2.25). El incremento observado para  $\sigma_c=1$ dB entre 300 y 400 metros está muy influido por la resolución tomada en el algoritmo.

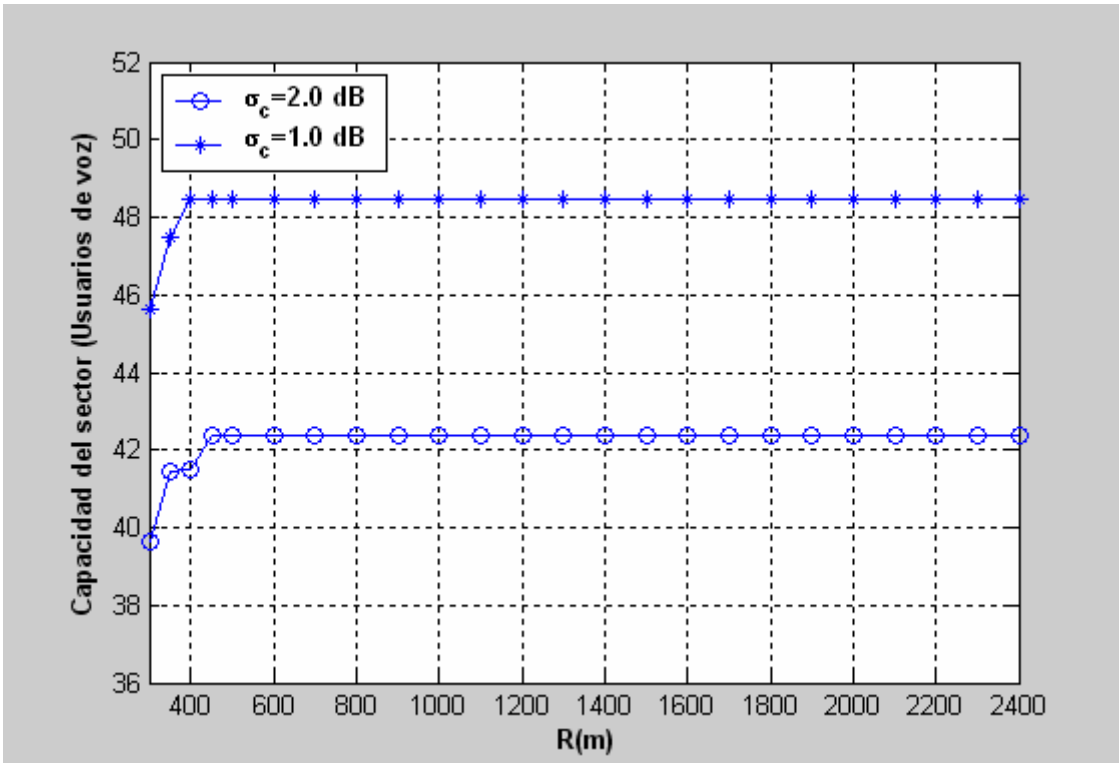


Figura 2.25: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura

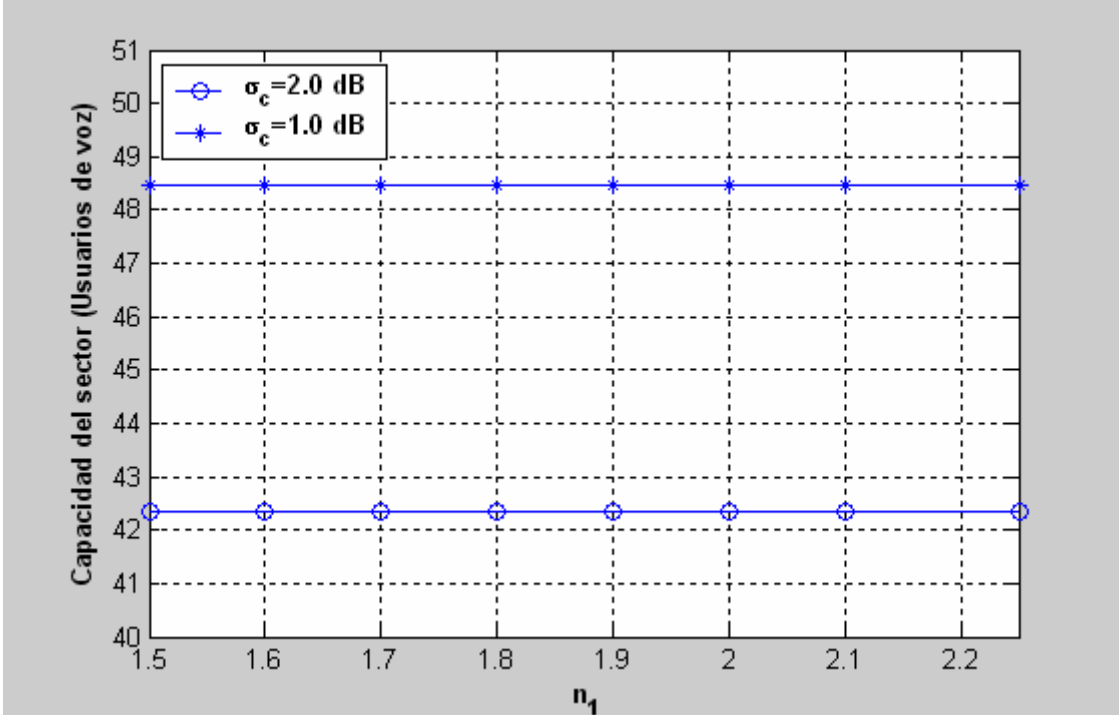


Figura 2.26: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

En la Figura (2.26), podemos observar como el exponente de propagación  $n_1$  no afecta al sistema.

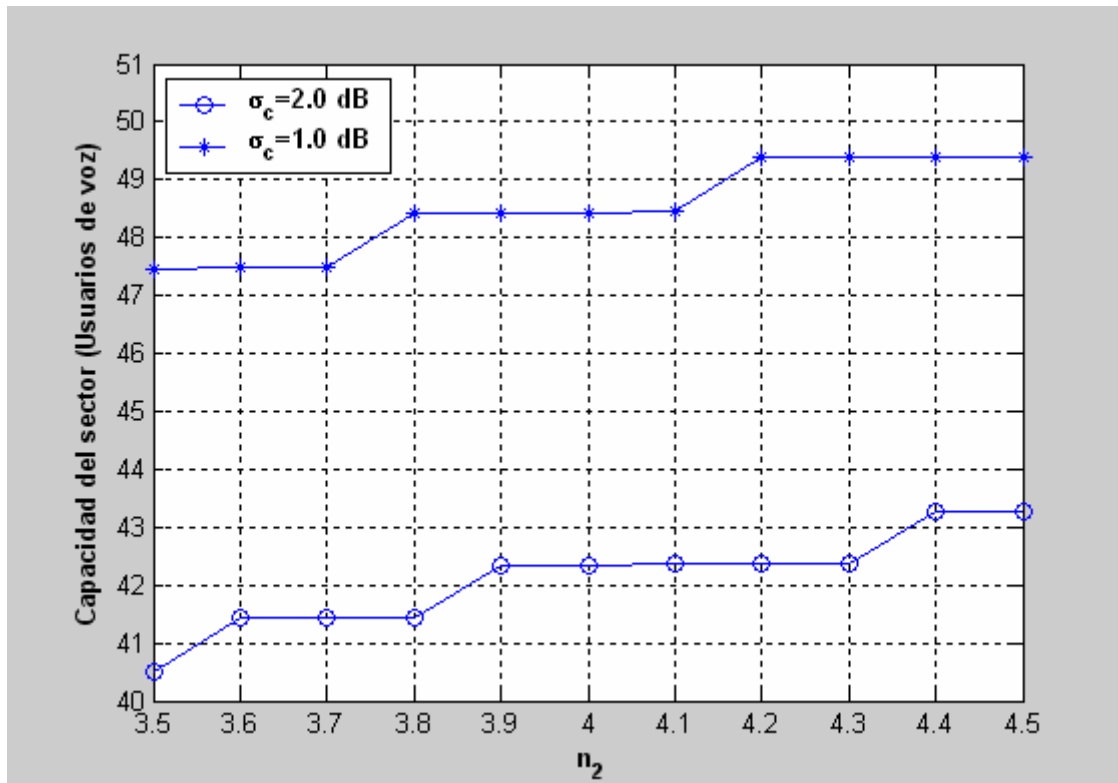


Figura 2.27: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

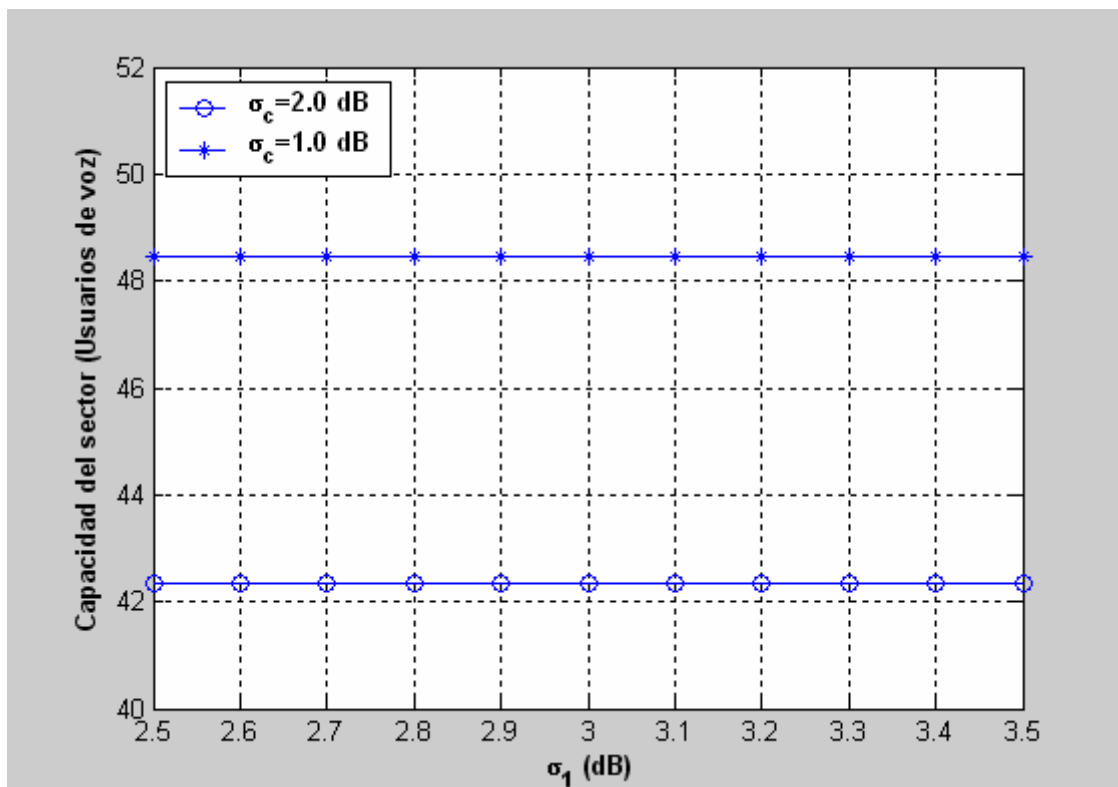


Figura 2.28: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$

Por regla general, tendremos un comportamiento bastante similar al producirse una variación de la desviación para el control de potencia en el estudio de la capacidad.

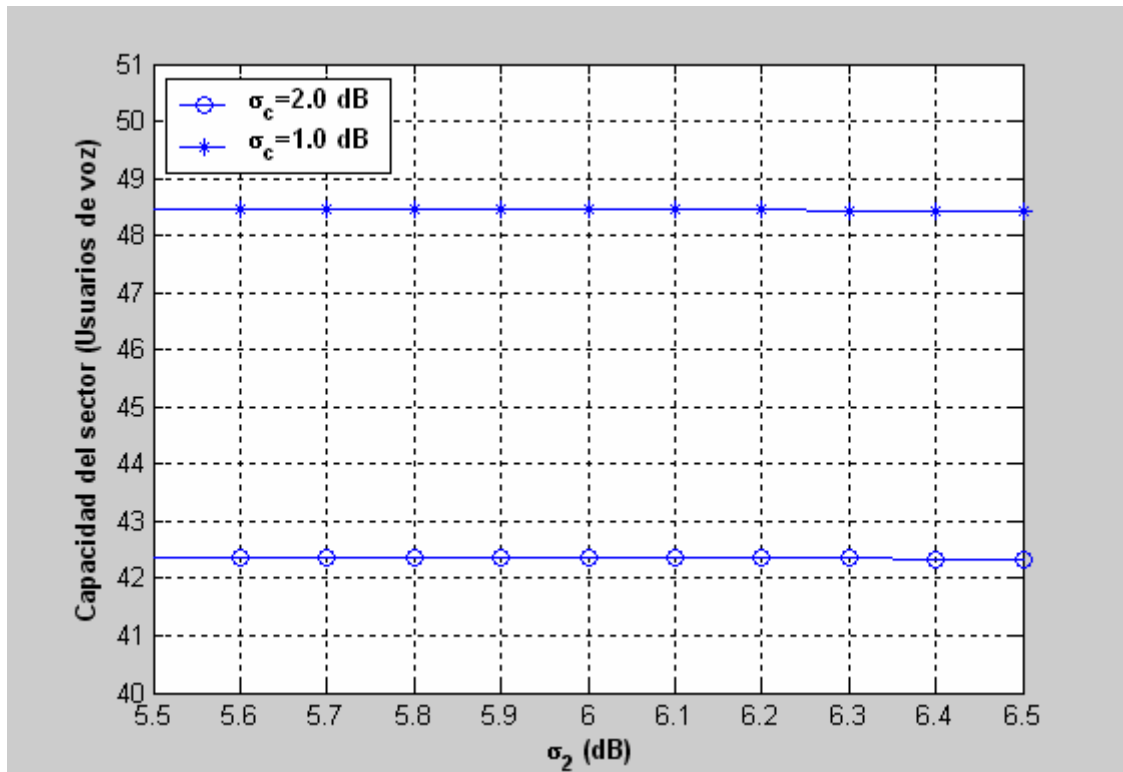


Figura 2.29: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_2$

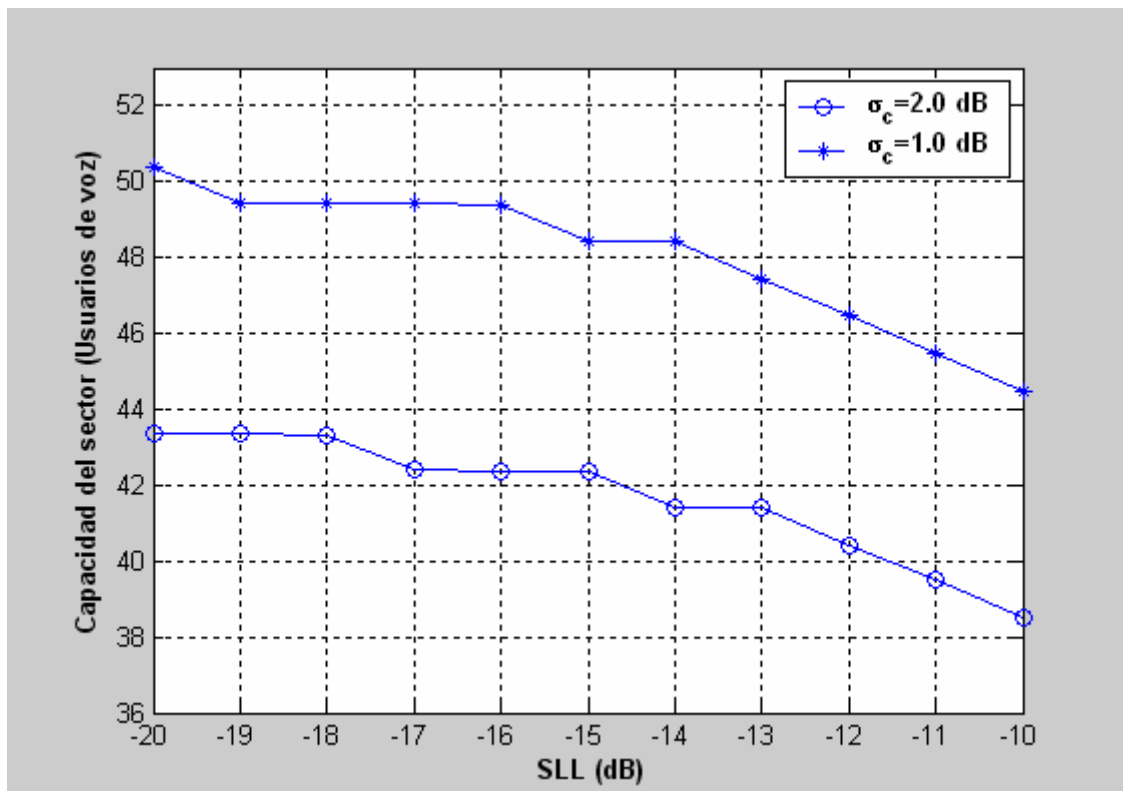


Figura 2.30: Capacidad del uplink del sector en función del SLL



Podemos observar como se produce un descenso considerable de la capacidad conforme se produce un incremento del nivel de lóbulos secundarios. Por tanto, nos interesará que el nivel de lóbulos secundarios no sea muy elevado. Por regla general, en los estudios realizados se ha tomado un punto medio de aproximadamente -15dB.

## 2.7 Análisis para sistema con limitación de potencia máxima

### Parámetros utilizados:

$$G_{tx} = 0 \text{ dB}$$

$$G_{rx} = 12 \text{ dB}$$

$$P_{txVOZ} = 18.6 \text{ dBm}$$

$$P_{txDATOS} = 25 \text{ dBm}$$

$$\text{freq} = 1950 \text{ MHz}$$

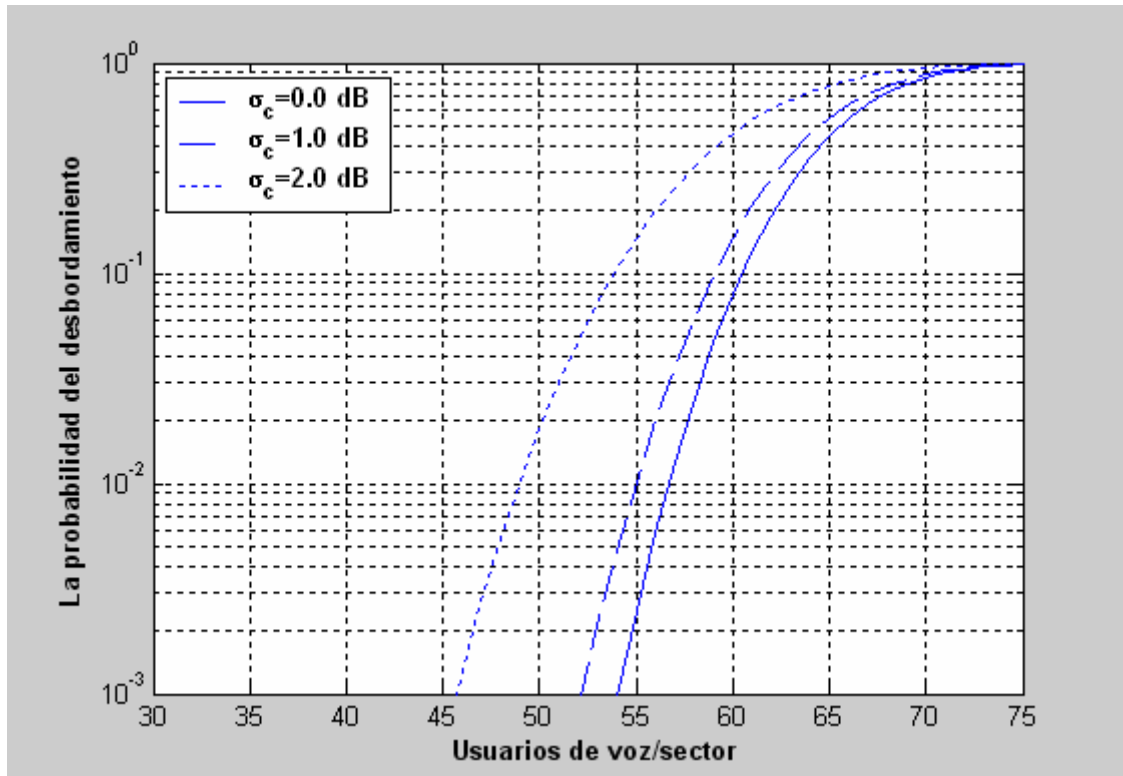
Los valores más utilizados serán estos en casi todas las gráficas analizadas. En el caso de un sistema de voz, se trata de obtener la mayor capacidad posible con la menor potencia posible, ya que un exceso de ésta puede provocar interferencias.

Finalmente la potencia recibida se obtiene del siguiente cálculo

$$P_{rxVOZ} = P_{txVOZ} + G_{rx} + G_{tx} - L_p \quad (2.35)$$

$$P_{rxDATOS} = P_{txDATOS} + G_{rx} + G_{tx} - L_p \quad (2.36)$$

### 2.7.1 Análisis numérico para voz

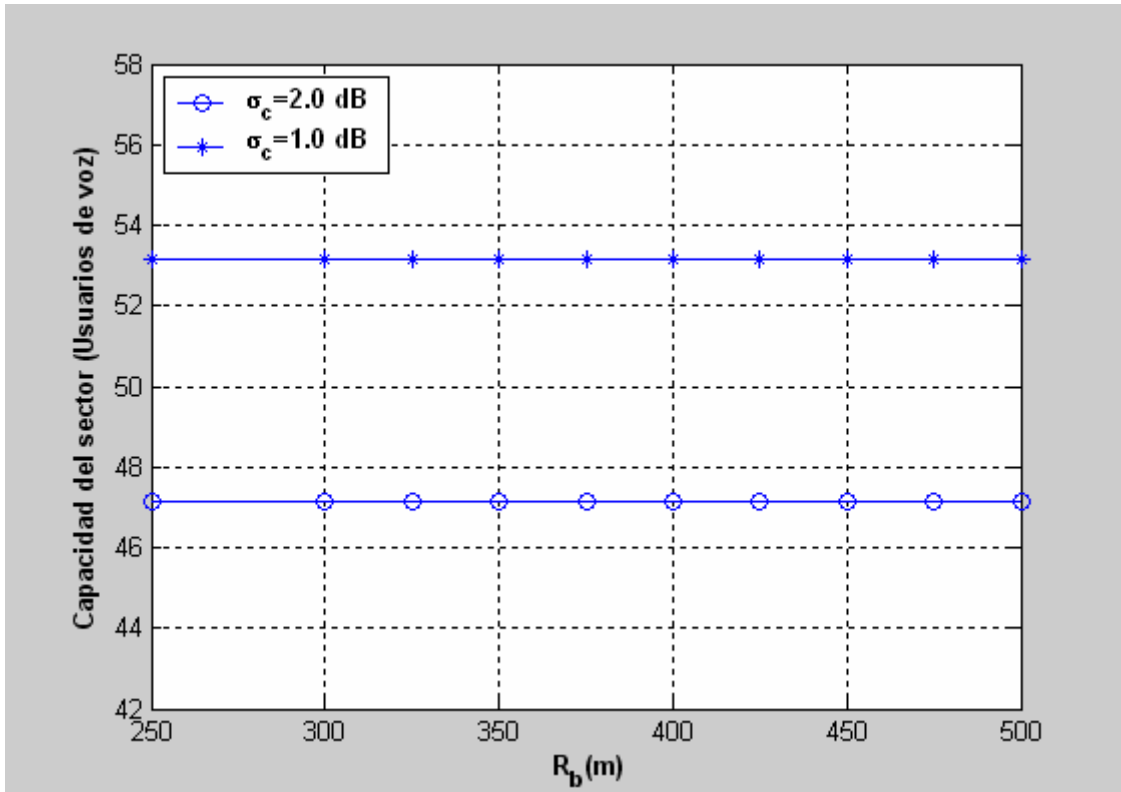


**Figura 2.31: Probabilidad del desbordamiento del uplink del sector**

La Figura (2.31) representa una situación para la cual existe limitación de potencia. Es un caso más realista del utilizado a efectos prácticos.

Se ha introducido una potencia de 20 dB aproximadamente para el usuario de voz en el borde del sector; obviamente un incremento de esta magnitud va a provocar un incremento de la capacidad del número de usuarios.

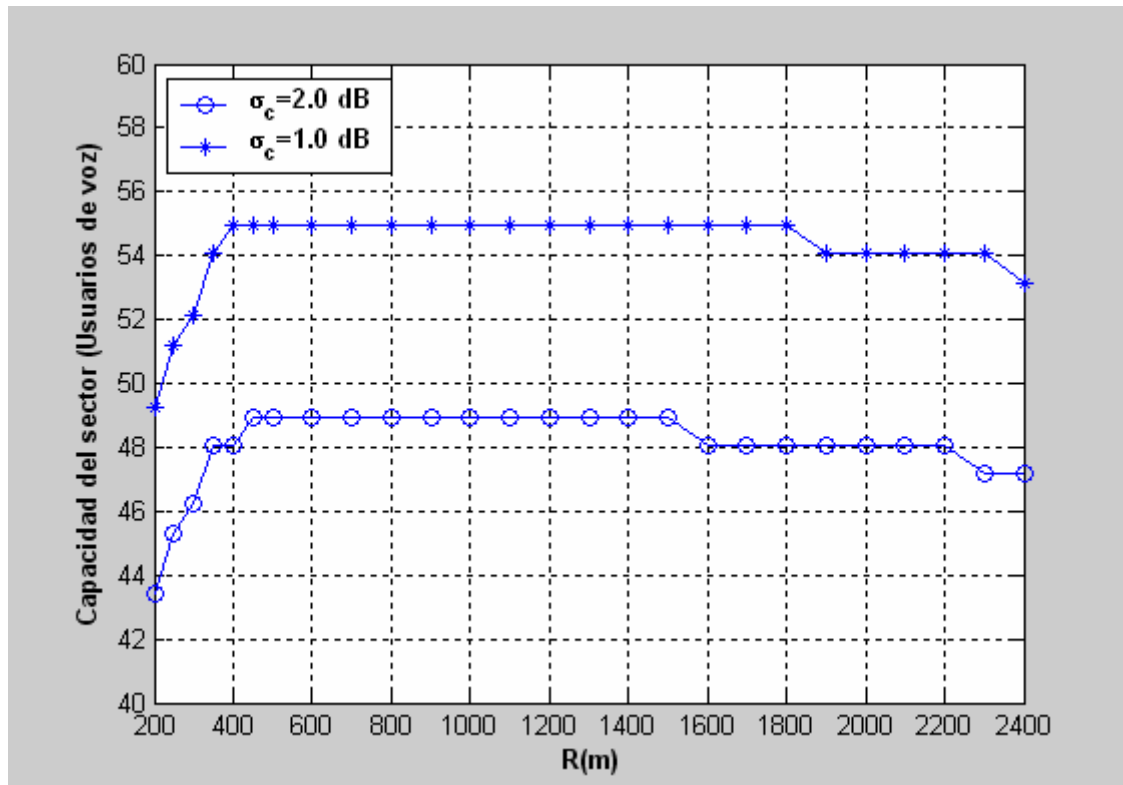
Tendremos en cuenta las pérdidas de propagación, que afectarán disminuyendo la potencia recibida por el sistema.



**Figura 2.32: Capacidad del uplink del sector con limitación de potencia en función del punto de corte**

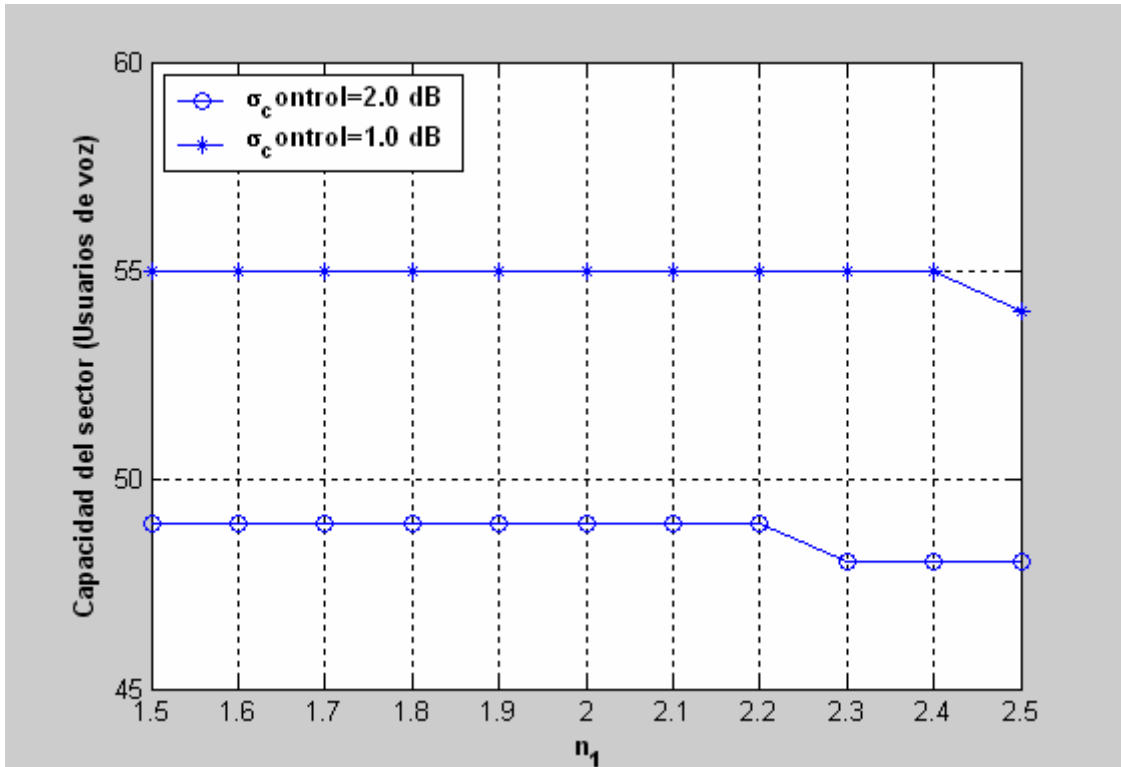
Independientemente del valor del punto de corte en la Figura (2.32), la capacidad del uplink del sector sigue siendo la misma, con una pequeña variación de un 0.01%.

Por tanto, podemos deducir que la capacidad no tiene mucha relación con este parámetro, siempre que sea inferior al valor de la mitad de la región de cobertura. No obstante, interesará que sea inferior al radio de cobertura  $R$  del sector bajo estudio.



**Figura 2.33: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de la región de cobertura**

En ambos casos de la Figura (2.33) se puede comprobar cómo entre 200 y 400 metros al aumentar  $R$ , la capacidad se ve incrementada. Por otra parte, observamos como a partir de cierto valor, 1500 metros aproximadamente, la capacidad se ve disminuida para  $\sigma_c=2$ dB y a 1800 metros para  $\sigma_c=1$ dB. Lo cual tiene sentido ya que a partir de cierta distancia la potencia transmitida no será suficiente. O expresado de otra forma, llega un punto en el cual un incremento de la región de cobertura se va a traducir en un descenso en la capacidad de número de usuarios motivado por las pérdidas de propagación.



**Figura 2.34: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del exponente de propagación en el vacío**

En la Figura (2.34), observamos una ligera diferencia respecto al caso anterior; podemos observar como conforme aumentamos el exponente de propagación  $n_1$ , la capacidad de número de usuarios se ve disminuida en gran parte. Este fenómeno, se observa para valores que superan un 10% el valor del exponente de propagación para  $n_1=2$ .

Cabe recordar, viendo las fórmulas anteriores, tanto  $n_1$  como  $n_2$  contribuyen a un aumento de las pérdidas de propagación.

No obstante, un incremento del valor de  $n_2$  se traducirá en un aumento de la capacidad. Desde un punto de vista matemático, se puede demostrar basándonos en las fórmulas expuestas anteriormente.

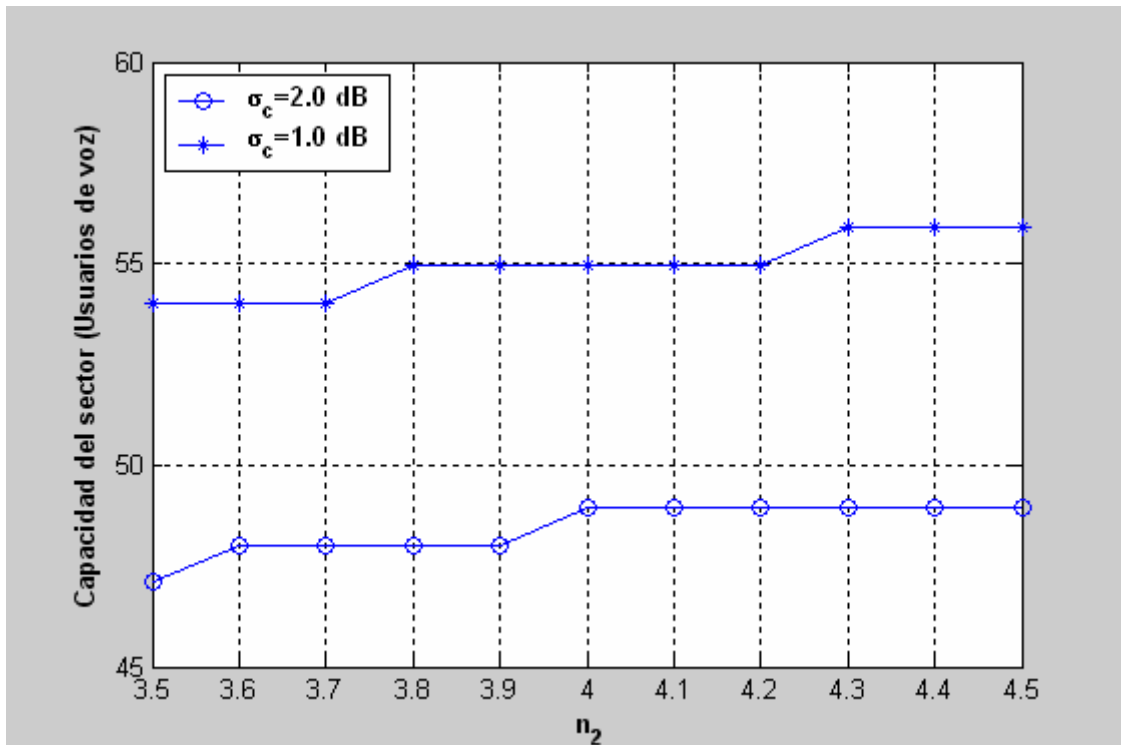


Figura 2.35: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del exponente de propagación en el medio

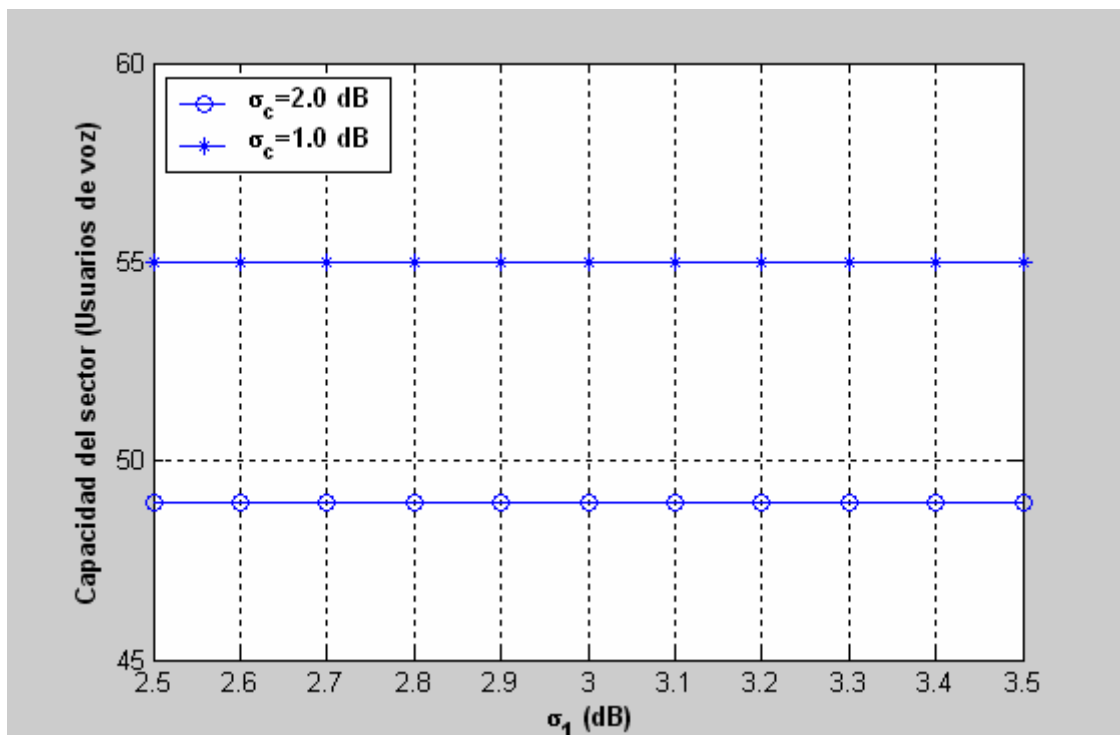


Figura 2.36: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de  $\sigma_1$

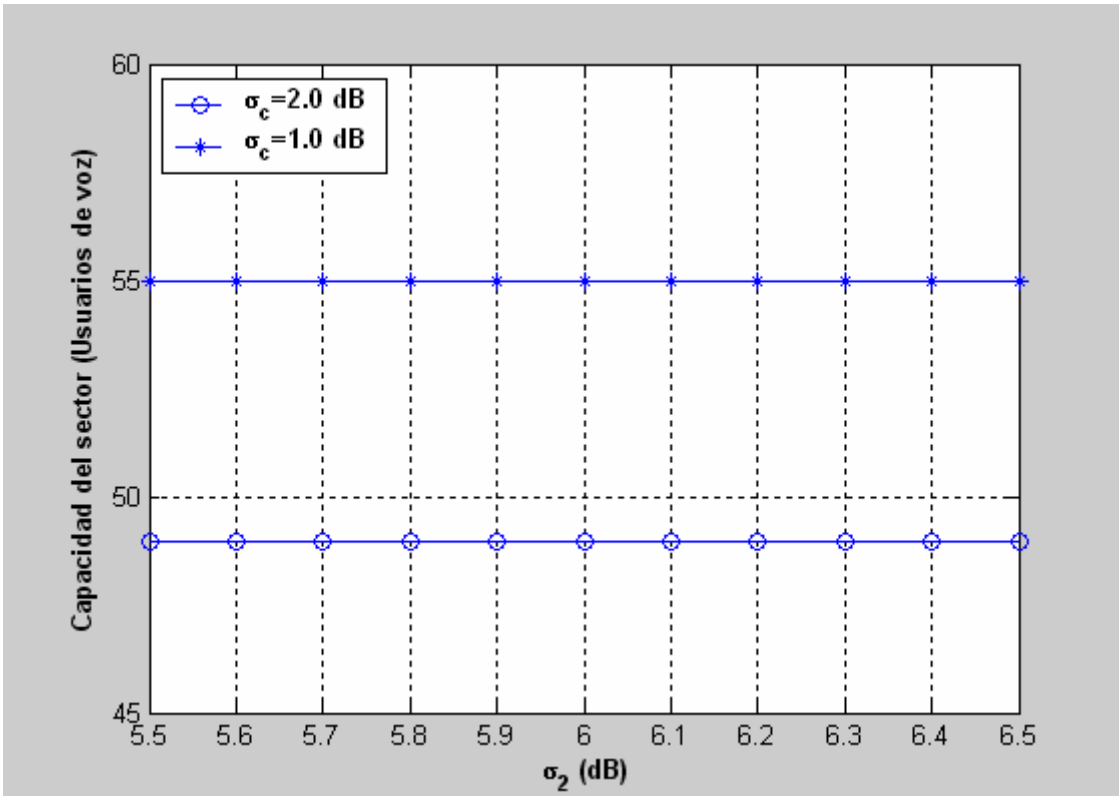


Figura 2.37: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de  $\sigma_2$

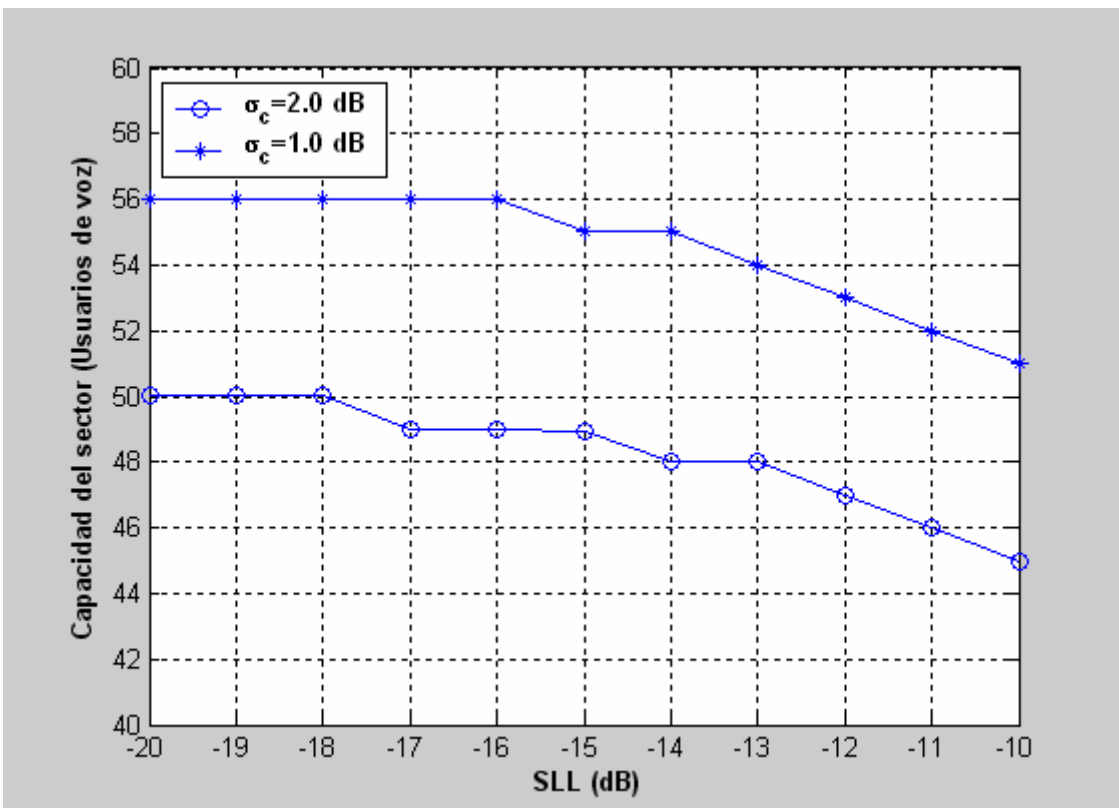


Figura 2.38: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del SLL

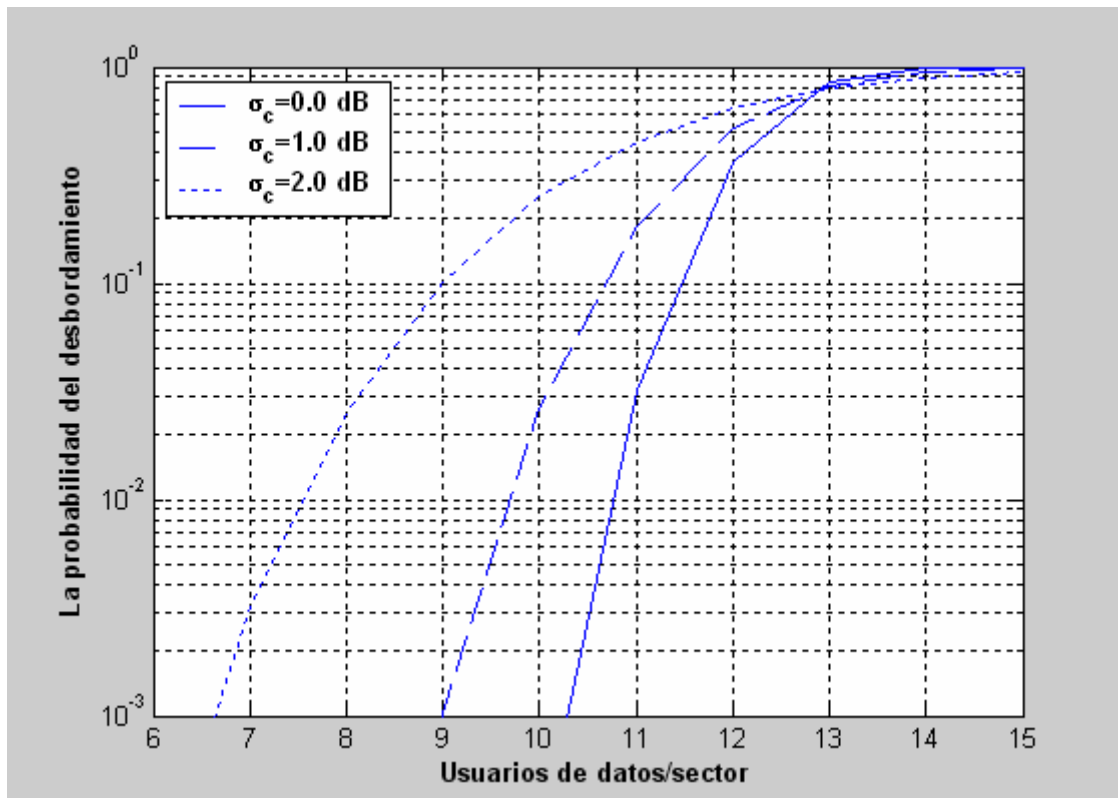
Nuevamente observando la Figura (2.38), volvemos a incidir en el hecho de interesarnos un nivel de lóbulos secundarios bajo. Con ello se alcanzará una mayor capacidad en el sistema bajo estudio. Para un SLL bajo podremos mejorar en un margen de 5 usuarios de voz.

En las Figuras (2.36) y (2.37) podemos observar como  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  no influyen significativamente en la capacidad de número de usuarios en el sistema. Cabe recordar que estas dos desviaciones típicas están asociadas a dos variables aleatorias Gaussianas.  $\xi_1$  y  $\xi_2$ . Estas variables cabe recordar que estarán presentes en el cálculo de la media y la varianza de la potencia de la señal bajo estudio y de la señal interferente.

En resumen, se puede percibir un comportamiento parecido en todos los casos al variar cada uno de los parámetros bajo estudio. Fundamentalmente, se puede apreciar como en cada uno de los tres sistemas (voz, datos, y datos-voz conjuntamente) la capacidad es muy distinta por diversos factores reflejados en las fórmulas analizadas anteriormente.



## 2.7.2 Análisis numérico para datos



**Figura 2.39: Probabilidad del desbordamiento del uplink del sector en sistema con limitación de potencia**

Como podemos observar en la Figura (2.39), se produce una disminución de la capacidad del uplink considerable influenciada considerablemente por una limitación de la potencia máxima.

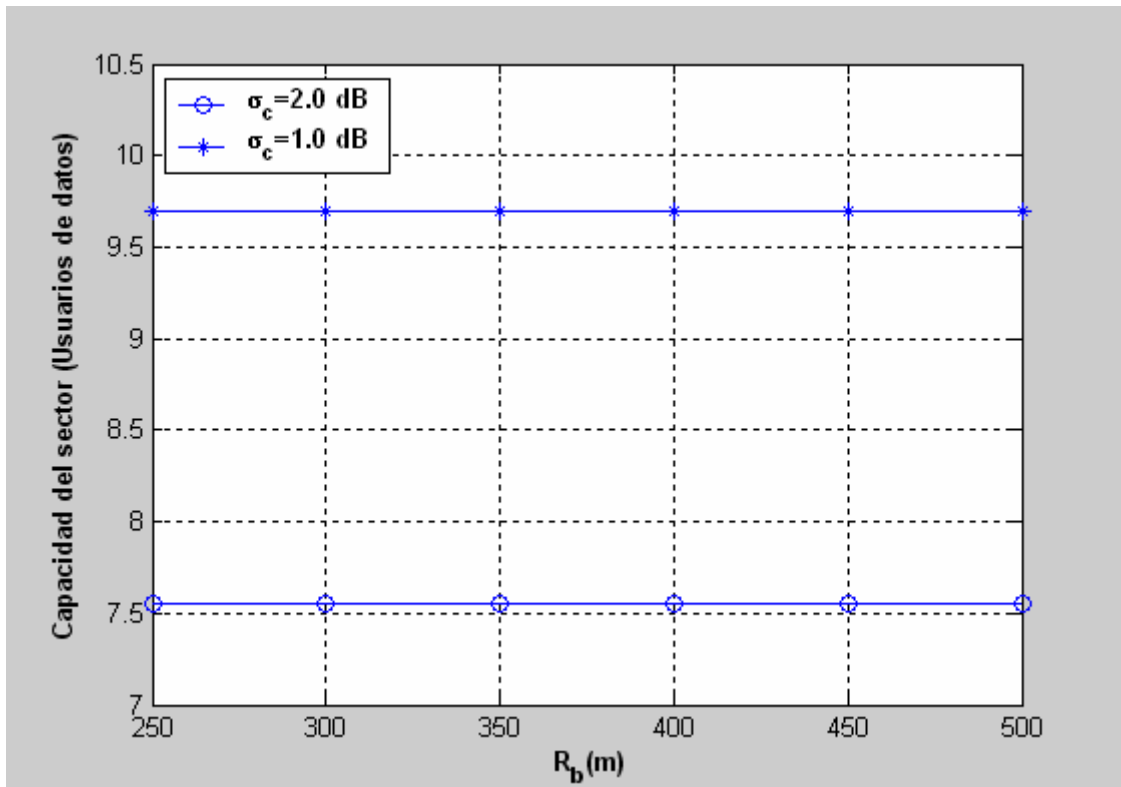


Figura 2.40: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del punto de corte

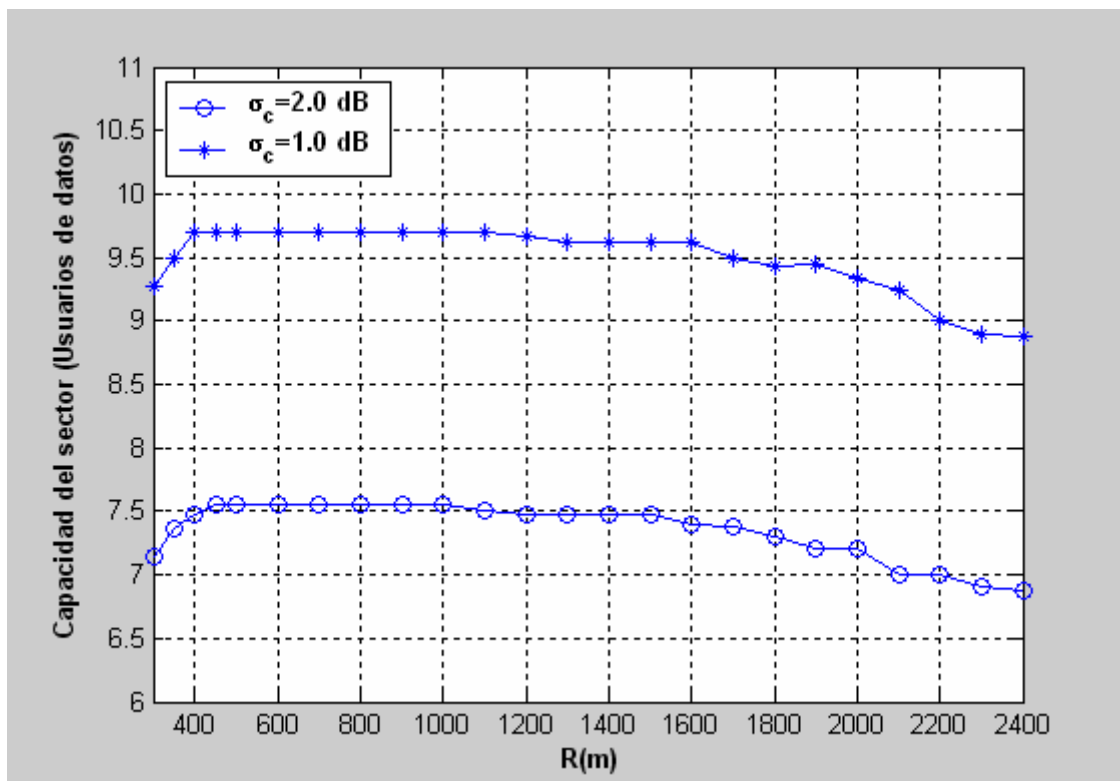


Figura 2.41: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de la región de cobertura

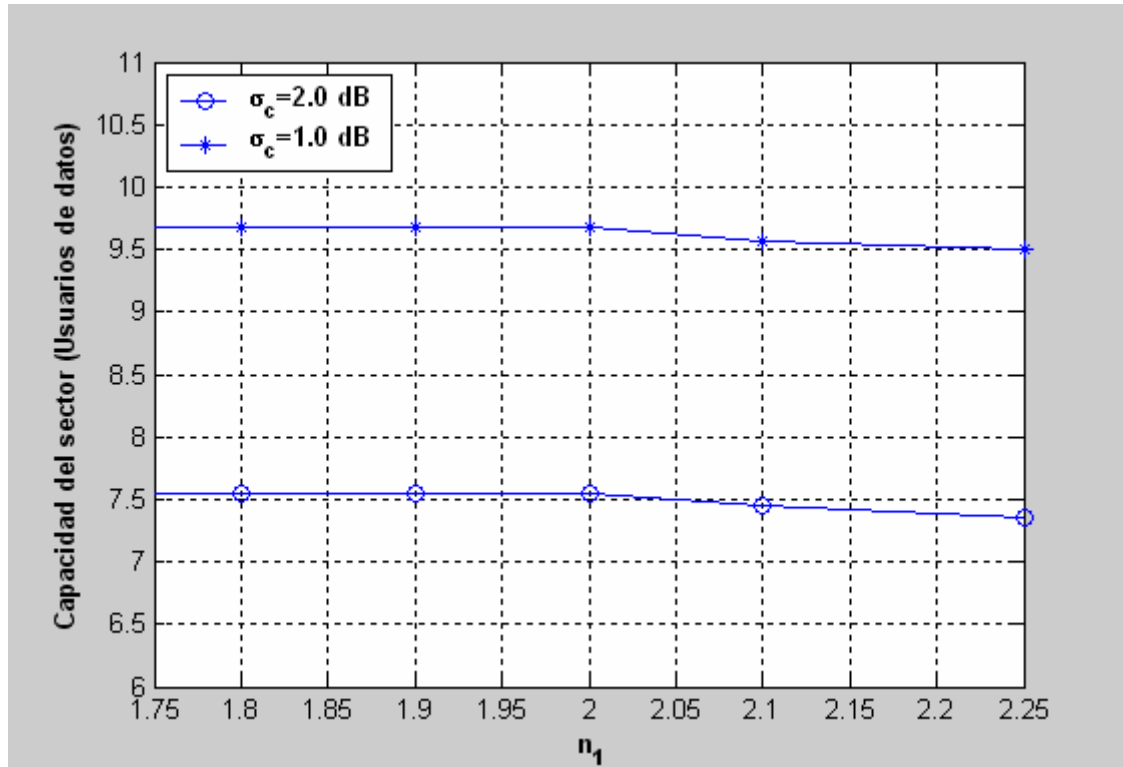


Figura 2.42: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del exponente de propagación  $n_1$

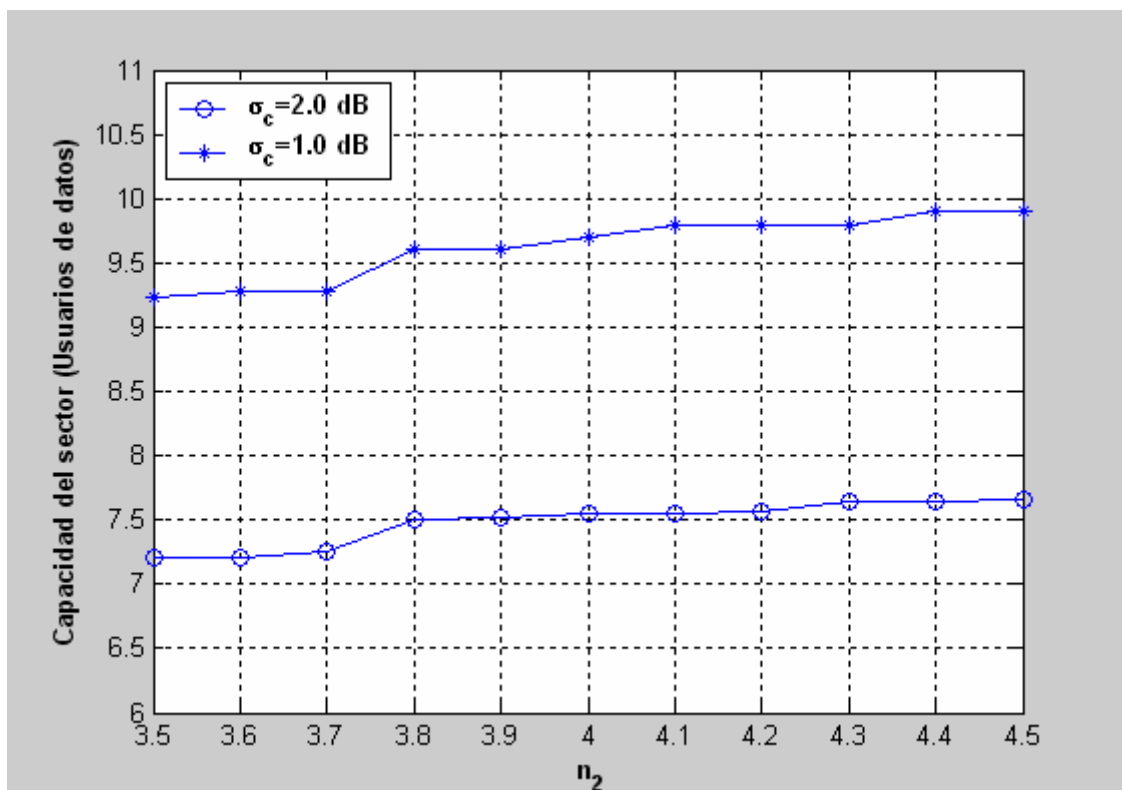


Figura 2.43: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del exponente de propagación  $n_2$

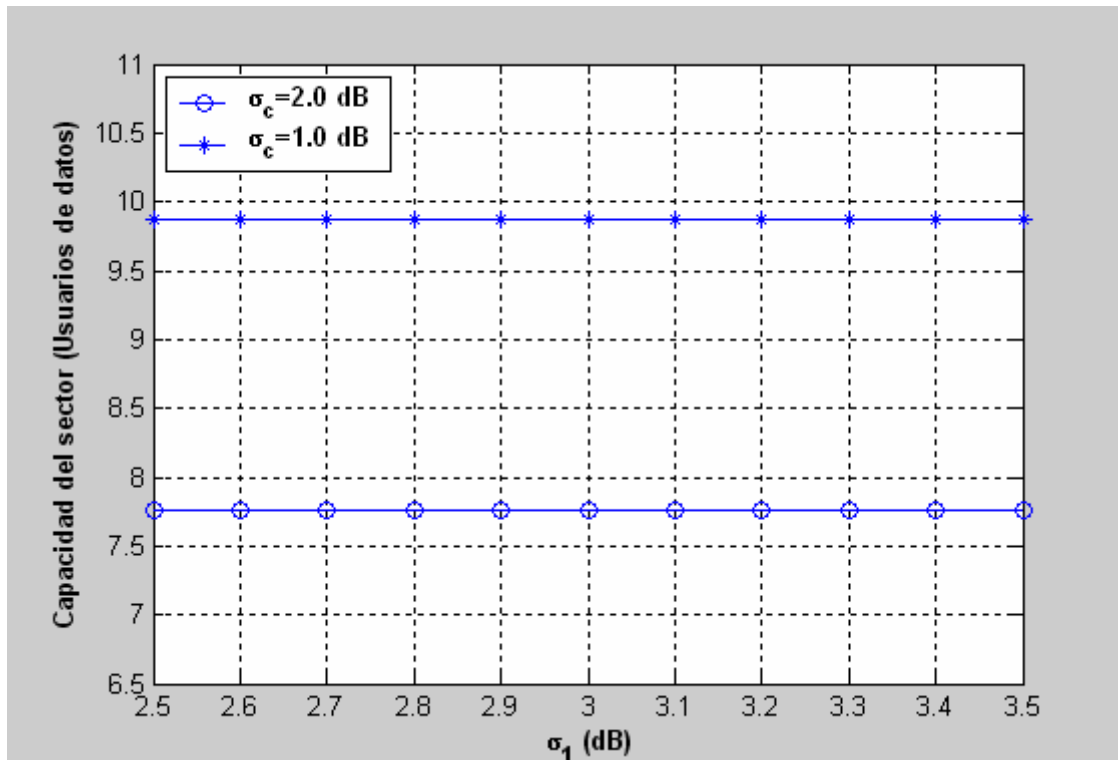


Figura 2.44: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de  $\sigma_1$

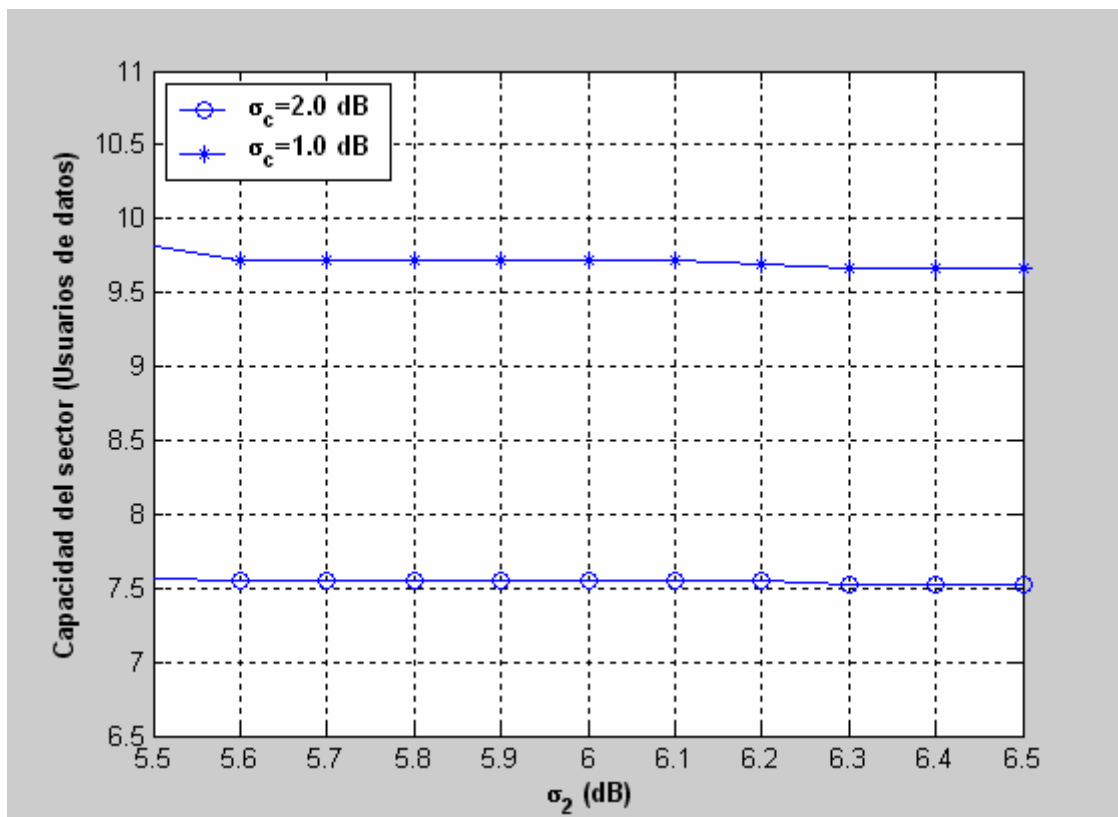
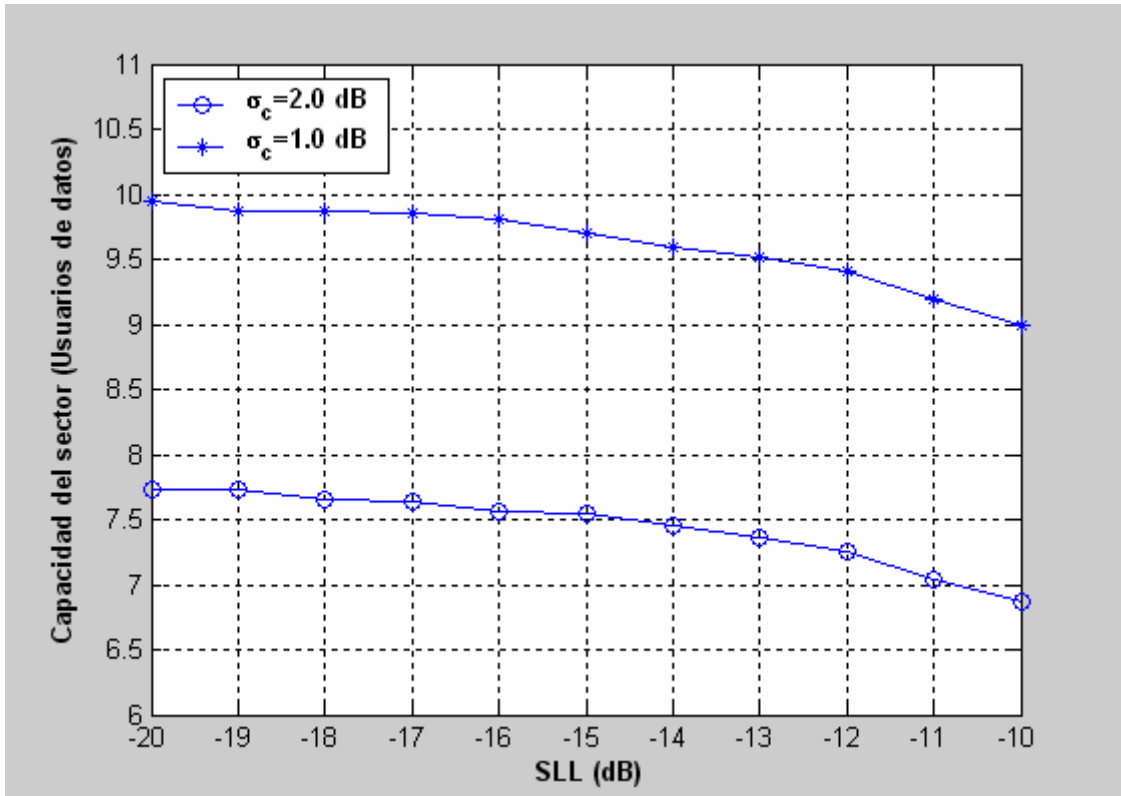


Figura 2.45: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de  $\sigma_2$



**Figura 2.46: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del SLL**

Analizando desde la Figura (2.40) a la (2.46), se puede destacar primordialmente unos resultados con mayor finura al tomarse para estos estudios una mayor resolución. Con ello se quiere dejar constancia en todo momento de que en realidad se están realizando simulaciones que pretenden acercarse lo más fielmente posible a la realidad, y que en todo momento la precisión y los resultados obtenidos dependerán de datos aproximados que se podrán ajustar más o menos en función de lo eficiente que se pretenda implementar el programa que calcula la probabilidad del desbordamiento.

### 2.7.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

En este estudio, se plantea la posibilidad de dar dos servicios de forma simultánea al usuario. Para ello, será necesario recurrir a ciertas fórmulas que difieren someramente de las mencionadas anteriormente.

En esta parte del estudio, estamos evaluando la capacidad del enlace transmitiendo voz y datos. Los resultados obtenidos en cuanto a capacidad dependerán del número de datos que pretendamos enviar.

Si analizamos las mediciones realizadas anteriormente, veremos que para una potencia de 18.6dBm en el que el envío es sólo de voz la capacidad para una probabilidad de desbordamiento (outage) de 0.01 y una  $\sigma_c$  igual a cero es de 58.2 mientras que para un envío de voz máximo (aproximadamente 9.5 paquetes de datos) la capacidad es aproximadamente cero.

#### Parámetros:

Outage: 1%

$R_b=300$  m

$R=1000$  m

$s_1=2.0$

$s_2=4.0$

$\sigma_1=3.0$  dB

$\sigma_2=6.0$  dB

Voz

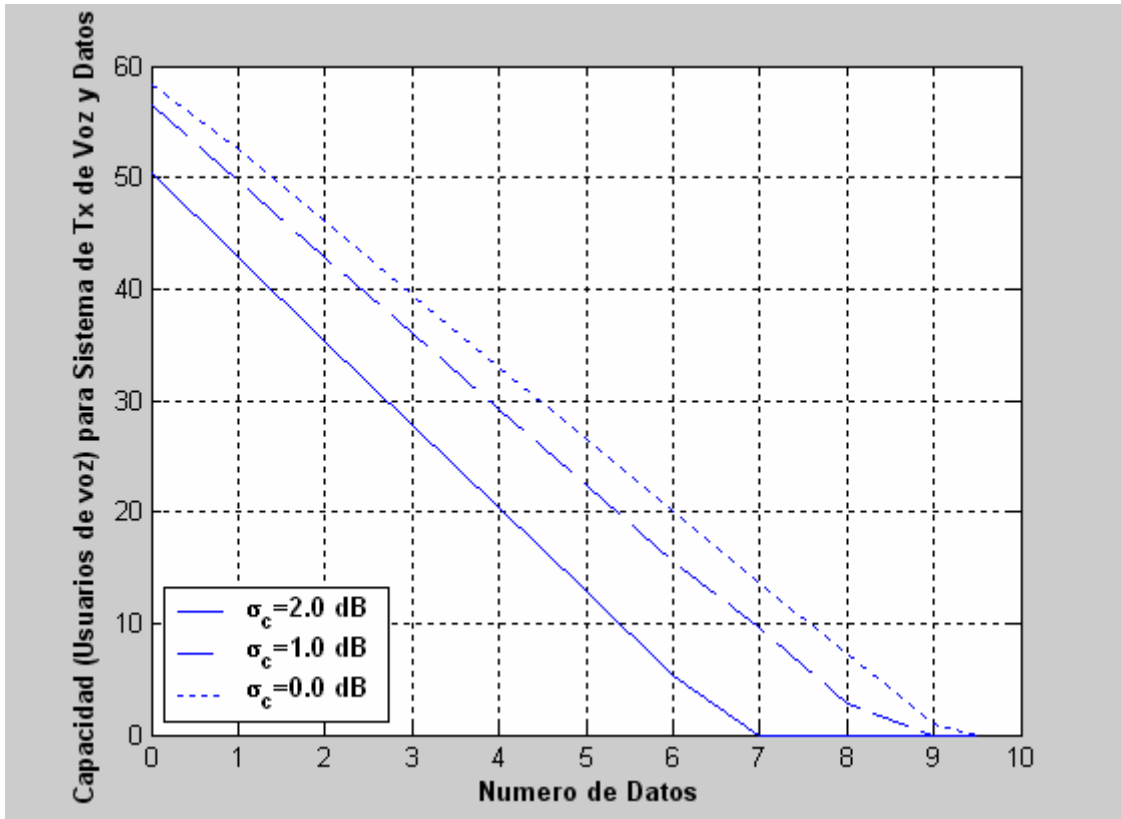
$G_{tx}=0$  dB

$G_{rx}=12$  dB

$P_{tx}=18.6$  dBm

freq= 1950 MHz

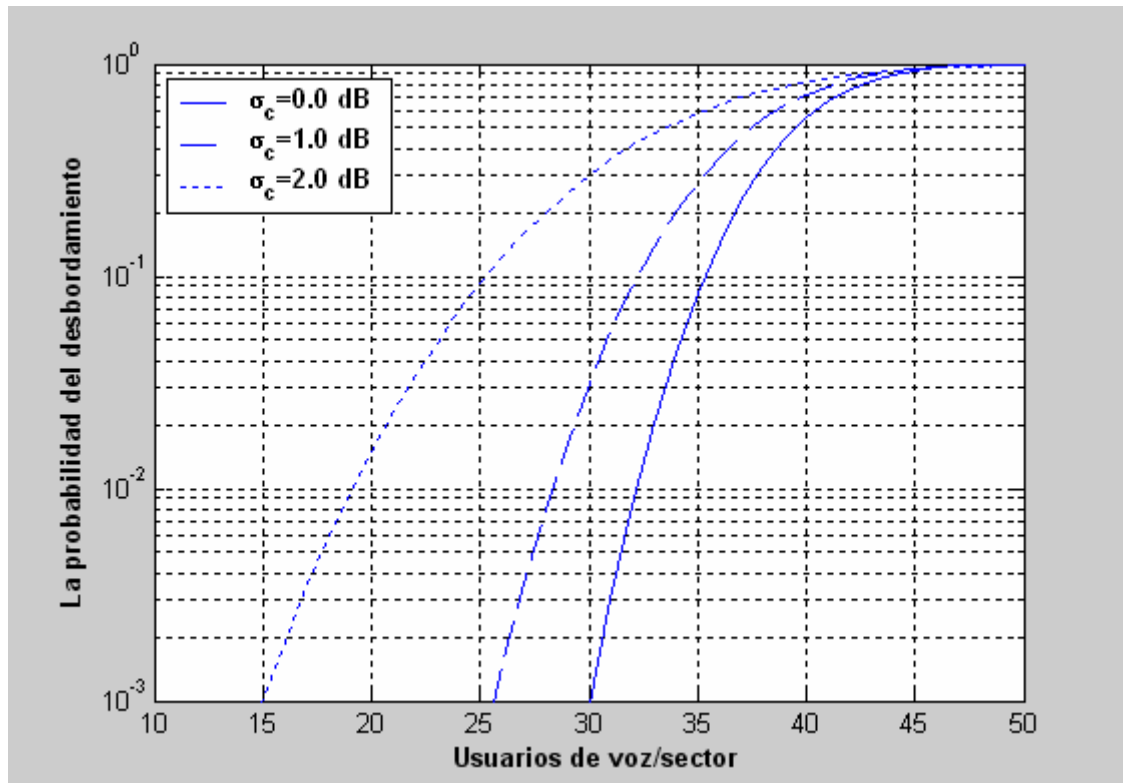
$N_{datos}$  = Variable



**Figura 2.47: Capacidad del uplink del sector en función del número de datos/sector**

A partir de la Figura (2.47), podemos observar como un incremento de la capacidad para datos va a provocar un descenso en la capacidad del número de usuarios de voz.

Generalmente, un usuario de datos va a eliminar de seis a siete usuarios de voz. Dependerá del caso que estemos estudiando, esto deberá ser tenido en cuenta, ya que para cada caso esta cifra varía ligeramente.

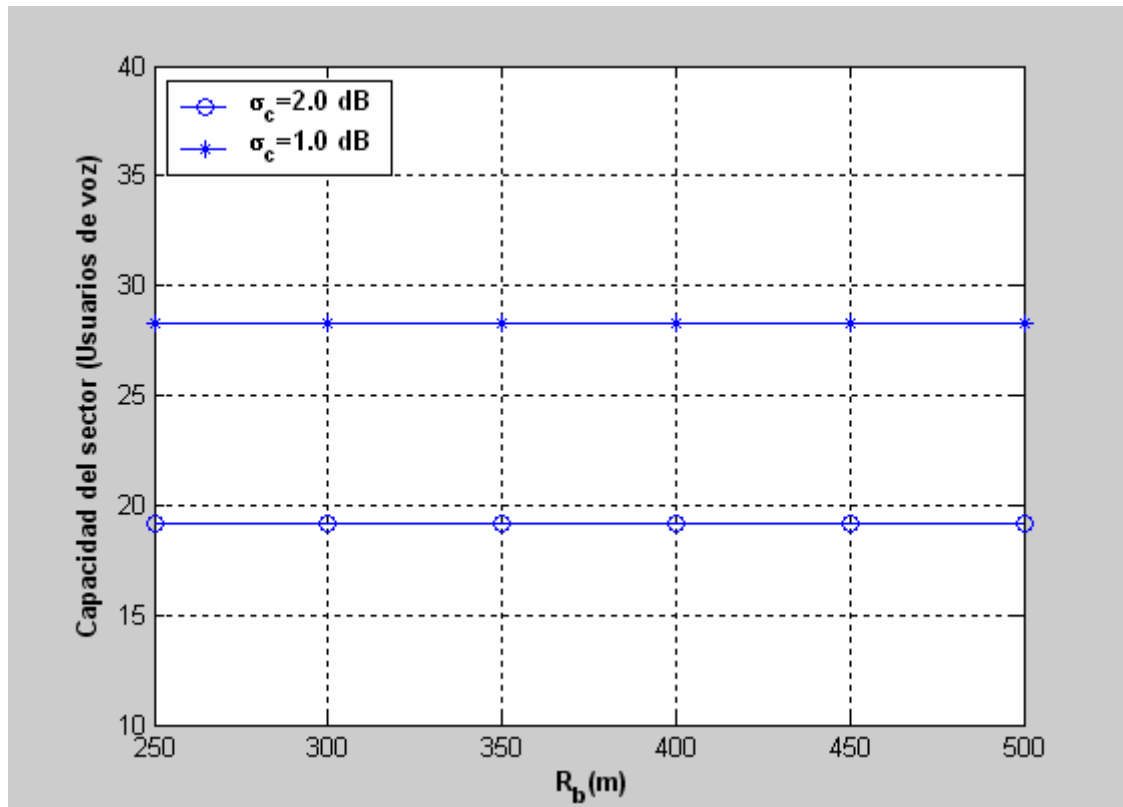


**Figura 2.48: Probabilidad del desbordamiento del uplink del sector en voz existiendo 5 usuarios de datos**

El caso de la Figura (2.48), está calculado para una situación en la cual tenemos la mitad de los usuarios de datos que eliminan aproximadamente la mitad de los usuarios de voz. Por regla general, los estudios de voz y datos se realizarán así. Por ejemplo: Si estamos ante una situación en la cual 10 usuarios de datos eliminan todos los usuarios de voz, utilizaremos para nuestros cálculos 5 usuarios de datos.

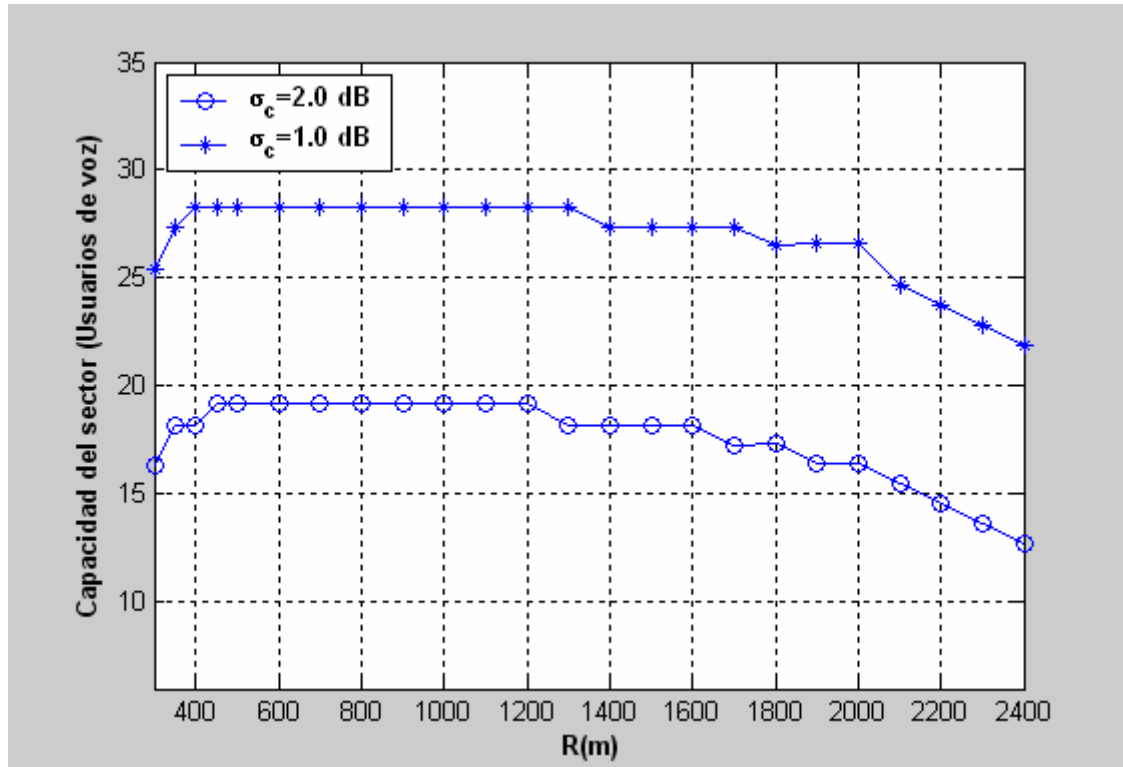
A continuación expresaremos los siguientes parámetros para una potencia transmitida para voz de 19.1dBm. Hemos tomado este valor porque es aquel que nos permite para un número de usuarios de datos igual a cero acercar la curva para  $\sigma_c=1$  dB a cero usuarios en la representación anterior. Este patrón lo seguiremos en todos los casos posteriores, salvo que en otras situaciones siguiendo la misma política, obtendremos una potencia para voz mayor o inferior a 19.1dBm.





**Figura 2.49: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del punto de corte**

Como podemos observar en este apartado y en casos anteriores, el valor del punto de corte no influye en la obtención de un mejor o peor resultado en cuanto a capacidad de número de usuarios siempre y cuando sea menor que la región de cobertura  $R$ .

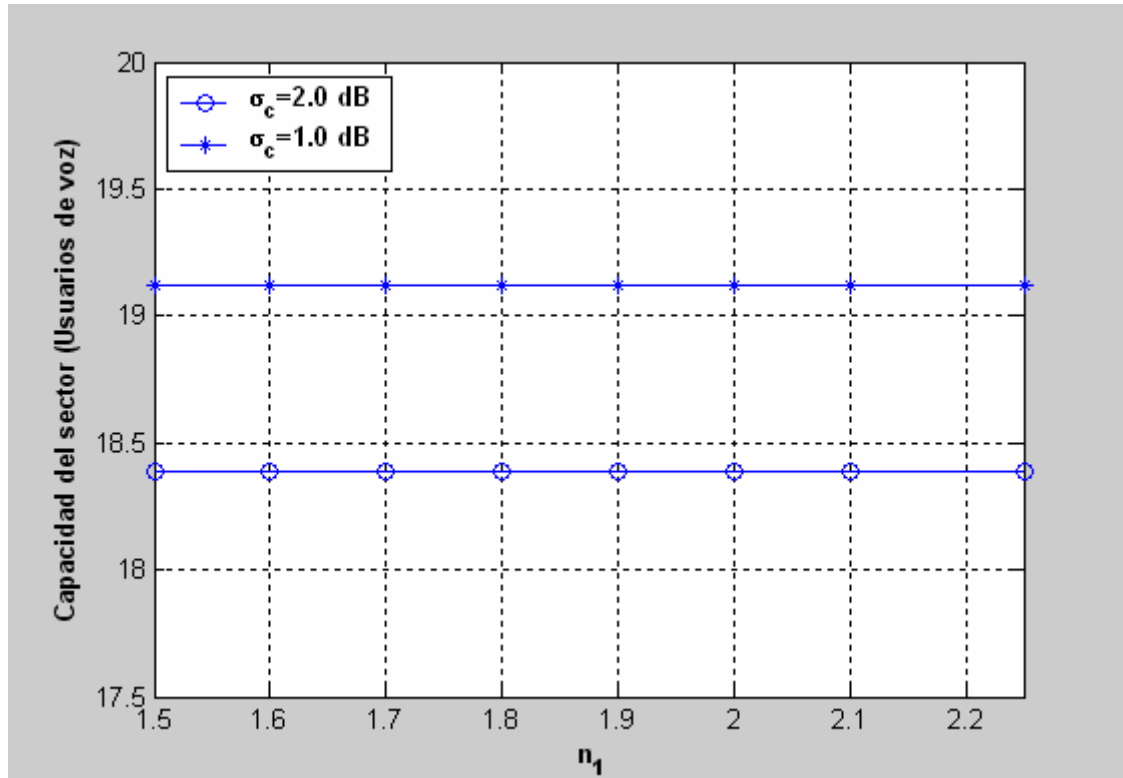


**Figura 2.50: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de la región de cobertura**

La capacidad tiende a incrementarse. Nuevamente nos remitimos a las fórmulas de pérdidas de propagación ocasionadas en la estación base, dándose dos casos en función de si R es mayor o menor que el punto de corte.

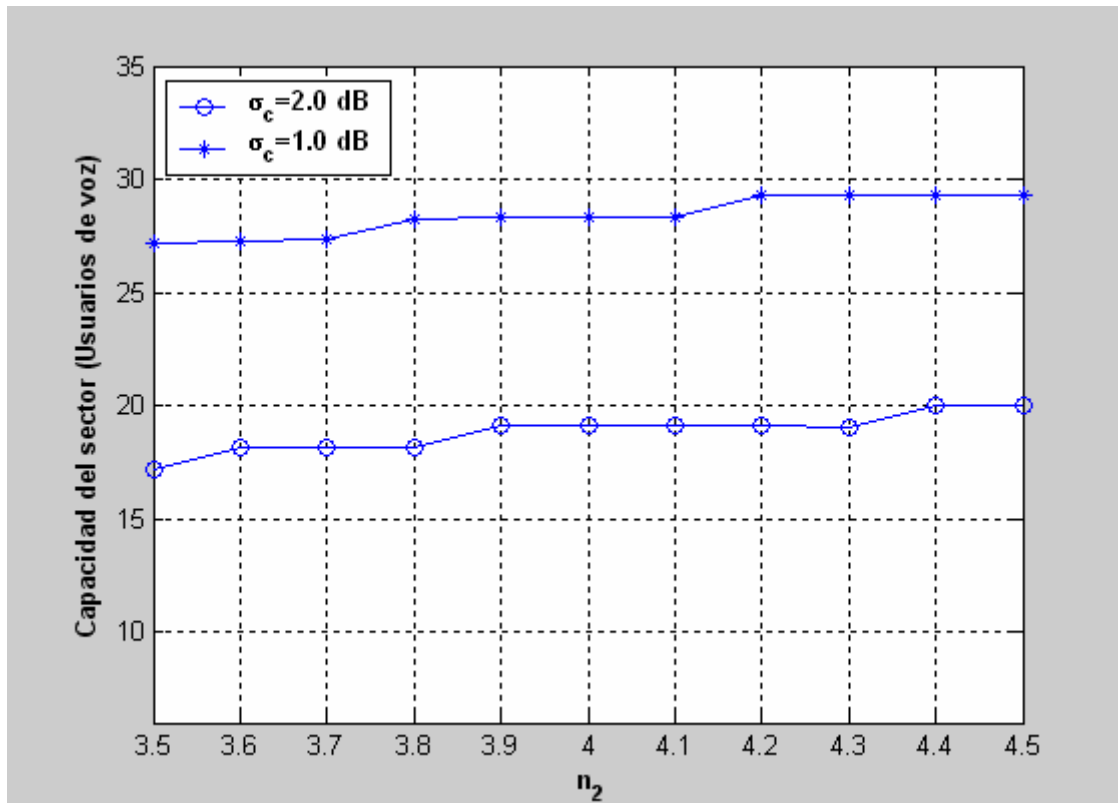
Cerca del doble del punto de corte, para valores por encima, la curva tiende a estabilizarse, volviendo a caer al alejarnos de la estación base. Normalmente, en los bordes la probabilidad de que exista cobertura será menor.

Es importante tener en cuenta que para una zona con un alto tráfico de coches se elegirá un radio  $R \geq 1000$  metros mientras que para una zona con un bajo tráfico de coches se tomará un radio  $R \leq 2400$  metros.



**Figura 2.51: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del exponente de propagación  $n_1$**

Si analizamos los resultados obtenidos en la Figura (2.51), podemos constatar que será importante contar con un exponente de propagación  $n_1$ , ya que si su valor supera a dos va a generar, como consecuencia, unas pérdidas en la capacidad de la región bajo estudio. Empíricamente, esto se puede constatar, otra forma de demostrarlo es echando mano de las fórmulas utilizadas para calcular la probabilidad del desbordamiento en el uplink.



**Figura 2.52: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del exponente de propagación  $n_2$**

Por otra parte en la Figura (2.52), si observamos el exponente de propagación correspondiente a la segunda pendiente, veremos como conforme incrementamos el valor de  $n_2$ , la capacidad se va a ver aumentada. Nos interesará tomar un valor de  $n_2$  grande en términos generales, aunque puedan darse excepciones.

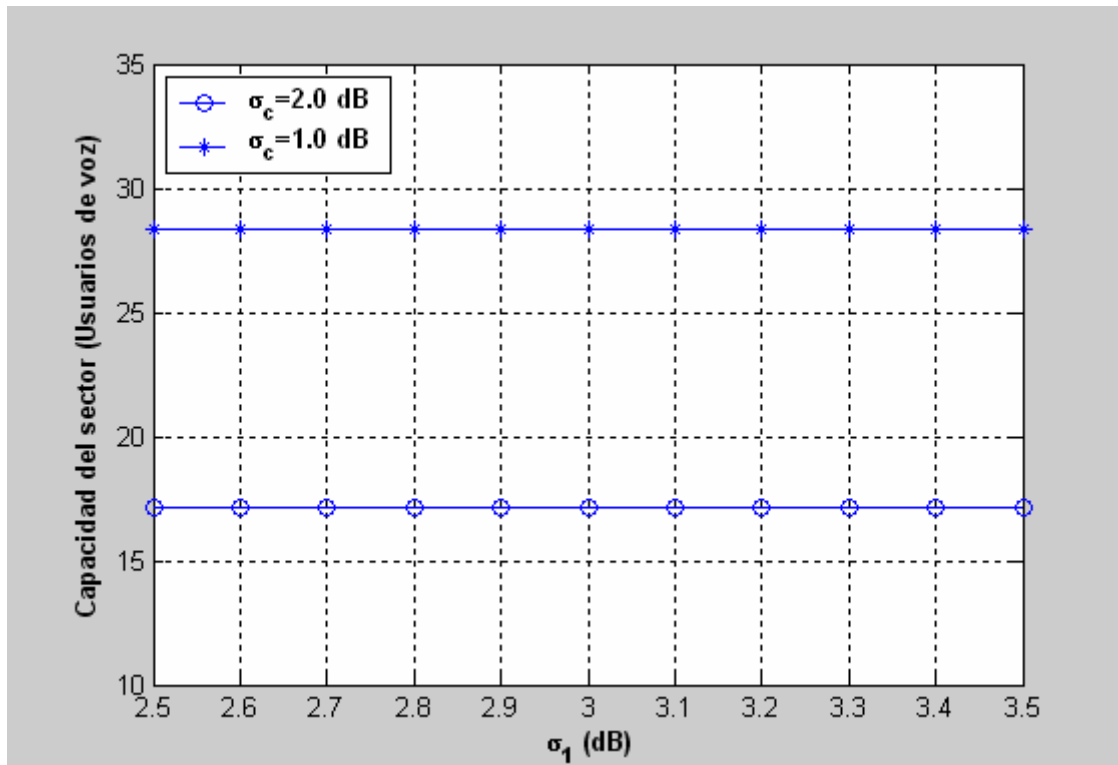


Figura 2.53: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de  $\sigma_1$

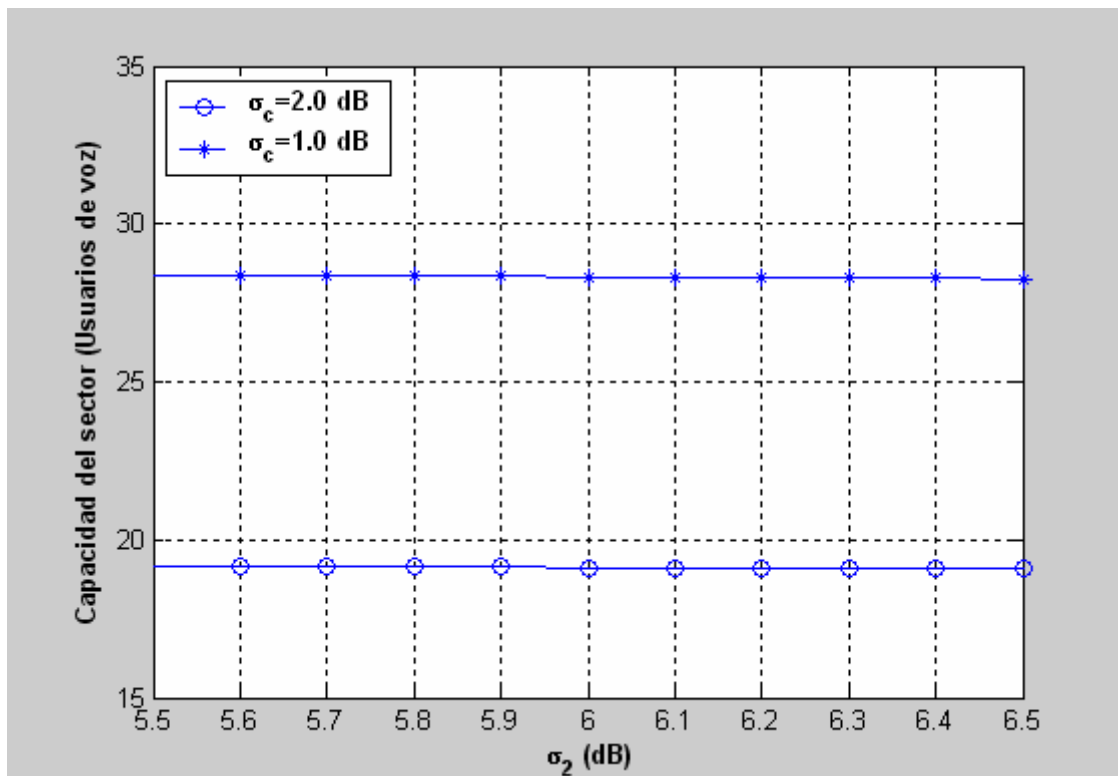
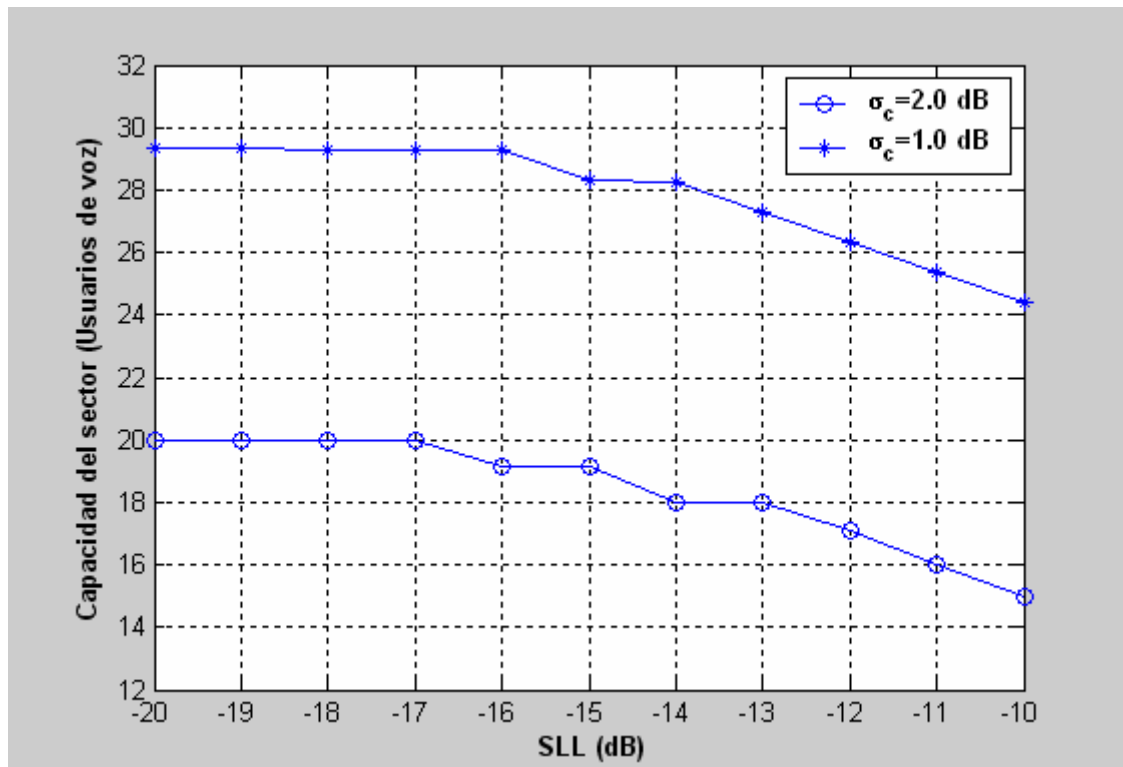


Figura 2.54: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función de  $\sigma_2$

Nuevamente, al igual que el punto de corte  $R_b$ , la variación en las Figuras (2.53) y (2.54) de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  no influye prácticamente casi en nada, apenas hemos observado una variación superior a 0.05% entre el punto de menor y mayor capacidad en la zona bajo estudio.

Basándonos en las fórmulas, se ha podido observar que  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  nos permiten calcular un término genérico de desviación denominado  $\sigma$ , que está presente en las expresiones de  $f$  y  $g$ . Ambas, si las analizamos detenidamente, poseen un elemento en la expresión de no mucha relevancia donde aparece  $\sigma$ . El no tener una gran relevancia en la fórmula en términos prácticos, hace que obtengamos resultados parecidos a los anteriores en donde la capacidad apenas varía.



**Figura 2.55: Capacidad del uplink del sector en sistema con limitación de potencia en función del SLL**

En la Figura (2.55), se vuelve a repetir el patrón de casos anteriores observando como conforme el nivel de lóbulos secundarios aumenta, la capacidad se va a ver afectada decayendo cada vez más. Nos interesará, por tanto, alcanzar valores del SLL lo más bajos posibles para poder alcanzar una capacidad máxima.

### **3. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) en servicio de trenes**



### 3.1 Introducción

La capacidad del sector instantánea puede ser el mejor valor o el peor valor en función de la posición del tren. El mejor caso se dará cuando el tren se encuentre lo más cercano posible a la estación base con la que va a establecer comunicación. El peor caso será cuando el tren se encuentre entre dos regiones, en esa situación el móvil medirá el nivel de piloto y enganchará con la base que le proporcione un mejor control de potencia.

La capacidad práctica será la que se obtendría en el peor caso. En el caso de disponer de un tren de 500 pasajeros, aproximadamente podrán comunicarse un 10% de ellos simultáneamente. Por otra parte, el nivel de lóbulos secundarios afecta de lleno a la capacidad. Esto se debe a que la reducción del nivel de interferencias y el nivel de lóbulos secundarios son dos fenómenos que van unidos. Por ejemplo un cambio de nivel de SLL de -10 a 20 dB puede provocar que la capacidad se vea reducida en aproximadamente 5 usuarios. Otro aspecto a tener en cuenta es que un aumento de la superficie cubierta por el sector hace que la interferencia de sectores vecinos sea menor, permitiendo, en consecuencia, una capacidad mayor. Un buen compromiso sería elegir un rango con valores entre [500 800] metros.

En el caso de que la velocidad del tren alcanzara velocidades elevadas a 500 Km/h se daría el efecto Doppler. Aspecto importante a estudiar para futuros trenes en el futuro. Para los análisis realizados no se ha tenido en cuenta.

### 3.2 Modelo de propagación

En primer lugar, hablaremos de las pérdidas básicas de propagación dadas por las expresiones (3.1) y (3.2) [13].

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + \xi_1 \quad \text{si } r \leq R_b \quad (3.1)$$



$$L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left( \frac{r}{R_b} \right) + \xi_2 \quad \text{si } r > R_b \quad (3.2)$$

Las pérdidas básicas  $L_b$  son las pérdidas para  $r=R_b$  y  $R_b$  viene dada por la fórmula (3.3):

$$R_b \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (3.3)$$

$h_b$  es la altura de la antena de la estación base.

$h_m$  es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\xi_1$  y  $\xi_2$  son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente. Generalmente, estas variables aleatorias alcanzan valores inferiores a 10 dB. A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar:

$$s_1 = 1.75 \text{ a } 2.25$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 4 \text{ a } 6 \text{ dB}$$

A continuación, se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. En el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco micro celdas.

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (3.4)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_2-s_1)} \left( \frac{r_{im}^{s_1}}{r_{id}^{s_2}} \right) \quad (3.5)$$

- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_1-s_2)} \left( \frac{r_{im}^{s_2}}{r_{id}^{s_1}} \right) \quad (3.6)$$

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (3.7)$$

$\xi_{id}$  y  $\xi_{im}$ , ambos poseen las relaciones de:

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_2$
- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_2$

$$U(r) = \begin{cases} 1, & \text{Región de tren} \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) = \begin{cases} 1, & \rightarrow L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, & \rightarrow \text{resto} \end{cases} \quad (3.9)$$

Se asume una densidad uniforme de usuarios en cada sector  $\rho = N_u / R$  [3]

$$E[I_{S0}]_r \approx \alpha_s \rho_s \int_{s0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) U(r) dr \quad (3.10)$$

Donde a su vez el parámetro 'f' tiene el siguiente desarrollo:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right] = \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1 / L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

$\beta = \left(\frac{\ln 10}{10}\right)$ , siendo  $\alpha$  el factor de actividad (0.63 para voz y 1.0 para datos).

A continuación hallaremos una relación para  $\sigma^2$  en las expresiones (3.12), (3.13) y (3.14):

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad (3.12)$$

- Cuando  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  o  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$   $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto:

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad (3.13)$$

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_2$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \quad (3.14)$$

La función Q(x) vale

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (3.15)$$

A continuación, se hará un análisis detenido de la esperanza referida a las interferencias intercelulares e intracelulares como medida de estas.

Cabe destacar, que las medidas más utilizadas serán la esperanza y la desviación estándar [13].

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s1} L(r_{id}, r_{im}) E[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}] U(r) dr \quad (3.16)$$

Las interferencias ocasionadas por la parte derecha de la región S1 vienen dadas por la expresión (3.17):

$$E[I]_{r,s} = E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s} \quad (3.17)$$

Finalmente, la fórmula (3.18), que se obtiene teniendo en cuenta el nivel de lóbulos secundarios es la siguiente:

$$E[I]_{inter,s} = E[I]_{r,s} (1 + SII) \quad (3.18)$$

Potencia interferente intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} \quad (3.19)$$

Potencia interferente intracelular:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_u (1 + SII) \quad (3.20)$$

Potencia interferente final:

$$E[P]_{intf}]_{t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (3.21)$$

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P_{int f}]_t = \sum_{s=1}^M E[P_{int f}]_{t,s} \quad (3.22)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación expresaremos las fórmulas correspondientes a la varianza directamente relacionadas con la desviación estándar [13]. Cabe destacar que las expresiones (3.23) y (3.24) se utilizarán en las relaciones sucesivas.

$$p = e^{2\beta^2\sigma_c^2} \quad (3.23)$$

$$q = e^{\beta^2\sigma_c^2} \quad (3.24)$$

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} U(r) dr \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right]^2 = \\ &= e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

Varianza de señal interferente debido a la región S<sub>1</sub> en fórmula (3.27):

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}\right]^2 - q \alpha_s^2 E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}\right] \right\} U(r) dr$$

Varianza de la interferencia intercelular:

$$\text{var}[I]_{inter,s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\} (1 + Sll) \quad (3.28)$$

Varianza de interferencia intracelular:

$$\text{var}[I]_{int ra,s} = Nu (1 + Sll) (p \alpha_s - q \alpha_s^2) \quad (3.29)$$

Varianza de interferencia total:

$$\text{var}[I]_{t,s} = \text{var}[I]_{inter,s} + \text{var}[I]_{int ra,s} \quad (3.30)$$

Varianza de la potencia total interferente:

$$\text{var}[P]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (3.31)$$

Por otra parte, exponemos la fórmula correspondiente a la probabilidad de desbordamiento de vital importancia en cada uno de los estudios realizados a lo largo de todo el proyecto.

La varianza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$\text{var}[P_{\text{int } f}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (3.32)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

$$P_{\text{out}} = Q \left[ \frac{E(P)_{t,s|N_u = N_{u\text{MEDIO}}} - E(P)_{t,s|N_u = N}}{\sqrt{\text{var}(P)_{t,s|N_u = N}}} \right] \quad (3.33)$$

Finalmente, F es un factor que viene dado por la fórmula (3.32):

$$F = \frac{\text{Interferencia Inter celular}}{\text{Interferencia Intra celular}} = \frac{E[P]_{\text{int } er,s}}{E[P]_{\text{int } ra,s}} \quad (3.34)$$

### 3.3 Conceptos de CDMA relacionados con el caso bajo estudio

En el caso de estudiar una situación en la cual no haya un control perfecto de potencia, nos encontraremos ante un caso en el que la distribución del número de usuarios no es uniforme. Nuevamente volviendo al caso bajo estudio, trabajaremos con un control perfecto de potencia.

Haciendo una breve introducción del futuro tema a tratar, se dará un efecto parecido al que se genera en una guía de onda apareciendo un término n (modo de propagación en una guía de onda).

En las investigaciones llevadas a cabo, estaremos refiriéndonos a situaciones genéricas en las que se comunica un porcentaje de los pasajeros, no llegándose a dar situaciones de saturación.

Como en el estudio realizado para carreteras, los sectores bajo estudio estarán divididos en dos regiones  $S_0$  y  $S_1$ . El usuario establecerá conexión con la micro celda más próxima en principio a no ser que otra más lejana le proporcione una potencia piloto mayor.

Cabe destacar que casi prácticamente todas las interferencias son producidas por la región  $S_0$  que como ya pudimos observar anteriormente, se encuentra más cercano al sector de referencia que se pretende estudiar.

### 3.4 Análisis numérico genérico para el mejor caso



Figura 3.1

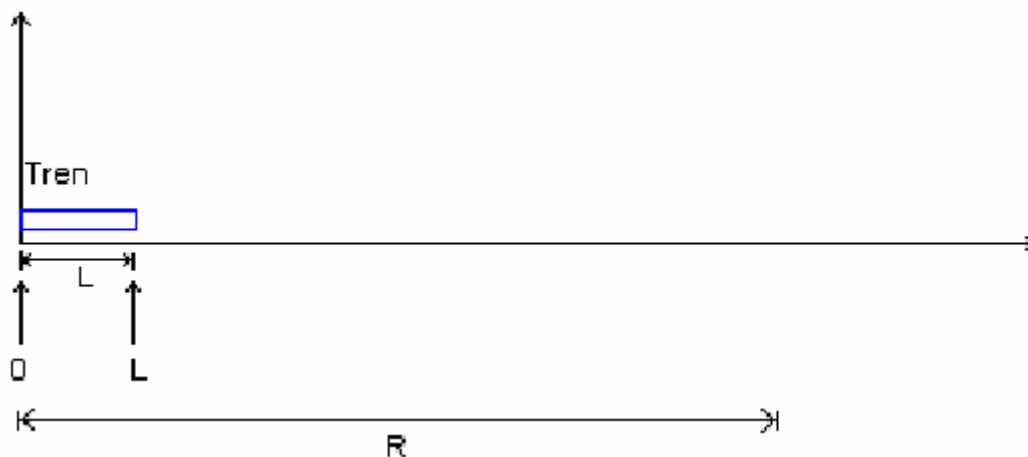
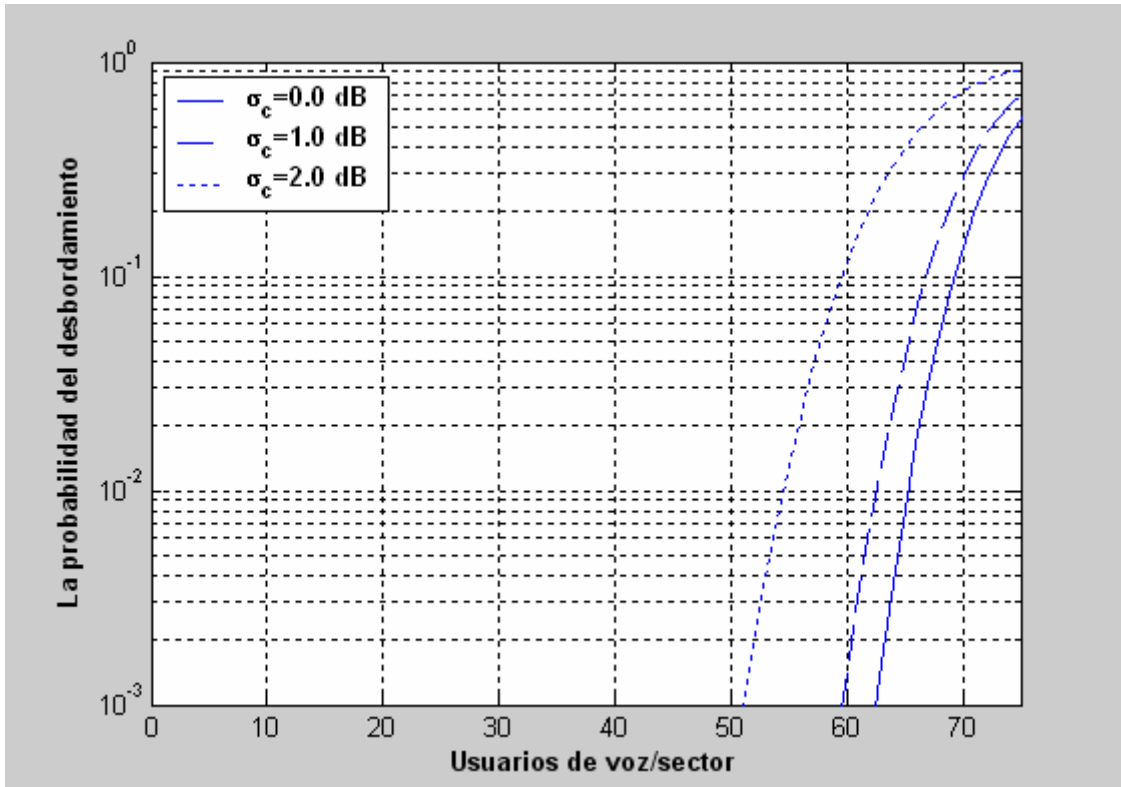


Figura 3.2: Sector bajo estudio en el que el tren se encuentra lo más próximo a la estación base.



**Figura 3.3: Probabilidad del desbordamiento del uplink del sector en sistema con limitación de potencia**

En la Figura (3.3) se observa como por ahora, no se están teniendo en cuenta los efectos derivados del movimiento del tren, estamos suponiendo un caso estático para simplificar el problema. En el caso de que el tren más situado en el borde de la región de cobertura se encontrase la mitad de este en una región y la mitad en otra, implicaría que unos usuarios serían abastecidos por una estación base y otros más cercanos a la segunda base serían atendidos por ésta.

### 3.5 Análisis numérico para el peor caso



Figura 3.4: Escenario que ejemplifica el caso bajo estudio

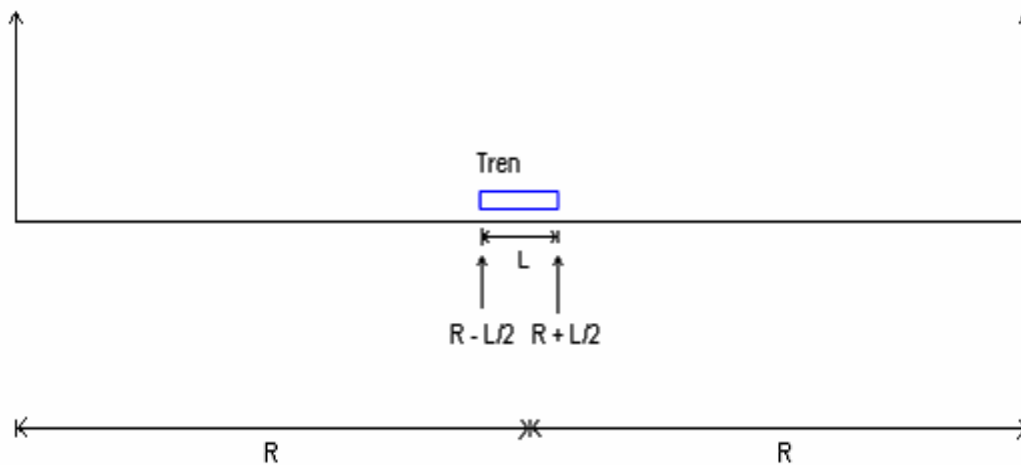


Figura 3.5: Tren colocado en el extremo del sector

Las diferencias respecto al caso anterior se pueden observar a simple vista en la Figura (3.5). El tren pasa a encontrarse en la zona media de la región de cobertura. Esto genera diversos efectos en cuanto a capacidad, podrán darse dos situaciones que la capacidad de usuarios sea la misma, pero la cobertura en ese punto descienda o que la capacidad a su vez también se vea afectada en ese punto al disminuir la cobertura.



En el primer caso estudiado, la situación será similar a la comentada en este último estudio. No obstante, aparece una diferencia apreciable al contemplar este caso. Este se encuentra situado entre dos regiones de cobertura diferentes. Por tanto, habrá usuarios que establezcan comunicación con la base inicial bajo estudio, mientras que otros establecerán con la segunda base la comunicación. No obstante, podrán darse situaciones en las cuales, aun encontrándonos más cerca de una base seamos atendidos por la otra al ser la potencia piloto de ésta mayor.

**Parámetros:**

$$n_1 = 2.0$$

$$n_2 = 4.0$$

$$\sigma_1 = 3.0 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 6.0 \text{ dB}$$

$$R_b = 300 \text{ m}$$

$$R = 1000 \text{ m}$$

$$\sigma_c = 0, 1, 1.5, 2 \text{ dB}$$

$$\varepsilon = 0.9375$$

$$G_{p\text{VOZ}} = 256$$

$$G_{p\text{DATOS}} = 26.6$$

$$\alpha_{\text{voz}} = 0.63$$

$$\alpha_{\text{datos}} = 1.0 \text{ (Para datos)}$$

$$(E_b/N_0)_{\text{up voz}} = 7 \text{ dB}$$

$$(E_b/N_0)_{\text{up datos}} = 3 \text{ dB}$$

$$G_{\text{tx}} = 0 \text{ dB}$$

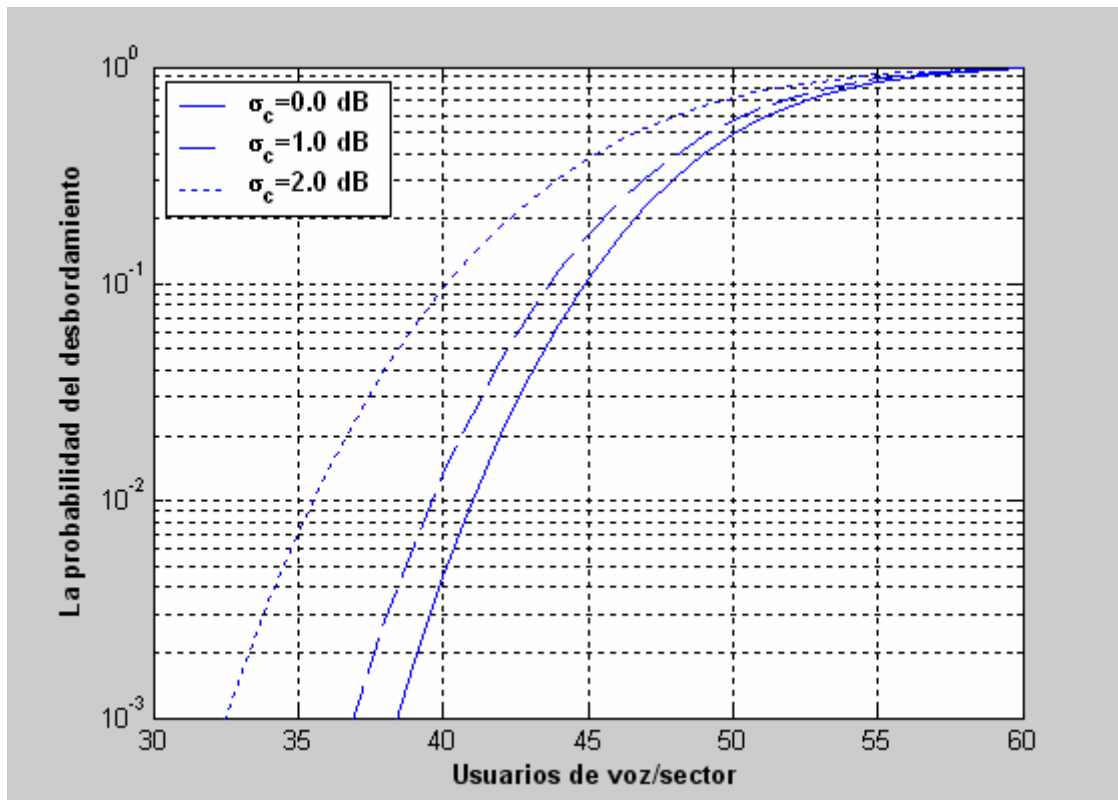
$$G_{\text{rx}} = 12 \text{ dB}$$

$$P_{\text{tx voz}} = 18.6 \text{ dBm}$$

$$P_{\text{tx datos}} = 25 \text{ dBm}$$

$$\text{freq} = 1950 \text{ MHz}$$

### 3.5.1 Análisis numérico para voz



**Figura 3.6: Probabilidad del desbordamiento**

Los estudios realizados se centran, generalmente, en sistemas con limitación de potencia ya que si no hubiera limitación de potencia los fenómenos que estamos estudiando para los diferentes parámetros no se darían. Por otra parte, en realidad, siempre hablaremos de sistemas limitados en potencia porque siempre se buscará mejorar los parámetros de eficiencia y coste en los sistemas de telecomunicaciones.

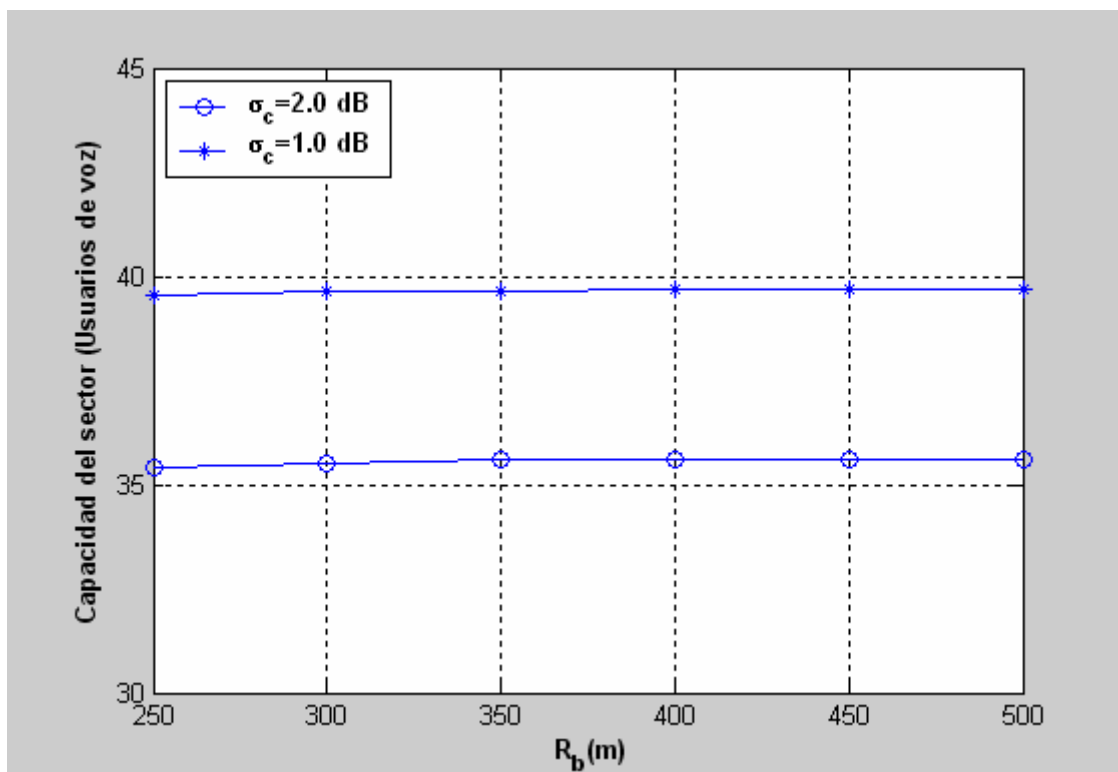
Es importante destacar, en la Figura (3.6), que los resultados obtenidos cumplirán coherentemente unas propiedades al variar los valores de los diferentes parámetros.

La potencia como se comentará posteriormente, ha de ser en voz inferior a la de datos por las diferentes propiedades de propagación. Por tanto, los valores razonables de potencia que encontraremos rondarán en voz cercanos a un margen entre 18 y 20 dBm normalmente.

Se puede comprobar como el número de usuarios ha descendido considerablemente, esto se debe a que los resultados corresponden al caso más crítico que podría darse en el estudio de la capacidad de número de usuarios de voz para trenes. Esta situación se dará al encontrarse parte del tren en el borde de un sector y el resto en el sector contiguo a éste.

Algunos puntos donde este tipo de vehículos encontrarán máxima capacidad de usuarios se darán en las estaciones de tren.

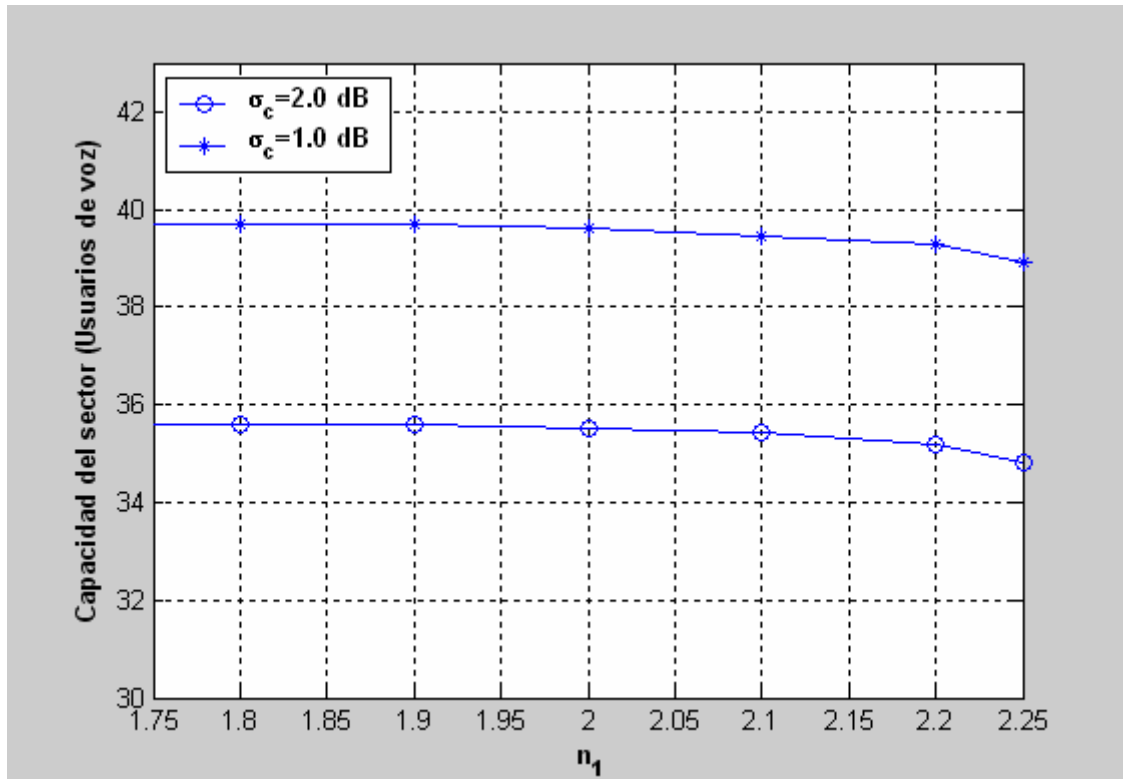
A continuación en los estudios que realicemos sobre la capacidad, se tenderá a comparar el efecto producido con una desviación en la potencia de control de 1dB y 2 dB.



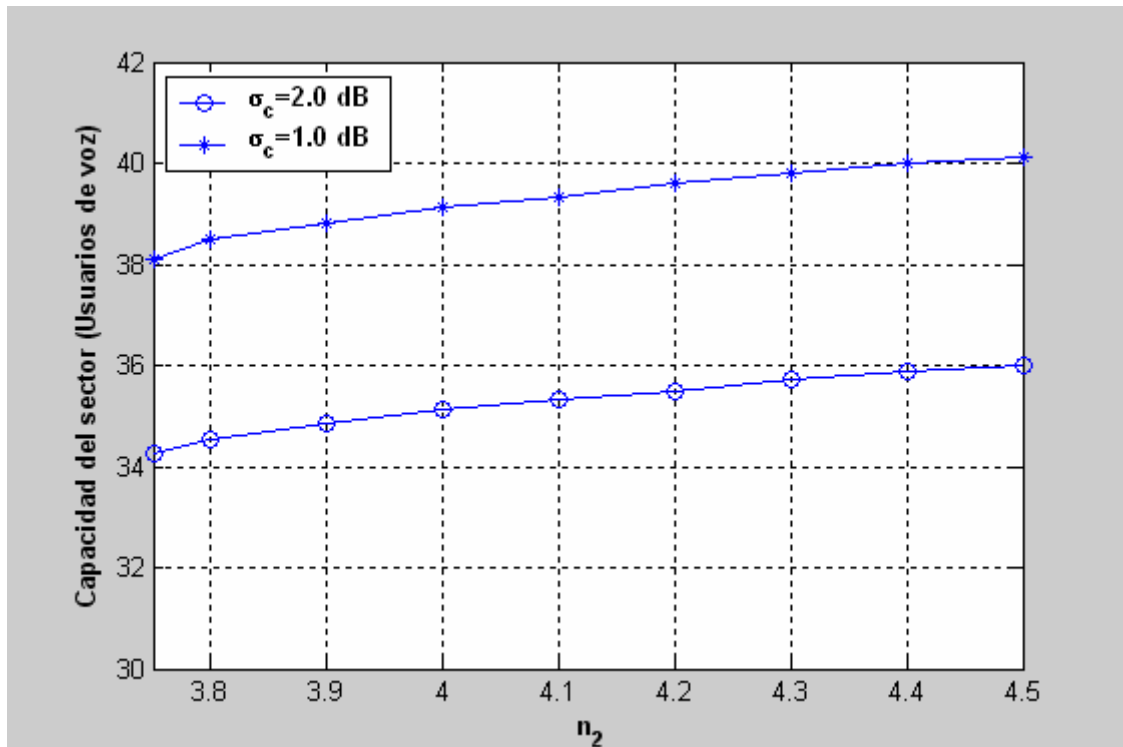
**Figura 3.7: Capacidad del uplink del sector de número de usuarios en función del punto de corte**

Nuevamente en la Figura (3.7), como en los estudios realizados en autopistas, la variación del punto de corte no supone cambios apreciables en

los resultados de nuestro estudio. Esto se debe a que el radio correspondiente a la región de cobertura del sector es bastante mayor que el punto de corte.



**Figura 3.8:** Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

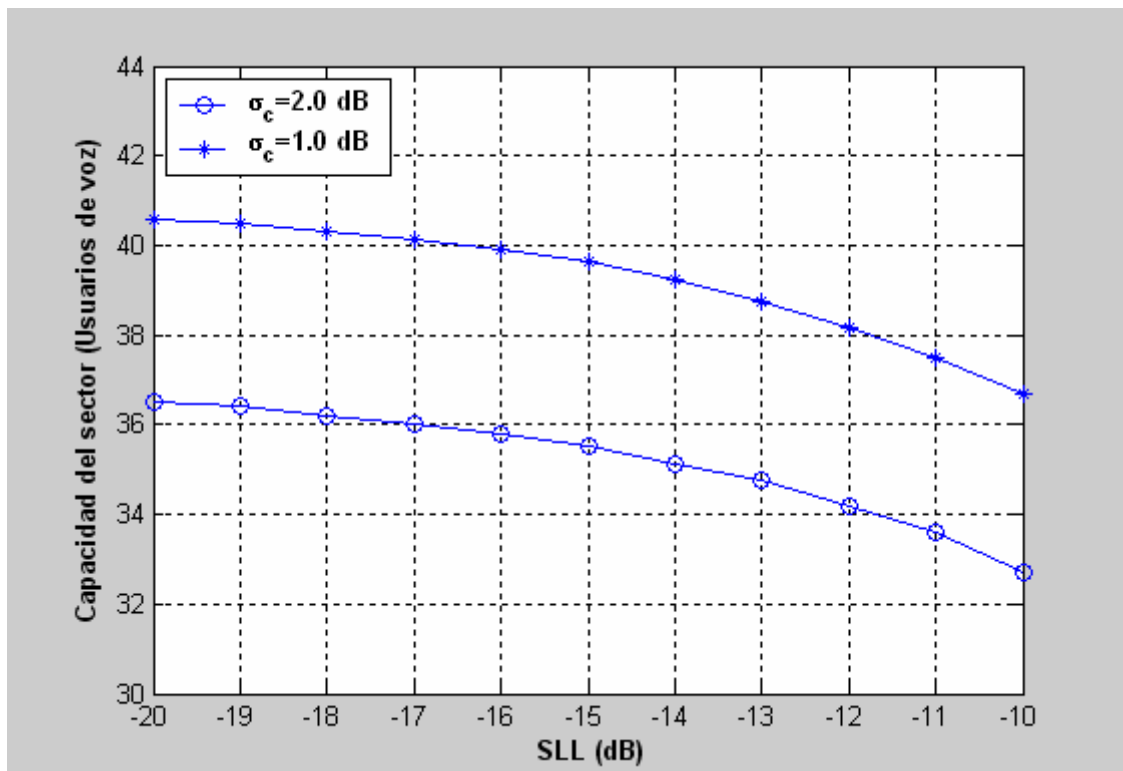


**Figura 3.9:** Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

Los resultados obtenidos en las Figuras (3.8) y (3.9) nos muestran como los exponentes de propagación hacen cambiar ligeramente la capacidad en 3 usuarios aproximadamente. Veremos comparando en estudios posteriores, como esta variación es grande.

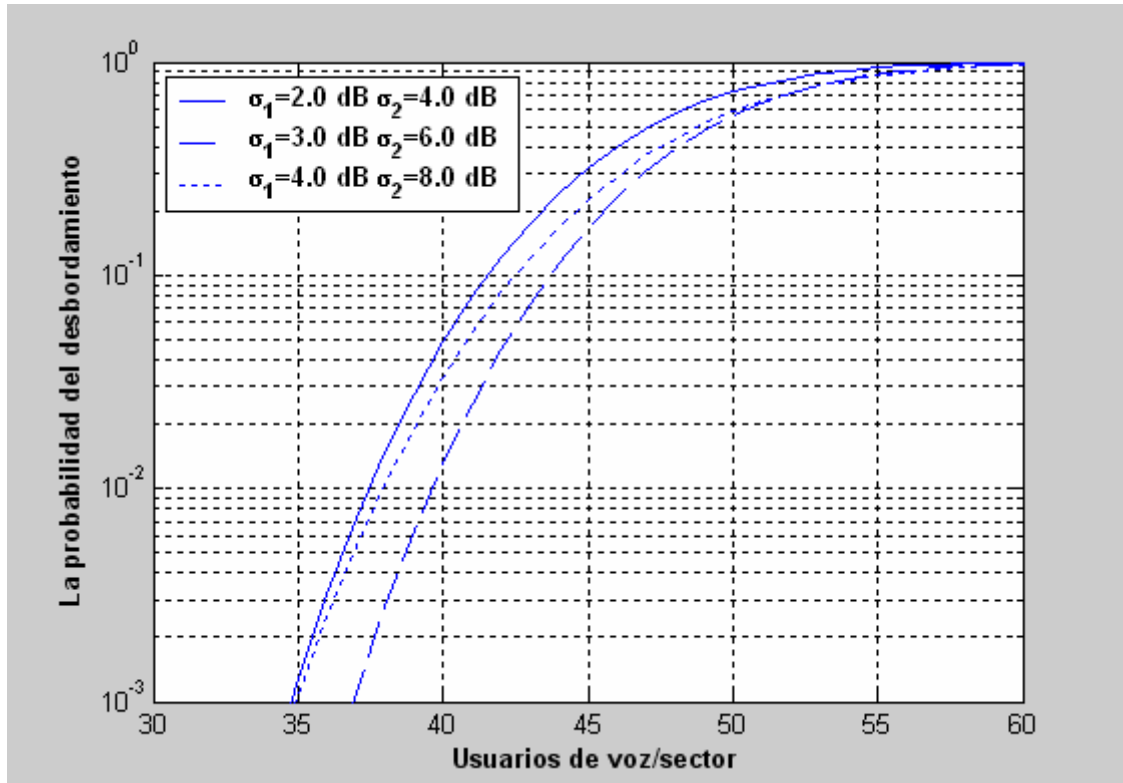
Como regla general,  $n_1$  provocará un descenso en la capacidad y  $n_2$  generará un ascenso sobre ésta.

Si nos basamos en las fórmulas, un ascenso de  $n_2$  para valores superiores a 6 y posteriores provocarán un descenso de la capacidad en lugar de un ascenso. Por este motivo, en las investigaciones llevadas a cabo sólo se ha analizado para valores entre 3.75 y 5 incluso inferiores a estos.



**Figura 3.10: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**

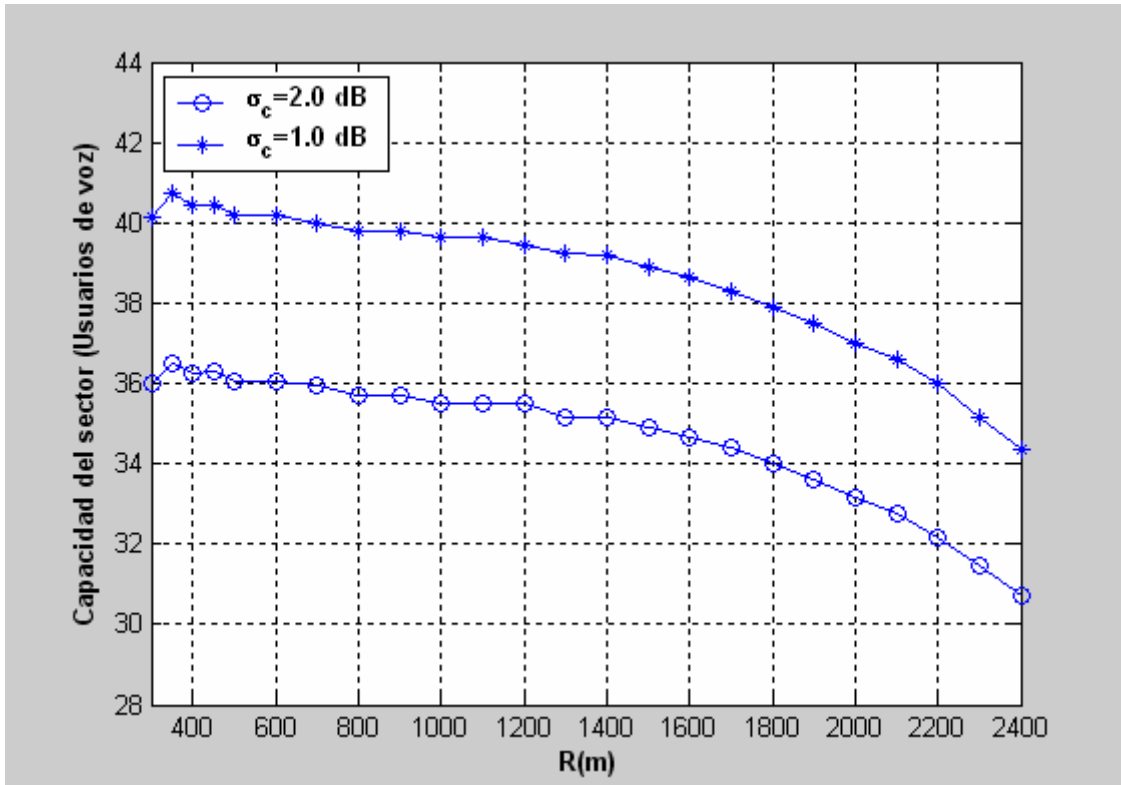
En la Figura (3.10), volvemos a apreciar como un aumento del SLL se traduce en un descenso de la capacidad.



**Figura 3.11: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Como podemos observar en la gráfica correspondiente a la Figura (3.11), los valores obtenidos para distintas desviaciones son coherentes. En ningún caso una de las gráficas debe cruzarse con otra para alcanzar un valor de capacidad inferior. Es muy común que una de las representaciones para una desviación determinada, empiece próximo a una gráfica y acabe muy próxima a otra. Fundamentalmente, este fenómeno se deberá a que la resolución utilizada para el cálculo de la SNR en el programa no sea todo lo pequeña que se pueda.

En este caso, podemos ver esta situación viendo como la representación para  $\sigma_1=4\text{dB}$  y  $\sigma_2=8\text{ dB}$  comienza próxima a la de  $\sigma_1=3\text{dB}$  y  $\sigma_2=6\text{ dB}$  y acaba pegada a la de  $\sigma_1=2\text{dB}$  y  $\sigma_2=4\text{ dB}$ .



**Figura 3.12: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

En esta figura, fundamentalmente podemos destacar como la capacidad del uplink es mayor para un valor de R un poco mayor que el punto de corte. Por regla general,  $300 < R < 400$  nos permitirá una mayor capacidad a costa de disminuir la región de cobertura.

En términos prácticos, nos interesará trabajar con una región de cobertura que posea un valor intermedio; esto nos permitirá tener una capacidad de usuarios aceptable y poder cubrir una zona de cobertura que se ajuste a unas necesidades más prácticas en torno a  $1\text{Km} < R < 1.5\text{Km}$ .

### 3.5.2 Análisis numérico para datos

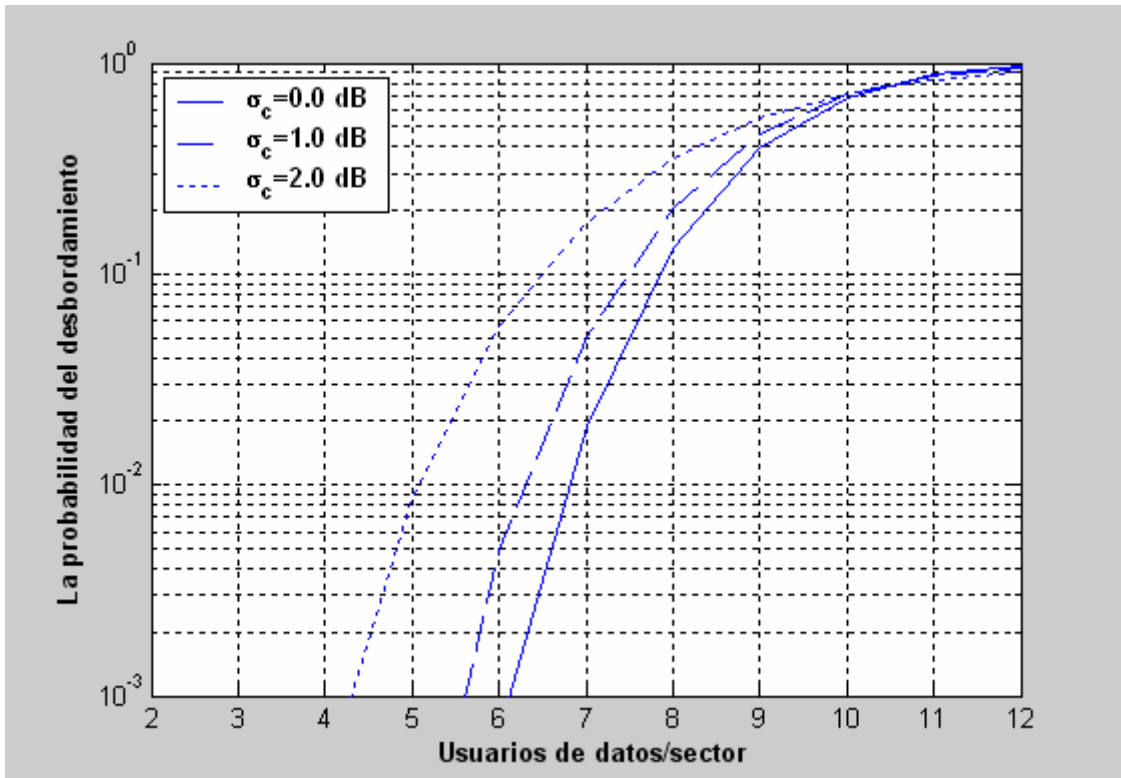


Figura 3.13: Probabilidad del desbordamiento en el sistema

Comparando con el caso para autopistas, la capacidad se ha visto considerablemente disminuida en la Figura (3.13).

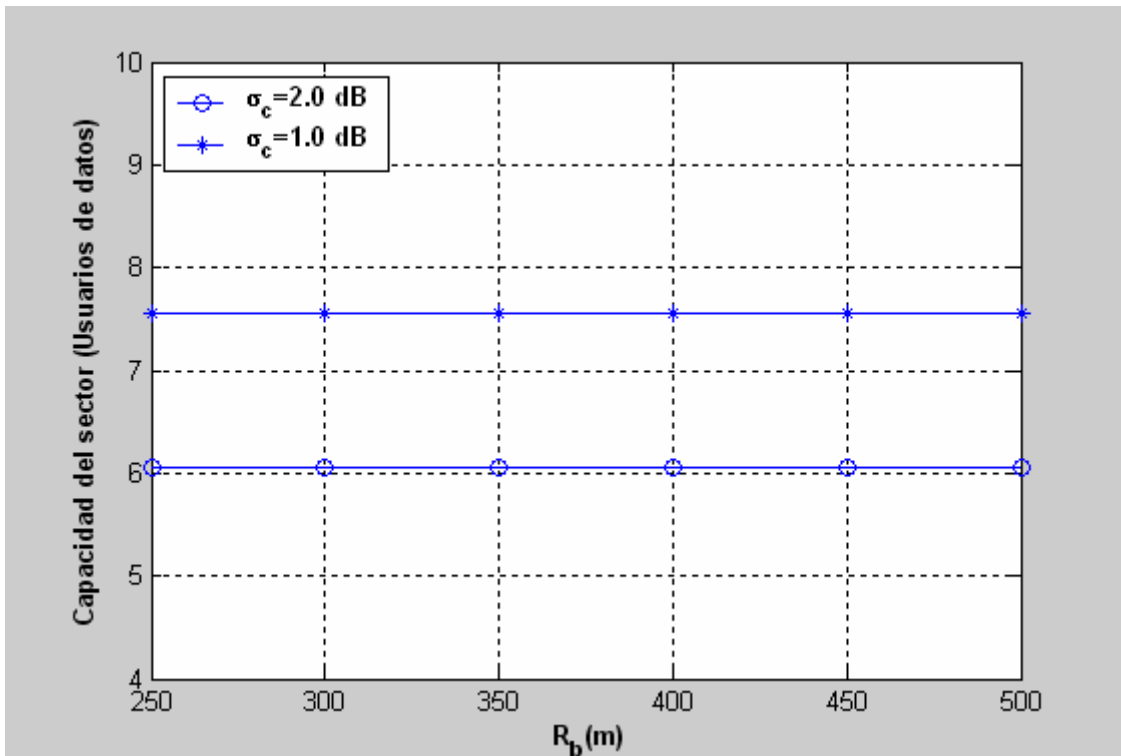
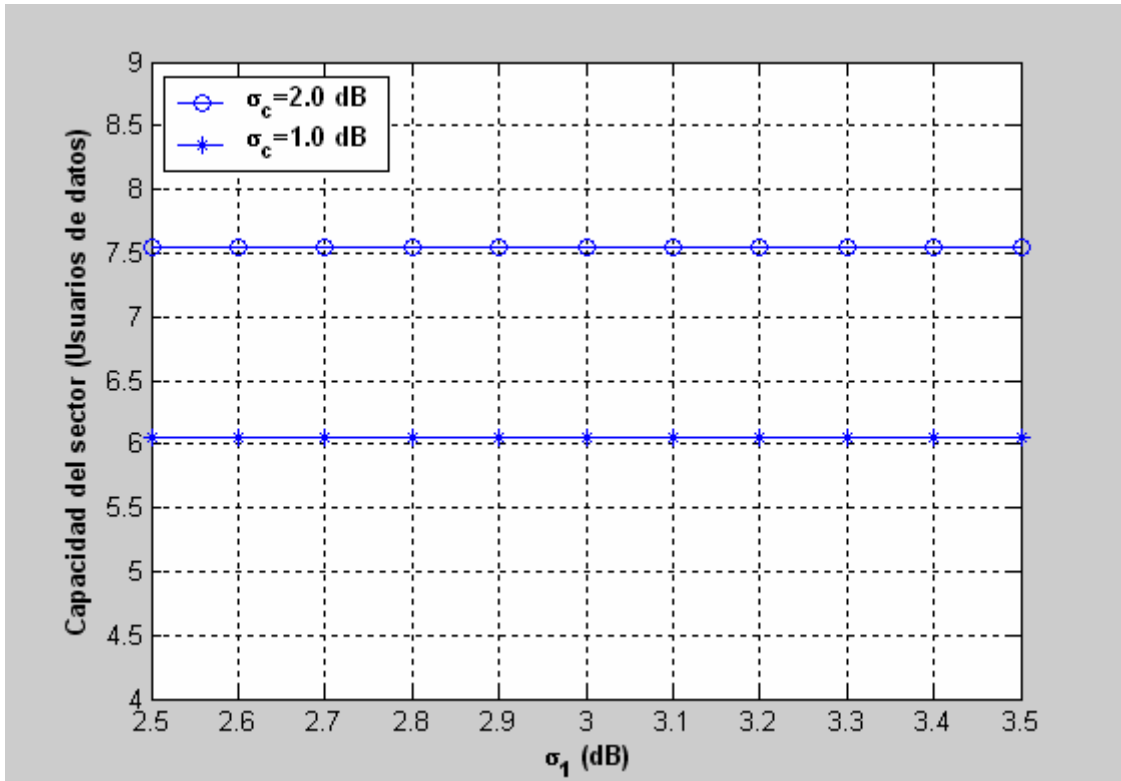
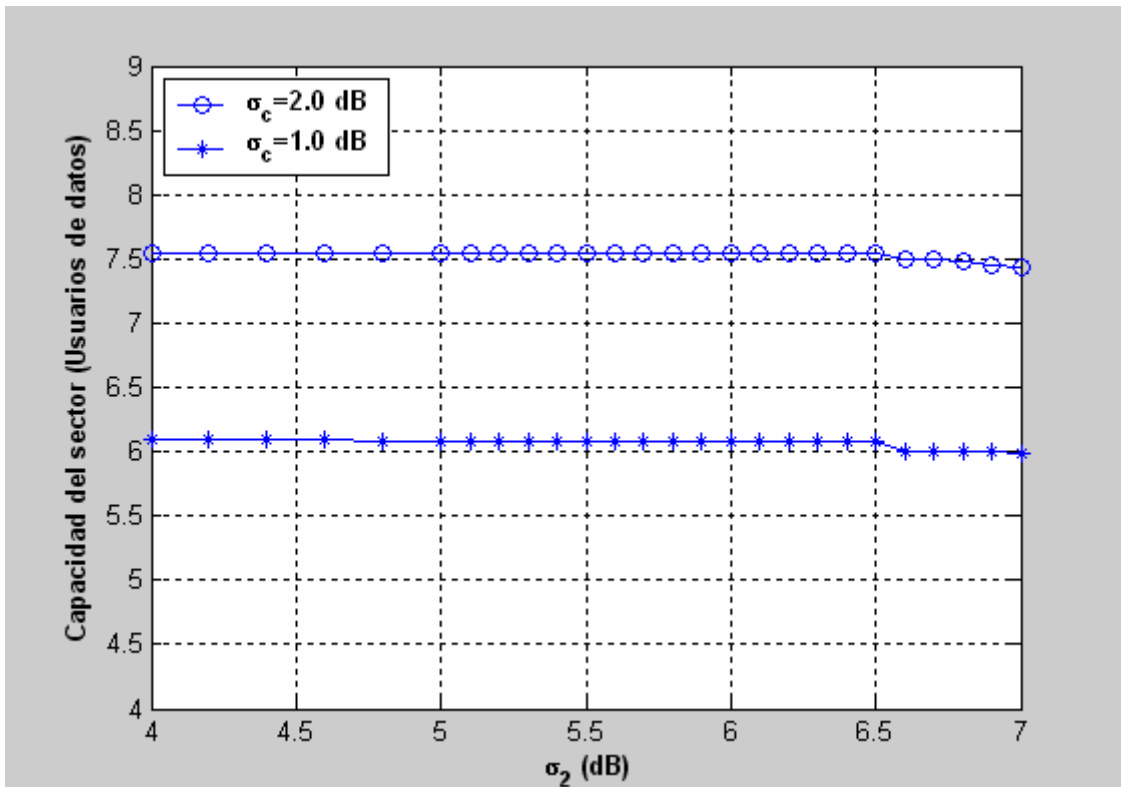




Figura 3.14: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

Figura 3.15: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$ Figura 3.16: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_2$

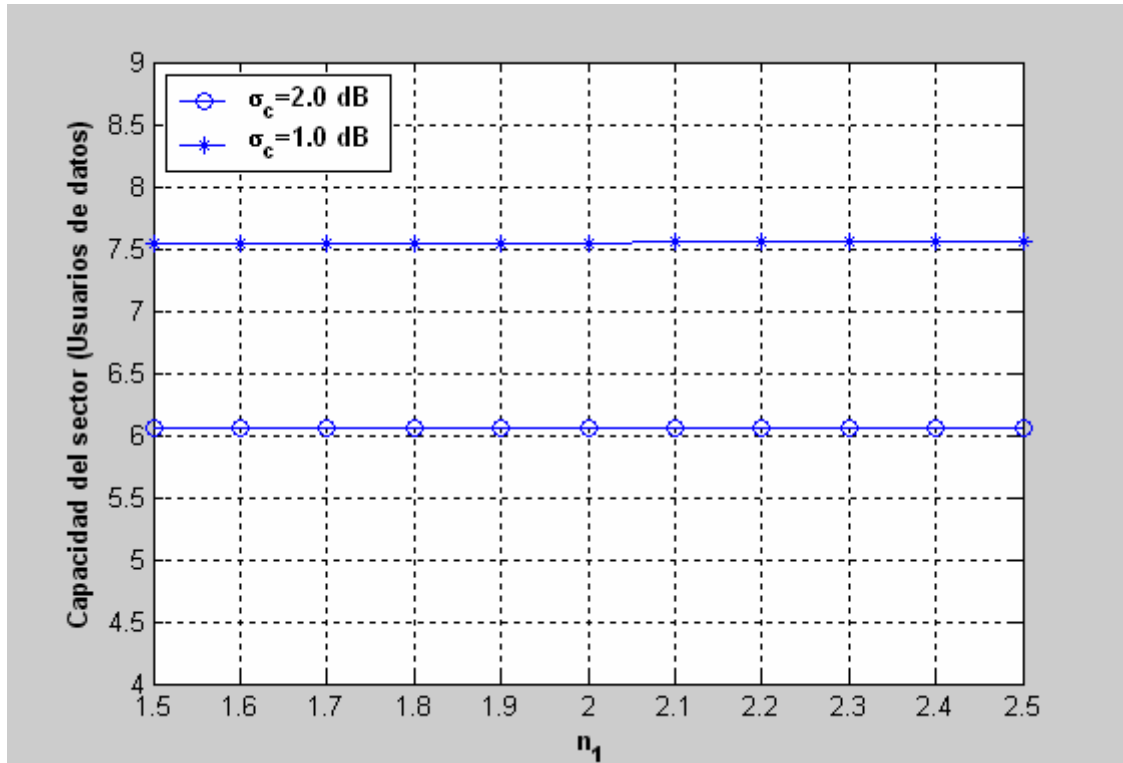


Figura 3.17: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

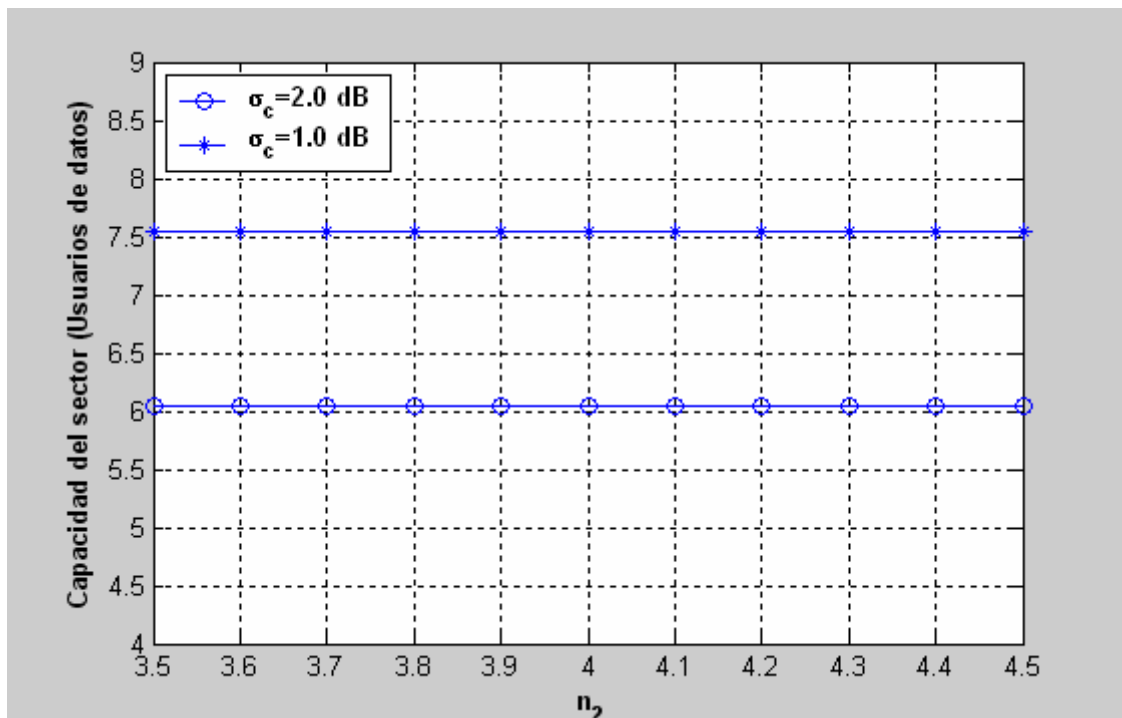
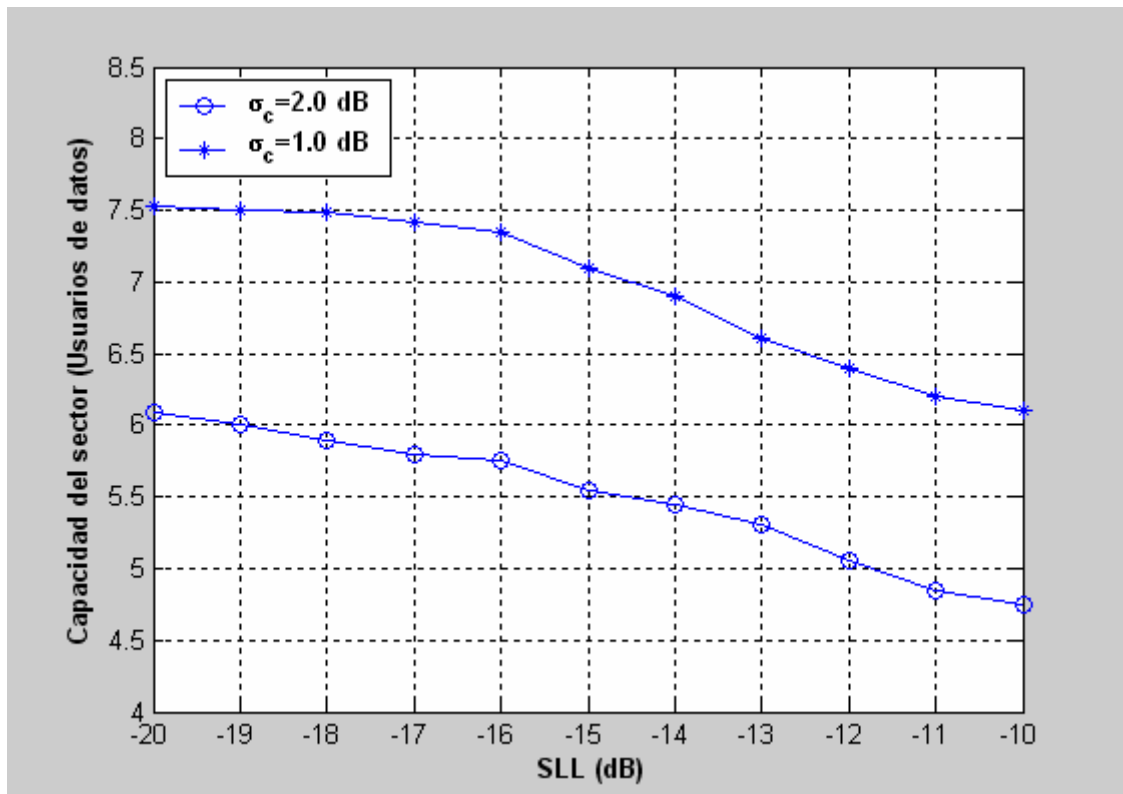


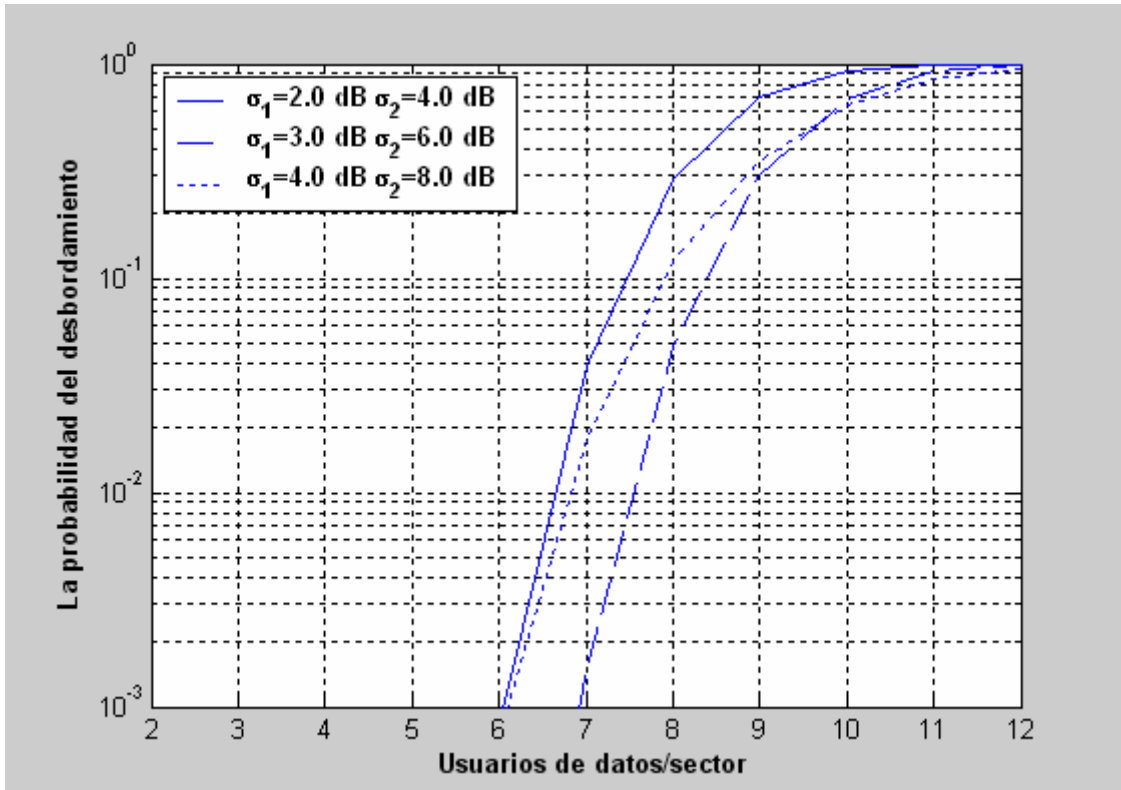
Figura 3.18: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

Se puede apreciar como para una  $\sigma_c$  de 2dB, variar el exponente de propagación no provoca ningún cambio en la capacidad. No obstante, para una  $\sigma_c$  de 1dB, se produce una subida o una bajada de 1dB. En cuanto a la Figura (3.17) y (3.18), se puede observar como la capacidad permanece invariable.

Nuevamente, para el estudio del efecto de los lóbulos secundarios, en la Figura (3.19) sucede lo mismo.

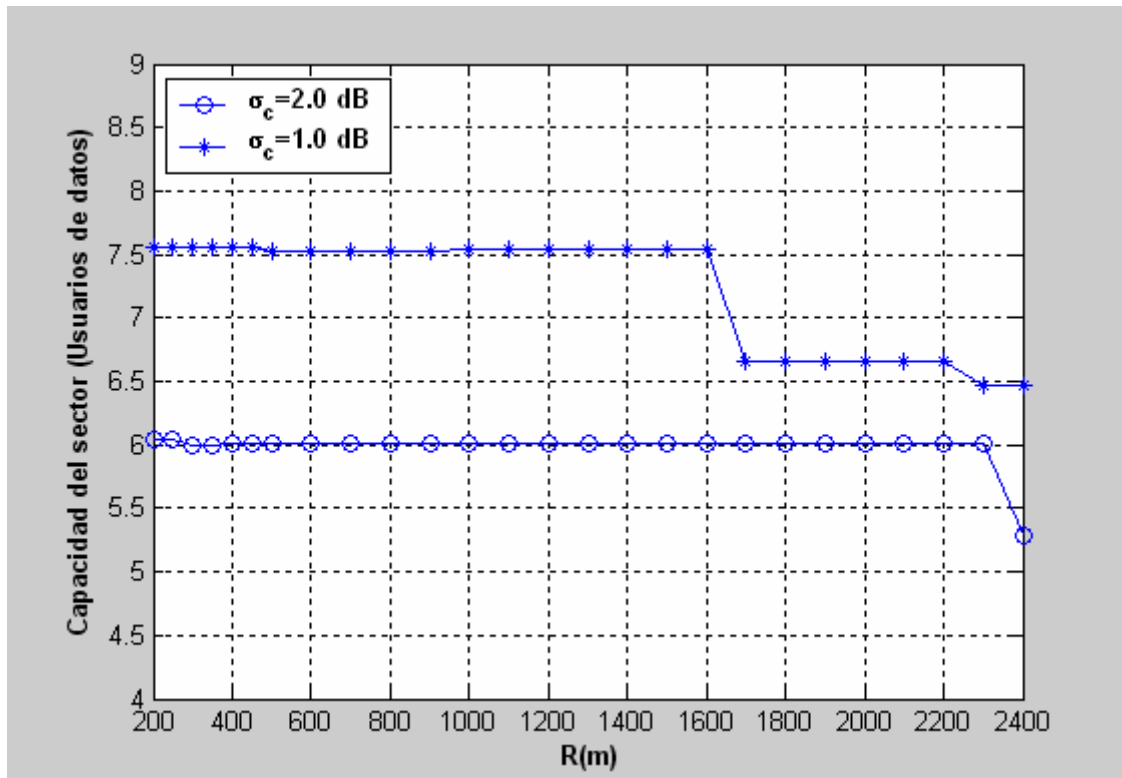


**Figura 3.19: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**



**Figura 3.20: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Un incremento de los parámetros de desviación correspondientes a la Figura (3.20), va a provocar una mayor desviación en los resultados finales de capacidad de número de usuarios, por este motivo, nos interesará trabajar unos valores de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  lo más pequeños posibles para que se ajusten a los resultados teóricos fielmente.



**Figura 3.21: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

En términos generales, en los estudios que llevemos a cabo, para valores entre 400 y 1600 metros las variaciones producidas serán ligeramente moderadas. Esto se debe a que nos encontramos con un valor de  $R$ , en la Figura (3.21), superior al del punto de corte y tampoco requiere tener una región de cobertura extremadamente elevada.

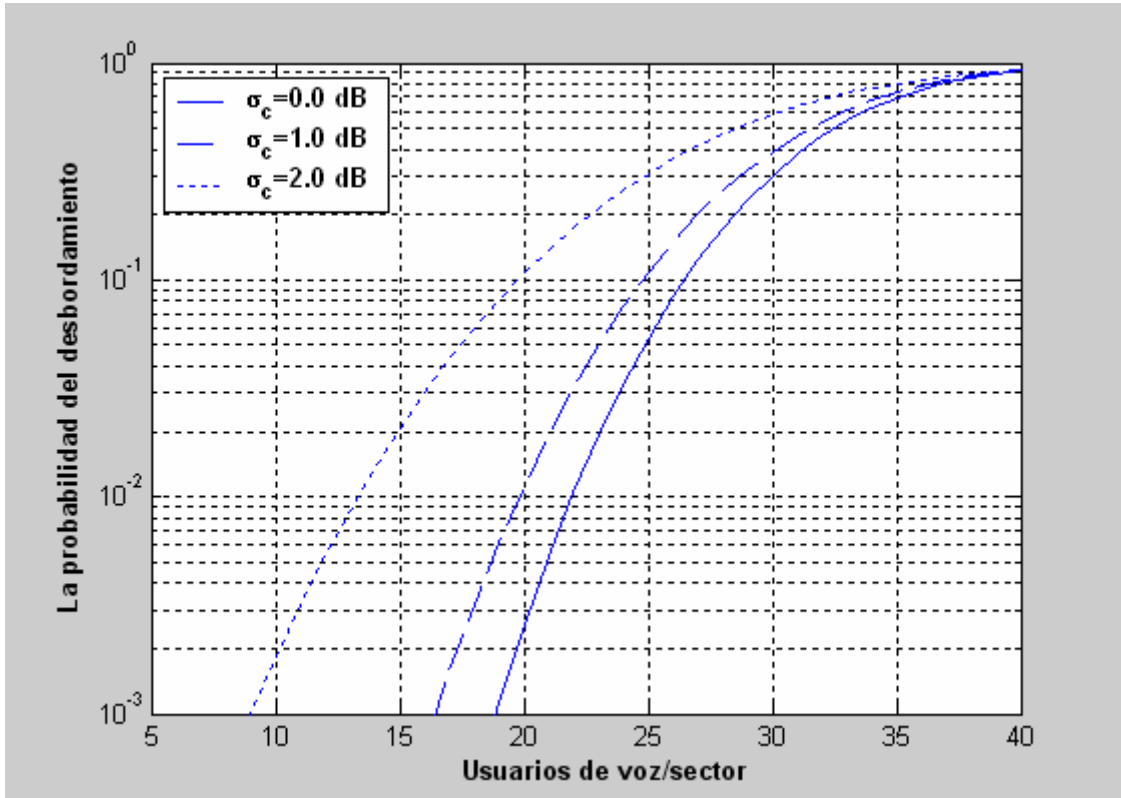
### 3.5.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

Hemos utilizado una potencia para voz de 18.2dBm. Este valor se puede calcular de forma práctica y teórica.

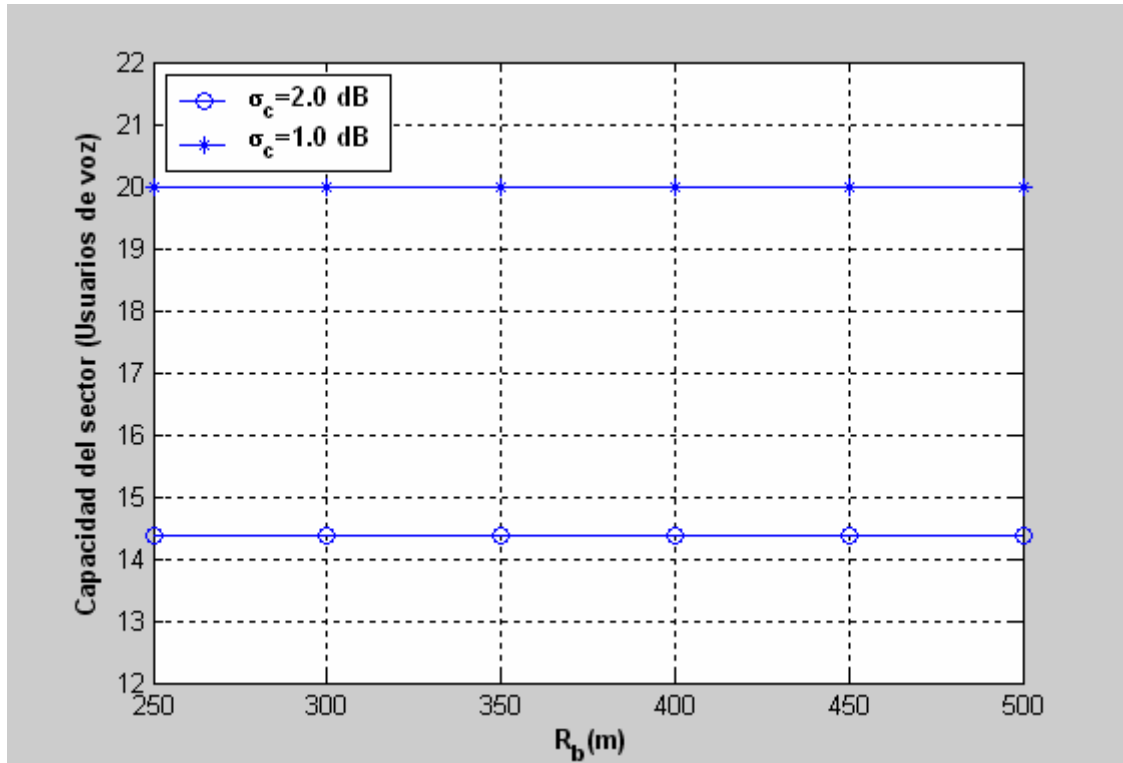
La forma práctica de obtenerlo es tomar el valor máximo de número de datos obtenido en el estudio de la capacidad para usuarios de datos con una desviación en la potencia de control de 1dB.

Una vez obtenidos estos parámetros, establecemos una potencia que nos permita obtener una probabilidad de desbordamiento cercana a 0.01 para  $\sigma_c$  de 1dB.

Nuevamente, como sucedía en voz los resultados obtenidos en cuanto a capacidad de número de usuarios son bastante menores. Como ya era de esperar, esto se debe a que se ha realizado un estudio para el peor caso que se pueda dar en trenes.



**Figura 3.22: Probabilidad del desbordamiento existiendo 3 usuarios de datos**



**Figura 3.23: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

Como norma general, para valores de la región de cobertura mayores que el punto de corte darán resultados de capacidad similares o ligeramente superiores. En el estudio de la Figura (3.23), podemos comprobar empíricamente cierta subida para una  $\sigma_c$  de 2 dB un ascenso de un usuario aproximadamente.

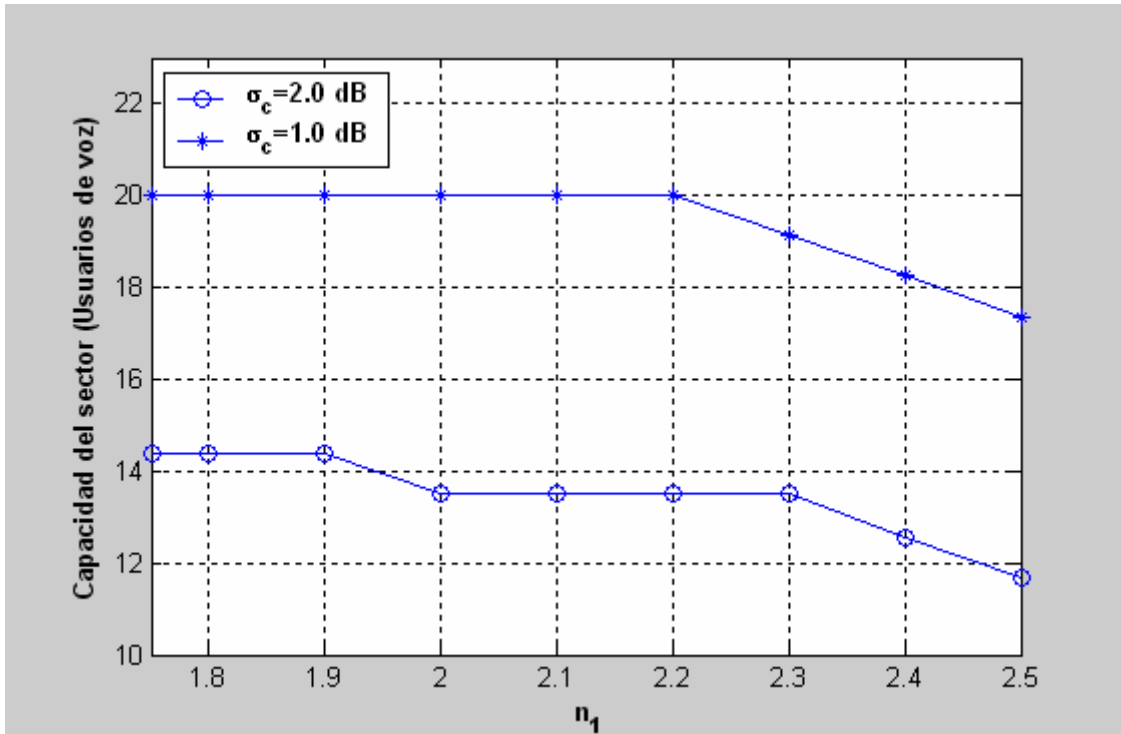


Figura 3.24: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

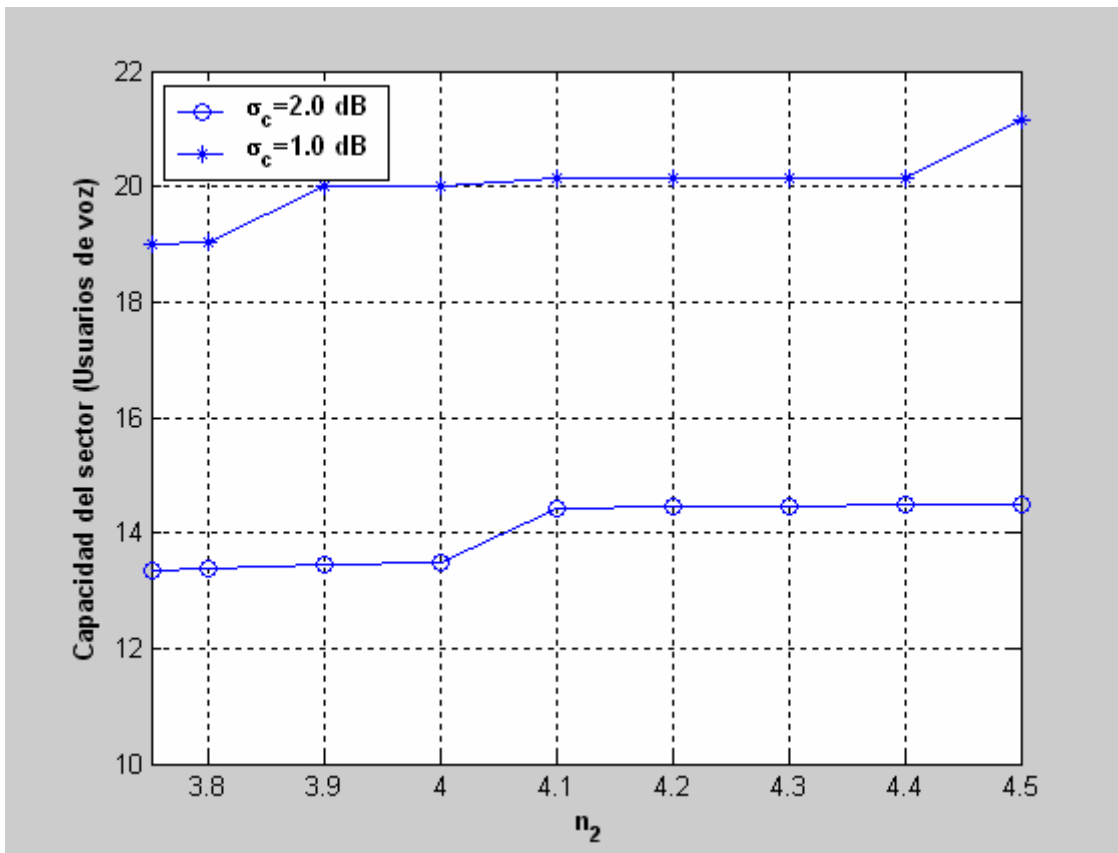


Figura 3.25: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$



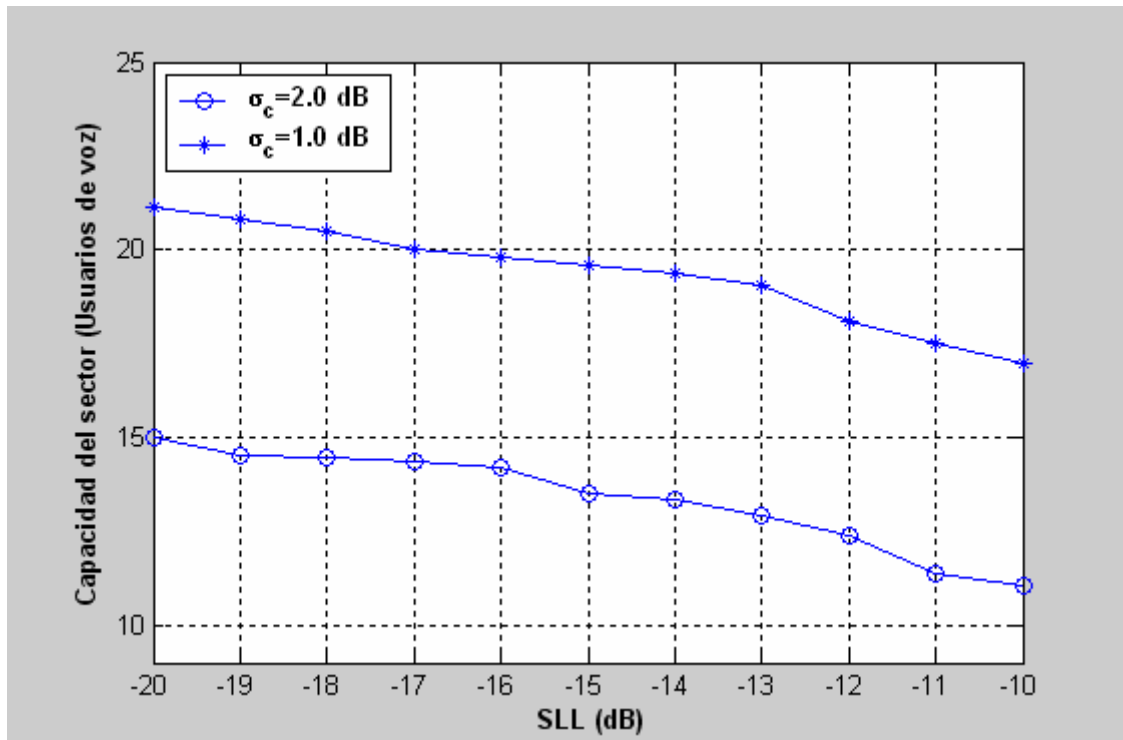


Figura 3.26: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

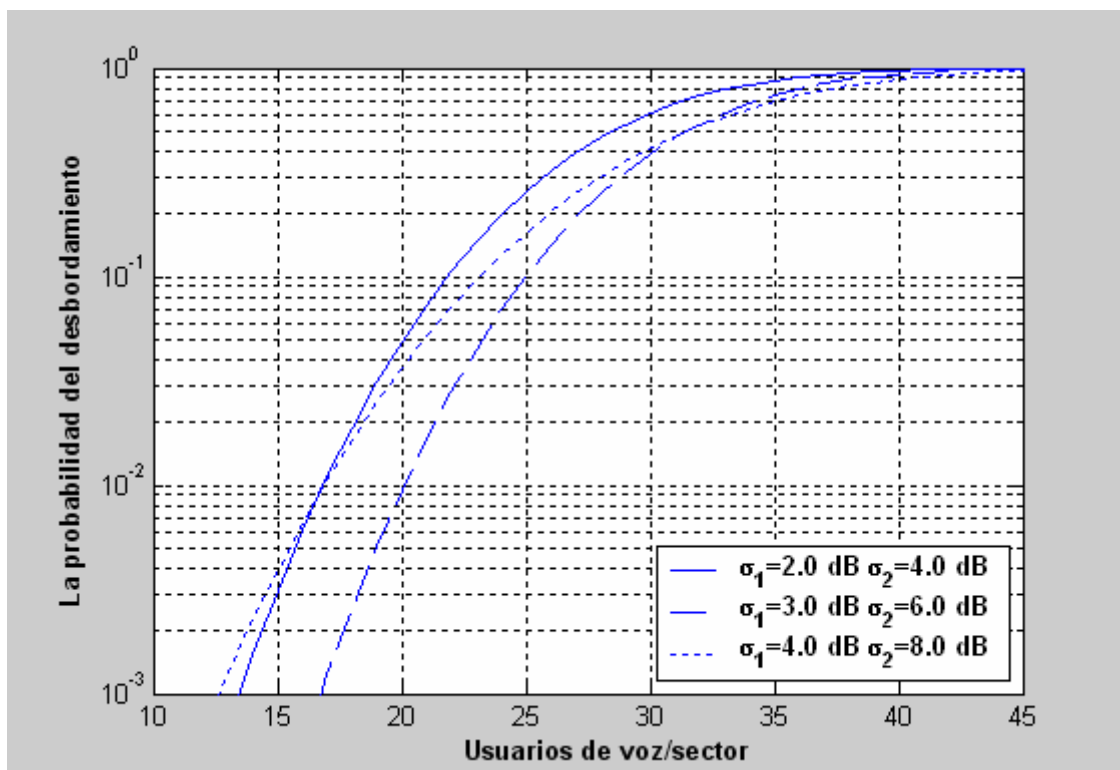


Figura 3.27: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  existiendo 3 usuarios de datos

**4. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para microcélulas en forma cruciforme (Cross-Shaped), para microcélulas en forma de T (T-Shaped) en autopistas y para microcélulas con forma cruciforme (Cross-Shaped) en ciudades**

**4.1 Estudio para microcélulas en forma de T (T-Shaped) en autopistas**



### 4.1.1 Introducción

La utilización de este tipo de sectores se dará en autopistas y en ciudades. Primeramente, realizaremos un estudio para autopistas como en los casos anteriores analizando la capacidad para usuarios de voz, datos y datos-voz.

Este tipo de sectores será necesario utilizarlos en aquellas partes de la carretera donde se produzcan cruces con otras vías ajenas a ella. La forma que tendrán será de T al igual que la que se da al bifurcarse una carretera en dos vías de tráfico perpendicularmente por término medio. Como se puede observar serían un caso particular o un caso avanzado sobre las microcélulas explicadas anteriormente con forma de puro.

Como veremos en un estudio detenidamente, los resultados que se obtengan en capacidad de número de usuarios variarán ligeramente con una cierta mejoría.

Para mayor claridad, leer las páginas que vienen a continuación.

### 4.1.2 Modelo de propagación

En primer lugar, hablaremos de las pérdidas básicas de propagación [3].

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left( \frac{r}{R_b} \right) + \xi_1 \quad \text{si } r \leq R_b \quad (4.1)$$

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left( \frac{r}{R_b} \right) + \xi_2 \quad \text{si } r > R_b \quad (4.2)$$

Las pérdidas básicas vienen dadas por la siguiente fórmula:

$$L_b(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10s_1 \log_{10}(R_b) \quad (4.3)$$

$h_b$  es la altura de la antena de la estación base.

$h_m$  es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\xi_1$  y  $\xi_2$  son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente. Generalmente, estas variables aleatorias alcanzan valores inferiores a 10 dB. A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar:

$$s_1 = 1.75 \text{ a } 2.25$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 4 \text{ a } 6 \text{ dB}$$

A continuación, se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. En el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco microceldas.

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (4.4)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_2 - s_1)} \left( \frac{r_{im}^{s_1}}{r_{id}^{s_2}} \right) \quad (4.5)$$

- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_1 - s_2)} \left( \frac{r_{im}^{s_2}}{r_{id}^{s_1}} \right) \quad (4.6)$$

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (4.7)$$

$\xi_{id}$  y  $\xi_{im}$ , poseen las relaciones de:

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_2$
- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_2$

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = \begin{cases} 1, \rightarrow L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, \rightarrow \text{resto} \end{cases} \quad (4.8)$$

Se asume una densidad uniforme de usuarios en cada sector  $\rho_s = N_u/R$  [3]

$$E[I_{S0}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) dr \quad (4.9)$$

donde a su vez la fórmula (4.10) viene dada por:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right] = \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

$\beta = \frac{\ln 10}{10}$ , siendo  $\alpha$  el factor de actividad (0.63 para voz y 1.0 para datos).

A continuación hallaremos una relación para  $\sigma^2$ :

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad (4.11)$$

- Cuando  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  o  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad (4.12)$$

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_2$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \quad (4.13)$$

La función  $Q(x)$  vale

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (4.14)$$

Donde el valor esperado intercelular teniendo en cuenta las dos regiones es:

A continuación, se hará un análisis detenido de la esperanza referida a las interferencias intercelulares e intracelulares como medida de estas.

Cabe destacar, que las medidas más utilizadas serán la esperanza y la desviación estándar [12].

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{S1} L(r_{id}, r_{im}) E[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}] dr \quad (4.15)$$

Generadas por la parte derecha de la región  $S_1$ .

$$E[I]_{r,s} = E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s} \quad (4.16)$$

Finalmente, la fórmula que se obtiene teniendo en cuenta el nivel de lóbulos secundarios es la siguiente:

$$E[I]_{inter,s} = E[I]_{r,s} (1 + 2SII) \quad (4.17)$$

Potencia interferente intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} \quad (4.18)$$

Potencia interferente intracelular:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_u (1 + 2SII) \quad (4.19)$$

Potencia interferente final:

$$E[P]_{intf,t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (4.20)$$

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P]_{intf,t} = \sum_{s=1}^M E[P]_{intf,t,s} \quad (4.21)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación expresaremos las fórmulas correspondientes a la varianza directamente relacionadas con la desviación estándar [12].

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (4.22)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (4.23)$$

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} dr \quad (4.24)$$

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right]^2 =$$

$$= e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \quad (4.25)$$

La varianza de señal interferente debido a la región  $S_1$  en la fórmula (4.26):

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \{p\alpha_s E[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}]^2 - q\alpha_s^2 E^2[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}]\} dr$$

Varianza de la interferencia intercelular:

$$\text{var}[I]_{inter,s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\} (1 + 2SII) \quad (4.27)$$

Varianza de interferencia intracelular:

$$\text{var}[I]_{int ra} = Nu (1 + 2SII) (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (4.28)$$

Varianza de interferencia total:

$$\text{var}[I]_{t,s} = \text{var}[I]_{inter,s} + \text{var}[I]_{int ra,s} \quad (4.29)$$

Varianza de la potencia total interferente:

$$\text{var}[P]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (4.30)$$

La varianza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$\text{var}[P_{int f}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (4.31)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

Por otra parte, exponemos la fórmula correspondiente a la probabilidad de desbordamiento de vital importancia en cada uno de los estudios realizados a lo largo de todo el proyecto.

$$P_{out} = Q\left[\frac{E(P)_{t,s|N_u = N_{uMEDIO}} - E(P)_{t,s|N_u = N}}{\sqrt{\text{var}(P)_{t,s|N_u = N}}}\right] \quad (4.32)$$

Finalmente, F es un factor que viene dado por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\text{Interferencia Inter celular}}{\text{Interferencia Intra celular}} = \frac{E[P]_{\text{inter},s}}{E[P]_{\text{intra},s}} \quad (4.33)$$

Fundamentalmente, la diferencia que se puede apreciar es la utilización de un factor de 2 SLL en lugar de 1Sll como en Cigar-Shaped.

### **Parámetros:**

$G_{tx}=0$  dB

$G_{rx}=12$  dB

$P_{tx}=18.6$  dBm

freq= 1950 MHz

$P_{tx2}=25$  dBm

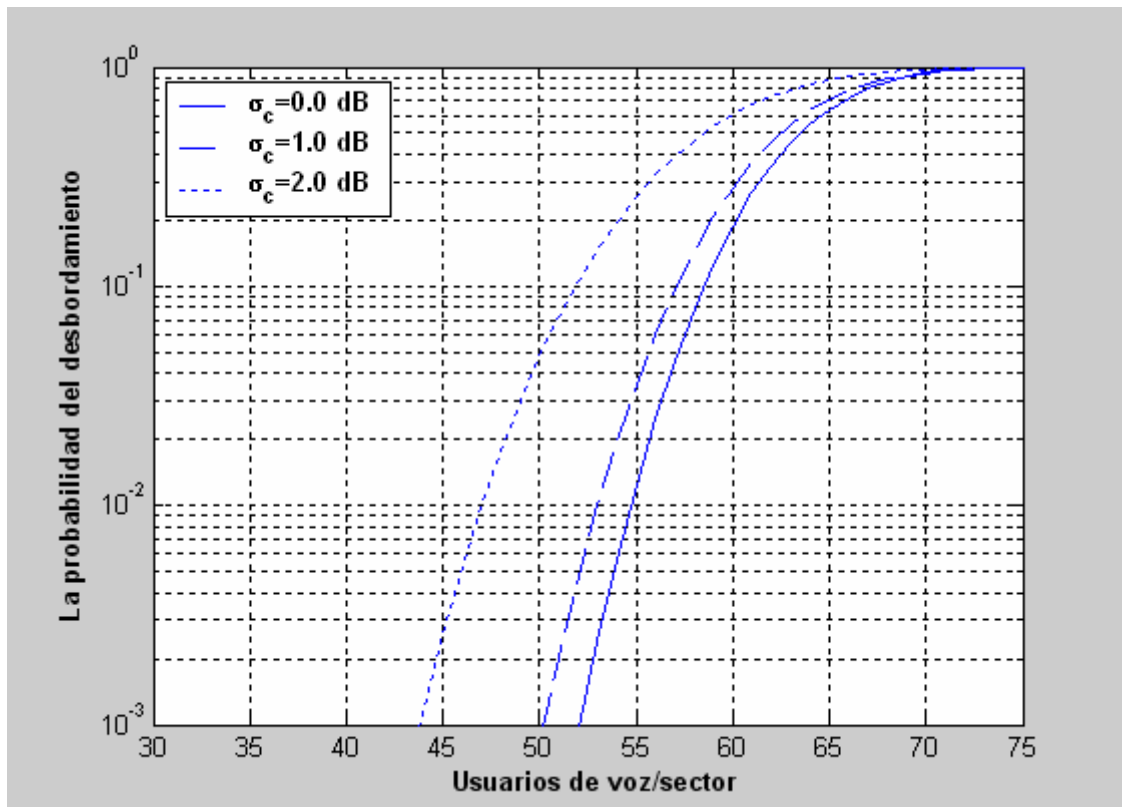
$P_{rx2}=P_{tx2} + G_{rx} + G_{tx} - L_p$

$P_{rx2}=10^{(Prx2/10)}$

$N_{\text{datos}} = \text{Variable}$



### 4.1.3 Análisis numérico para voz



**Figura 4.1: Probabilidad del desbordamiento del sistema**

Si observamos en la Figura (4.1), los resultados obtenidos y los comparamos con los calculados para las microceldas del tipo Cross-Shaped, nos daremos cuenta como se produce un ascenso de cerca dos usuarios en términos de capacidad. La explicación a este fenómeno es muy sencilla ya que los cálculos en las fórmulas utilizadas, excluyen un lóbulo secundario. Esto hará que el término SLL influya de manera menos significativa en los resultados obtenidos y la capacidad sea algo mayor que el tipo Cross-Shaped.

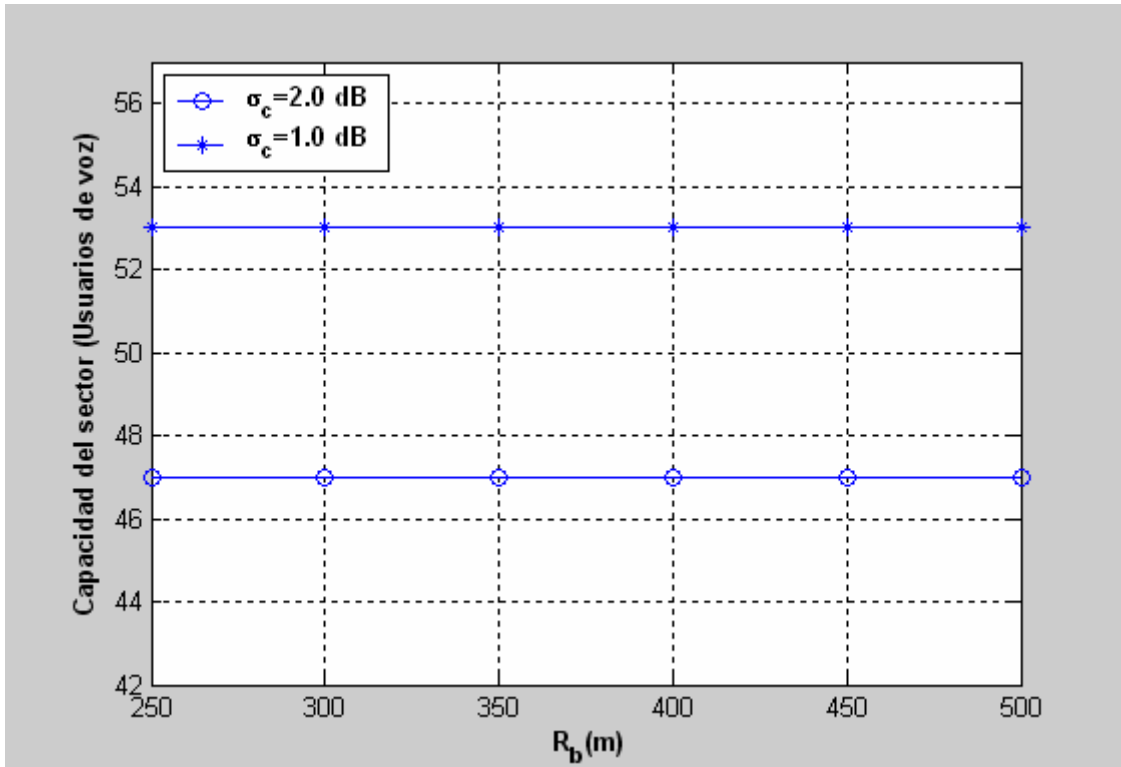


Figura 4.2: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

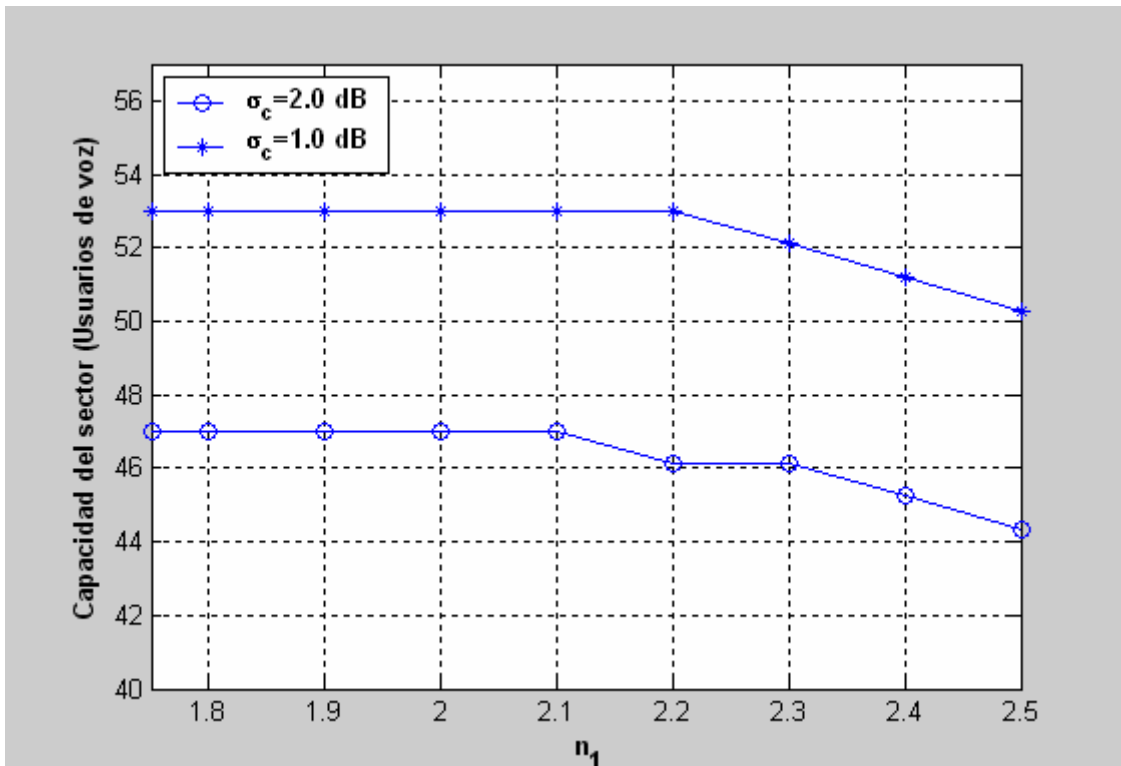


Figura 4.3: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

En la Figura (4.3), se observa como va descendiendo la capacidad a partir de un exponente de propagación de 2.1 para  $\sigma_c=2$ dB y 2.2 para  $\sigma_c=1$ dB.

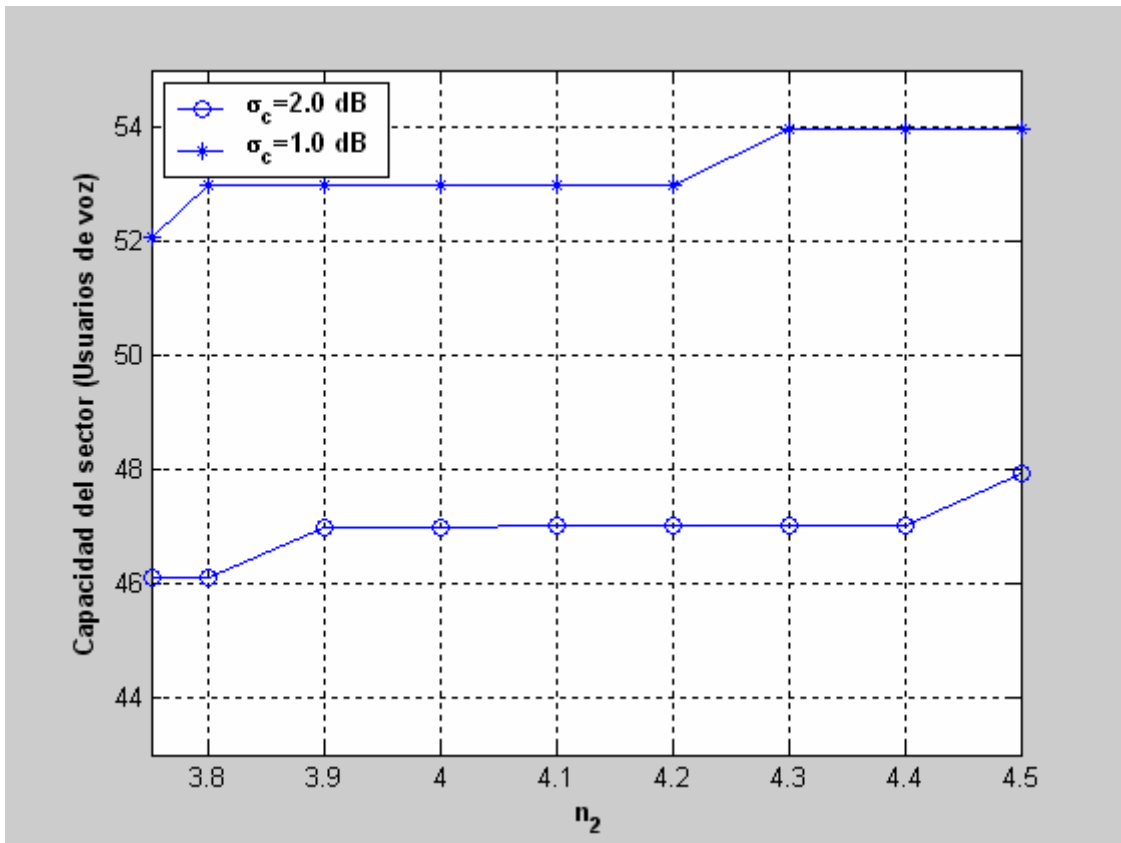


Figura 4.4: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

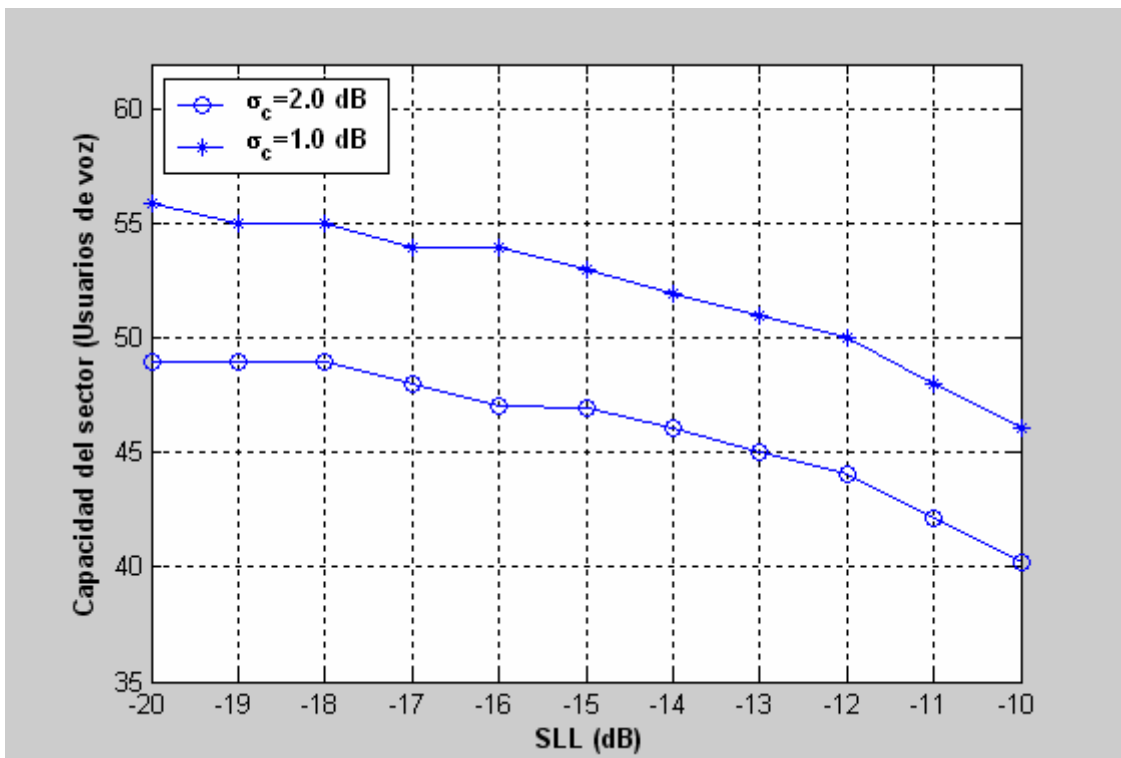
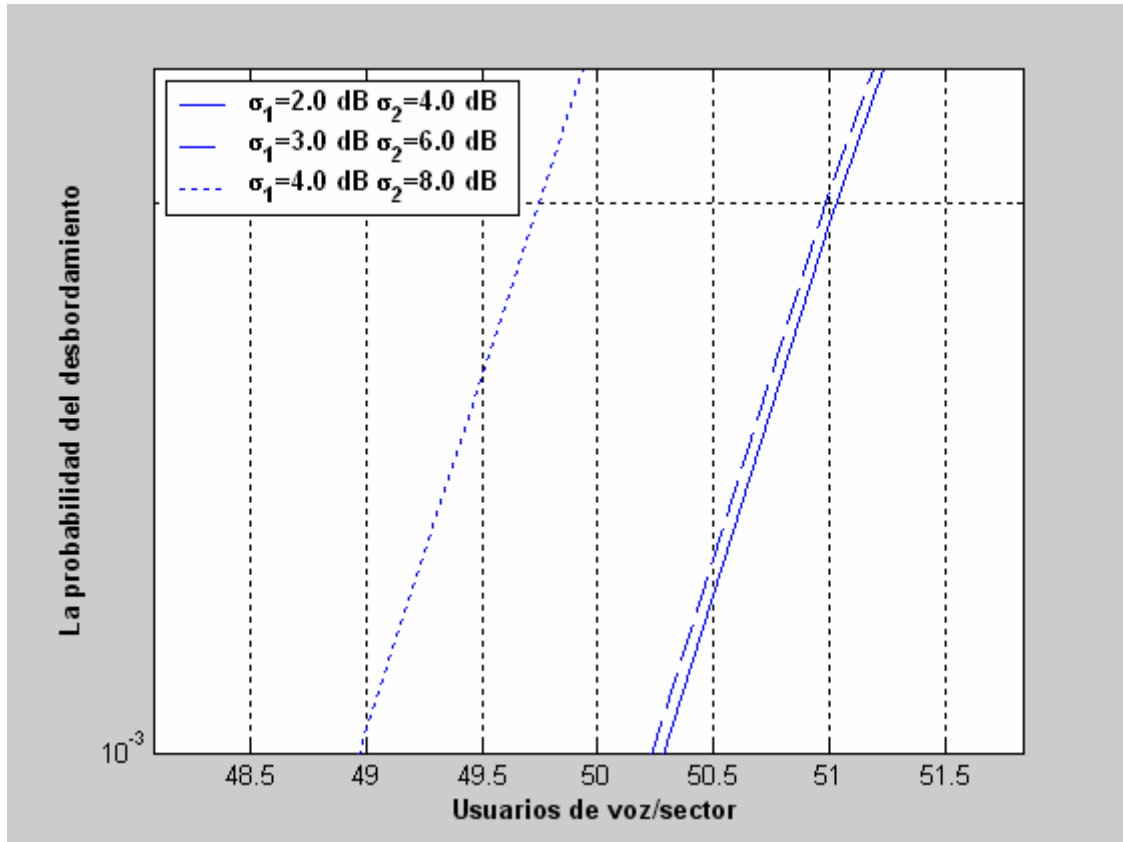


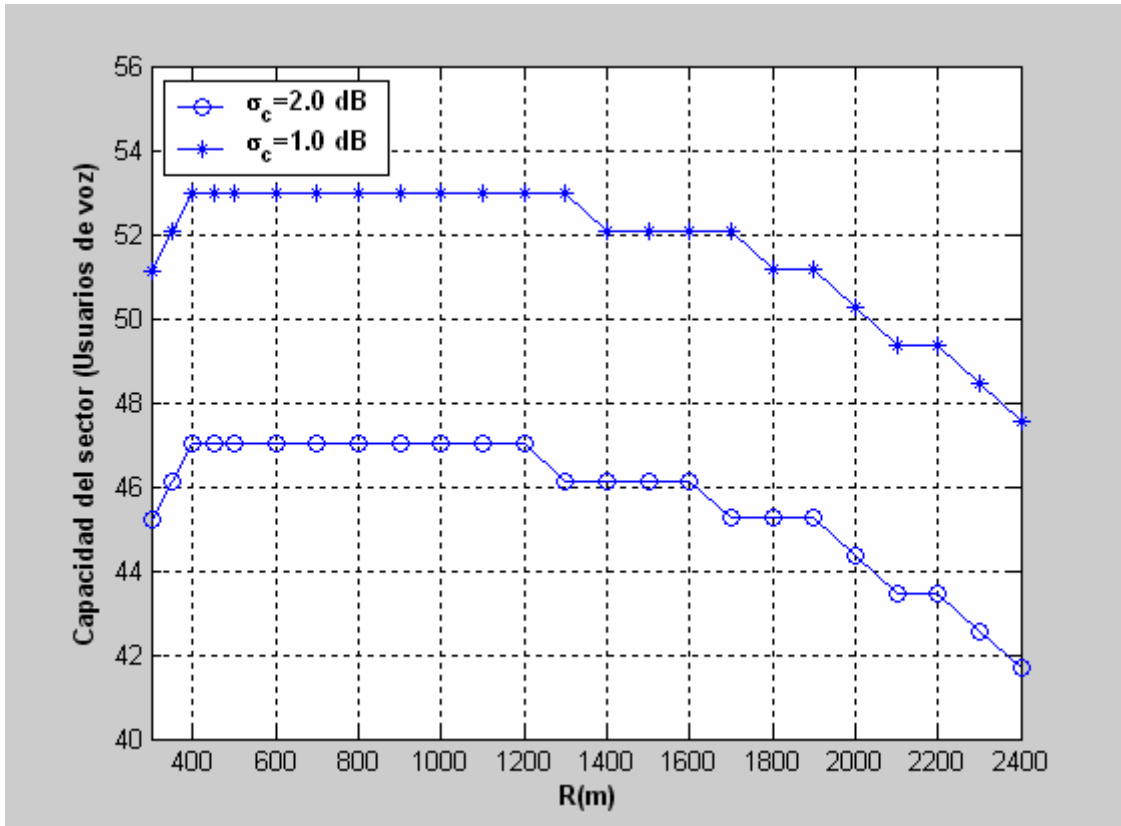
Figura 4.5: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

En la Figura (4.4), sucede lo contrario que en la (4.5) un incremento de este exponente de propagación se traduce en un aumento de la capacidad.



**Figura 4.6: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Se ha ampliado la Figura (4.6) con el fin de poder apreciar las ligeras diferencias en cada uno de los tres casos. Un aumento de las desviaciones estándar se va a traducir en un descenso de la capacidad.



**Figura 4.7: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

En la Figura (4.7), podemos observar nuevamente un descenso de la capacidad a partir de 1200 metros para  $\sigma_c=2$ dB y  $\sigma_c=1$ dB. Por lo que nos interesará trabajar con un radio de cobertura que ronde los 1000 metros, ya que nos permitirá cubrir una extensión muy grande y al mismo tiempo, la capacidad es muy razonable.

### 4.1.4 Análisis numérico para datos

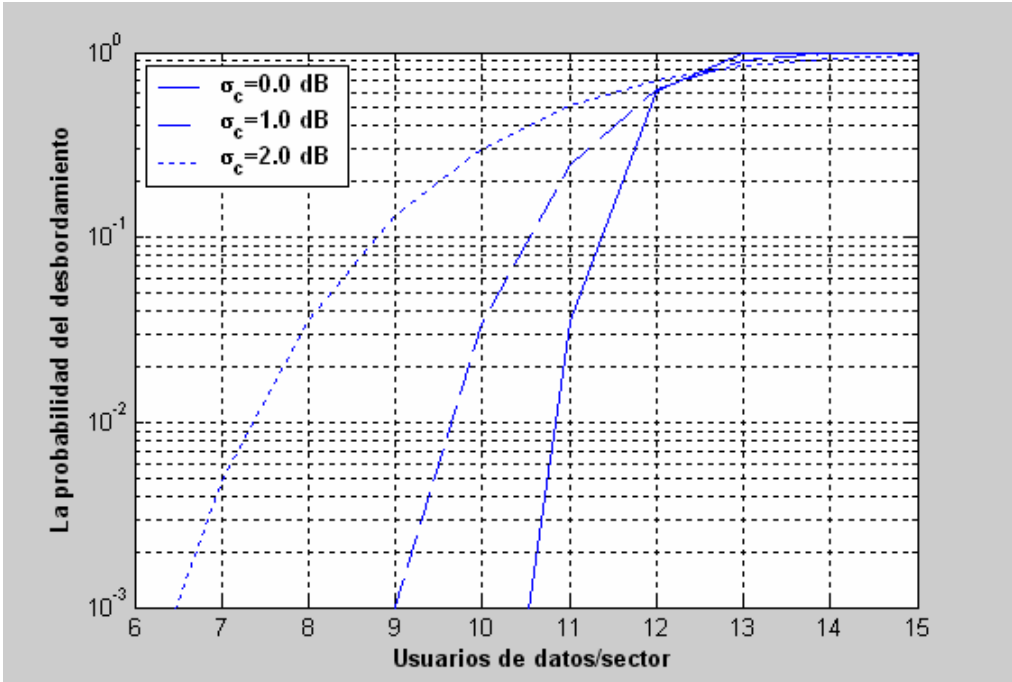


Figura 4.8: Probabilidad del desbordamiento del sistema

En la Figura (4.8), se produce un ligero descenso ocasionado por la presencia de dos lóbulos secundarios en el servicio de datos.

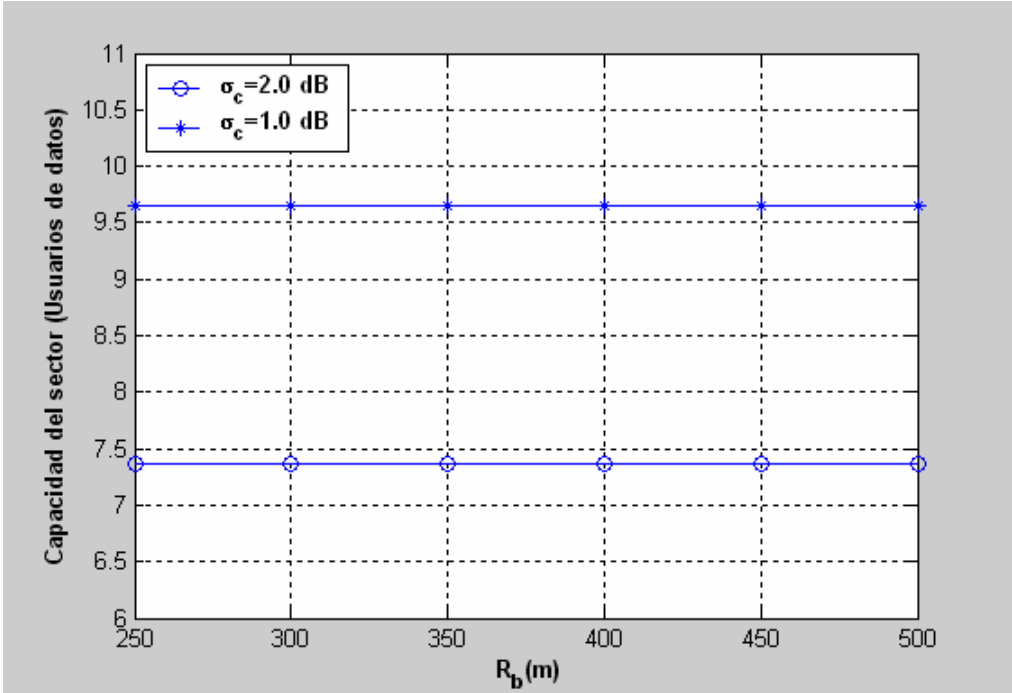


Figura 4.9: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

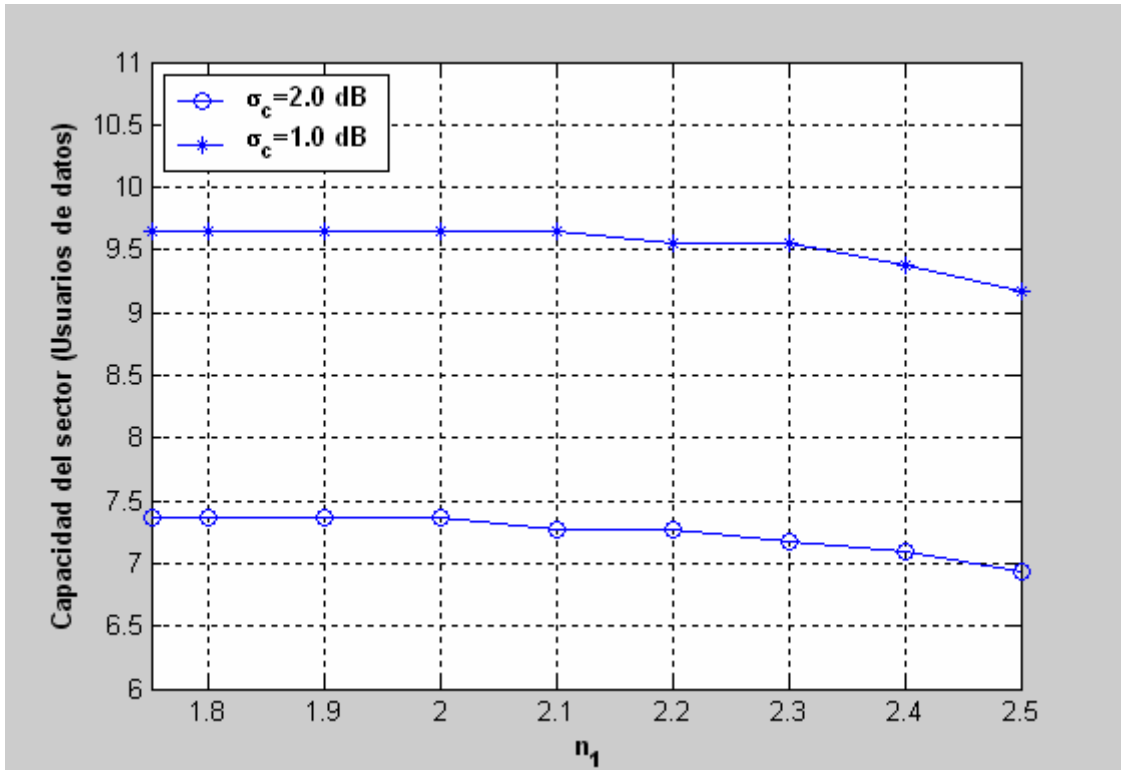


Figura 4.10: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

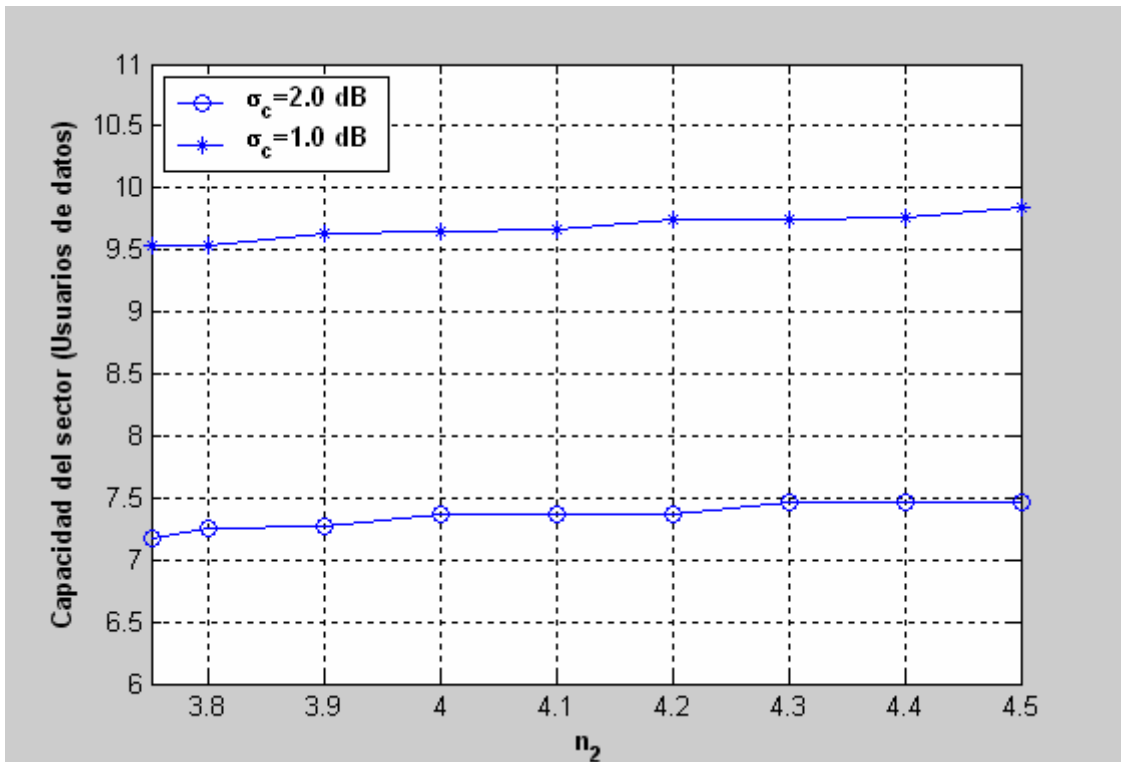


Figura 4.11: Capacidad del uplink del sector en función del Exponente de Propagación  $n_2$

En las Figuras (4.10) y (4.11), el descenso o aumento de la capacidad se produce en ambas figuras, de una forma muy suave.

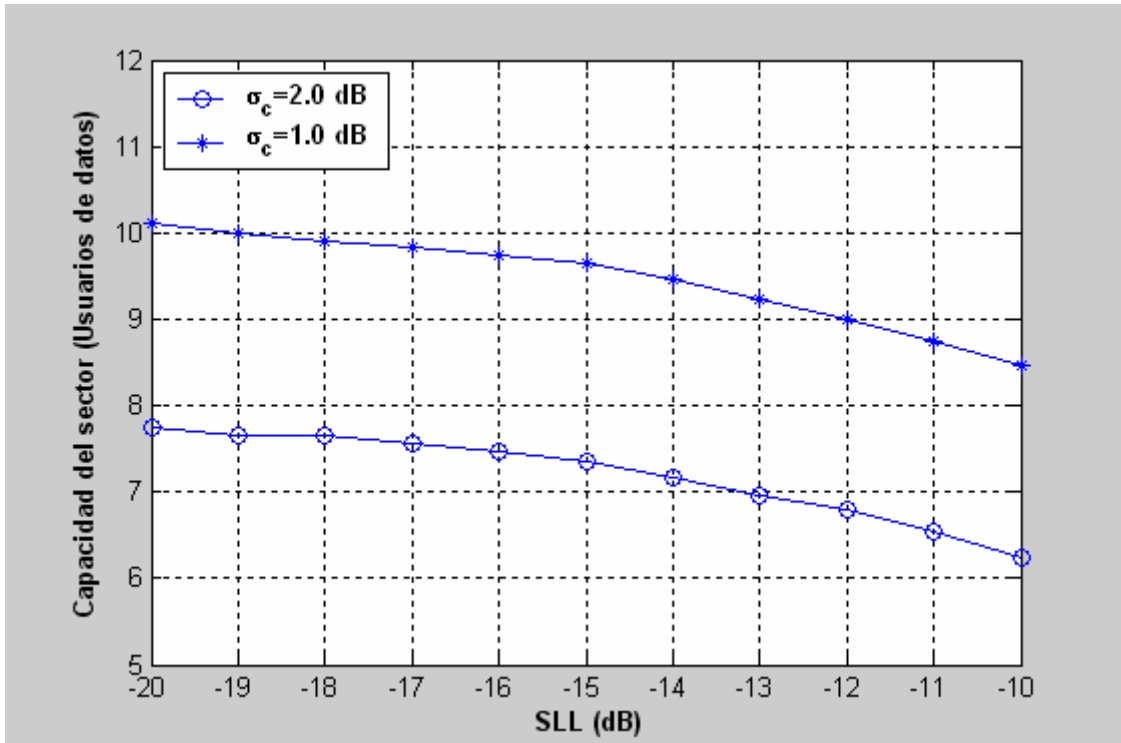


Figura 4.12: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

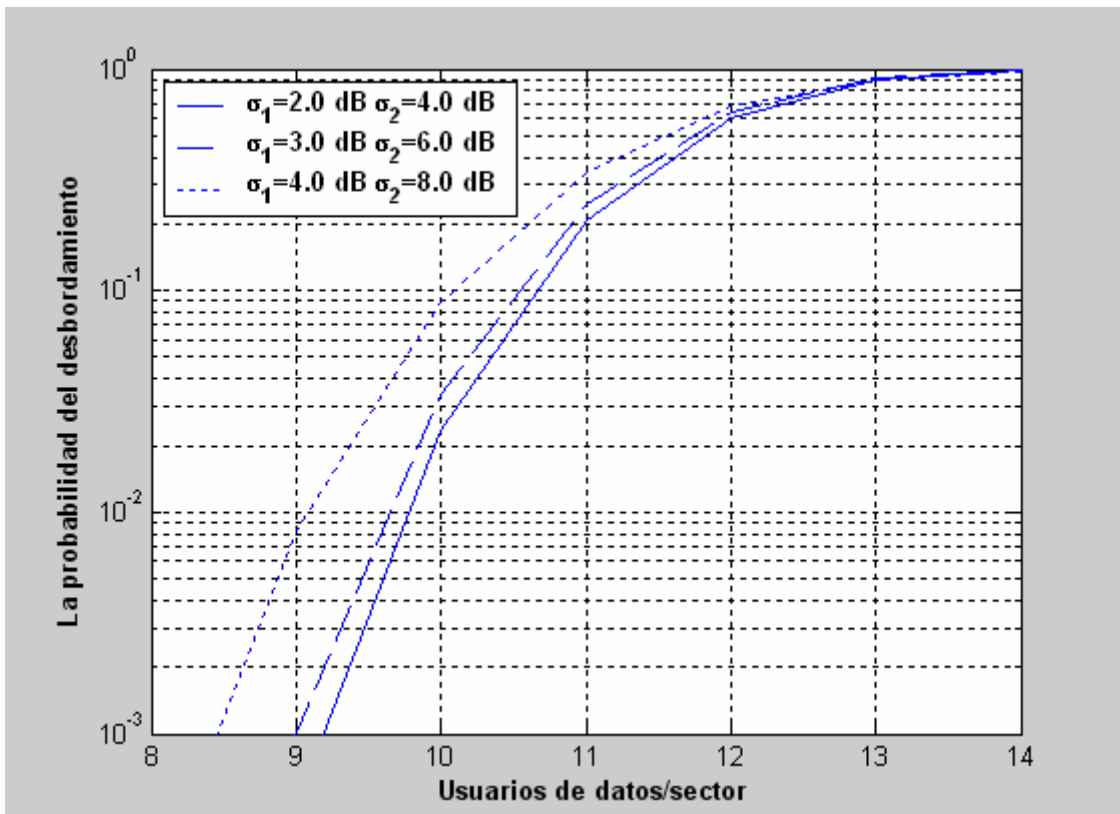
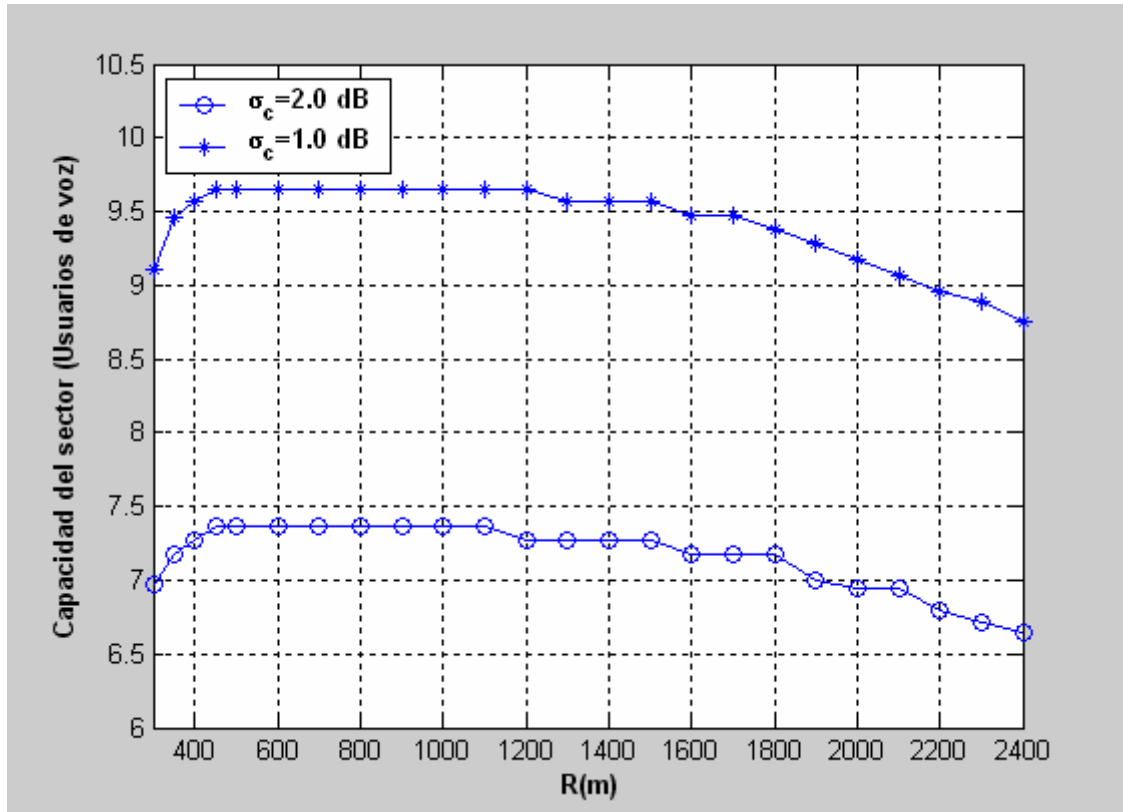


Figura 4.13: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$

En las Figuras (4.12) y (4.13), los resultados son diferentes a estudios anteriores, pero la evolución de las gráficas es parecida.



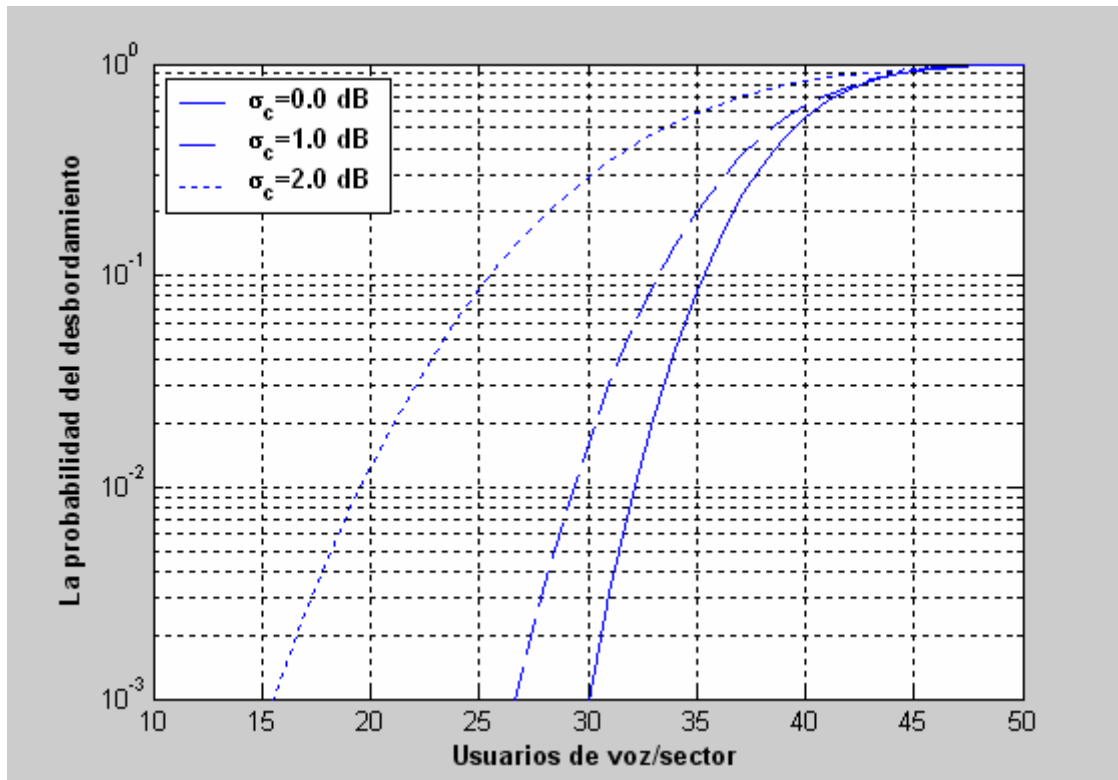


**Figura 4.14: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

En la Figura (4.14), nuevamente, veremos que nos interesará una región de cobertura amplia para cubrir una superficie considerable, pero no excesivamente para no perder capacidad.

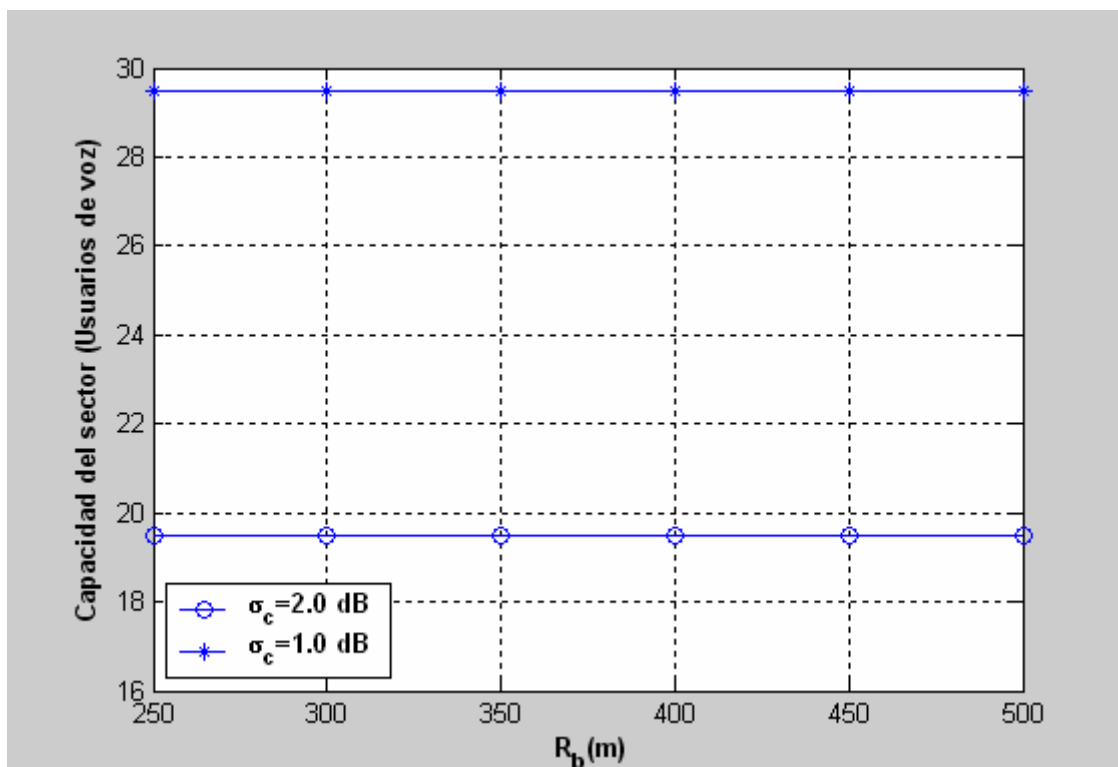
#### 4.1.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

En este estudio, se plantea la posibilidad de dar dos servicios de forma simultánea al usuario. Para ello, será necesario recurrir a una fórmula que difiere someramente de las mencionadas anteriormente.



**Figura 4.15: Probabilidad del desbordamiento existiendo 5 usuarios de datos**

En la Figura (4.15), se han elegido 5 usuarios de datos sabiendo que cada usuario de datos implica que no se pueda dar servicio de voz a 4 o 5 usuarios.



**Figura 4.16: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

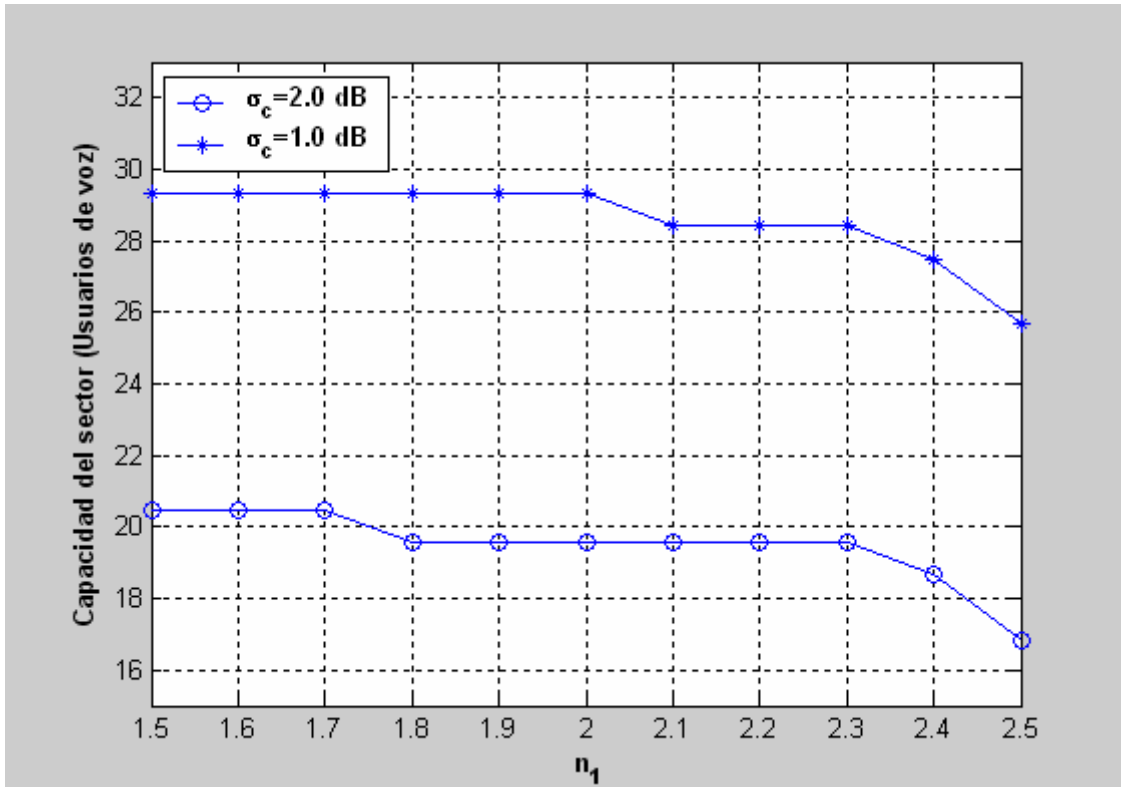


Figura 4.17: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

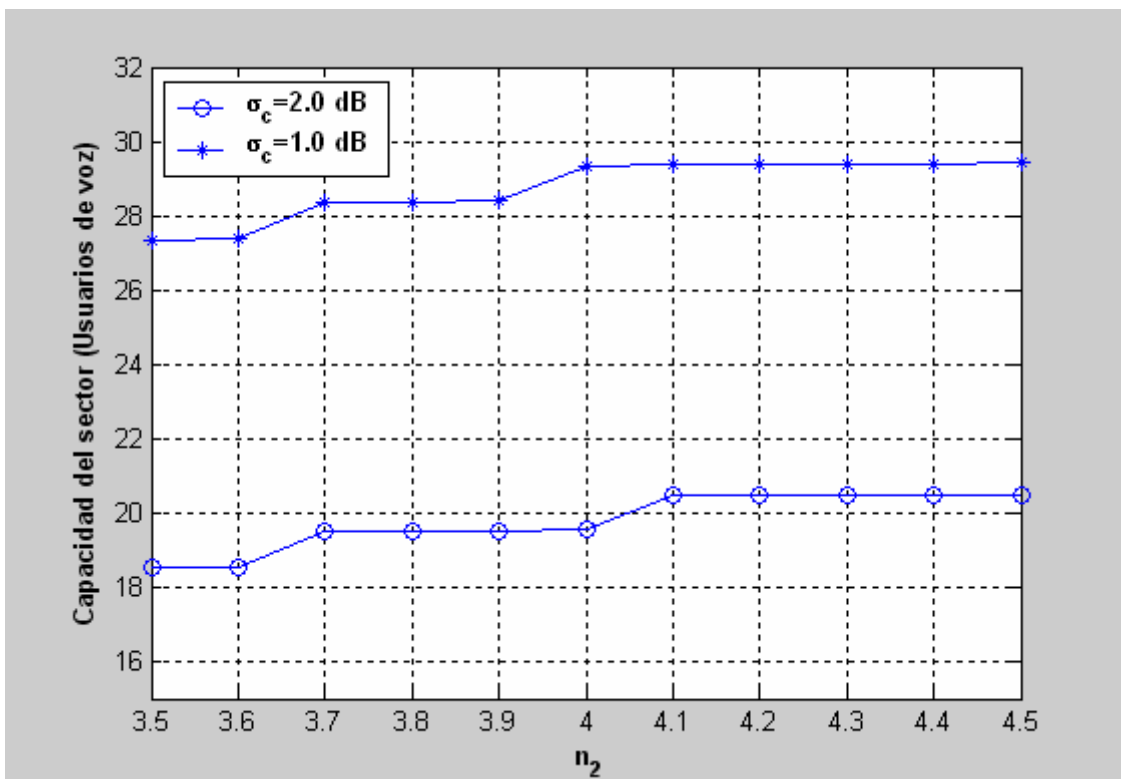


Figura 4.18: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

En las Figuras (4.17) y (4.18), las variaciones de la capacidad son más bruscas que las estudiadas para el servicio de datos. En la Figura (4.18) podemos apreciar fundamentalmente, tres zonas donde se mantiene durante un mayor número de valores. Finalmente, para ambos casos en dicha figura, conforme aumentamos el exponente de propagación llega un momento que la capacidad no se ve incrementada.

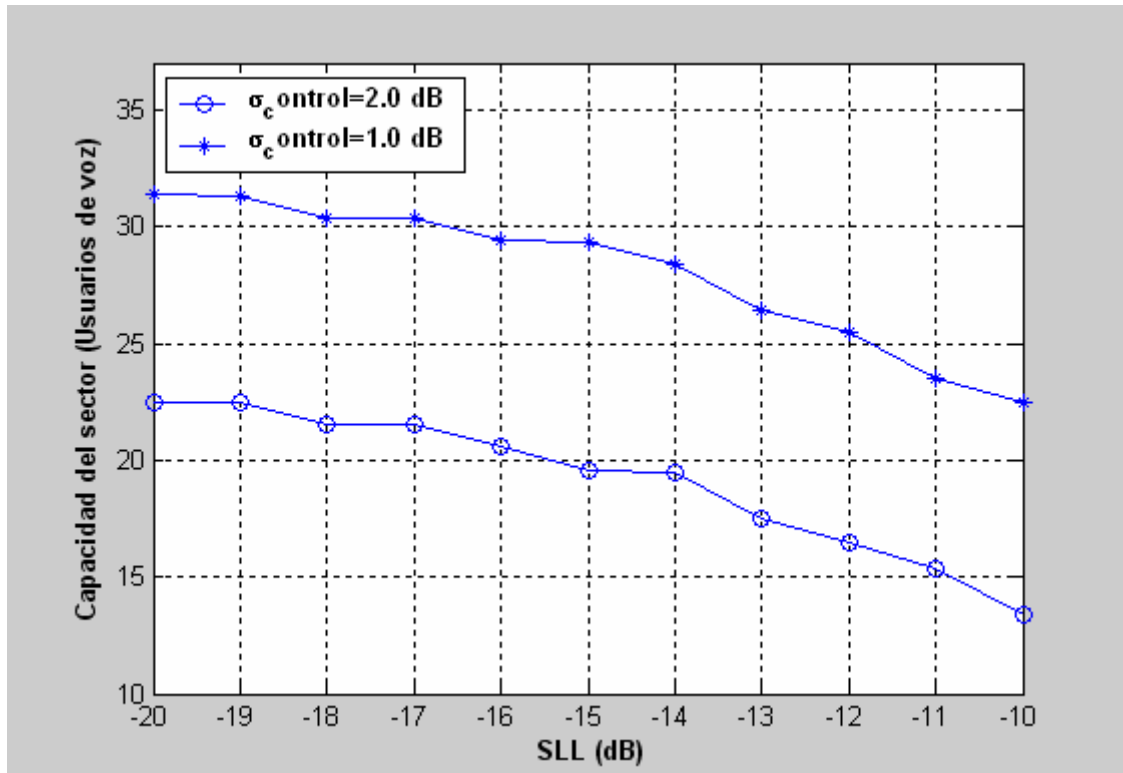
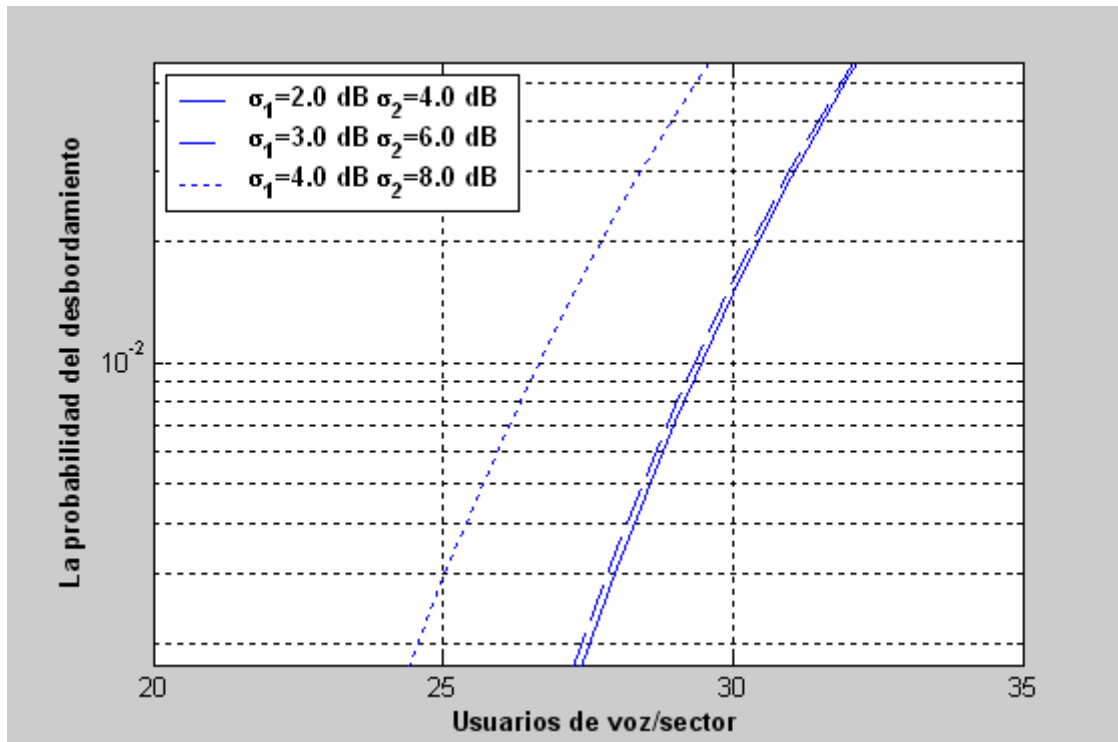
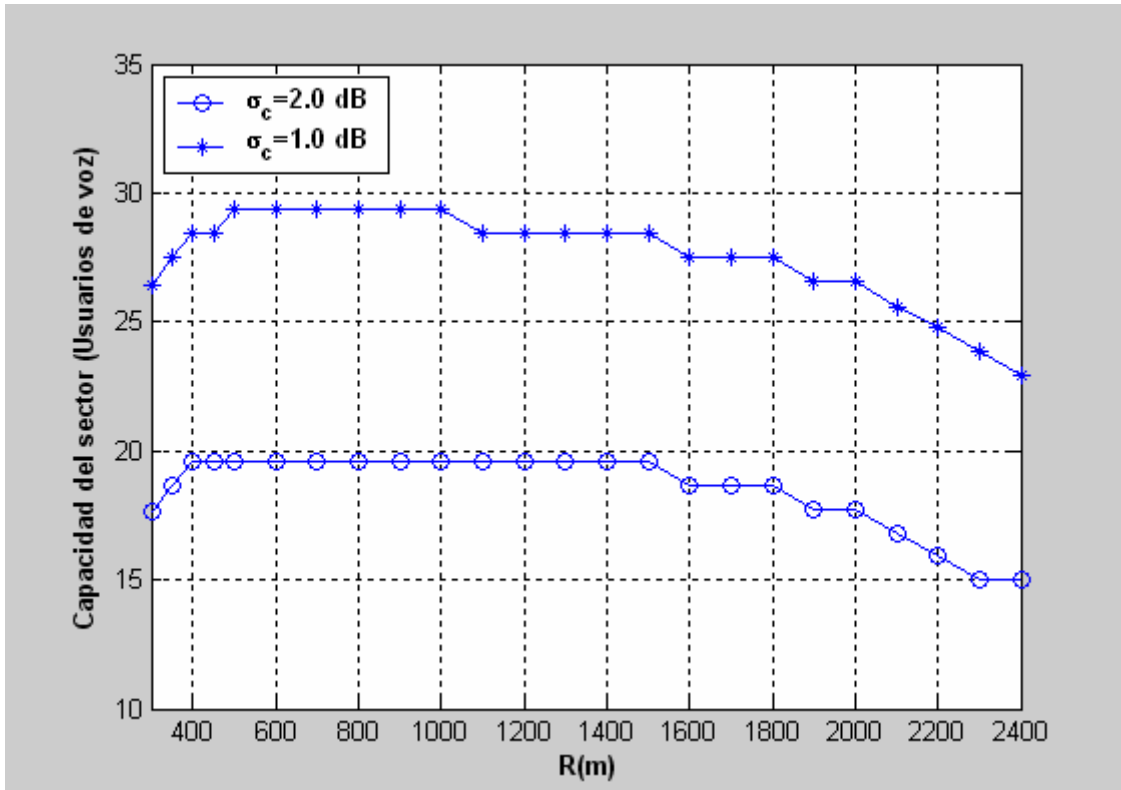


Figura 4.19: Capacidad del uplink del sector en función del SLL



**Figura 4.20: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Nuevamente, en la Figura (4.20) se ha ampliado con el fin de distinguir para las distintas desviaciones esa mínima diferencia en cuanto al resultado obtenido de capacidad para un outage del 1%. En los tres estudios realizados, podemos comprobar que los resultados obtenidos se ajustan a formas típicamente ya analizadas en casos anteriores. Esto es algo que también sucede en la Figura (4.21).



**Figura 4.21: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

Es importante destacar el hecho relevante acerca de la potencia de voz. Ésta siempre será inferior a la de datos como regla técnica y rondará siempre valores cercanos a 20 y 21 dBm alejándose como mucho un punto o medio punto sobre estos valores.

## 4.2 Estudio para microcélulas en forma cruciforme (Cross-Shaped) en autopistas



### **4.2.1 Introducción**

La utilización de este tipo de sectorización se dará en autopistas y en ciudades. Primeramente, realizaremos un estudio para autopistas como en los casos anteriores analizando la capacidad para usuarios de voz, datos y la situación conjunta de voz y datos.

Este tipo de sectores será necesario utilizarlos en aquellas partes de la carretera donde se produzcan cruces con otras vías ajenas a ella. La forma que tendrán será semejante a una cruz, que es la que se obtiene al cortarse dos vías de tráfico en términos generales.

La existencia de un mayor número de sectores en cada microcelda va a provocar un descenso de la capacidad debido a una mayor presencia del nivel de lóbulos secundarios. Las fórmulas genéricas vienen expresadas por un conjunto de términos generales al que hay que añadir uno adicional multiplicativo donde están presentes 2 lóbulos secundarios, en lugar de uno como se había estudiado anteriormente utilizando microceldas del tipo Cigar-Shaped.

El objetivo de este trabajo es extraer resultados ante una situación con un control de la potencia transmitida en el uplink para W-CDMA.

### **4.2.2 Modelo de propagación**

Las pérdidas de propagación y las pérdidas por causas de interferencia intercelular se mantendrán intactas. Las variaciones en cuanto a los cálculos realizados, se deberán a si el estudio se realiza en el borde del sector o en el comienzo sin tener en cuenta el estudio de capacidad en toda la región de cobertura. Los valores prácticos que se darán a los parámetros generales para calcular la capacidad serán los mismos que en casos anteriores. Sólo que nuevamente, muchos de ellos se variarán con el fin de observar que efectos produce su alteración.



En primer lugar, exponemos las fórmulas (4.34) y (4.35) correspondientes a las pérdidas básicas de propagación [3].

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + \xi_1, \text{ si } r \leq R_b \quad (4.34)$$

$$L_p(dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + \xi_2, \text{ si } r > R_b \quad (4.35)$$

Las pérdidas básicas vienen dadas por las fórmula (4.36):

$$L_b(dB) = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10s_1 \log_{10}(R_b) \quad (4.36)$$

$h_b$  es la altura de la antena de la estación base.

$h_m$  es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\xi_1$  y  $\xi_2$  son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente. Generalmente, estas variables aleatorias alcanzan valores inferiores a 10 dB. A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar:

$$s_1 = 1.75 \text{ a } 2.25$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 4 \text{ a } 6 \text{ dB}$$

A continuación, se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. En el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco microceldas. Muy importante mencionar las expresiones desde la (4.37) a la (4.40):

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left(\frac{r_{im}}{r_{id}}\right)^{s_1} \quad (4.37)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_2-s_1)} \left(\frac{r_{im}^{s_1}}{r_{id}^{s_2}}\right) \quad (4.38)$$

- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_1 - s_2)} \left( \frac{r_{im}^{s_2}}{r_{id}^{s_1}} \right) \quad (4.39)$$

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left( \frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (4.40)$$

$\xi_{id}$  y  $\xi_{im}$ , poseen las relaciones de:

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_2$
- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_2$

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) = \begin{cases} 1, \rightarrow L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, \rightarrow \text{resto} \end{cases} \quad (4.41)$$

Se asume una densidad uniforme de usuarios en cada sector  $\rho_s = N_u/R$  [3].

$$E[I_{S0}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s_0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) dr \quad (4.42)$$

donde a su vez la fórmula (4.43) tiene el siguiente desarrollo:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right] = \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (4.43)$$

$\beta = \frac{\ln 10}{10}$ , siendo  $\alpha$  el factor de actividad (0.63 para voz y 1.0 para datos).

A continuación hallaremos una relación para  $\sigma^2$  en las expresiones (4.44), (4.45) y (4.46):

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad (4.44)$$

- Cuando  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  o  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad (4.45)$$

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_2$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \quad (4.46)$$

La función  $Q(x)$  vale

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (4.47)$$

A continuación, se hará un análisis detenido de la esperanza referida a las interferencias intercelulares e intracelulares como medida de estas. Cabe destacar, que las medidas más utilizadas serán la esperanza y la desviación estándar.

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s1} L(r_{id}, r_{im}) E[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}] dr \quad (4.48)$$

Las interferencias ocasionadas por la parte derecha de la región S1 vienen dadas por la expresión (4.49):

$$E[I]_{r,s} = E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s} \quad (4.49)$$

Finalmente, la fórmula que se obtiene teniendo en cuenta el nivel de lóbulos secundarios es la siguiente [12]:

$$E[I]_{int\ er,s} = E[I]_{r,s} (1 + 3SI) \quad (4.50)$$

Potencia interferente intercelular:

$$E[P]_{int\ er,s} = P_{r,s} E[I]_{int\ er,s} \quad (4.51)$$

Potencia interferente intracelular:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_u (1 + 3SI) \quad (4.52)$$

Potencia interferente final:

$$E[P]_{intf,t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (4.53)$$

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P]_{intf,t} = \sum_{s=1}^M E[P]_{intf,t,s} \quad (4.54)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación expresaremos las fórmulas correspondientes a la varianza directamente relacionadas con la desviación estándar [12]. Los parámetros p y q vienen dados por (4.55) y (4.56) y se utilizarán en los desarrollos sucesivos.

$$p = e^{2\beta^2\sigma_c^2} \quad (4.55)$$

$$q = e^{\beta^2\sigma_c^2} \quad (4.56)$$

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q\alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} dr \quad (4.57)$$

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right]^2 = e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \quad (4.58)$$

Varianza de señal interferente debido a la región S<sub>1</sub> para la fórmula (4.59):

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_s E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}\right]^2 - q\alpha_s^2 E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}\right] \right\} dr$$

Varianza de la interferencia intercelular:

$$\text{var}[I]_{inter,s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\} (1 + 3SII) \quad (4.60)$$

Varianza de interferencia intracelular:

$$\text{var}[I]_{int ra,s} = Nu(1 + 3SII)(p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (4.61)$$

Varianza de interferencia total:

$$\text{var}[I]_{t,s} = \text{var}[I]_{inter,s} + \text{var}[I]_{int ra,s} \quad (4.62)$$

Varianza de la potencia total interferente:

$$\text{var}[P]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (4.63)$$

La varianza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$\text{var}[P_{\text{int } f}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (4.64)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

Por otra parte, exponemos la fórmula (4.65) correspondiente a la probabilidad de desbordamiento de vital importancia en cada uno de los estudios realizados a lo largo de todo el proyecto.

$$P_{\text{out}} = Q \left[ \frac{E(P)_{t,s|N_u = N_{u\text{MEDIO}}} - E(P)_{t,s|N_u = N}}{\sqrt{\text{var}(P)_{t,s|N_u = N}}} \right] \quad (4.65)$$

Finalmente, F es un factor que viene dado por la fórmula (4.31):

$$F = \frac{\text{Interferencia Intercelular}}{\text{Interferencia Intracelular}} = \frac{E[P]_{\text{inter},s}}{E[P]_{\text{intra},s}} \quad (4.66)$$

Como vemos, la principal diferencia en las fórmulas utilizadas viene dada por el término de 3.SII, esto se debe a la aparición de dos lóbulos secundarios más.

### **Parámetros:**

$G_{\text{tx}}=0$  dB

$G_{\text{rx}}=12$  dB

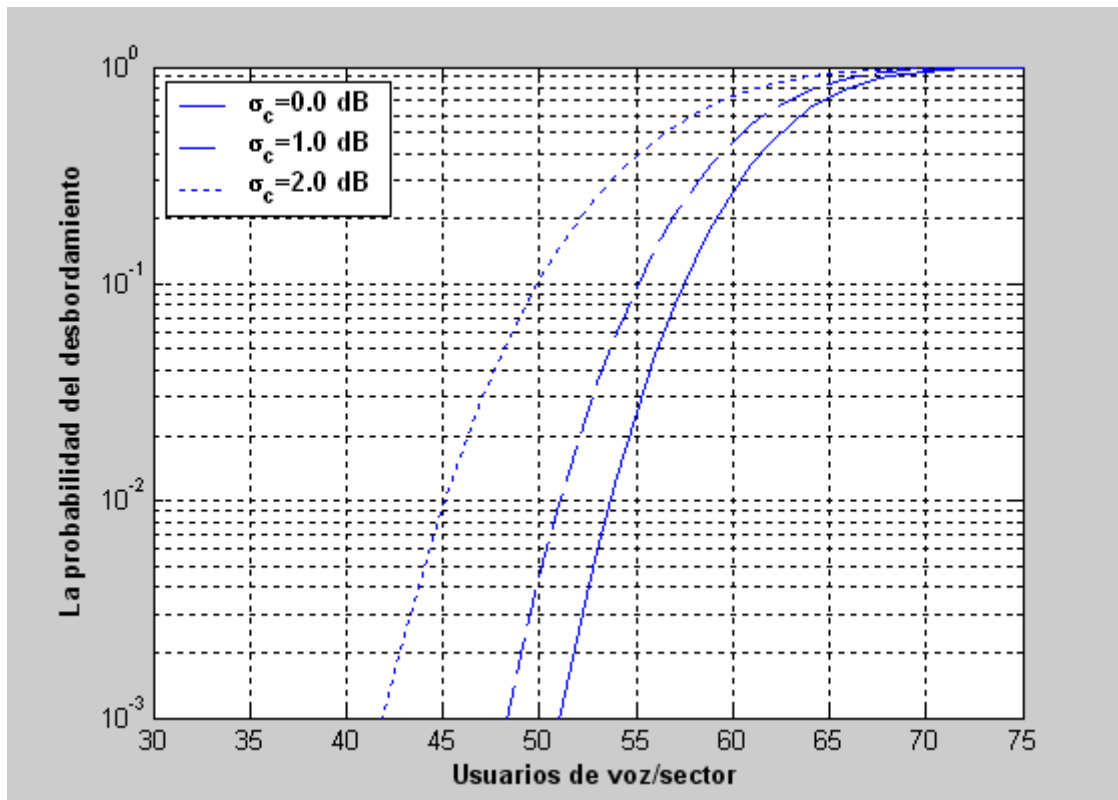
$P_{\text{txVoz}}=18.6$  dBm

freq= 1950 MHz

$P_{\text{txDatos}}=25$  dBm

$N_{\text{datos}} = \text{Variable}$

### 4.2.3 Análisis numérico para voz

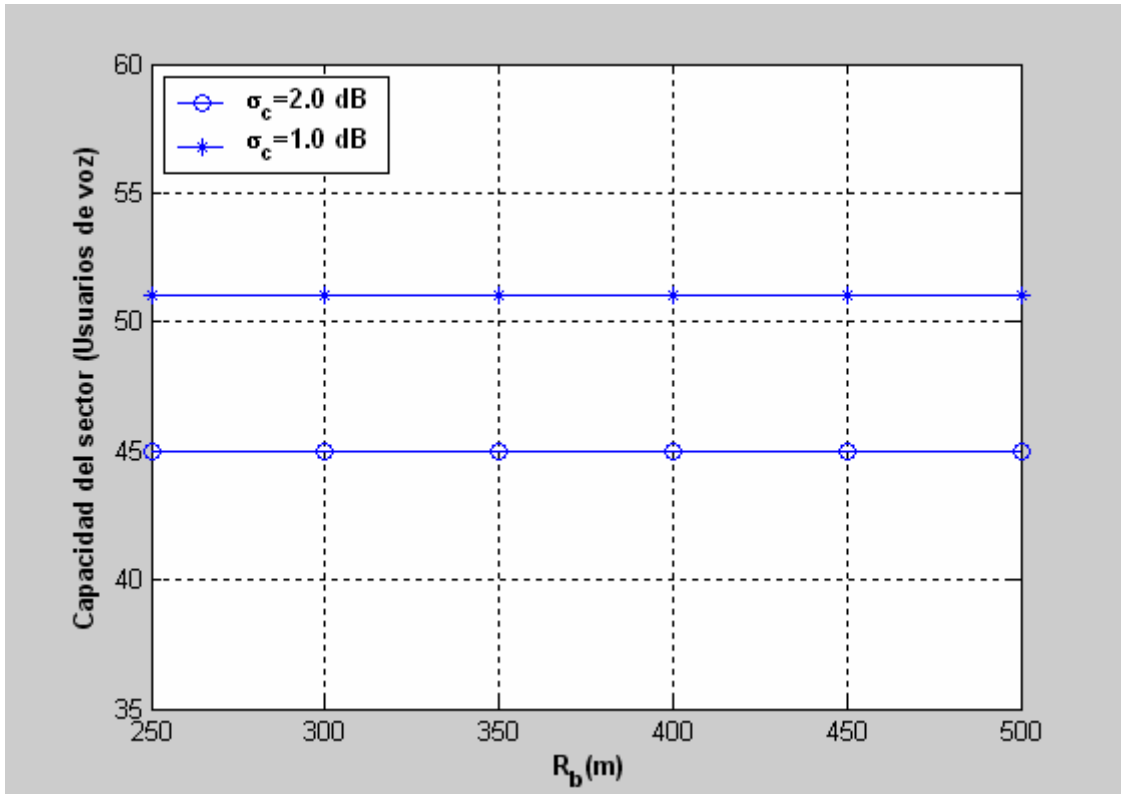


**Figura 4.22: Probabilidad del desbordamiento en el sistema**

En la Figura (4.22) observamos como el número de usuarios desciende ligeramente tres usuarios aproximadamente comparando con el caso genérico de Cigar-Shaped para autopistas.

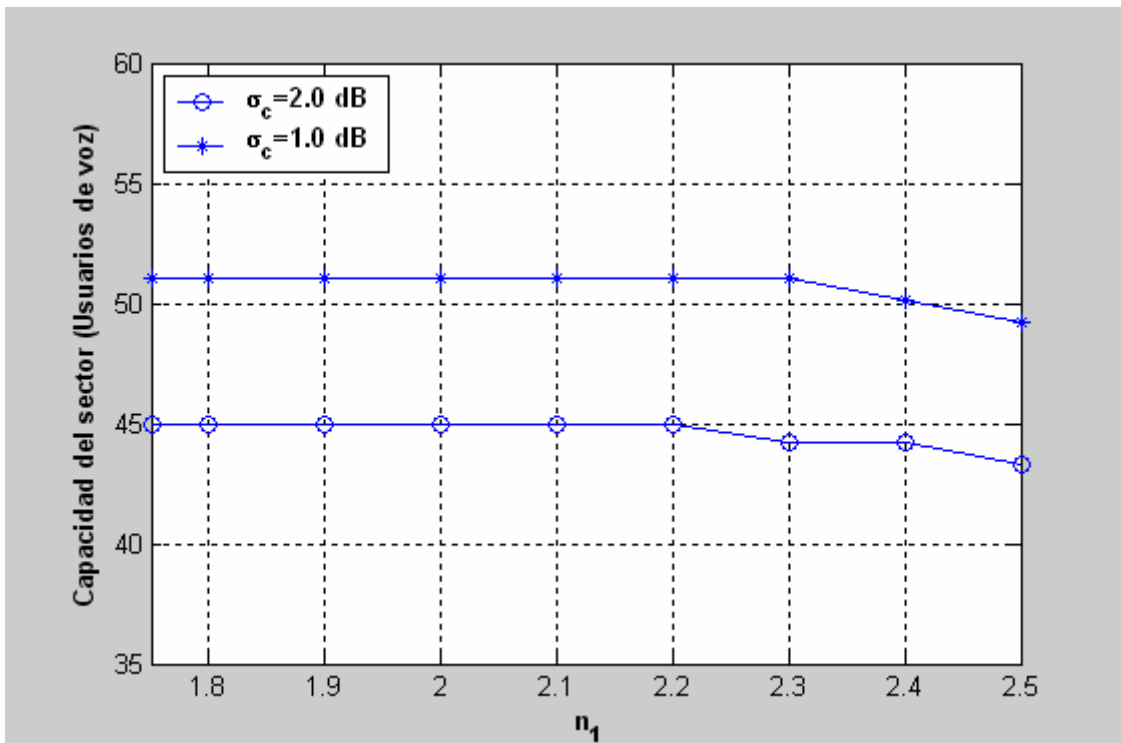
La aparición del efecto de tres lóbulos secundarios más al estar hablando para este estudio de cuatro sectores, va a provocar tener que analizar los efectos del SLL por triplicado; de alguna forma se generará un descenso del número de usuarios en el sistema que aunque no sea una cifra muy elevada, se podrá apreciar con claridad el cambio en la figura expuesta anteriormente.

Si observamos detenidamente para el caso genérico en el que no se produce desviación, podremos comprobar como el número de usuarios ha descendido cuatro puntos comparado con el tipo de sectorización Cigar-Shaped.



**Figura 4.23: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

En la Figura (4.23) observamos como nuevamente el punto de corte no influye en el estudio de la capacidad.



**Figura 4.24: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación n<sub>1</sub>**

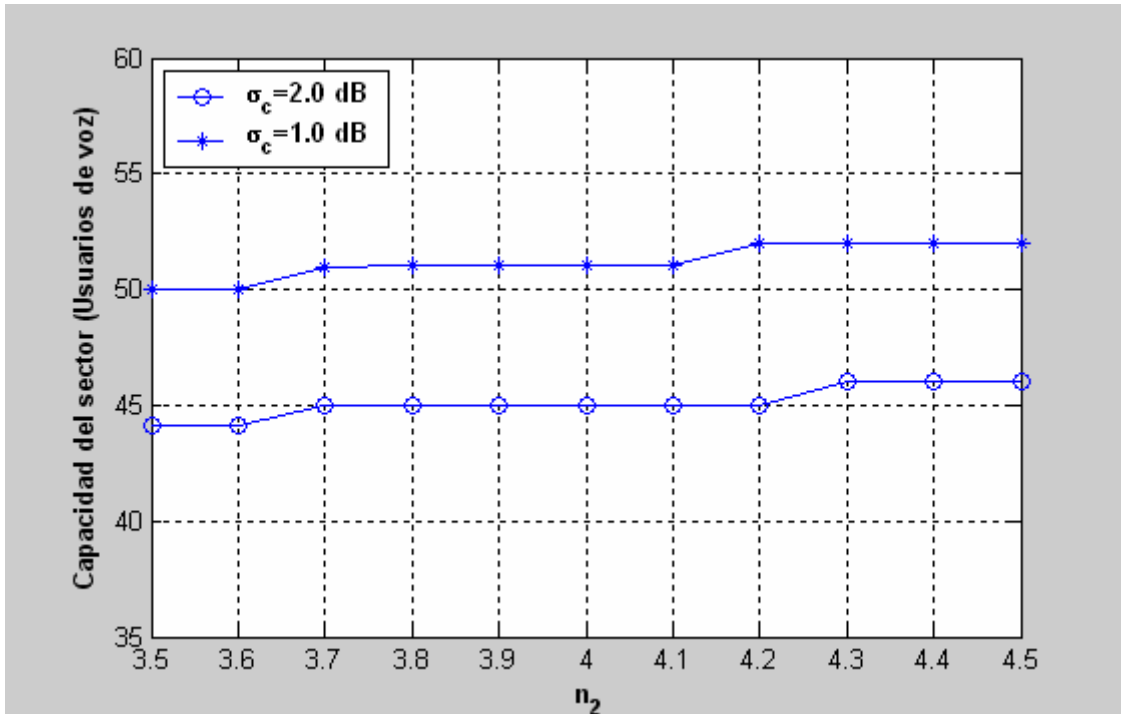


Figura 4.25: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

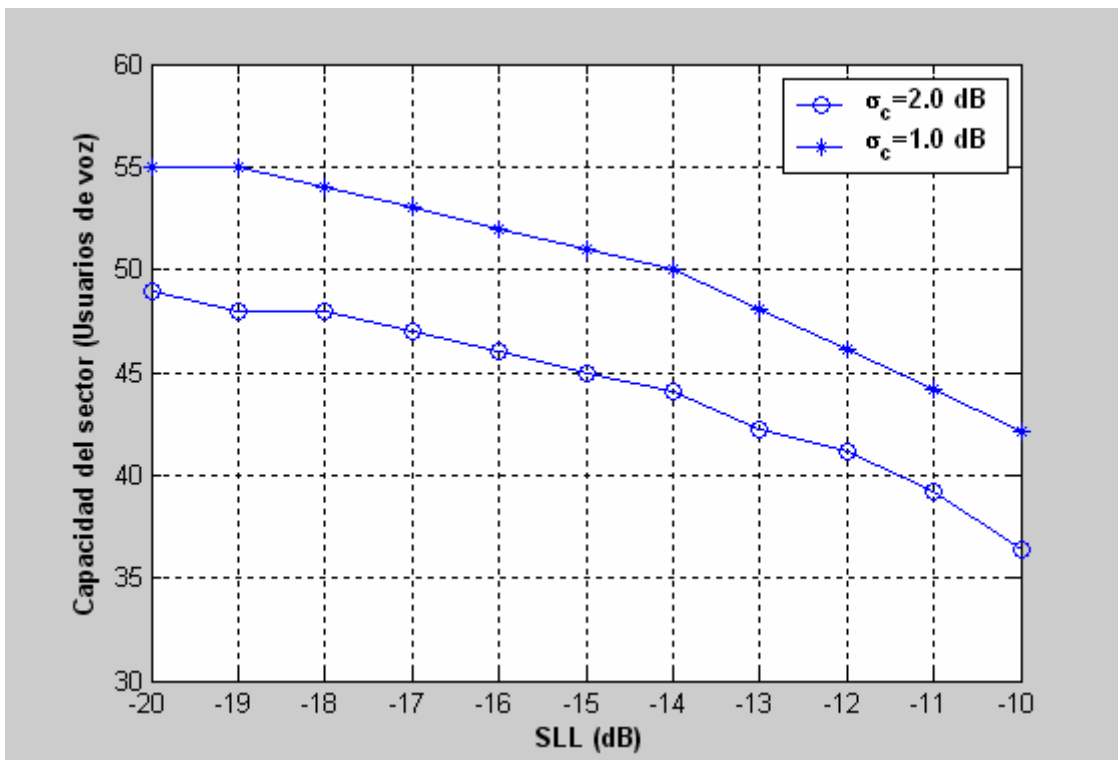


Figura 4.26: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

Un aumento del exponente de propagación de la Figura (4.24) se traduce en un pequeño descenso de la capacidad, mientras que para el exponente de propagación de la Figura (4.25), se traduce en un pequeño



ascenso de la capacidad. No obstante, el nivel de lóbulos secundarios de la Figura (4.26) desciende considerablemente por encima del 10% que suele variar normalmente. Este hecho es destacable y fundamentalmente se debe a que la fórmula utilizada pasa de tener un lóbulo secundario a tener tres, lo que provoca un descenso de la capacidad mayor al obtenido por norma general en las fórmulas anteriores.

Por otra parte en la Figura (4.27), un aumento del error de desviación de las variables aleatorias gaussianas  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  provoca un descenso de la capacidad del número de usuarios. Este fenómeno es prácticamente repetido en cualquier caso analizado en la superficie salvo en los lugares bajo tierra donde el comportamiento de la región bajo estudio viene motivado por parecerse al que se presenta en una guía de onda apareciendo un nuevo coeficiente que ya se estudiará detenidamente en capítulos posteriores.

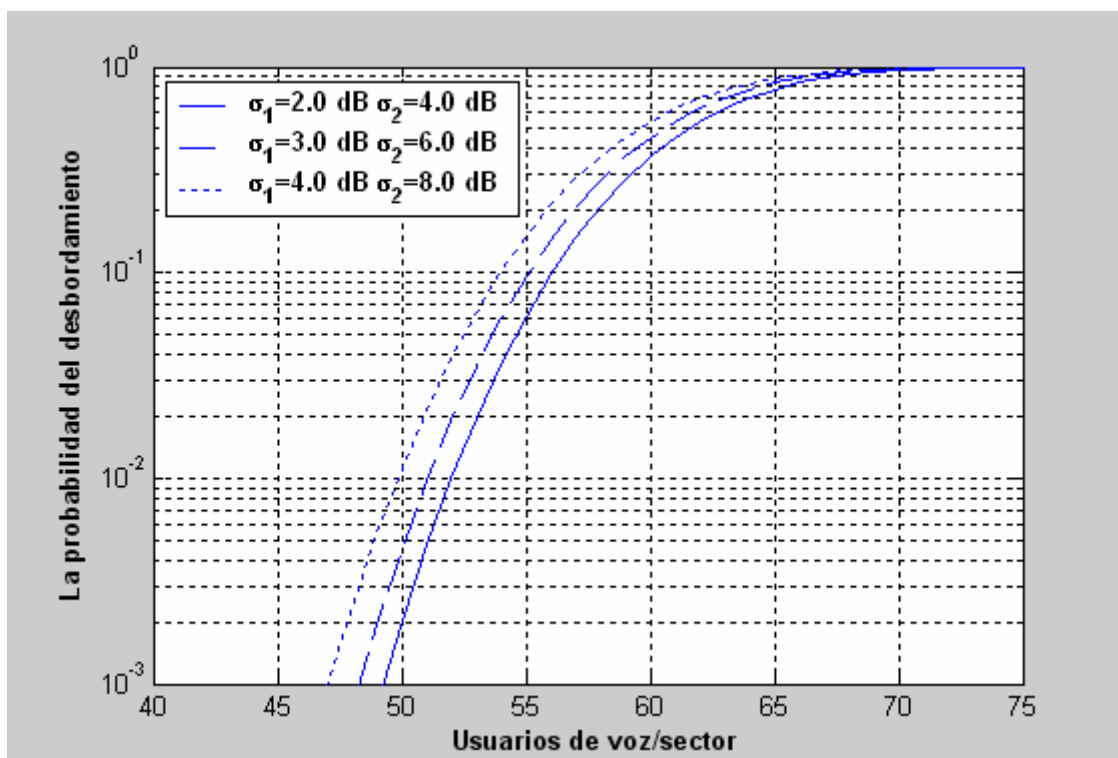
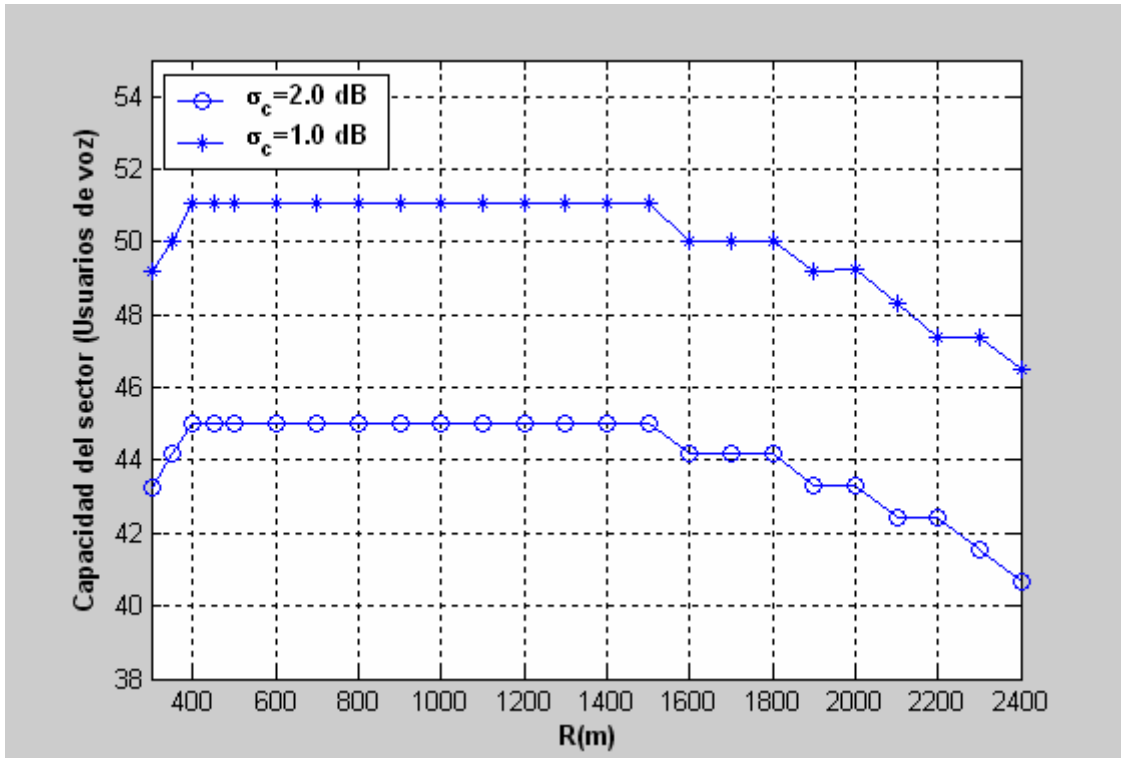


Figura 4.27: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$



**Figura 4.28: Capacidad de número de usuarios en función de la región de cobertura**

Nuevamente en la Figura (4.28), se puede observar como a partir de un valor superior al punto de corte, se produce un estancamiento de la capacidad en el sistema para luego disminuir una vez alcanzados valores superiores a los 1500 metros influido por las pérdidas de propagación. Como ya se observa, por este motivo, se tiende a utilizar radios de cobertura cercanos a los valores de 1000 y 1500 metros.

Analizando de forma global el comportamiento para cada una de las gráficas podemos observar que no se produce ninguna singularidad que las distinga de casos anteriores. Cada uno de los parámetros cumple las propiedades que se daban en estudios anteriores.

### 4.2.4 Análisis numérico para datos

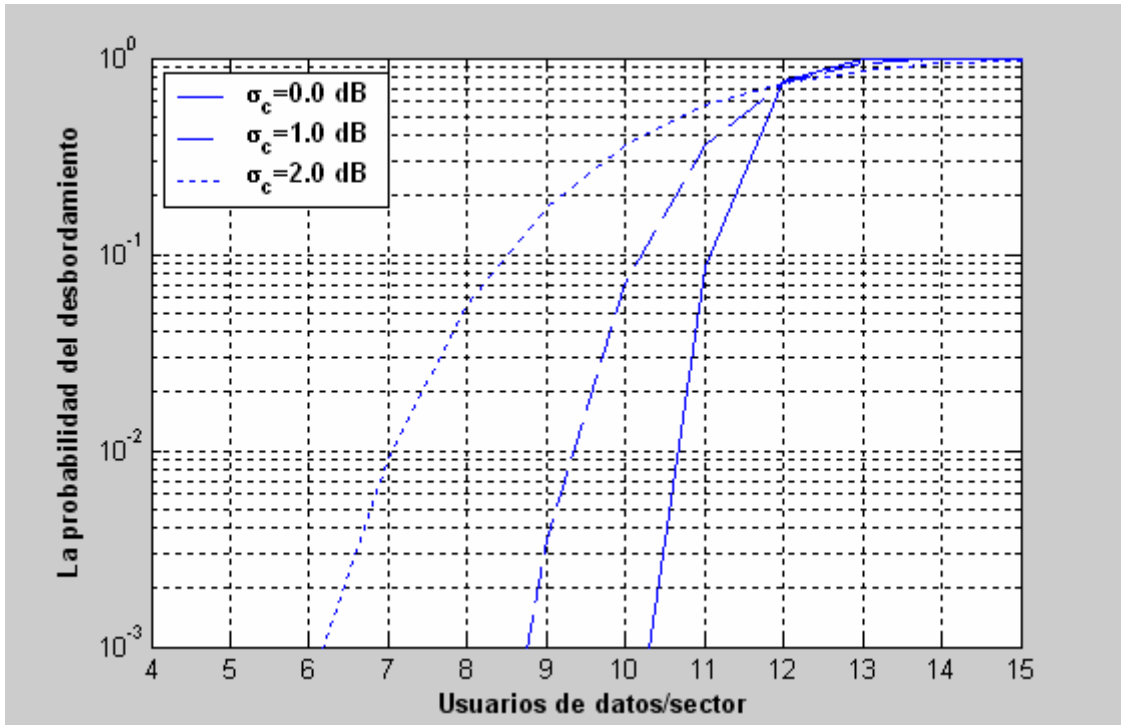


Figura 4.29: Probabilidad del desbordamiento del sistema

En la Figura (4.29), comparando con Cigar-Shaped, se produce un ligero descenso de la capacidad, motivado por una mayor influencia del SLL.

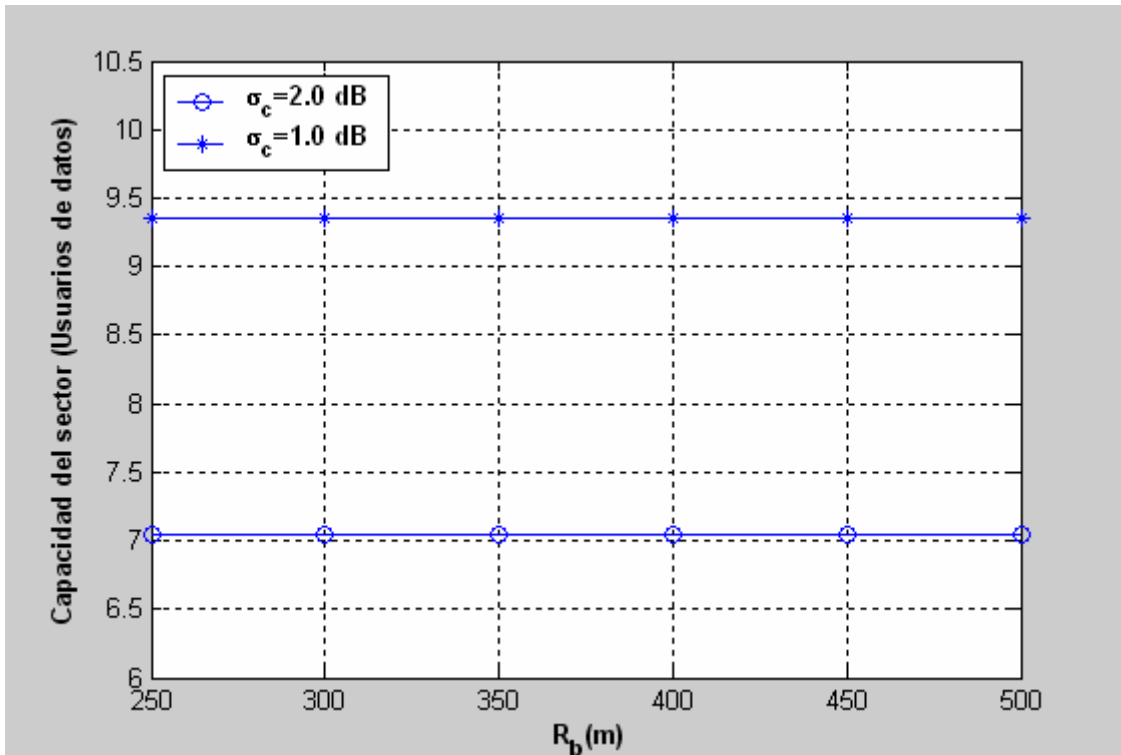


Figura 4.30: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura

Nuevamente, en la Figura (4.30), la influencia del punto de corte es apenas apreciable.

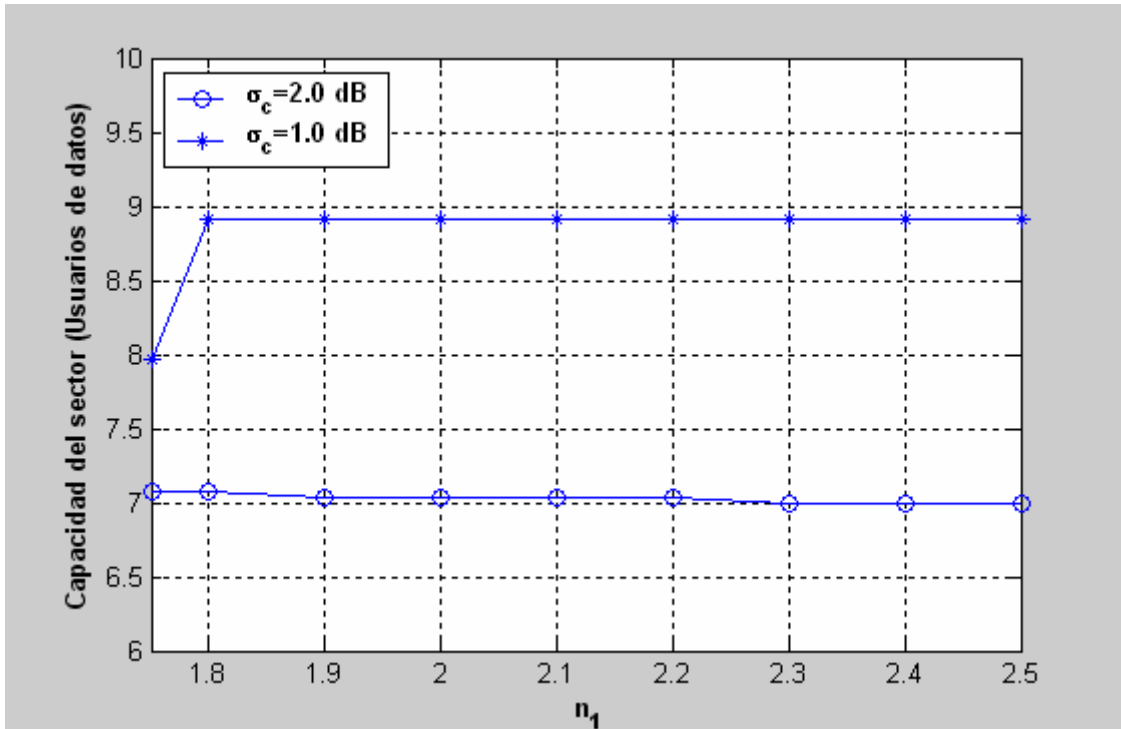


Figura 4.31: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

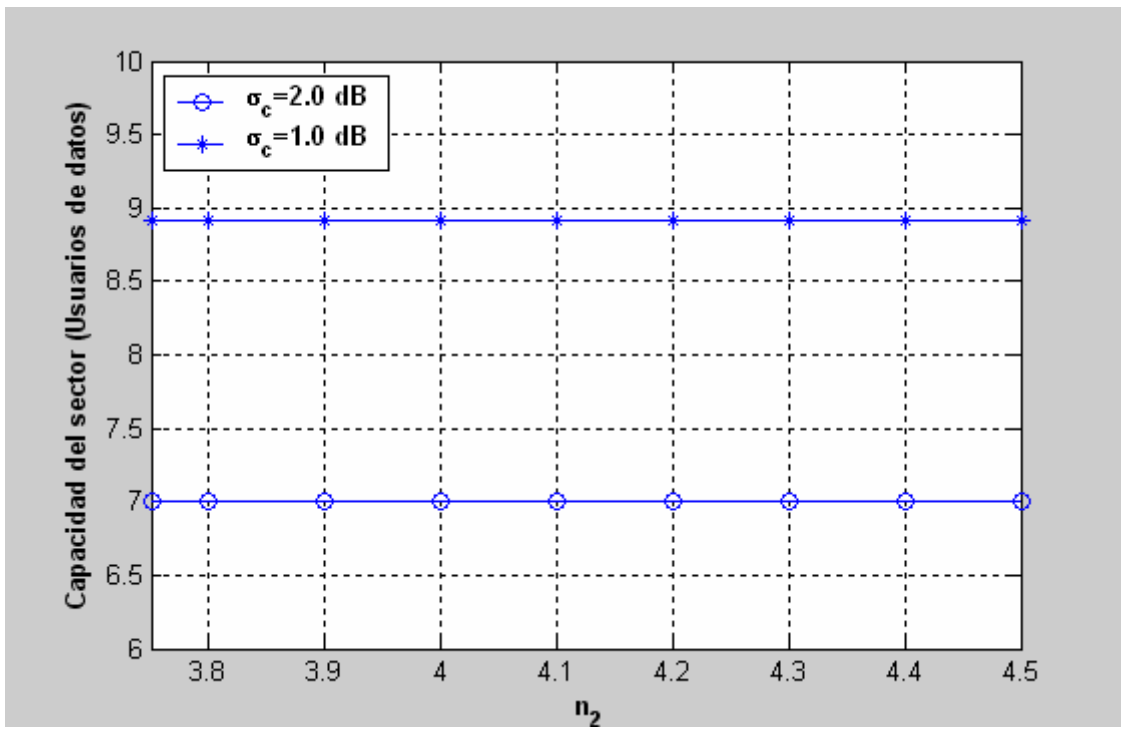
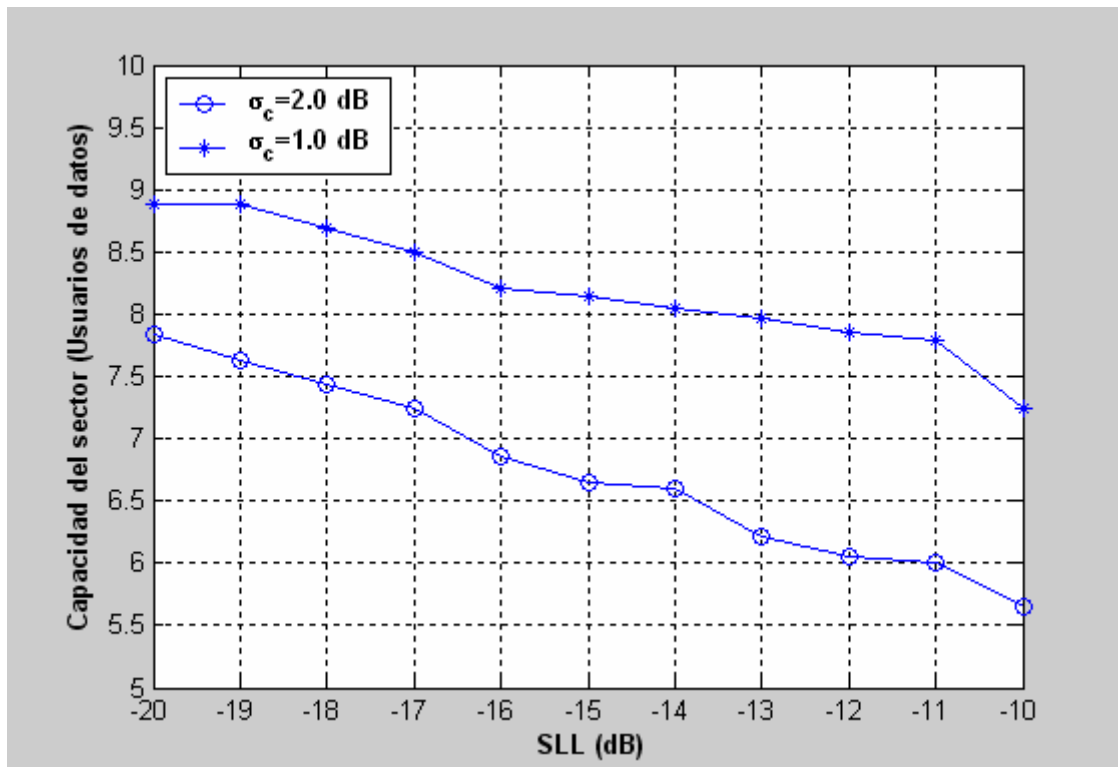


Figura 4.32: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

Es importante destacar como en este caso, para el exponente de propagación  $n_1$  de la Figura (4.31), se produce en una de las dos representaciones, un ascenso de la capacidad del número de usuarios. Generalmente, esto no es así ya que el incremento de  $n_1$  provoca un descenso de la capacidad. En la Figura (4.32), la influencia del exponente de propagación es prácticamente inapreciable.

Como ya se había mencionado en el caso para voz, la capacidad puede variar hasta un 30% motivada por la variación del nivel de lóbulos secundarios. Por este motivo, la función que aparece al estudiar la capacidad en cada uno de esos 15 puntos hace que la capacidad varíe de esta forma tan brusca comparando con el estudio de la capacidad en autopistas variando el nivel de lóbulos secundarios.



**Figura 4.33: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**

Nuevamente, como ya se ha comentado a lo largo de este apartado, podemos observar más claramente en la Figura (4.33), como el SLL afecta a la capacidad en el sistema bajo análisis.

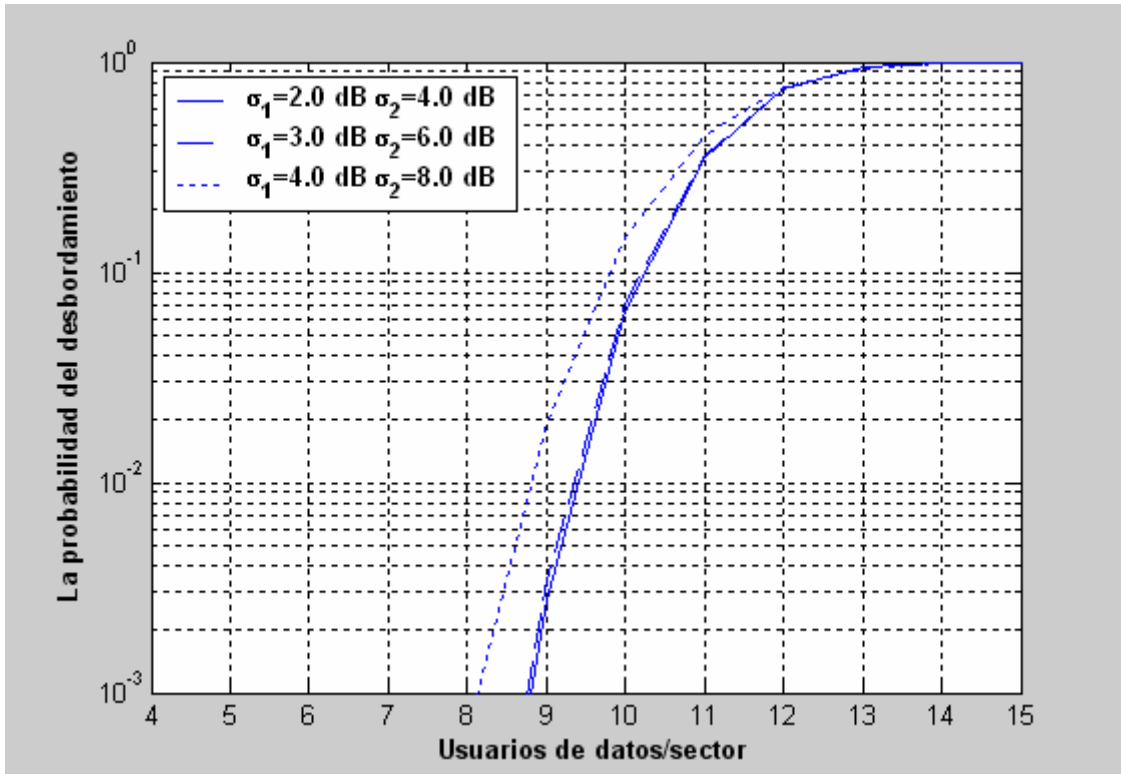


Figura 4.34: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$

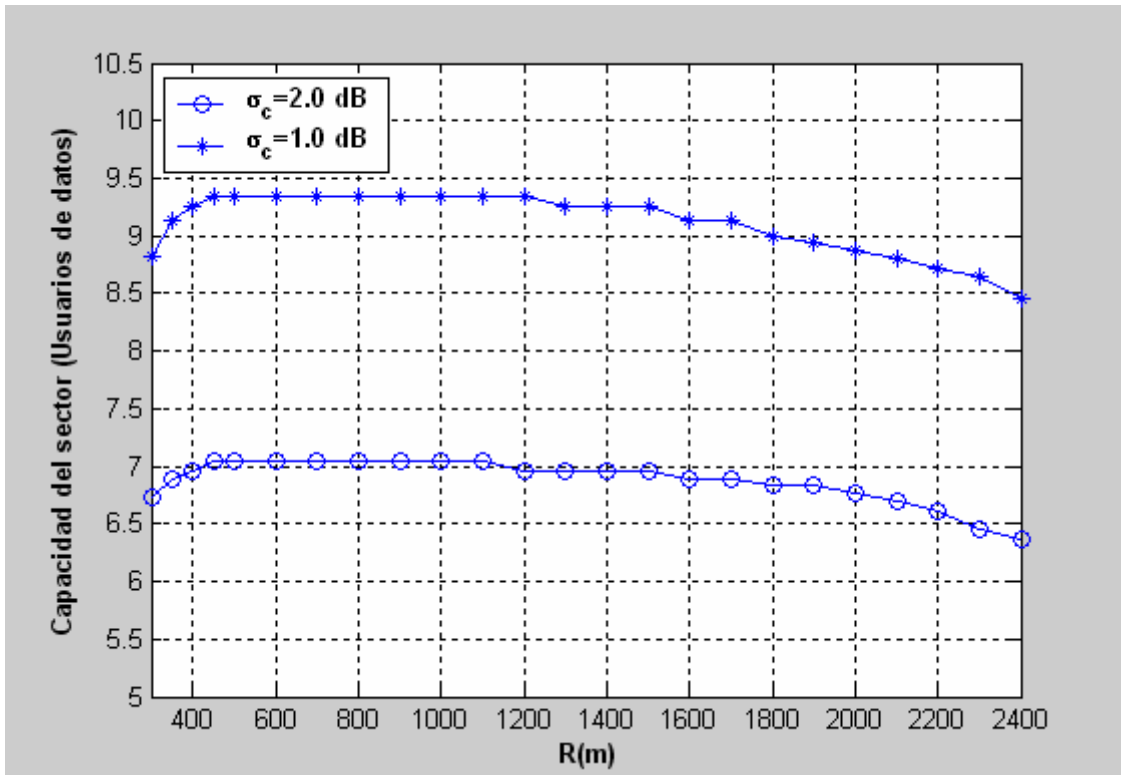


Figura 4.35: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura

La variación del error de desviación ocasionado por las variables aleatorias Gaussianas  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  en la Figura (4.35), hace que se genere un mínimo descenso de la capacidad apreciable en los cálculos realizados.

En cuanto a la capacidad, los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos en casos anteriores, salvo que como ya sabemos, la capacidad es ligeramente inferior a estudios anteriores.

#### 4.2.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

En este estudio, se plantea la posibilidad de dar dos servicios de forma simultánea al usuario. Para ello, será necesario recurrir a una fórmula que difiere someramente de las mencionadas anteriormente.

A continuación trataremos de desarrollar brevemente las expresiones utilizadas para extraer las conclusiones y las figuras posteriores. En primer lugar, para comprender los siguientes desarrollos, ver fórmulas (4.18), (4.19) y (4.20):

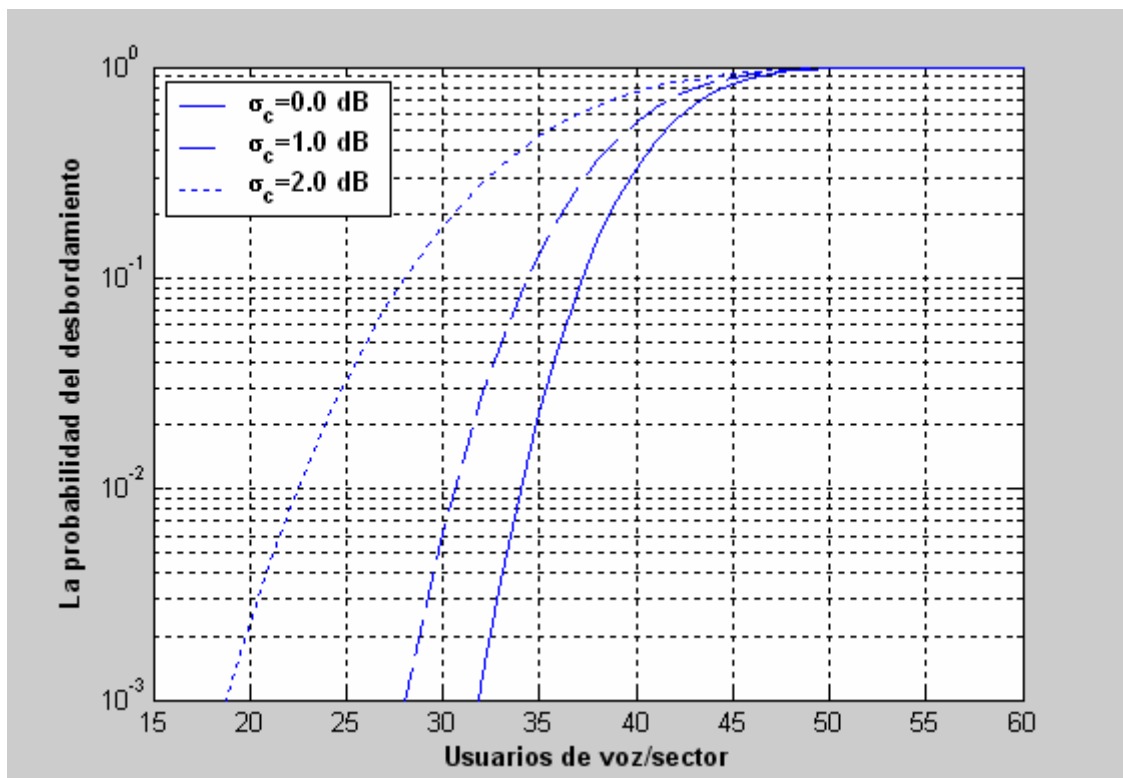
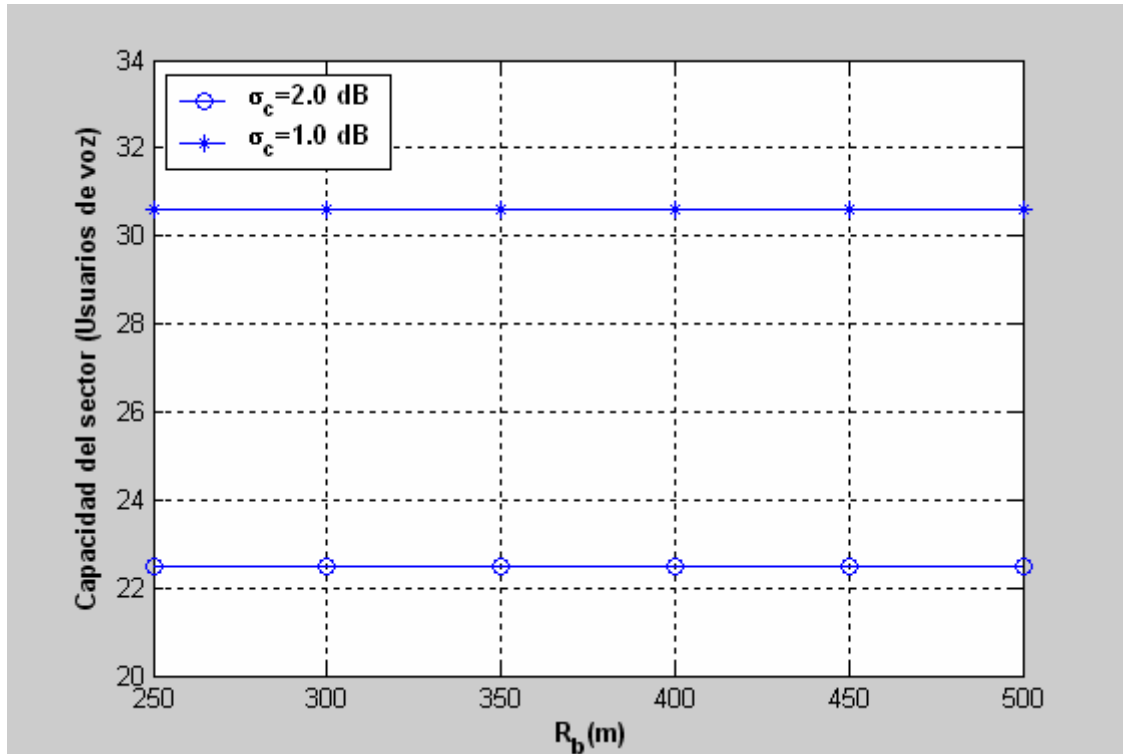


Figura 4.36: Probabilidad del desbordamiento existiendo 5 usuarios de datos



**Figura 4.37: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

La Figura (4.36) muestra como afecta la probabilidad del desbordamiento para microceldas del tipo Cross-Shaped. Podemos observar, como comparado con microceldas del tipo Cigar-Shaped, la capacidad desciende ligeramente de nuevo para el servicio conjunto de voz-datos.

Por otra parte, la Figura (4.37) refleja lo que ya se había podido apreciar en estudios anteriores, es decir, que su variación apenas afectará a la capacidad.



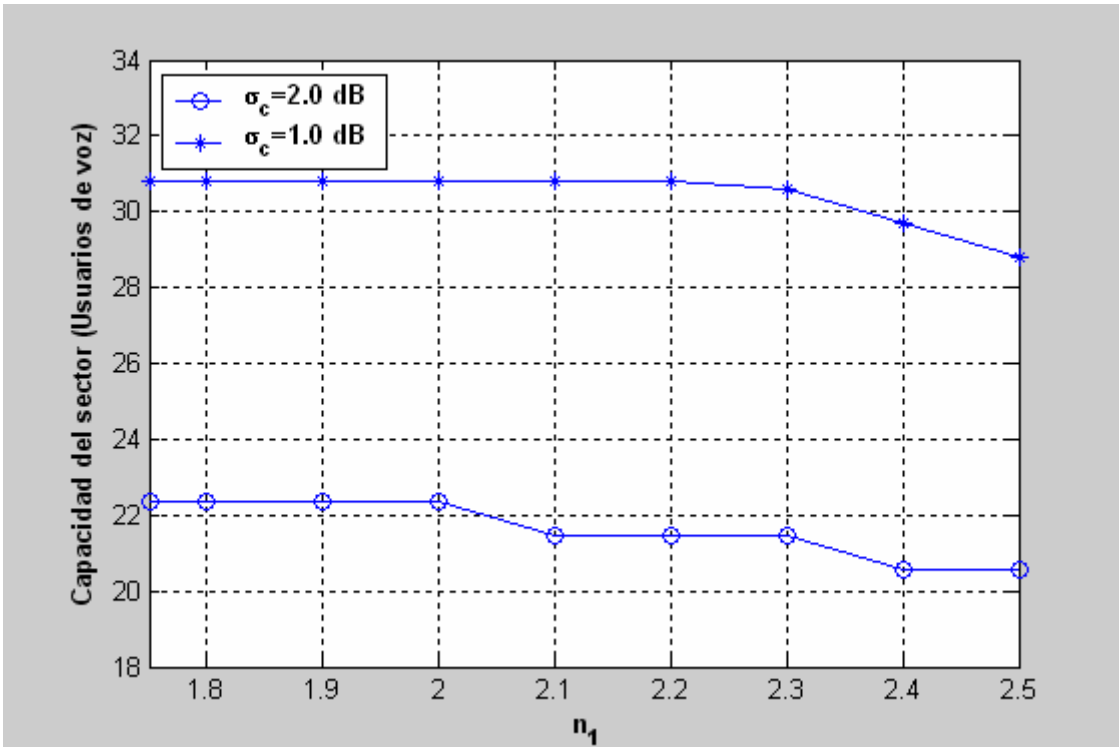


Figura 4.38: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

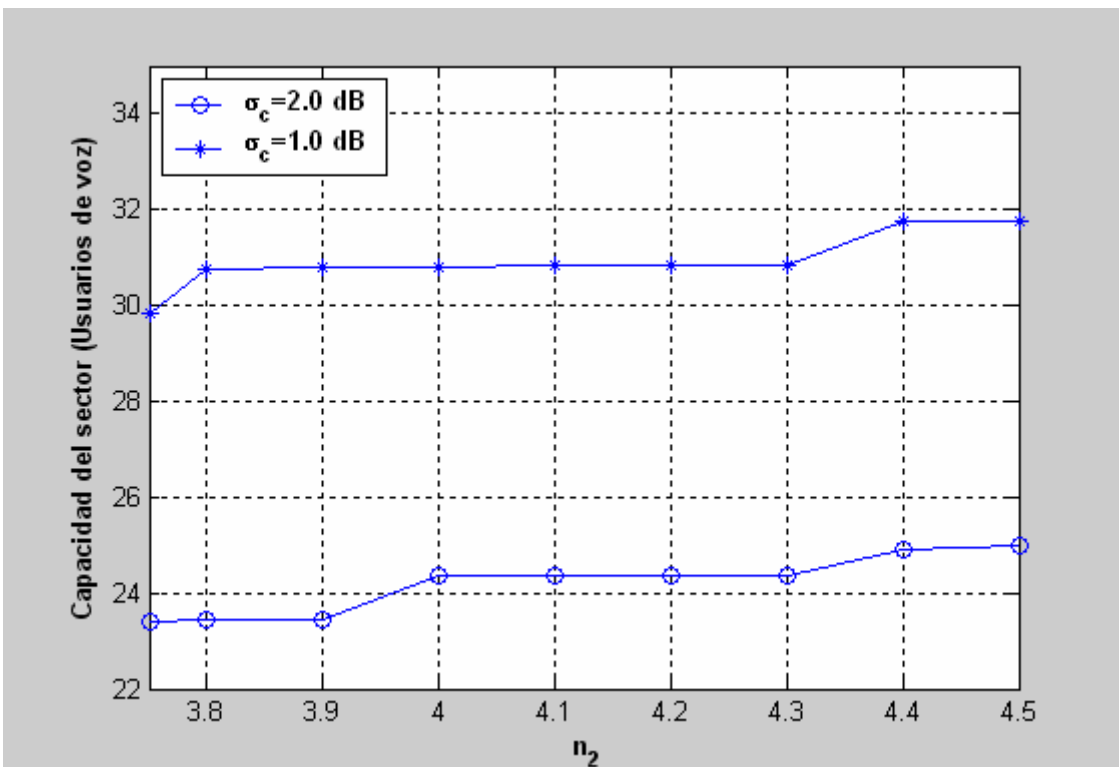


Figura 4.39: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

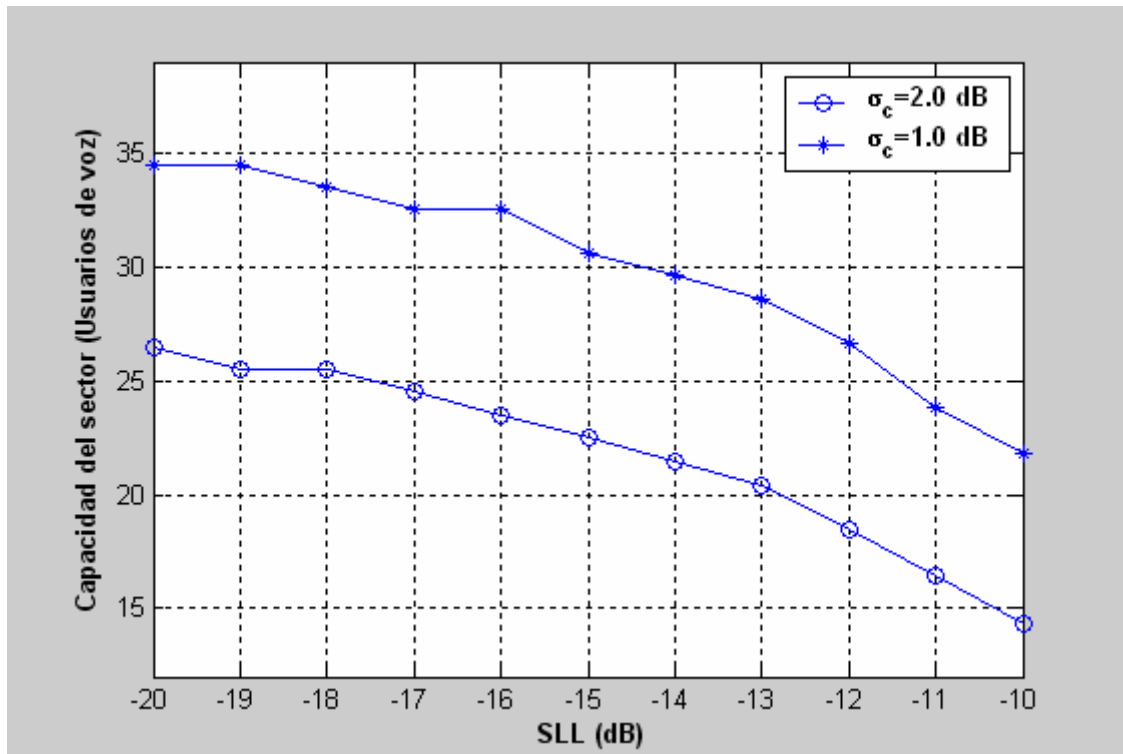


Figura 4.40: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

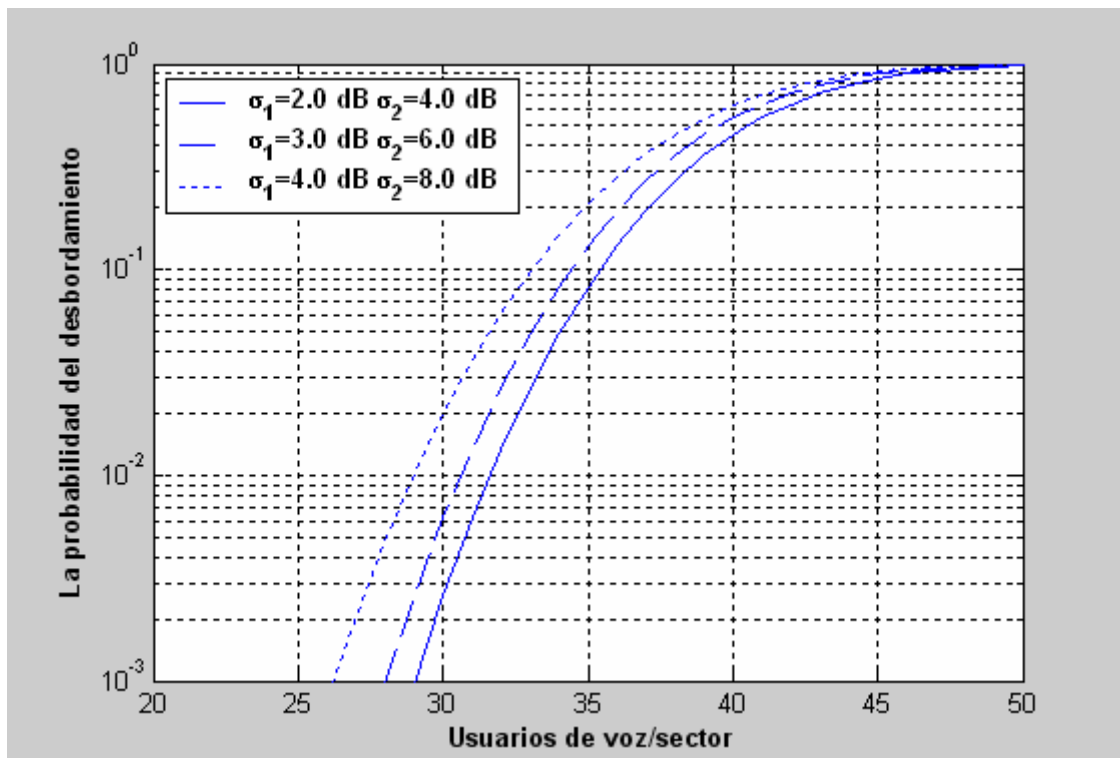
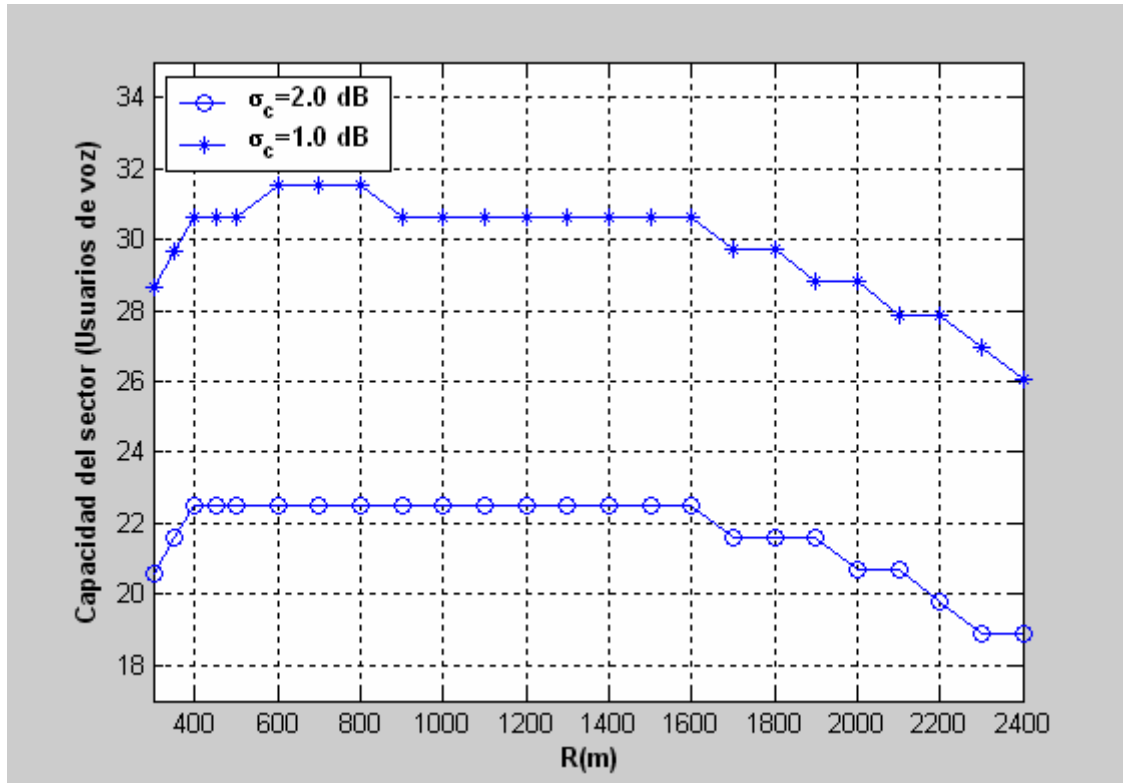


Figura 4.41: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  existiendo 5 usuarios de datos



**Figura 4.42: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

Cabe destacar como la variación de los exponentes de propagación de las Figuras (4.38) y (4.39) genera cierta bajada y subida en cierto modo elevada en cuanto a los resultados obtenidos de capacidad.

Por otra parte en la Figura (4.42), la capacidad para el estudio de la variación de la región de cobertura para una  $\sigma_c = 1$ dB sigue aumentando al superar el valor del punto de corte. El comportamiento que se espera por término medio, en los estudios realizados, es un aumento de la capacidad para valores cercanos a  $R_b$  para mantenerse en un intervalo y descender en el caso de que la región de cobertura sea muy elevada.

### 4.3 Estudio para microcélulas en forma cruciforme (Cross-Shaped) en ciudades



### 4.3.1 Introducción

En las ciudades, será necesario ubicar de los dos tipos encontrándonos ante un modelo mixto. En estudios reales, será necesario estudiar el comportamiento de una manera aproximada de las calles para saber qué tipo de sectorización desplegar.

Todo ello dependerá de los diferentes obstáculos que puedan existir, así como de la altura de los edificios.

Desde un punto de vista de ubicación, las estaciones base se ubican en el exterior con altura de antena bajas, supuestamente situadas en fachadas, farolas o semáforos. Los usuarios peatonales se ubican en las calles.

La estructura de las calles es del tipo denominado Manhattan, formado por una red regular de calles y avenidas perpendiculares. La cobertura que producen se orienta a lo largo de las calles y en las calles laterales.

El modelo de movilidad urbana se relaciona con la estructura de tipo Manhattan en la que los móviles se mueven a lo largo de las calles y pueden girar en los cruces con una cierta probabilidad. Los móviles se distribuyen uniformemente en la calle y su dirección de movimiento a lo largo de la misma se elige aleatoriamente en la inicialización. La posición de los móviles se actualiza cada 5 metros y su velocidad puede cambiar en cada actualización de la posición según una cierta probabilidad.

Muchos de los usuarios no tendrán porque desplazarse a grandes velocidades en vehículos, ya que gran parte se desplazarán a pie donde depende de la velocidad peatonal a la que estos vayan.

#### **Parámetros:**

$G_{tx}=0$  dB

$G_{rx}=12$  dB

$P_{txVOZ}=18.6$  dBm

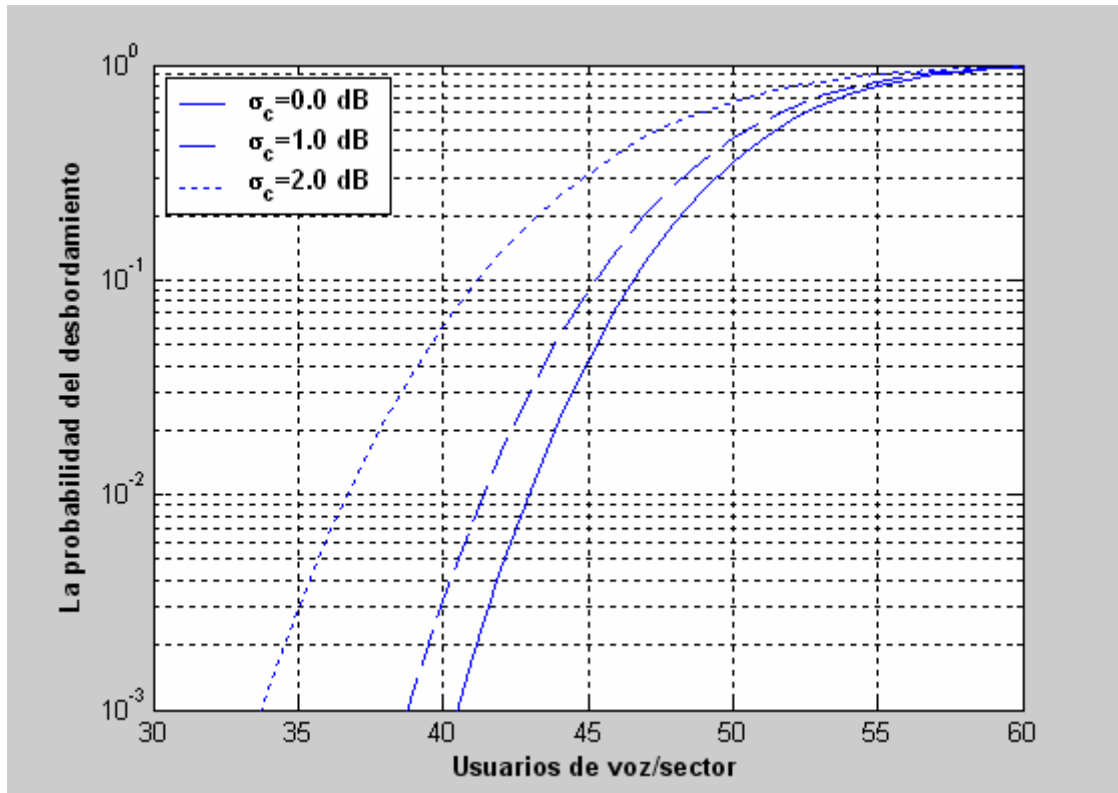
$P_{txDATOS}=25$  dBm

freq= 1950 MHz

$P_{tx2}=25$  dBm

## 4.3.2 Análisis numérico para micro células del tipo Half-Square cell

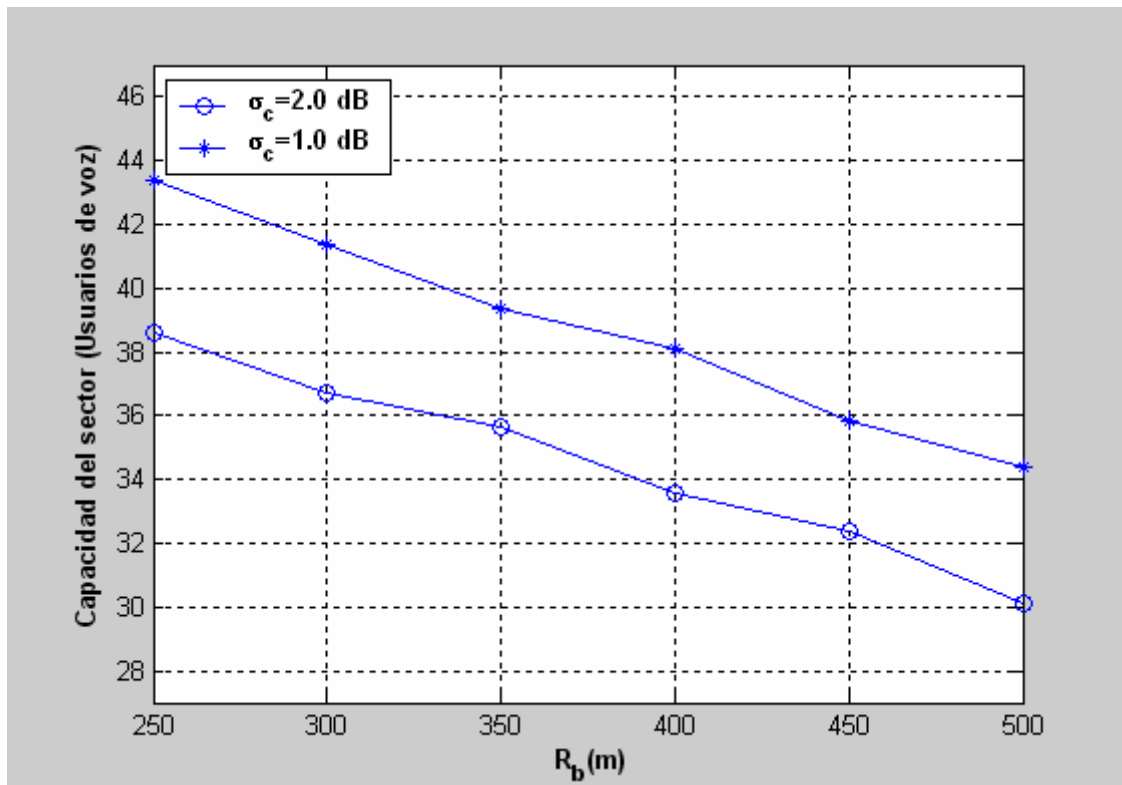
### 4.3.2.1 Análisis numérico para voz



**Figura 4.43: Probabilidad del desbordamiento del sistema**

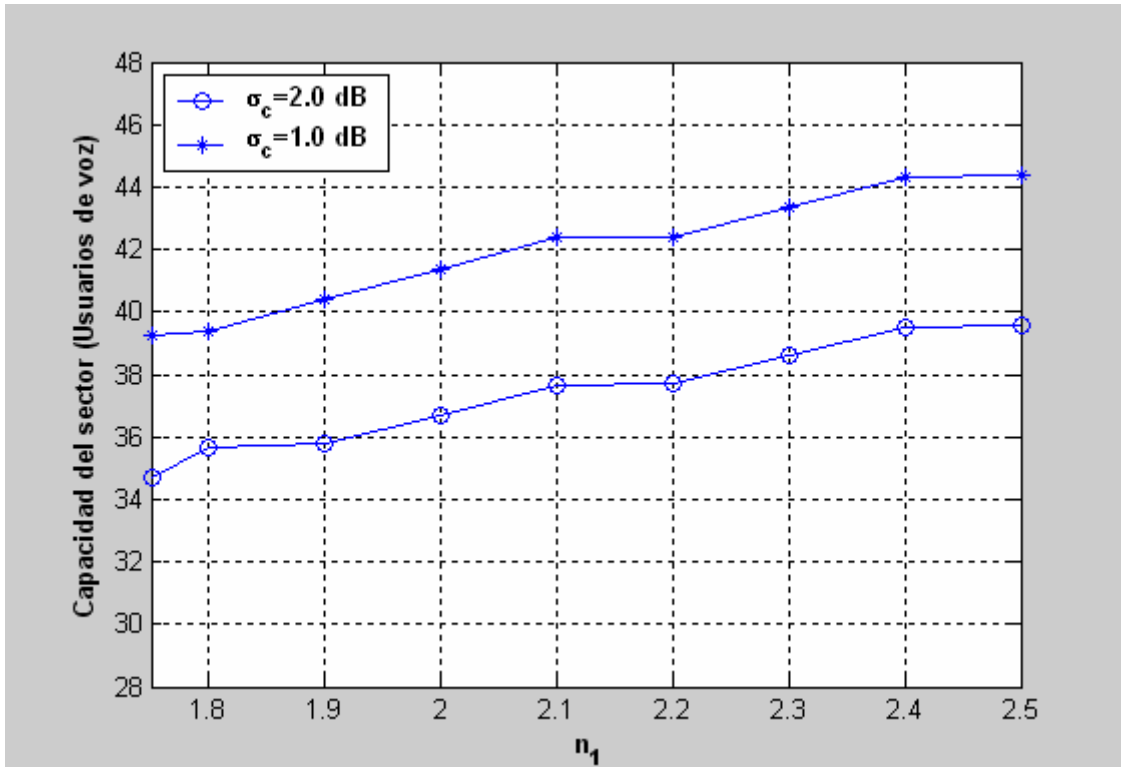
En la Figura (4.43), podemos observar como el número de usuarios decrece radicalmente en 10 puntos aproximadamente. Remitiéndose a la figura del radio de cobertura de la región bajo estudio veremos que para valores de  $R=125$  metros la capacidad es menor.

Más adelante, se pueden observar los resultados obtenidos para los diferentes parámetros. Las diferencias respecto a estudios anteriores se deben a que  $R$  tiene un valor inferior al punto de corte, que ronda valores cercanos a 300 metros, esto hará que su comportamiento sea muy distinto respecto al de estudios anteriores.



**Figura 4.44: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

En la Figura (4.44), se observa una variación muy grande debida a que estamos trabajando con un radio de cobertura con un valor inferior al del punto de corte.



**Figura 4.45:** Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

En la Figura (4.45), podemos destacar como el incremento del exponente de propagación provoca un incremento de la capacidad en lugar de un descenso como en estudios anteriores. Esto viene motivado nuevamente por la utilización de un radio de cobertura de 125 metros.



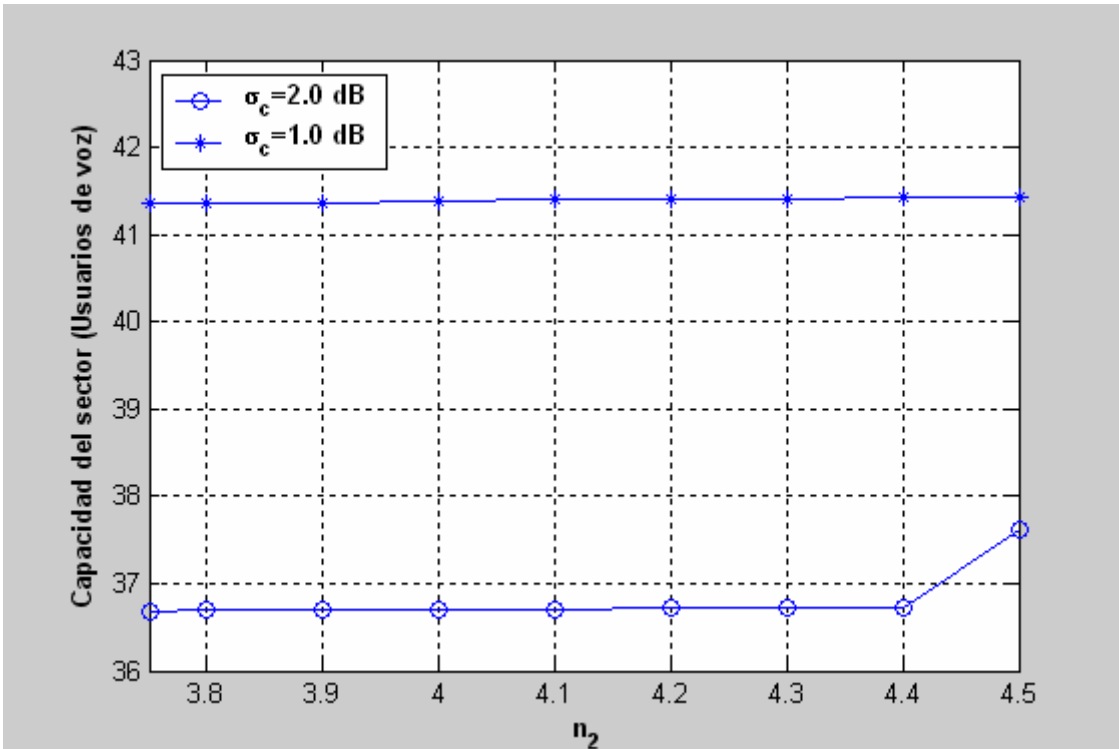


Figura 4.46: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

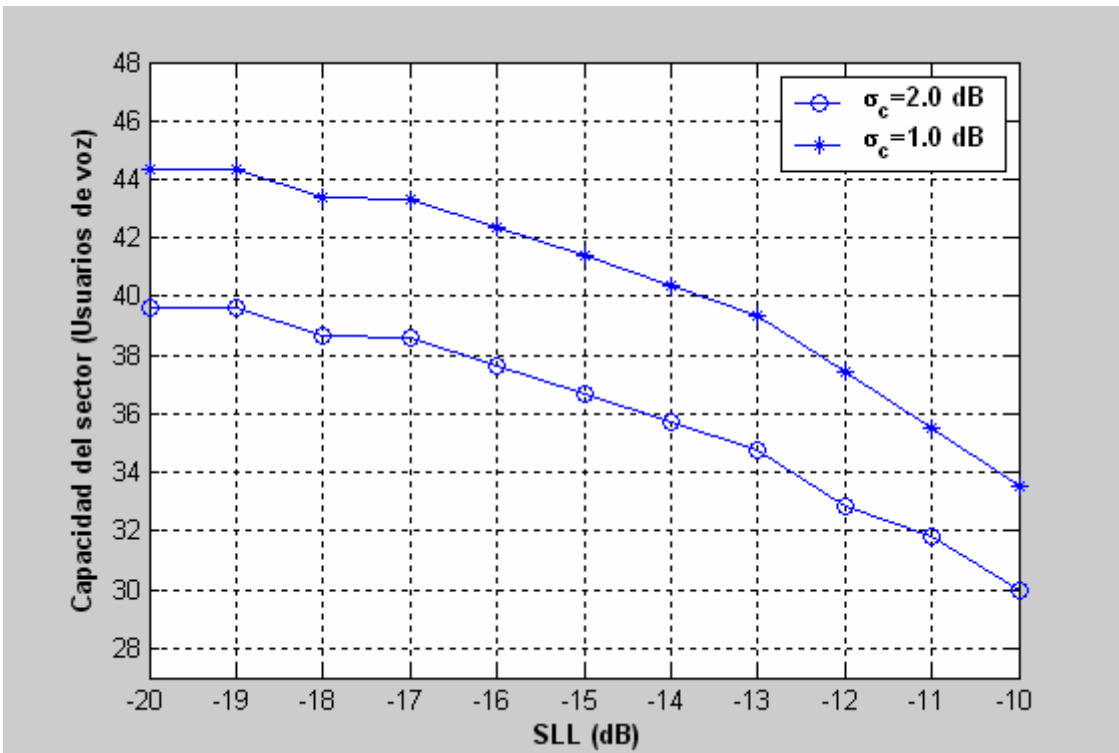


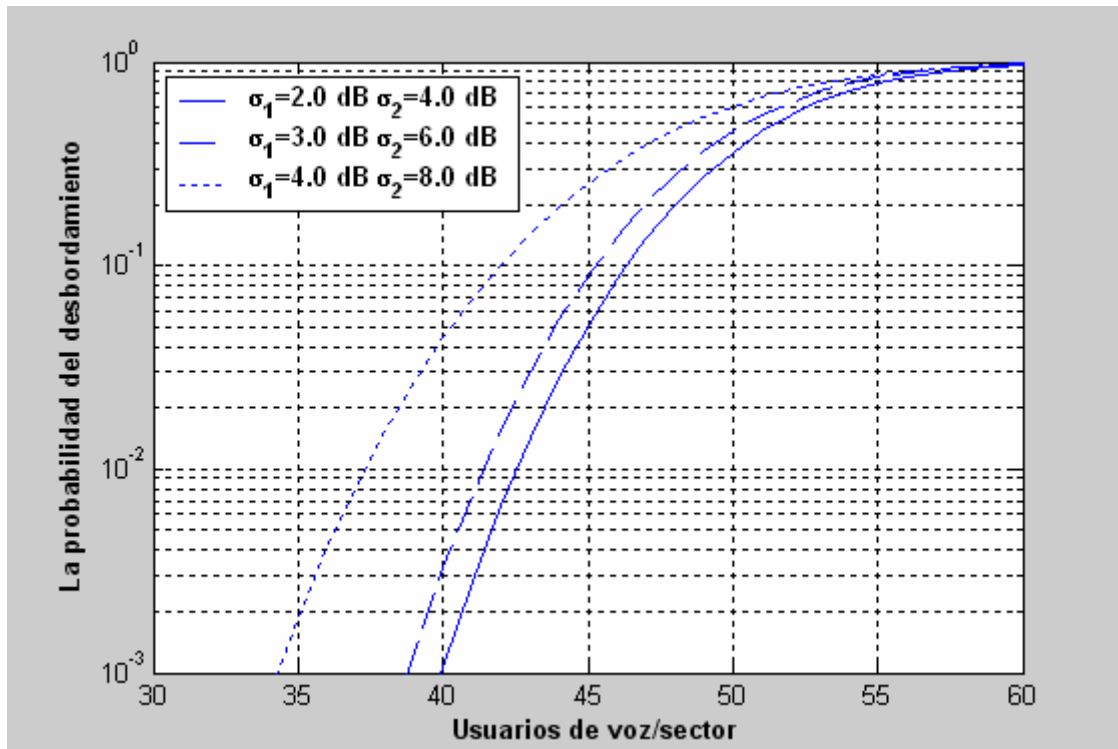
Figura 4.47: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

Fundamentalmente, los resultados se deberán a que la resolución escogida en el análisis del algoritmo donde se utiliza la SNR (ver código) es de

0.5 usuarios en lugar de ser una resolución superior con menor margen de error. Para calcular el SNR trabajamos con límites de acotación que nos permiten calcular un número de usuarios determinado.

Dada una situación entre 30 y 31 usuarios evaluamos el punto medio 31.5. En caso de mayor resolución podemos hablar de analizar 31.1, trabajando con las décimas. Este último análisis será aún más realista.

En caso de que el salto en el algoritmo sea de un usuario el punto medio bajo análisis será 0.5. Si el salto es de 0.1 usuarios, el punto medio bajo estudio será 0.05 usuarios. Todo ello, viene referido a un estudio haciendo referencia a los algoritmos utilizados para calcular el outage y su relación con la capacidad en las sucesivas gráficas.



**Figura 4.48: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Nuevamente, un incremento de las  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  provoca un descenso considerable de la capacidad para un mismo valor de la probabilidad del desbordamiento.

### 4.3.2.2 Análisis numérico para datos

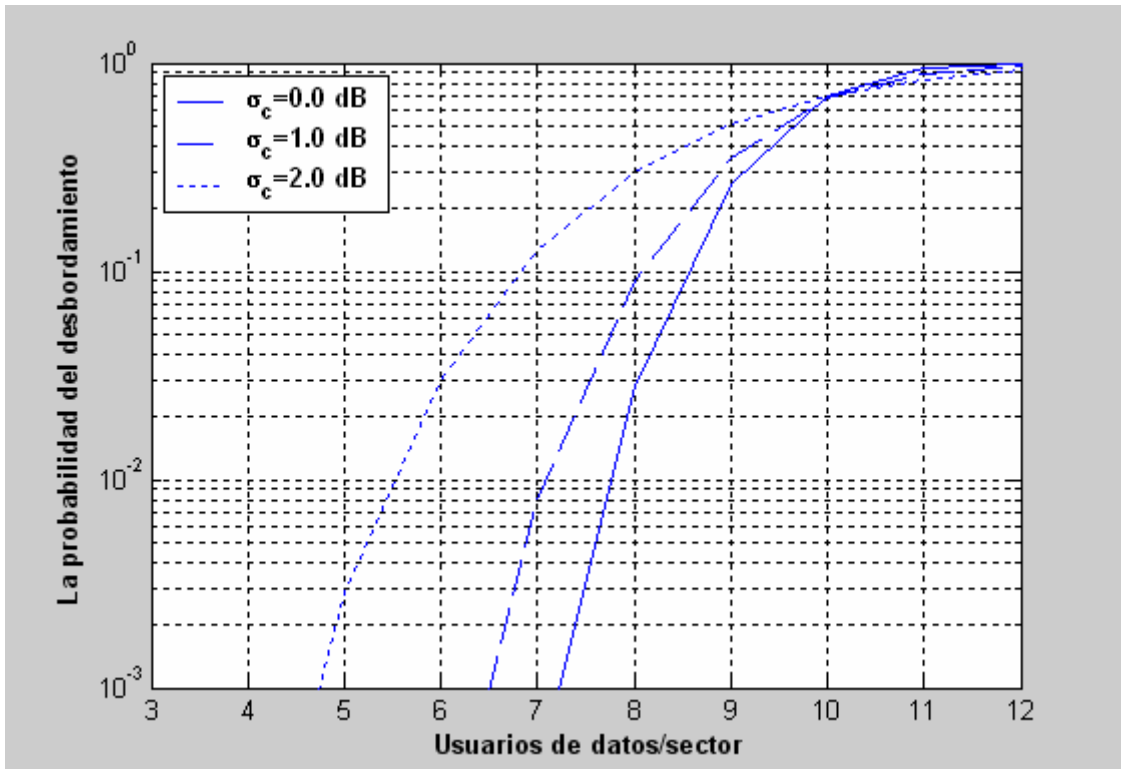


Figura 4.49: Probabilidad del desbordamiento

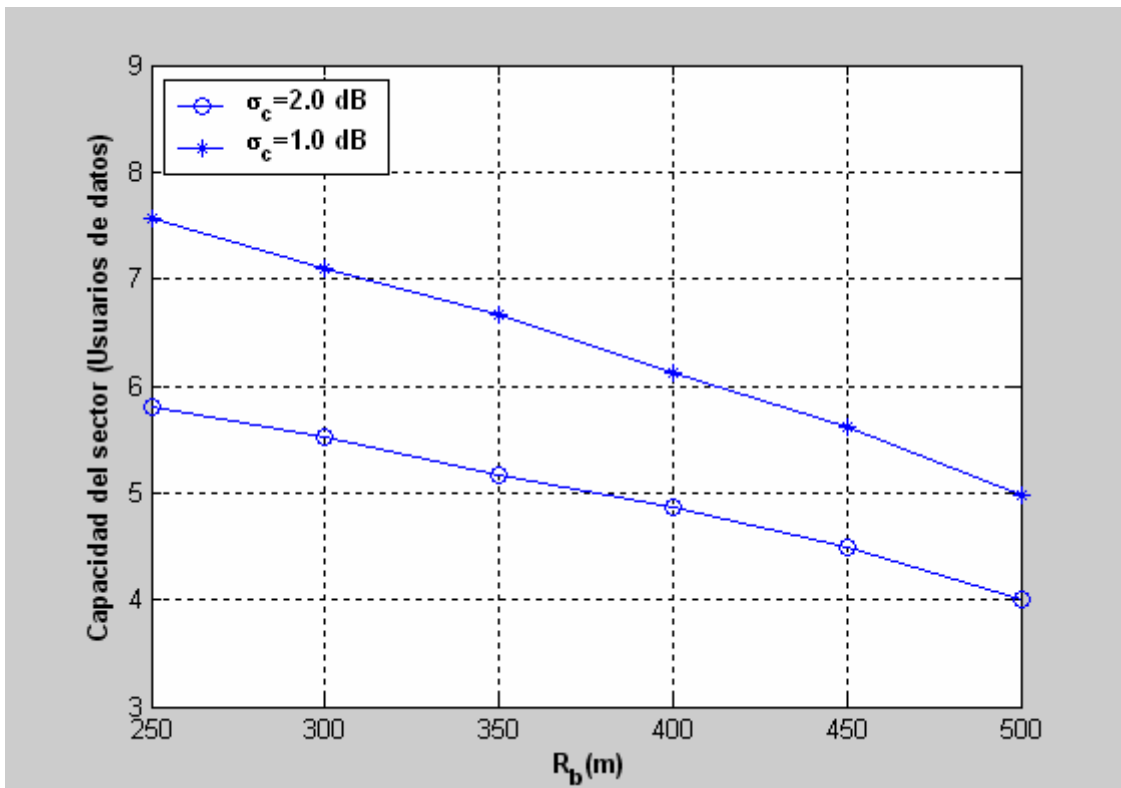
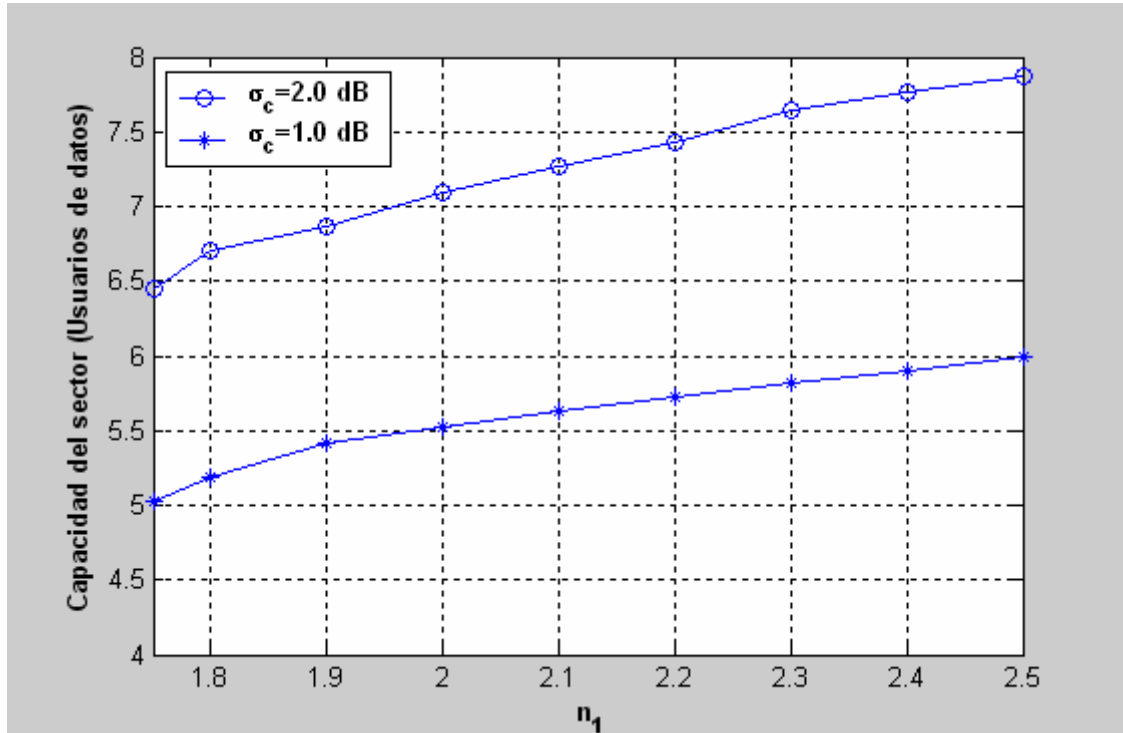


Figura 4.50: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

En la Figura (4.50), vuelve a suceder para el punto de corte, lo que se producía para este mismo caso en servicio de voz. Se genera una variación considerable de la capacidad conforme el punto de corte varía. En este caso, un incremento de este parámetro se traduce en un descenso de la capacidad.



**Figura 4.51: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$**

Nuevamente, en la Figura (4.51) vuelve a suceder lo mismo que en el estudio para servicio de voz. Un aumento de este exponente de propagación se traduce en un incremento de la capacidad.

En cuanto a la Figura (4.52), el comportamiento que se produce en ésta no es muy destacable.

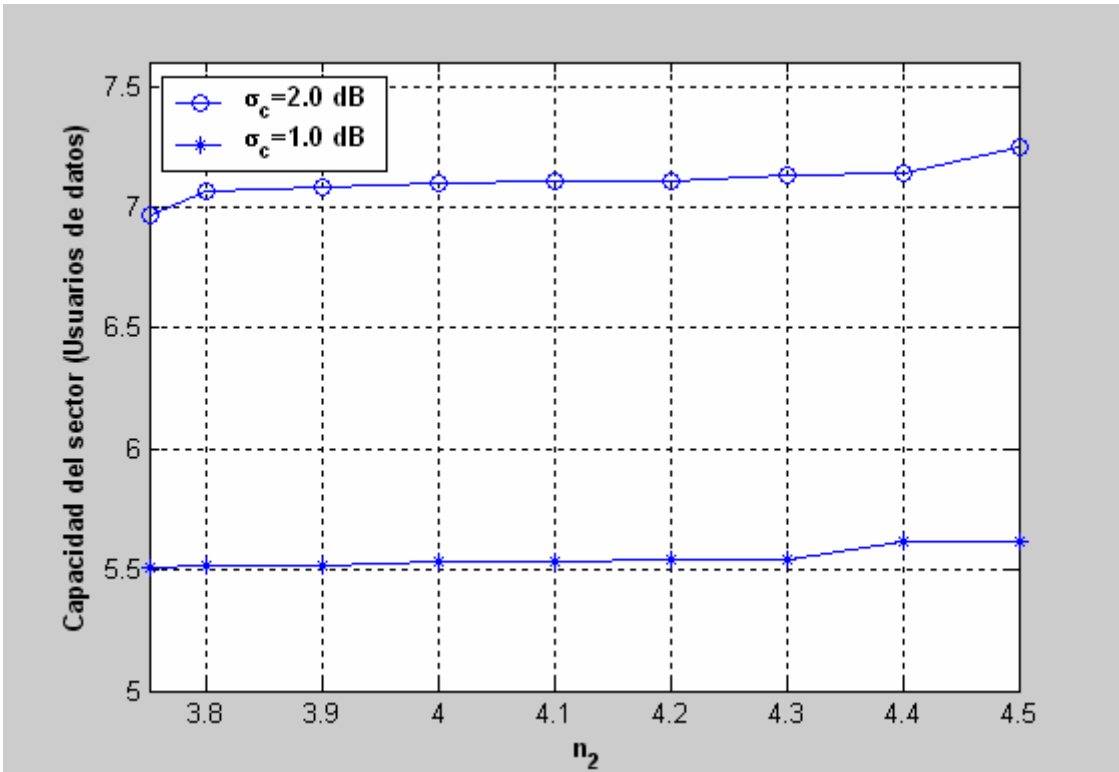


Figura 4.52: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

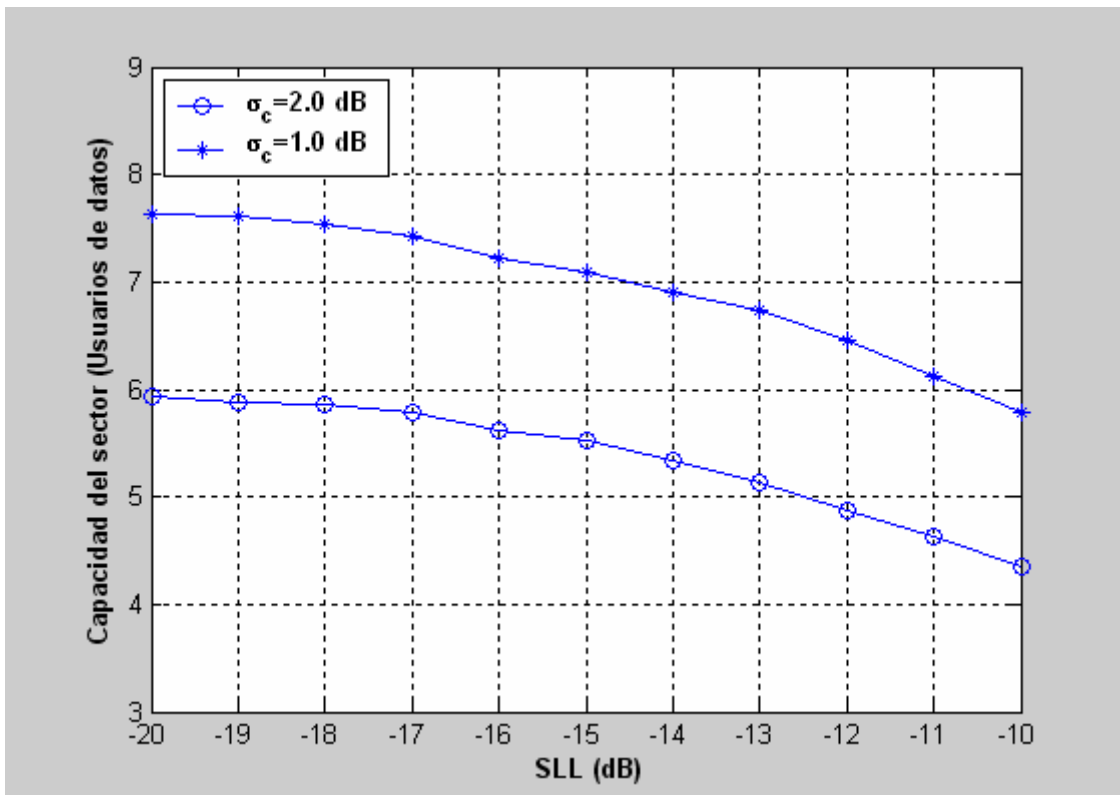
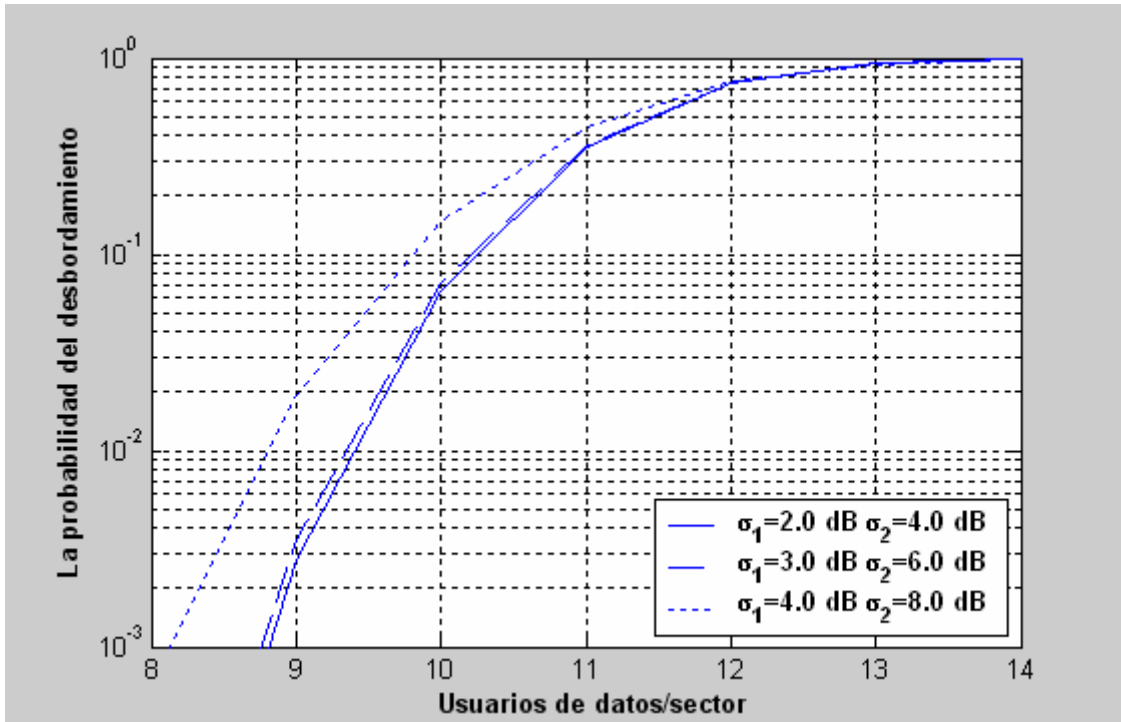


Figura 4.53: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

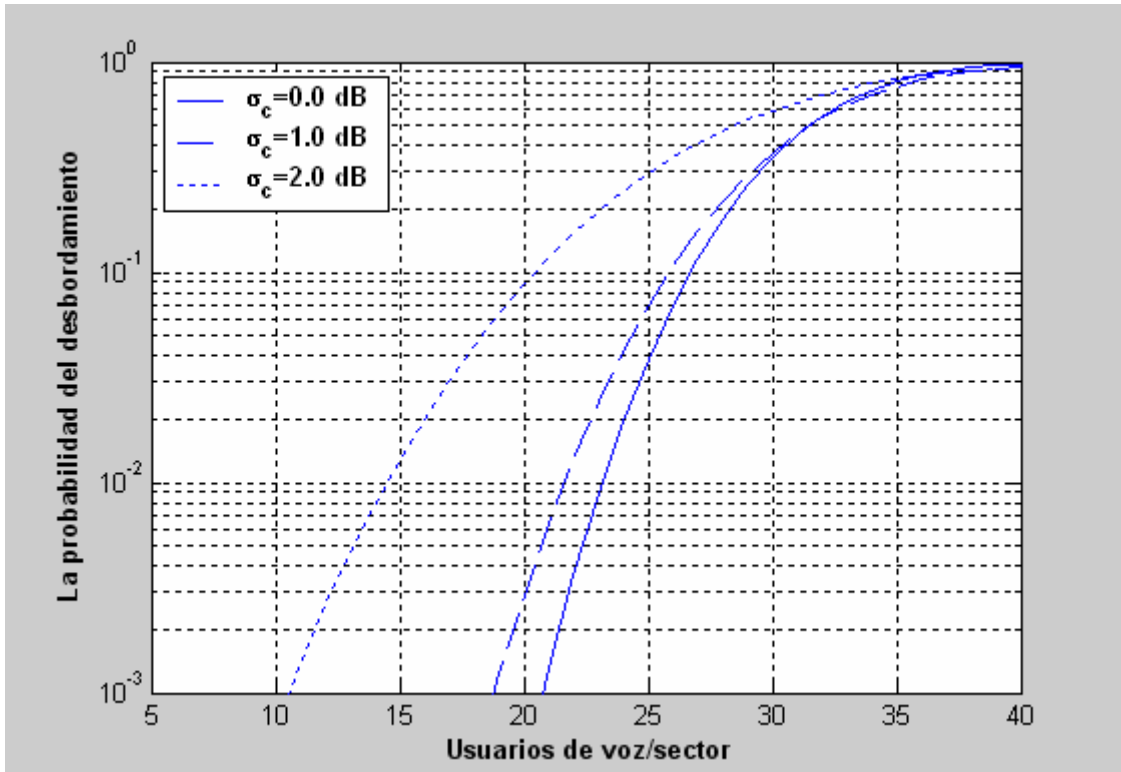
Como era de esperar en la Figura (4.53), un aumento del SLL se traduce en un descenso de la capacidad.



**Figura 4.54: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

En la Figura (4.54), se produce un descenso considerable de la capacidad conforme dichas sigmas aumentan su valor. Un aspecto que ya se había apreciado en los estudios anteriores.

### 4.3.2.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)



**Figura 4.55: Capacidad del uplink del sector existiendo 4 usuarios de datos**

En la Figura (4.56) que viene a continuación, se puede observar en este estudio y en los dos anteriores, como la capacidad desciende significativamente conforme el punto de corte es mayor respecto a R.

También cabe destacar como un incremento del exponente de propagación  $n_1$  en la Figura (4.57), genera un ascenso en la capacidad cuando generalmente provoca una bajada. Nuevamente, este comportamiento anómalo se debe a que R (radio de cobertura) es menor que el valor del punto de corte (300 metros para este tipo de estudio).

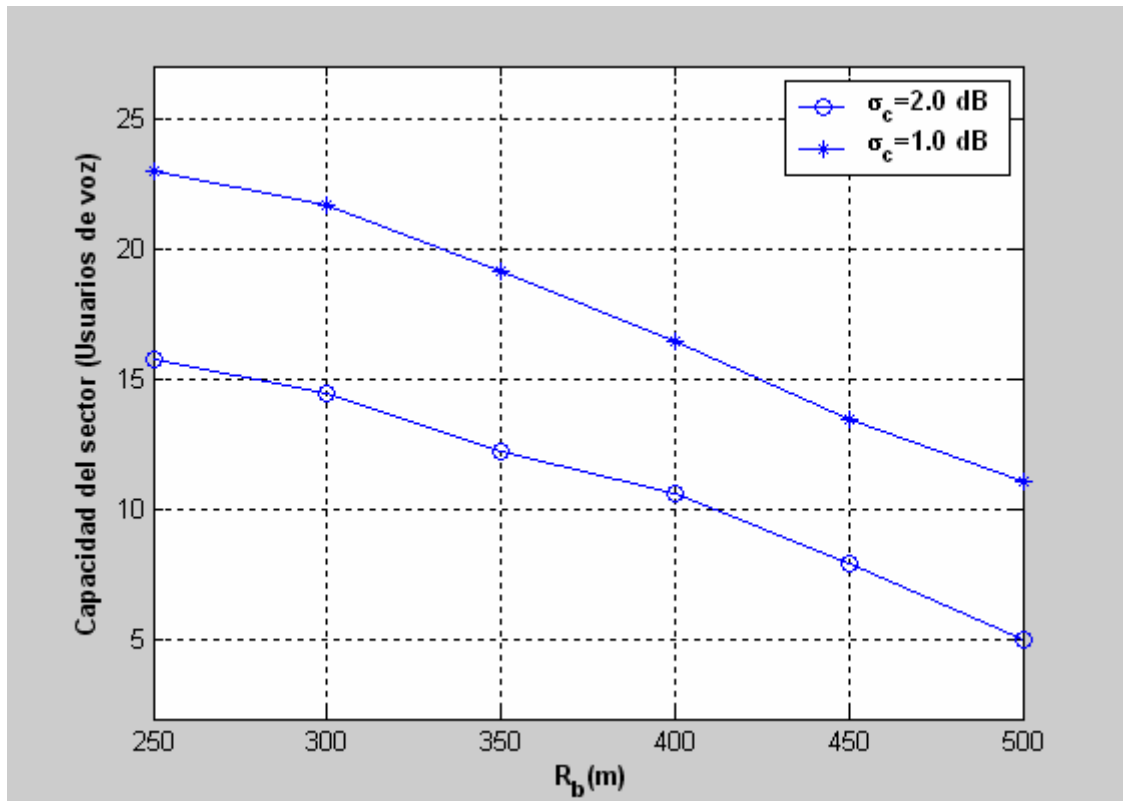


Figura 4.56: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

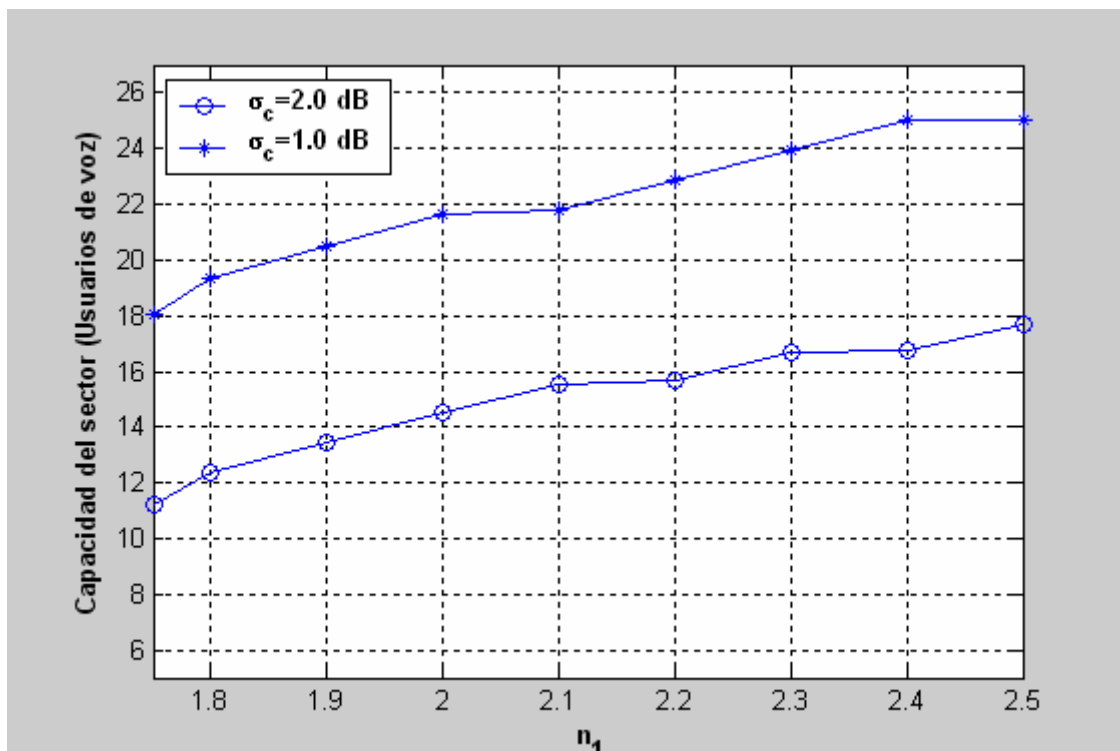


Figura 4.57: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$



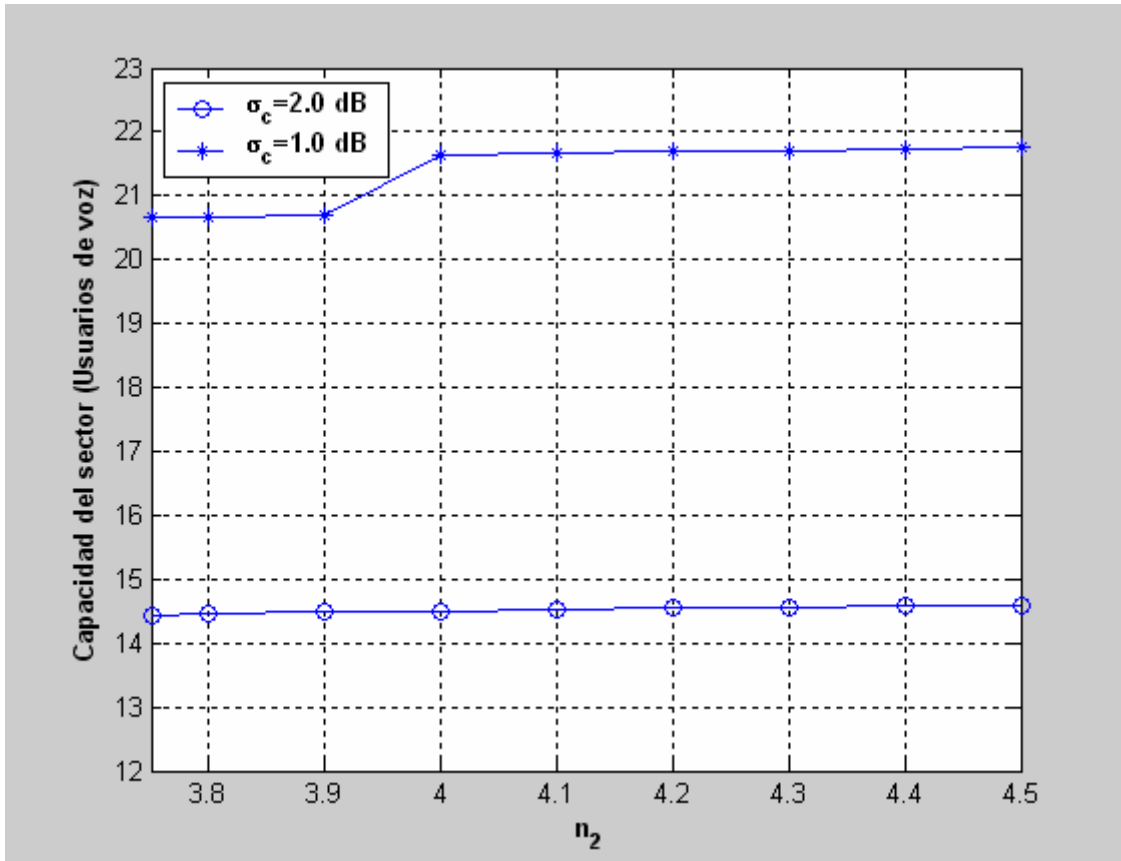


Figura 4.58: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

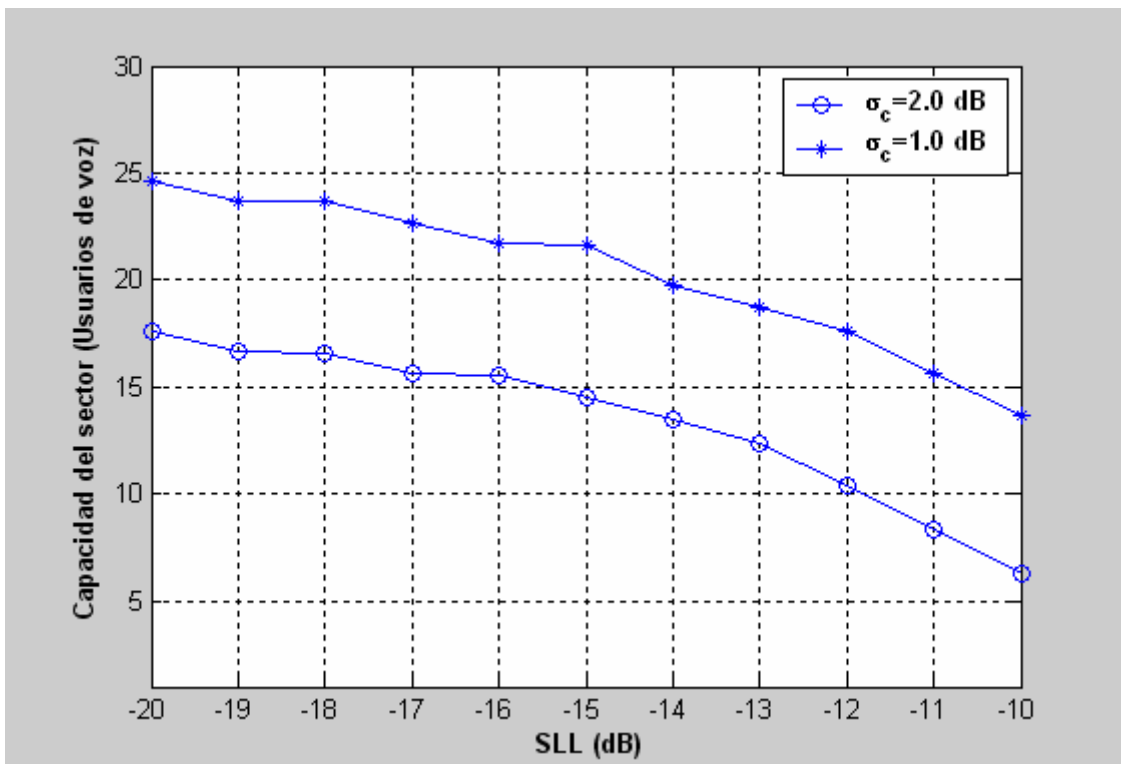
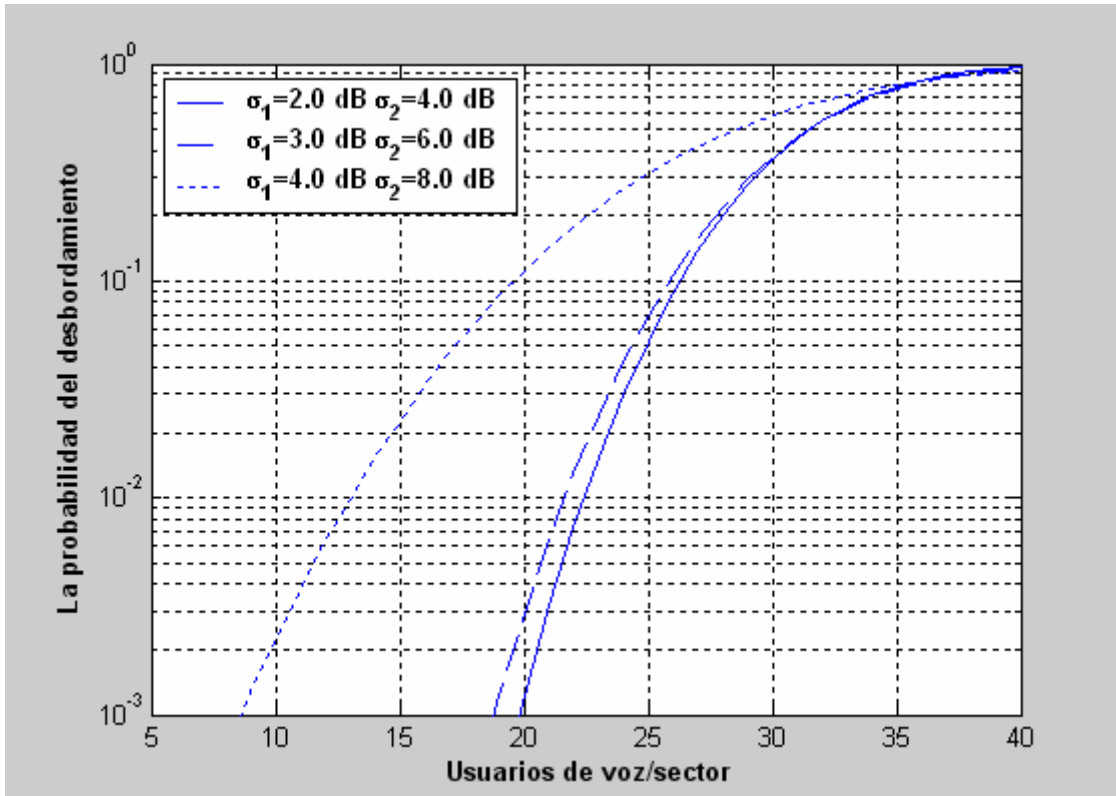


Figura 4.59: Capacidad del uplink del sector en función del SLL



**Figura 4.60: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  existiendo 4 usuarios de datos**

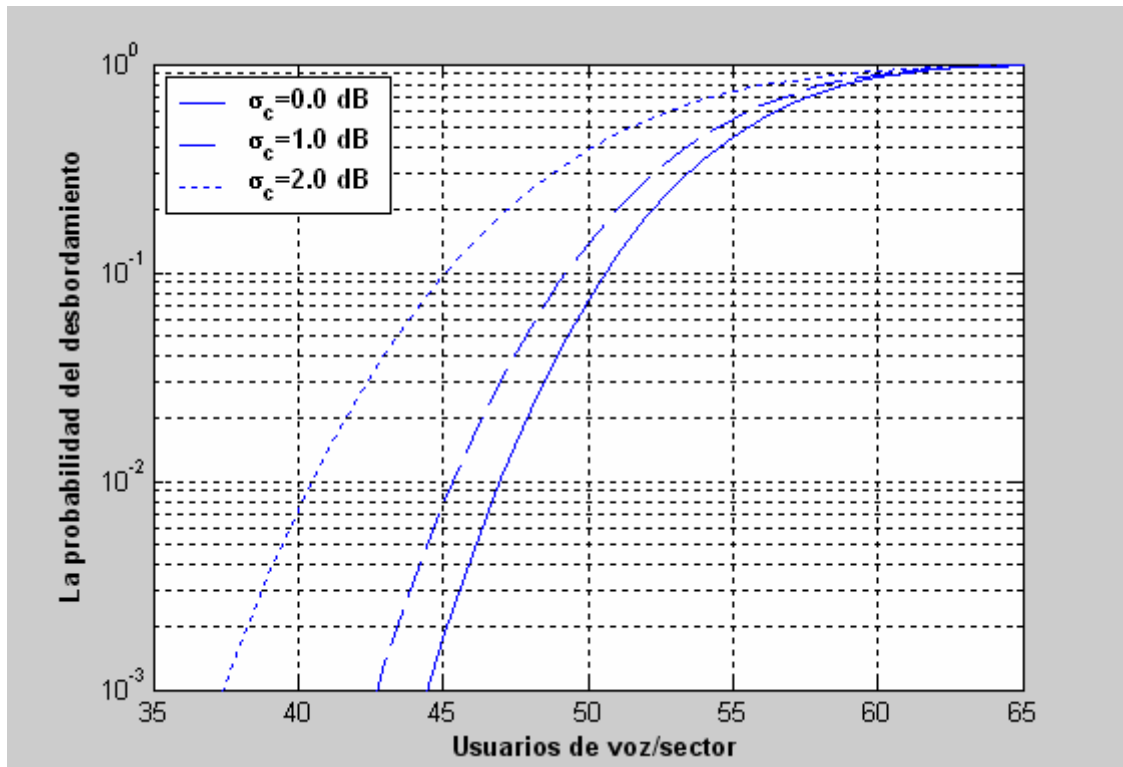
En la Figura (4.59) y (4.60), se recogen comportamientos similares a los servicios de voz y datos por separado en el estudio de Half-Squared Cross-Shaped solo que con unos valores razonables de un estudio multiservicio de voz y datos.

### 4.3.3 Análisis numérico para micro células del tipo Full-Square cell

#### 4.3.3.1 Análisis numérico para voz

Este estudio se ha realizado en ciudades basándose en sectores que cubran 250 metros de longitud. Esto corresponde a la longitud de una calle por término medio. Esta distancia está pensada para que con un único sector del tipo Full-Square cell se cubra perfectamente una calle de cualquier ciudad.

Una diferencia apreciable que distingue al tipo Full-Square del Half-Square es que al tener un radio de cobertura mayor la capacidad va a aumentar considerablemente. Además, sabemos que los valores de  $R$  por debajo del punto de corte aumentan conforme crece  $R$ , pero cuando superan el punto de corte tienden a estabilizarse. Podemos observar como en ambos casos  $R$  está por debajo del punto de corte, y por tanto, como para el Full-Square los resultados en capacidad de número de usuarios son mayores.



**Figura 4.61: Probabilidad del desbordamiento del sistema**

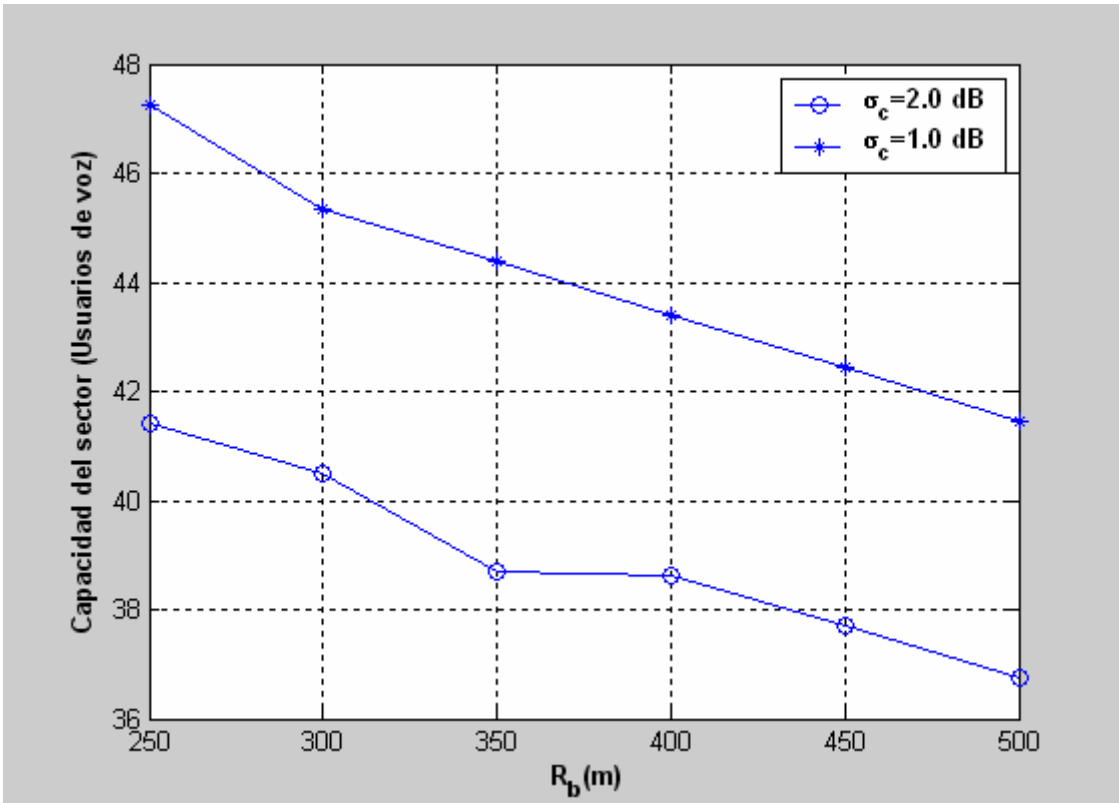


Figura 4.62: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

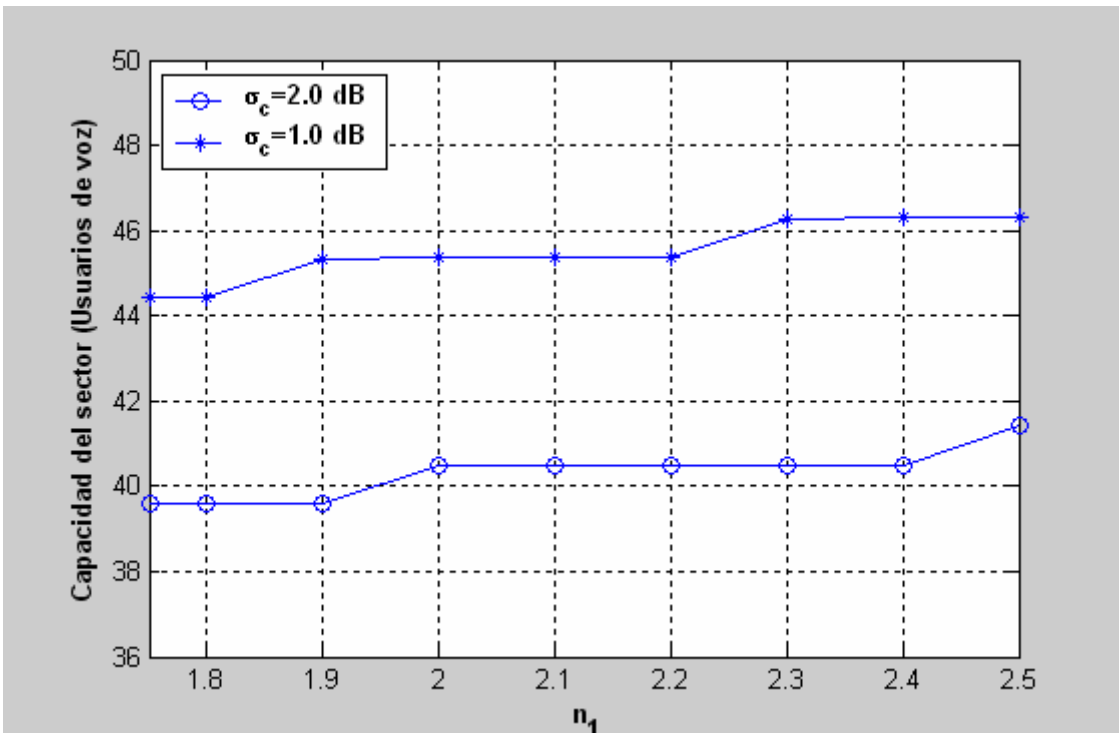


Figura 4.63: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación n<sub>1</sub>

Nuevamente, en la Figura (4.62), vuelve a producirse una variación de la capacidad influido por un radio de cobertura inferior al punto de corte. En

cuanto al comportamiento de la Figura (4.63) es similar al dado en Half-Square, se produce una subida conforme el exponente de propagación aumenta.

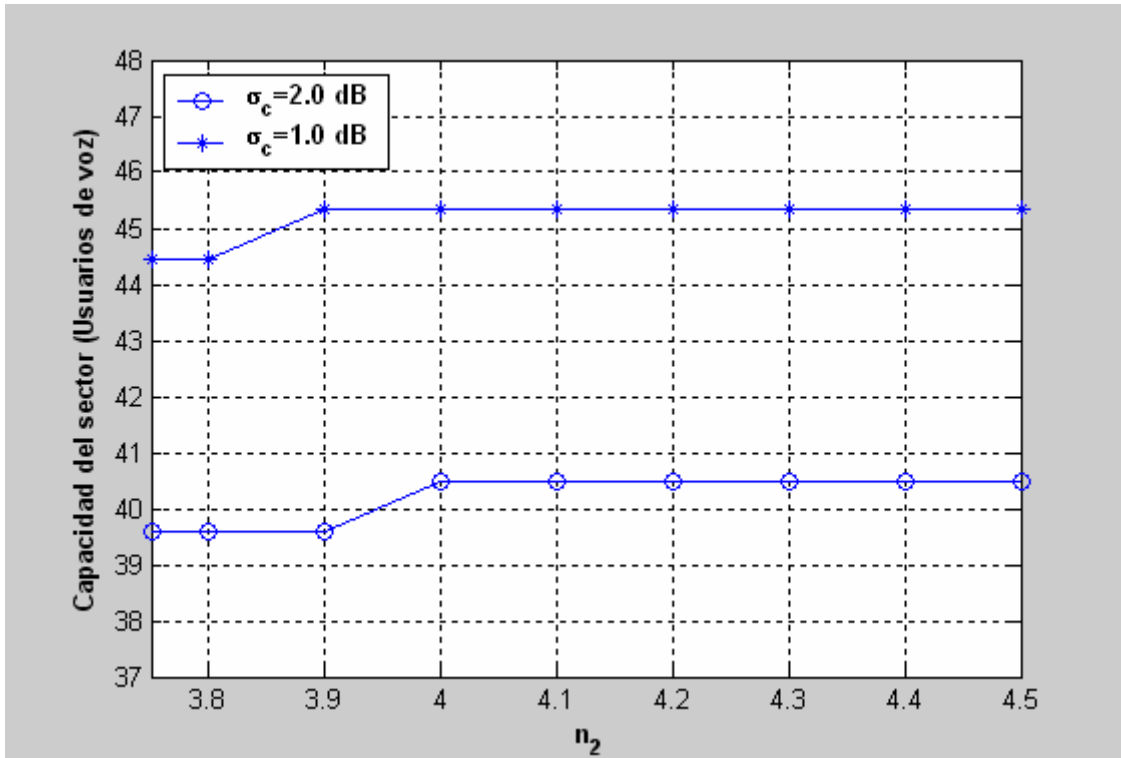


Figura 4.64: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

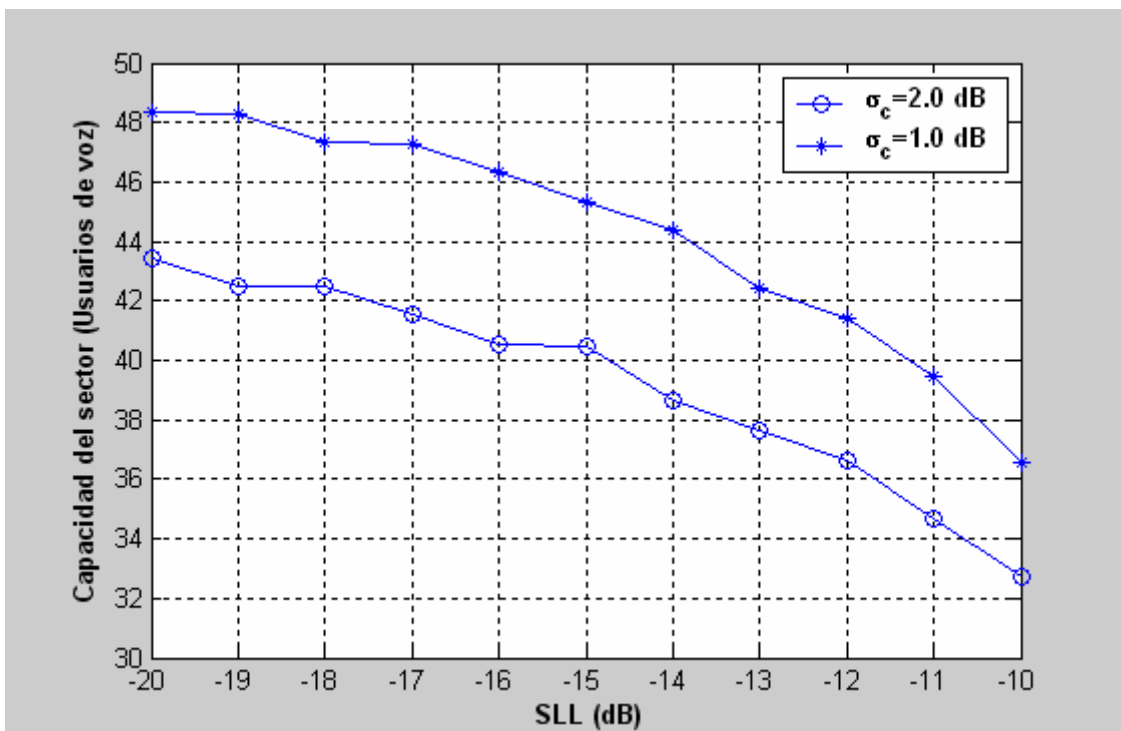
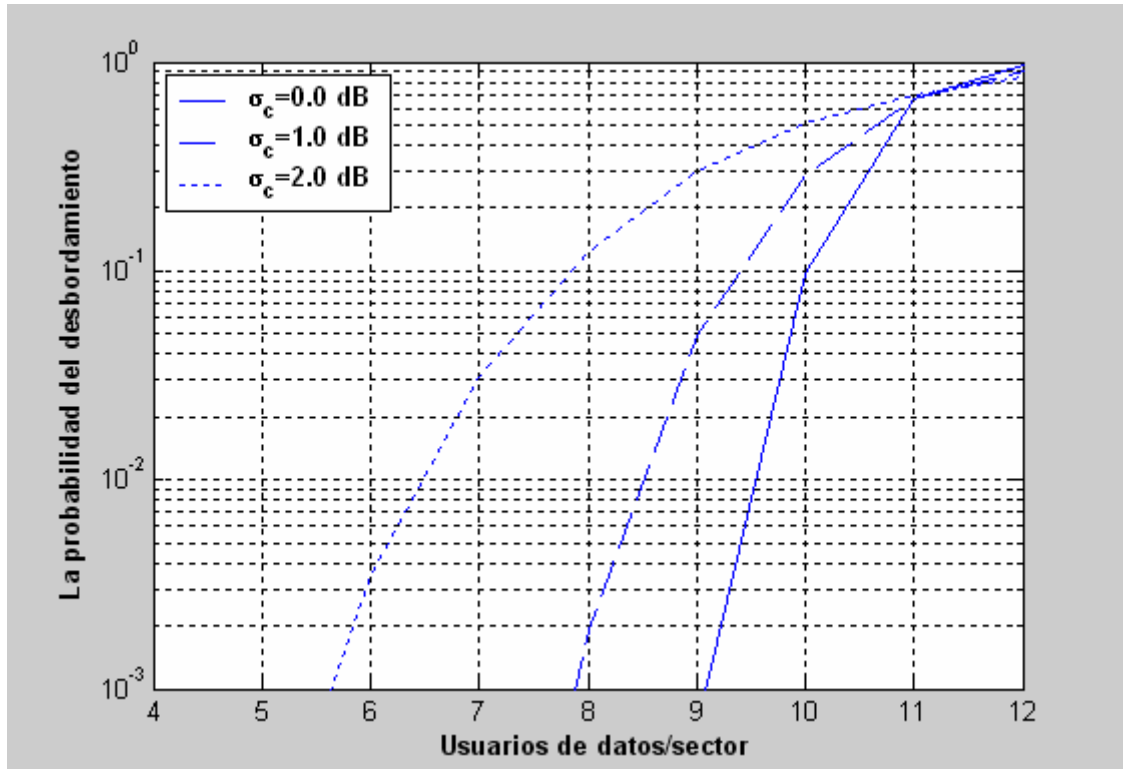


Figura 4.65: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

En la Figura (4.65), se produce un descenso de la capacidad de hasta 12 usuarios. Es una variación mucho más elevada si comparamos con sistemas en los que se utilizan microceldas del tipo Cigar-Shaped.

#### 4.3.3.2 Análisis numérico para datos



**Figura 4.66: Probabilidad del desbordamiento del sistema**

Nuevamente observamos una capacidad para datos inferior a la de Cigar-Shaped, por ejemplo, esto está relacionado directamente con la utilización de un radio de cobertura menor.

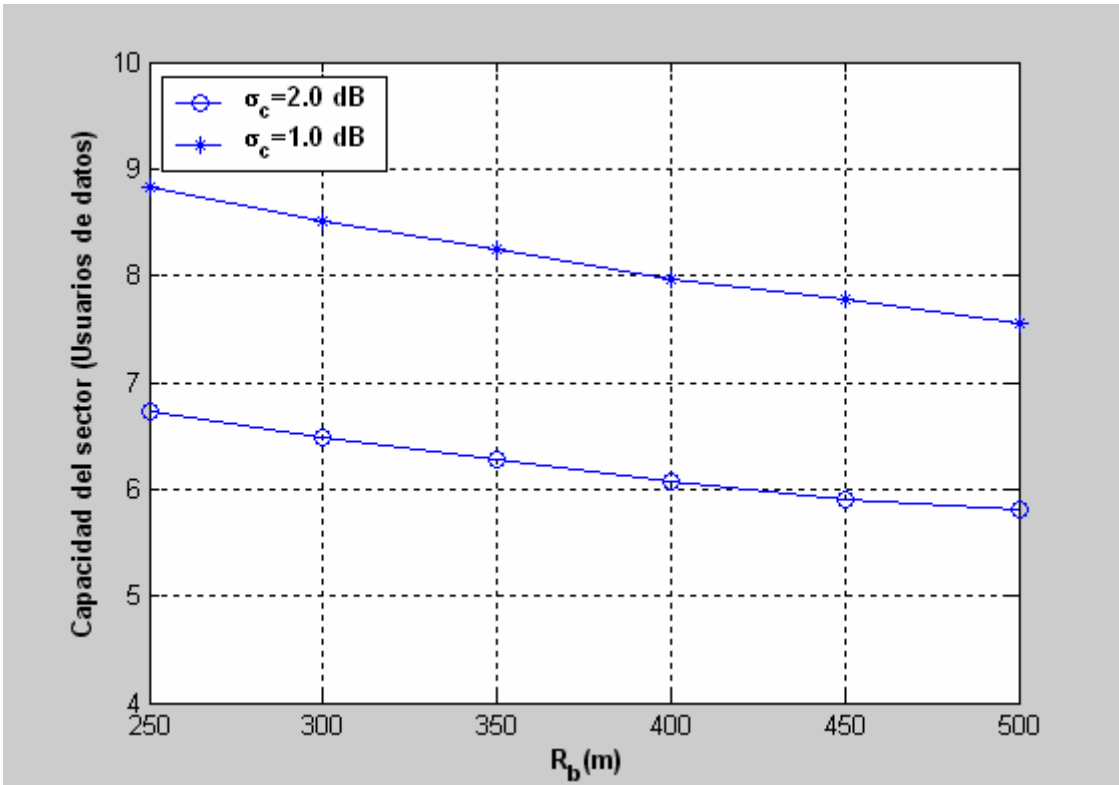


Figura 4.67: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

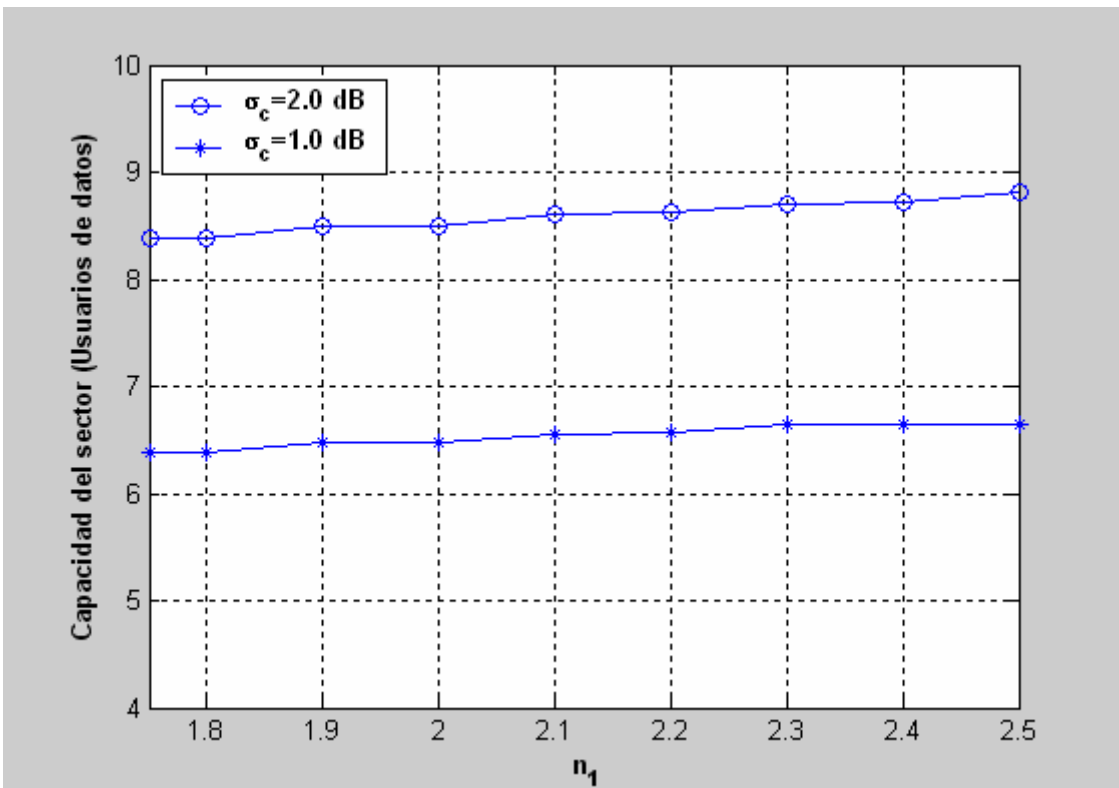


Figura 4.68: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$

Tanto en la Figura (4.68) como en la (4.69) el incremento de la capacidad se produce de una forma muy suave.

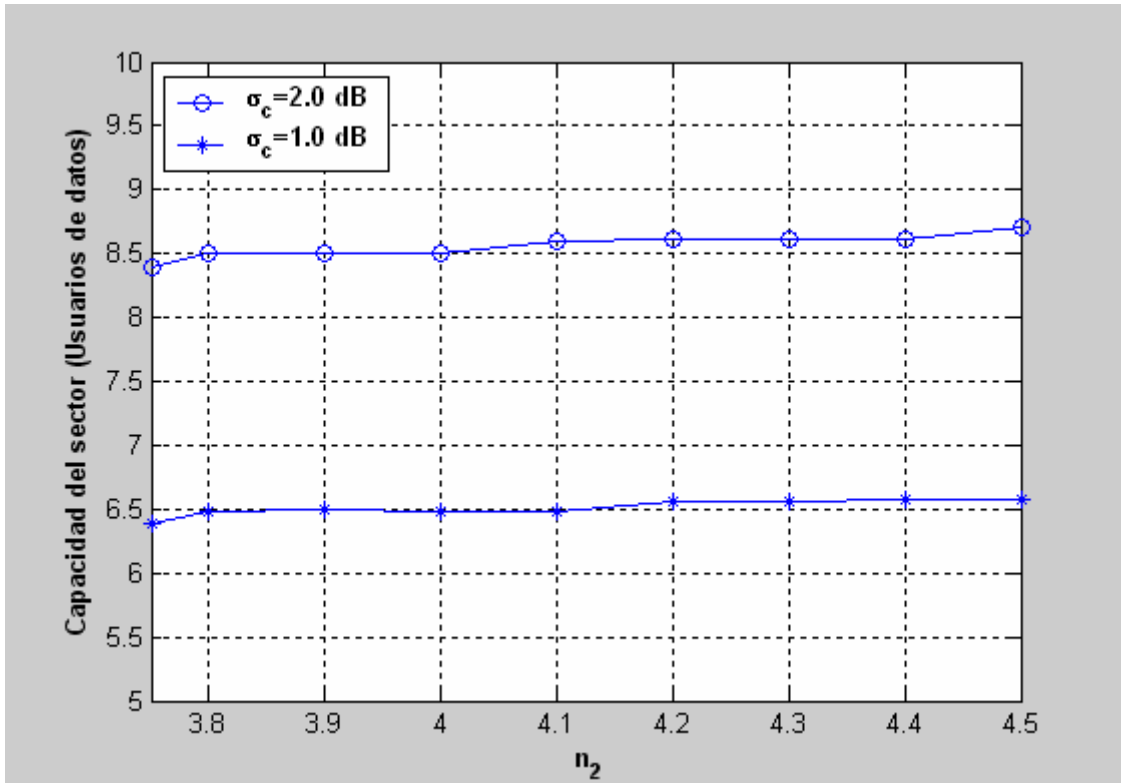


Figura 4.69: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

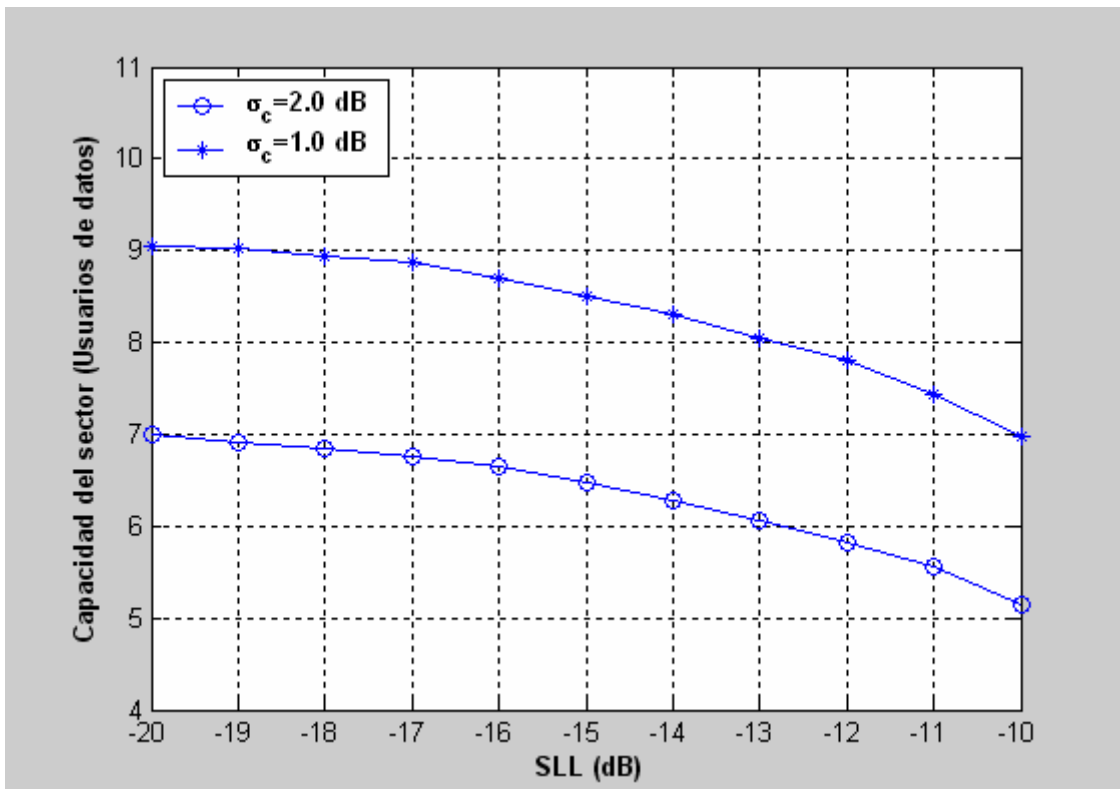
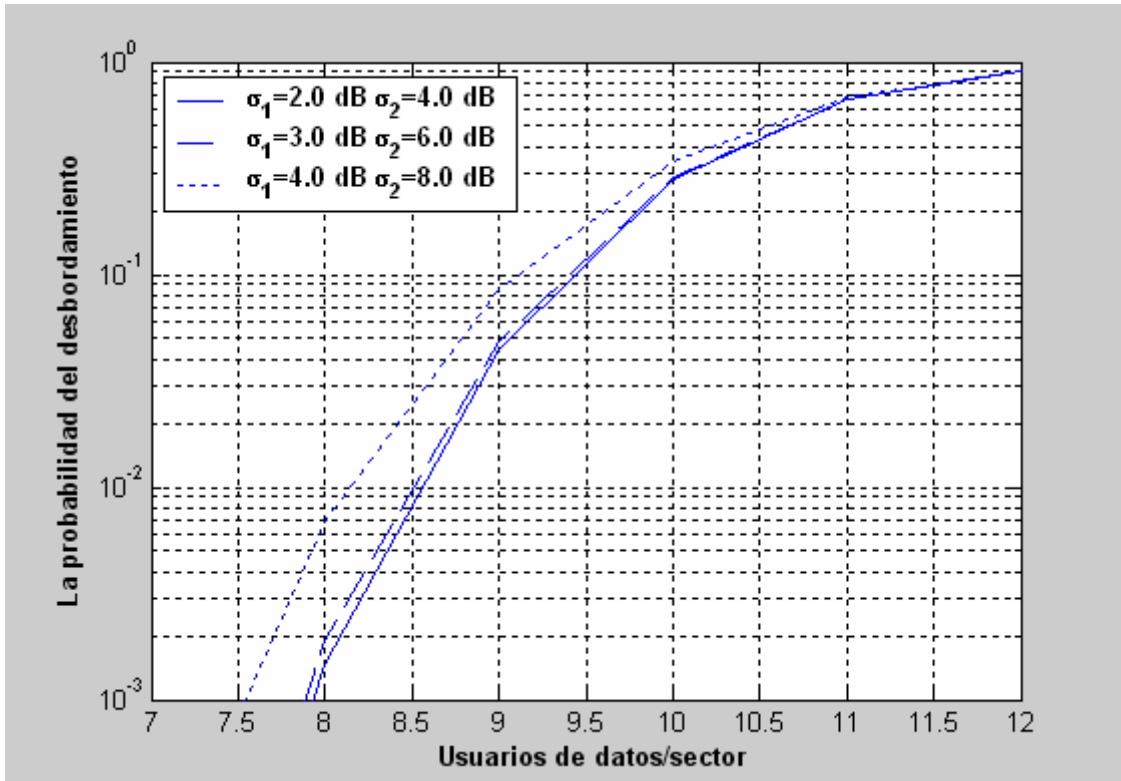


Figura 4.70: Capacidad del uplink del sector en función del SLL





**Figura 4.71: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Nuevamente como en voz, en la Figura (4.70) el descenso de la capacidad al incrementar el nivel de lóbulos secundarios es muy pronunciado.

En la Figura (4,71), se observa como hasta  $\sigma_1=3$ dB y  $\sigma_2=6$  dB un incremento de estos parámetros no es muy apreciable, pero por encima de estos valores, la capacidad desciende considerablemente.

### 4.3.3.3 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

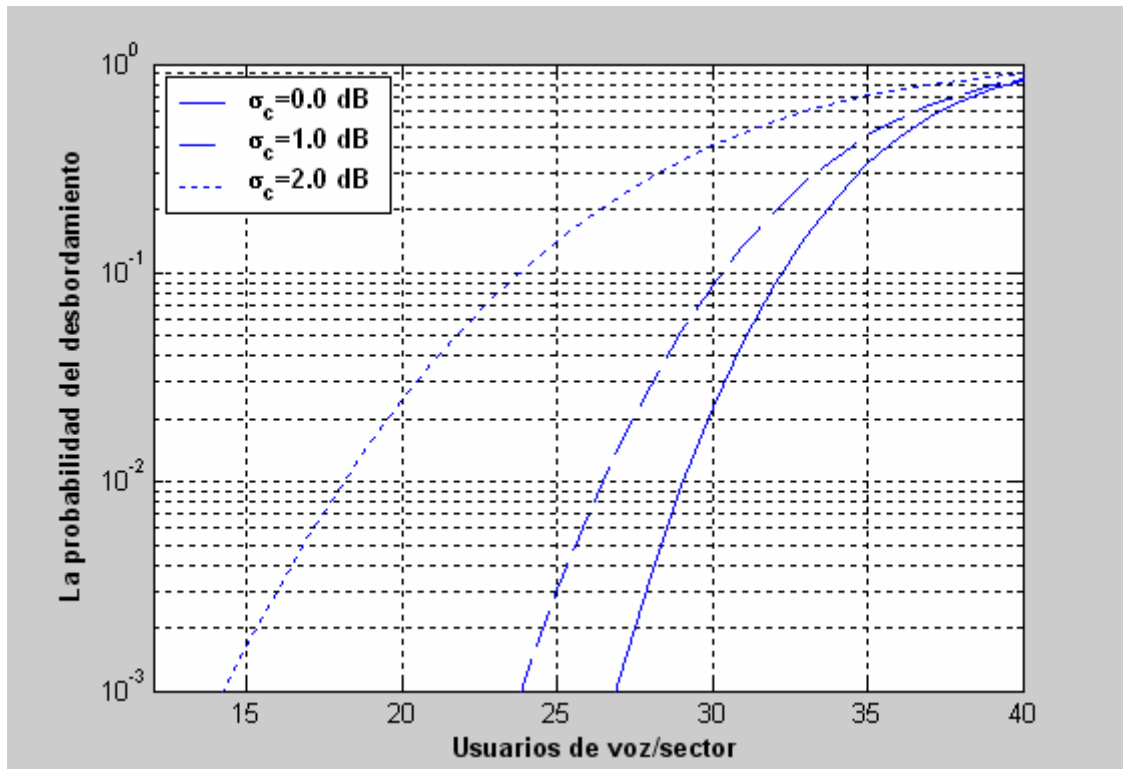


Figura 4.72: Probabilidad del desbordamiento existiendo 4 usuarios de datos

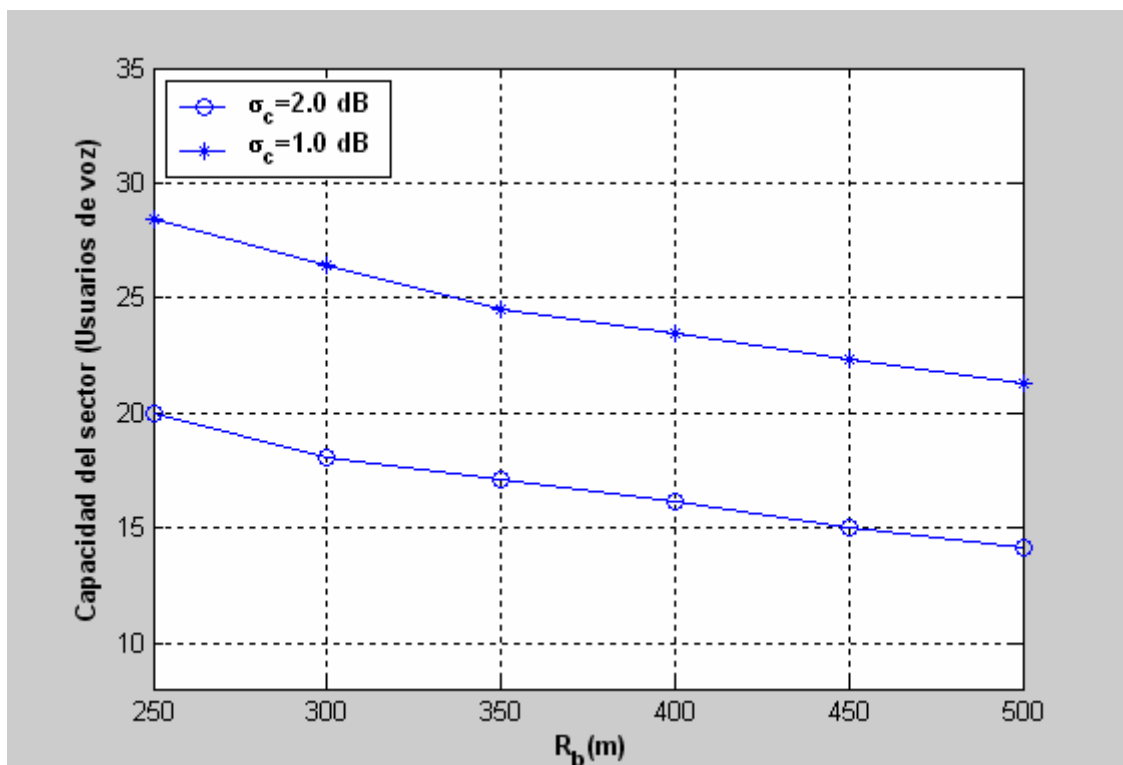
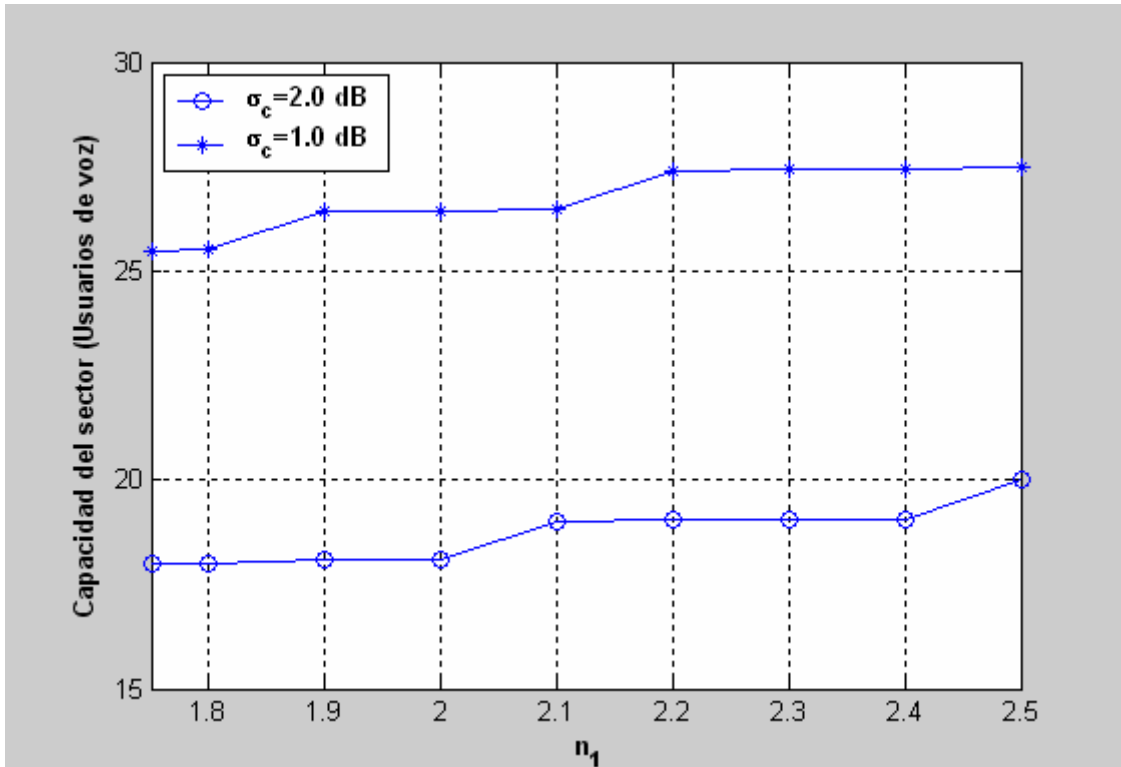


Figura 4.73: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

Cabe recordar que en la Figura (4.72) y siguientes se toman 4 usuarios de datos, que son la mitad de los usuarios de datos que hacen que no pueda transmitir ningún usuario de voz.



**Figura 4.74: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_1$**

En la Figura (4.74), se pueden observar tres zonas de subida algo pronunciadas que fomentarán un aumento de la capacidad en el sistema.

En la Figura (4.75), la variación se verá más destacada para una  $\sigma_c = 1$  dB.

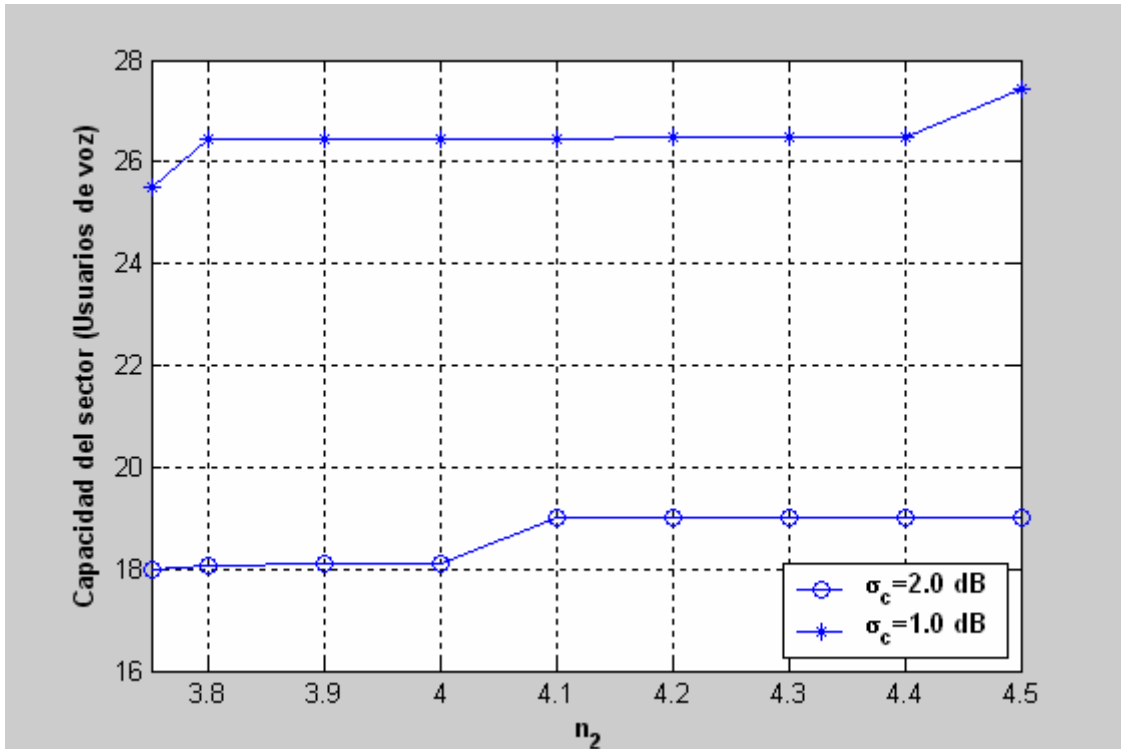


Figura 4.75: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $n_2$

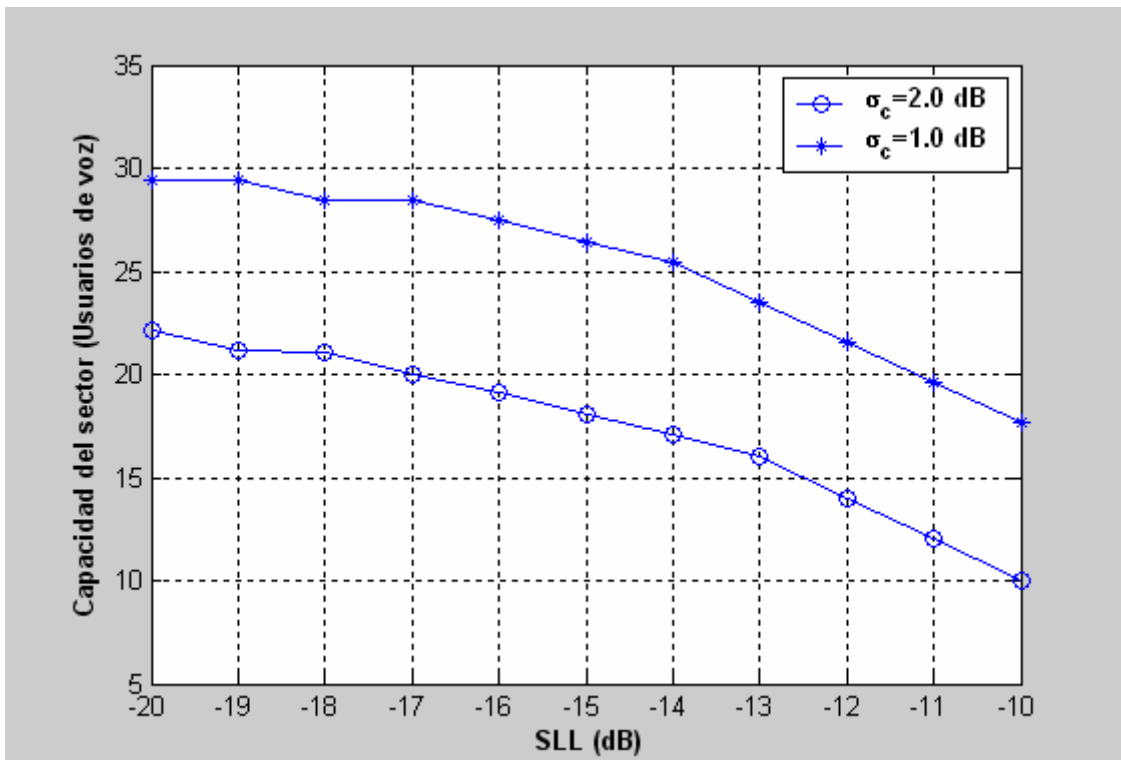
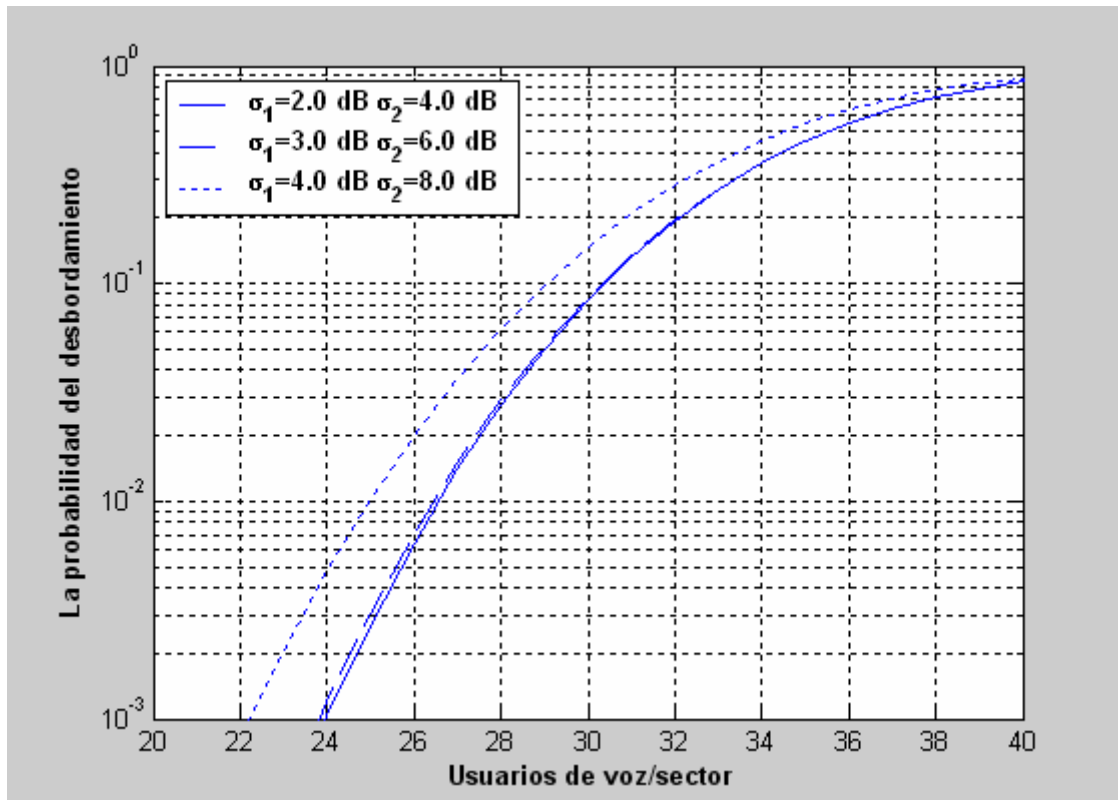


Figura 4.76: Capacidad del uplink del sector en función del SLL

Nuevamente, en la Figura (4.76), se podrá apreciar una caída considerable al aumentar el nivel de lóbulos secundarios. Esta consecuencia vendrá dada por la presencia de 3 lóbulos secundarios y la utilización de un

radio de cobertura menor que en sistemas que utilizan microceldas del tipo Cigar-Shaped y Cross-Shaped en autopistas.



**Figura 4.77: Probabilidad del desbordamiento en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  existiendo 4 usuarios de datos**

En la Figura (4.77), el cambio en cuanto a capacidad para una probabilidad del desbordamiento del 1% se va a dar para  $\sigma_1=4$ dB y  $\sigma_2=8$ dB. Algo que ya se veía en el servicio de voz y en el servicio de datos por separado.

#### 4.3.3.4 Capacidad de Número de Usuarios de voz en función de la colocación de los usuarios en el sector

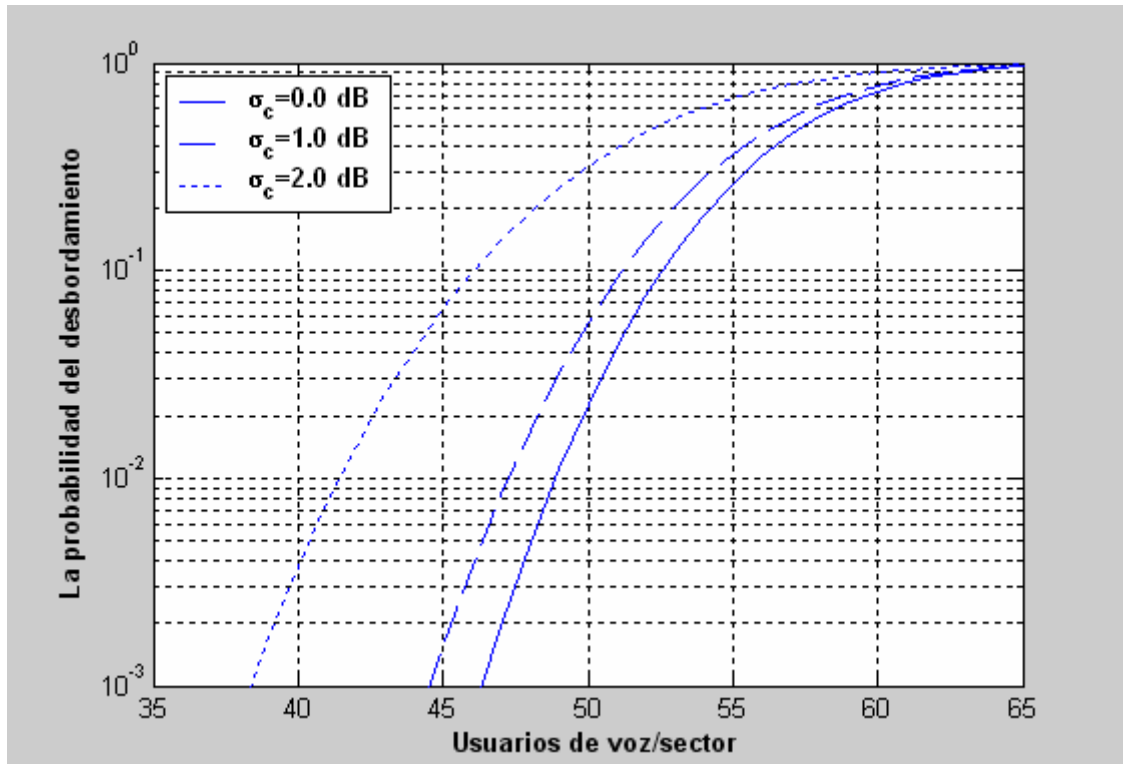
Los usuarios podrán colocarse en el borde del sector pegados a la estación base o distribuidos por el centro del sector, para este último caso estaremos hablando de una situación intermedia en la que los resultados obtenidos serían menos extremos.

Si tomamos un paso de  $0.01R$  en nuestros cálculos para el outage en el desarrollo de nuestro algoritmo, consideraremos una situación en la que cada

usuario se podrá encontrar a una distancia de aproximadamente 2.5 metros (donde  $R=250$  metros).

Si cambiamos el paso a  $0.1R$ , será una situación en la que nos encontremos a 25 metros de la antena. Donde  $R$  tiene un valor de 250 metros.

Nos interesará analizar varios casos para comprobar que variaciones se producen en la capacidad de número de usuarios.



**Figura 4.78: Probabilidad del desbordamiento para un paso de  $0.05R$**

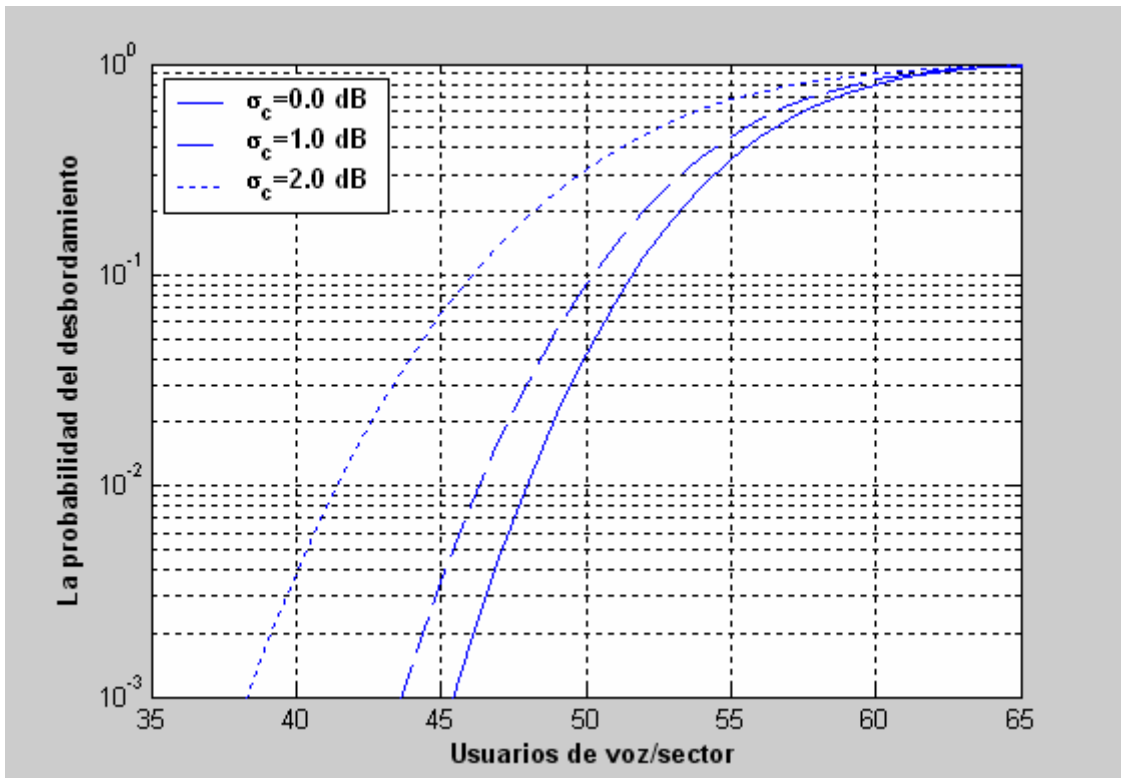


Figura 4.79: Probabilidad del desbordamiento para un paso de 0.1R

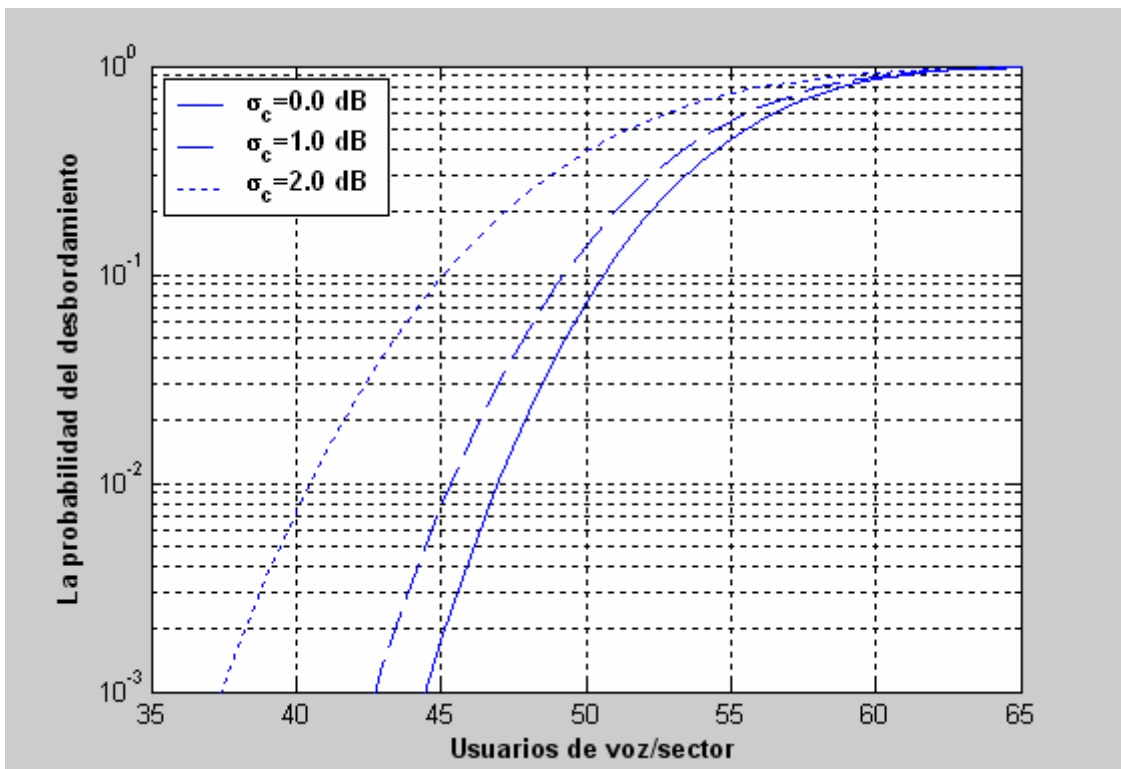


Figura 4.80: Probabilidad del desbordamiento para un paso de 0.2R

Conforme aumentemos el paso o lo que es lo mismo, la distancia entre los usuarios sea mayor en el escenario bajo estudio, la capacidad será menor

inevitablemente. En las Figuras (4.78), (4.79) y (4.80), hemos estudiado distancias de 50, 100 y 200 metros. La variación ronda entre uno y dos usuarios comparando entre un caso y otro. Interesará alcanzar la mayor precisión posible para que los resultados se ajusten lo máximo posible a los obtenidos en la práctica. No obstante, siempre habrá algunas diferencias con los resultados empíricos ya que los teóricos responden al uso de fórmulas y aproximaciones.



**5. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para micro células con forma de puro (Cigar-Shaped) en túneles para automóviles y servicio de metro**



## 5.1 Estudio para micro células en forma de puro (Cigar-Shaped) en túneles para automóviles

### 5.1.1 Introducción

En un túnel, los vehículos guardan una distancia de seguridad, aproximadamente 50 metros, esto no implica que la densidad en cuanto número de usuarios no sea grande ya que algunos de estos vehículos pueden ser autobuses. Para la realización los cálculos en el estudio de la capacidad, se tendrá en cuenta este factor de separación con el fin de realizar en la simulación una aproximación de la verdadera situación.



**Figura 5.1 Túnel con varios carriles para la circulación de vehículos**

El análisis exhaustivo de la capacidad en túneles va a suponer un gran cambio respecto al análisis en campo abierto. Aparecerán y se tendrán en cuenta efectos muy similares a los que se producen en las guías de onda.

Las fórmulas utilizadas en este tipo de estudio varían significativamente; este hecho implica tener que incorporar nuevas fórmulas con nuevos parámetros que hasta ahora no se habían utilizado.

Aparecen varios parámetros nuevos que cabe subrayar:

$s=2$  Modo de propagación en el espacio libre

$n_g= 1$  o  $2$  dB/100m (modo de propagación de guía de onda)

Las fórmulas de las pérdidas básicas son parcialmente distintas al introducir estos dos nuevos elementos. Por otra parte, cabe destacar otros dos términos referidos a las pérdidas ocasionadas por las curvas, que se puedan producir en los túneles ( $L_{bid}$  y  $L_{bim}$ ). El primero de ellos corresponde a las pérdidas ocasionadas por las curvas en el sector interferente y el segundo de ellos pertenece a las pérdidas generadas por las curvas en el sector bajo estudio.

Si se observa detenidamente como puede afectar una curva en un túnel, se podrá comprobar que existen infinitas posibilidades. Todo ello dependerá de si ésta se encuentra en el sector que ocasiona interferencias o en el sector bajo estudio y en qué parte del sector se encuentre.

Otro aspecto a tener en cuenta será donde se encuentra el usuario colocado en un instante de tiempo concreto. Por tanto, podrán darse situaciones para las cuales a un usuario no le afecte la curva y a otro usuario, la misma curva si le pueda generar problemas. Los problemas se traducen en no poder realizar una conexión ascendente correctamente.

En los primeros análisis que se lleven a cabo, se observará cómo afectan las curvas en función del número que se establezca de éstas y el lugar donde estén colocadas. Fundamentalmente, una curva colocada justo en el punto donde se encuentra una estación base no va a ocasionar ningún cambio apreciable.

El estudio de la utilización de Cigar-Shaped en túneles sigue el Modelo Híbrido de Propagación; asumiendo, factor de actividad de 0.5 para usuarios de

voz. La capacidad será una variable que se vea incrementada conforme se aumenta el radio del sector. Un caso genérico es tener un radio de aproximadamente 1.5 Km.

### 5.1.2 Modelo de propagación

En primer lugar, hablaremos de las pérdidas básicas de propagación de las expresiones (5.1) y (5.2). Donde  $L_1$  y  $L_2$  son las pérdidas por las curvas [12].

$$L_p(dB) \approx K + 10 \log_{10} r^s + L_1 + \xi_1, \text{ si } r \leq R_b \quad (5.1)$$

$$L_p(dB) \approx L_b + n(r - R_b) + L_2 + \xi_2, \text{ si } r > R_b \quad (5.2)$$

Las pérdidas básicas y  $R_b$  vienen dadas por las siguientes fórmulas:

$$L_b(dB) = K + 10s_1 \log_{10}(R_b) \quad (5.3)$$

$$K = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad (5.4)$$

$h_b$  es la altura de la antena de la estación base.

$h_m$  es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\xi_1$  y  $\xi_2$  son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente. Generalmente, estas variables aleatorias alcanzan valores inferiores a 10 dB. A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar:

$$s = 1.75 \text{ a } 2.25$$

$$\sigma_1 = 1.5 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 1.5 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

A continuación, se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. Cabe recordar que en el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco microceldas [12].

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} \leq R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(10 * \log r_{im}^s + L_{bim}) / 10}}{10^{(10 * \log r_{id}^s + L_{bid}) / 10}} \quad (5.5)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} \leq R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(10*\log r_{im}^s + L_{bid})/10}}{10^{(10*\log R_b^s + n(r_{im} - R_b) + L_{bid})/10}} \quad (5.6)$$

- Si  $r_{id} \leq R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(10*\log R_b^s + n(r_{im} - R_b) + L_{bid})/10}}{10^{(10*\log r_{id}^s + L_{bid})/10}} \quad (5.7)$$

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(n(r_{im} - R_b) + L_{bid})/10}}{10^{(n(r_{id} - R_b) + L_{bid})/10}} \quad (5.8)$$

$\xi_{id}$  y  $\xi_{im}$  poseen las relaciones de:

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_2$
- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_2$

La fórmula (5.9) se utilizará en relaciones posteriores:

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = \begin{cases} 1, \rightarrow L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, \rightarrow \text{resto} \end{cases} \quad (5.9)$$

Se asume una densidad uniforme de usuarios en cada sector  $\rho_s = N_u/R$  [3].

$$E[I_{s0}]_r \approx \alpha_s \rho_s \int_{s0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) dr \quad (5.10)$$

donde a su vez la expresión (5.11) viene dada por:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right] = \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (5.11)$$

$\beta = \ln 10/10$  siendo  $\alpha$  el factor de actividad (0.63 para voz y 1.0 para datos).

A continuación hallaremos una relación para  $\sigma^2$  en las expresiones (5.12), (5.13) y (5.14):

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1-C_{dm}) \sigma_1^2 \quad (5.12)$$

- Cuando  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  o,  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$   $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1-C_{dm}) \sigma_1 \sigma_2 \quad (5.13)$$

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_2$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1-C_{dm}) \sigma_2^2 \quad (5.14)$$

La función  $Q(x)$  viene dada por la expresión (5.15):

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (5.15)$$

Donde el valor esperado intercelular teniendo en cuenta las dos regiones es:

A continuación, se hará un análisis detenido de la esperanza referida a las interferencias intercelulares e intracelulares como medida de estas.

Cabe destacar, que las medidas más utilizadas serán la esperanza y la desviación estándar expresadas en las fórmulas que vienen a continuación [3]:

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s1} L(r_{id}, r_{im}) E[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}] dr \quad (5.16)$$

Ocasionadas por la parte derecha de la región S1.

$$E[I]_{r,s} = E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s} \quad (5.17)$$

Finalmente, la fórmula que se obtiene teniendo en cuenta el nivel de lóbulos secundarios es la siguiente:

$$E[I]_{int\ er, s} = E[I]_{r, s} (1 + Sll) \quad (5.18)$$

Potencia interferente intercelular:

$$E[P]_{int\ er, s} = P_{r, s} E[I]_{int\ er, s} \quad (5.19)$$

Potencia interferente intracelular:

$$E[P]_{intra_s} = P_{r, s} E[I]_{intra_s} \approx P_{r, s} \alpha_s N_u (1 + Sll) \quad (5.20)$$

Potencia interferente final:

$$E[P_{\text{int}f}]_{t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{\text{intra},s} + E[P]_{\text{inter},s}) \quad (5.21)$$

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P_{\text{int}f}]_t = \sum_{s=1}^M E[P_{\text{int}f}]_{t,s} \quad (5.22)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación expresaremos las fórmulas correspondientes a la varianza directamente relacionadas con la desviación estándar que utilizan los parámetros p y q de las fórmulas (5.23) y (5.24) [3].

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (5.23)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (5.24)$$

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} dr \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right]^2 = \\ &= e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (5.26)$$

Varianza de señal interferente debido a la región S<sub>1</sub>:

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}\right]^2 - q \alpha_s^2 E\left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}\right] \right\} dr \quad (5.27)$$

Varianza de la interferencia intercelular:

$$\text{var}[I]_{\text{inter},s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\} (1 + Sll) \quad (5.28)$$

Varianza de interferencia intracelular:

$$\text{var}[I]_{\text{int}ra,s} = Nu (1 + Sll) (p \alpha_s - q \alpha_s^2) \quad (5.29)$$

Varianza de interferencia total:

$$\text{var} [I]_{t,s} = \text{var} [I]_{\text{inter},s} + \text{var} [I]_{\text{intra},s} \quad (5.30)$$

Varianza de la potencia total interferente:

$$\text{var}[P_{\text{intf}}]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (5.31)$$

La varianza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$\text{var}[P_{\text{intf}}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (5.32)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

Por otra parte, exponemos la fórmula (5.33), correspondiente a la probabilidad de desbordamiento de vital importancia en cada uno de los estudios realizados a lo largo de todo el proyecto [3]:

$$P_{out} = Q \left[ \frac{E(I)_{t,s|N_u = N_{uMEDIO}} - E(I)_{t,s|N_u = N}}{\sqrt{\text{var}(I)_{t,s|N_u = N}}} \right] \quad (5.33)$$

Finalmente, F es un factor que viene dado por la expresión (5.34):

$$F = \frac{\text{InterferenciaInter celular}}{\text{InterferenciaIntra celular}} = \frac{E[P]_{\text{inter},s}}{E[P]_{\text{intra},s}} \quad (5.34)$$

Como se puede apreciar al estudiar con detenimiento los cuatro casos anteriores, las fórmulas ocasionadas por interferencias son diferentes a las utilizadas en los casos anteriores de micro celdas Cigar-Shaped; teniéndose en cuenta ahora un exponente de propagación de 2 (el utilizado en el vacío) y un coeficiente de propagación en guías de onda.

Las pérdidas adicionales  $L_{\text{bim}}$  y  $L_{\text{bid}}$  que representan las pérdidas ocasionada por las curvas para el sector bajo estudio y el interferente ocasionarán diferentes efectos que se describirán más adelante, pero que se traducirán genéricamente en un aumento de la capacidad.

Es importante tener en cuenta que el mero hecho de realizar un estudio con un solo exponente de propagación va a provocar ligeros cambios en los resultados obtenidos. En primer lugar, este fenómeno va a provocar un

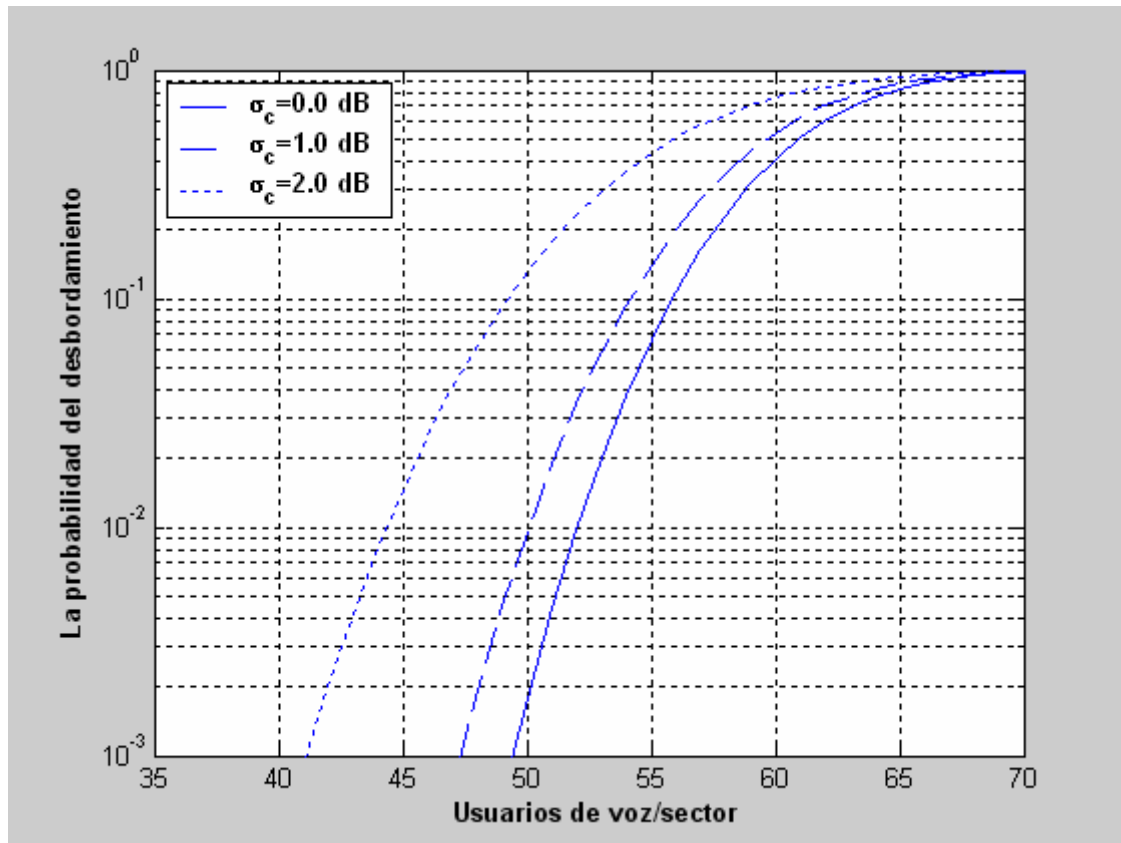


comportamiento poco usual en el estudio de la capacidad para una región de cobertura con un radio inferior al punto de corte.

**Parámetros utilizados:**

$G_{tx}=0$ dB
$G_{rx}=12$ dB
$P_{txVOZ}=18.6$ dBm
freq= 1950 MHz
$P_{txDATOS}=25$ dBm;

**5.1.3 Análisis numérico para voz**



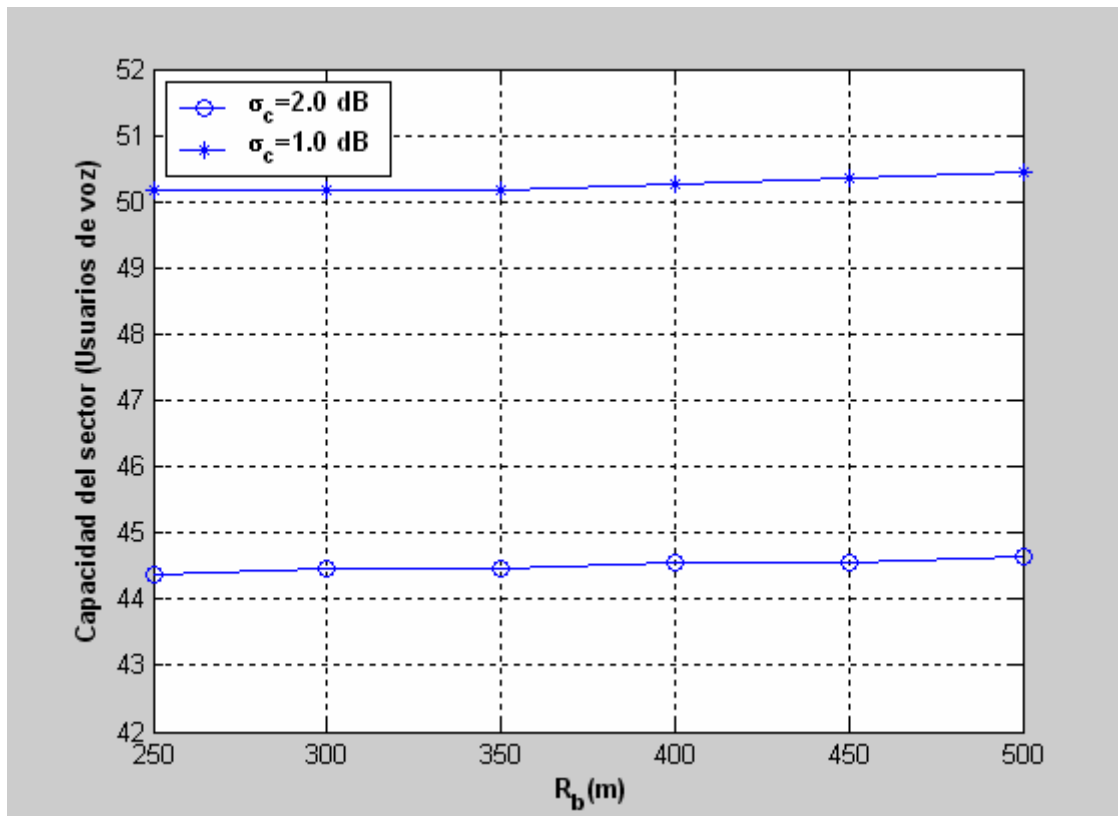
**Figura 5.2: Probabilidad del desbordamiento**

La capacidad, en la Figura (5.2), para una probabilidad del desbordamiento del 1% se ve ligeramente reducida comparada con la obtenida para autopistas en la superficie. Ello viene motivado por la utilización de un modelo de propagación diferente, el llamado “Modelo híbrido de propagación”.

Si se observan los resultados de la Figura (5.2), podremos comprobar un descenso de la capacidad. Esto se debe a que en las fórmulas utilizadas de las

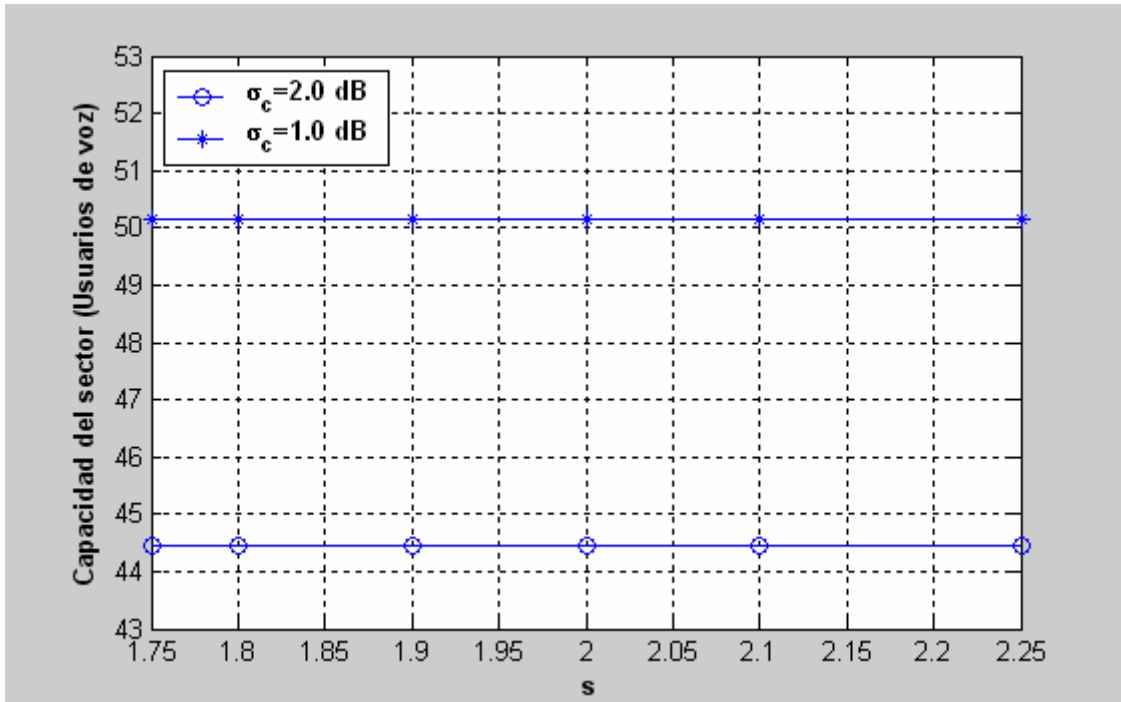
pérdidas ocasionadas por interferencias, se utiliza tan sólo un exponente de propagación con valores cercanos a los utilizados en el vacío y un término adicional ya mencionado denominado coeficiente de guía de onda. Este factor cuanto más pequeño sea más va a afectar a la capacidad del sistema.

El coeficiente de guías de onda afectará en todos los casos, salvo para la situación en la cual el radio de cobertura sea inferior al punto de corte por parte de la estación base bajo estudio y la estación base interferente.



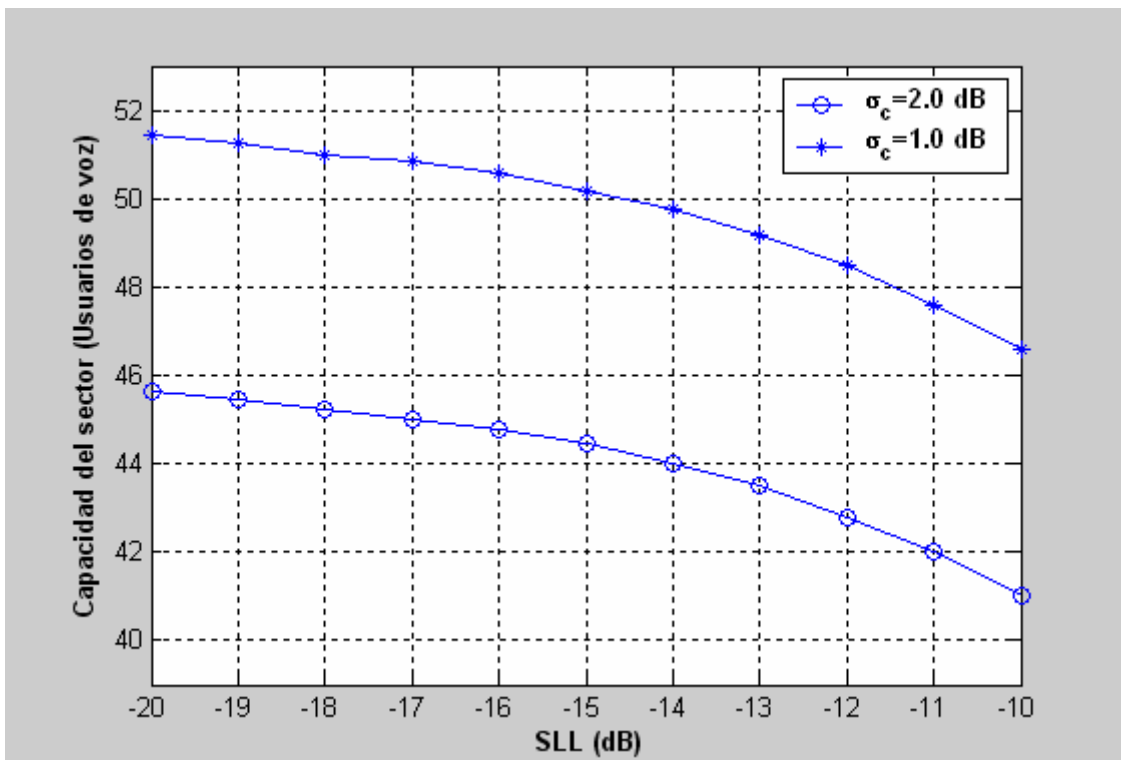
**Figura 5.3: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

Observamos que conforme el punto de corte varía, la capacidad aumenta ligeramente en la Figura (5.3). En esto difiere de los estudios mencionados anteriormente.



**Figura 5.4:** Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $s$

Como se puede observar en la Figura (5.4), el exponente de propagación apenas afecta a la capacidad conforme este varía.



**Figura 5.5:** Capacidad del uplink del sector en función del SLL

En la Figura (5.5), podemos observar una variación de SLL mucho más refinada, esto se debe a que se ha utilizado una resolución 10 veces superior a

la de estudios anteriores. Esto ha permitido eliminar las zonas abruptas y aproximarse más a los resultados que se obtendrían en la realidad.

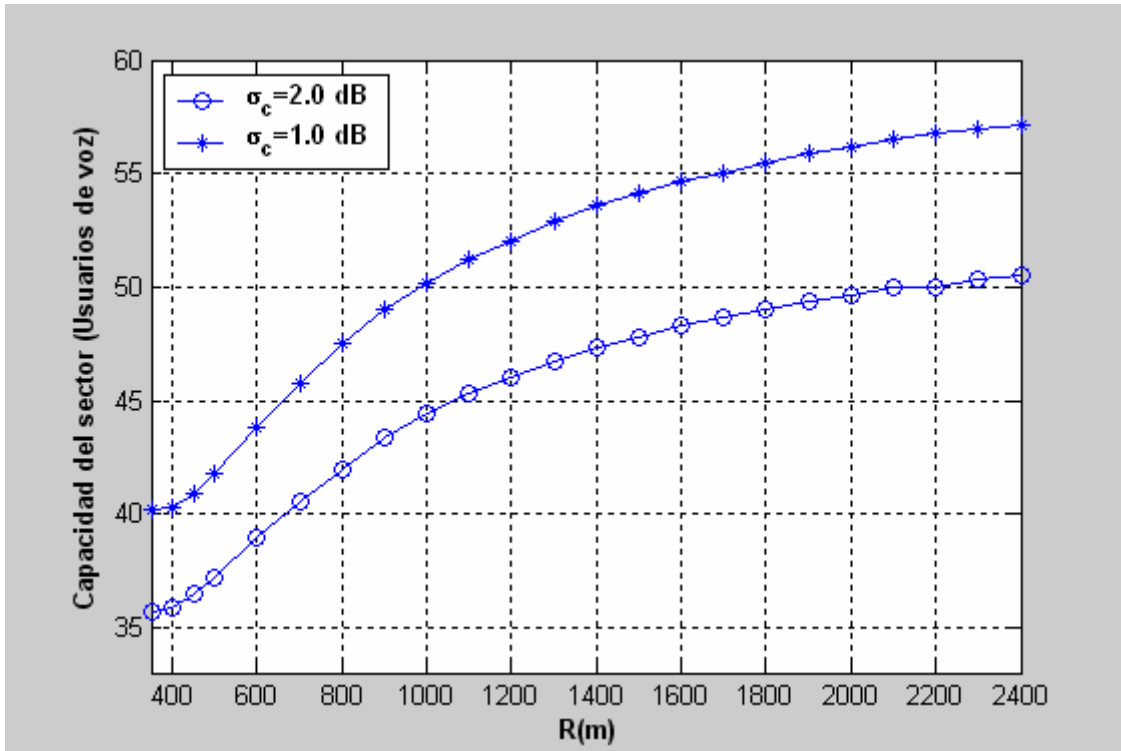


Figura 5.6: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura

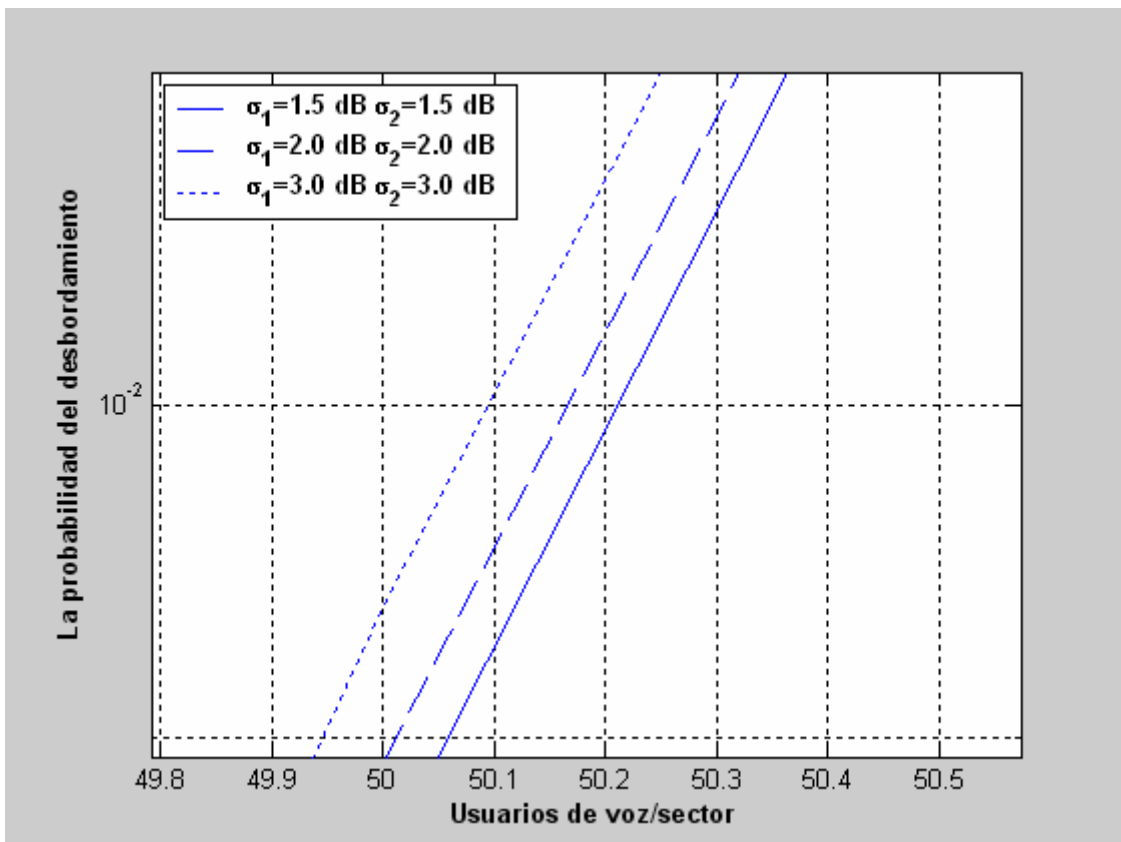


Figura 5.7: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$

Se podrá observar en los tres casos de la Figura (5.6) que la capacidad asciende conforme la región de cobertura del sector de referencia es mayor. En casos anteriores, tendía a estabilizarse hasta llegar un punto en el cual volvía a descender. En esta situación es distinto ya que también depende de factores asociados a las características del túnel como son el modo de propagación de la guía de onda, el cual representa un comportamiento diferente al que se observa en la superficie utilizando el modelo de sectorización Cigar-Shaped general.

Por otra parte, el comportamiento para una región de cobertura inferior al punto de corte será irregular.

#### 5.1.4 Análisis numérico para datos

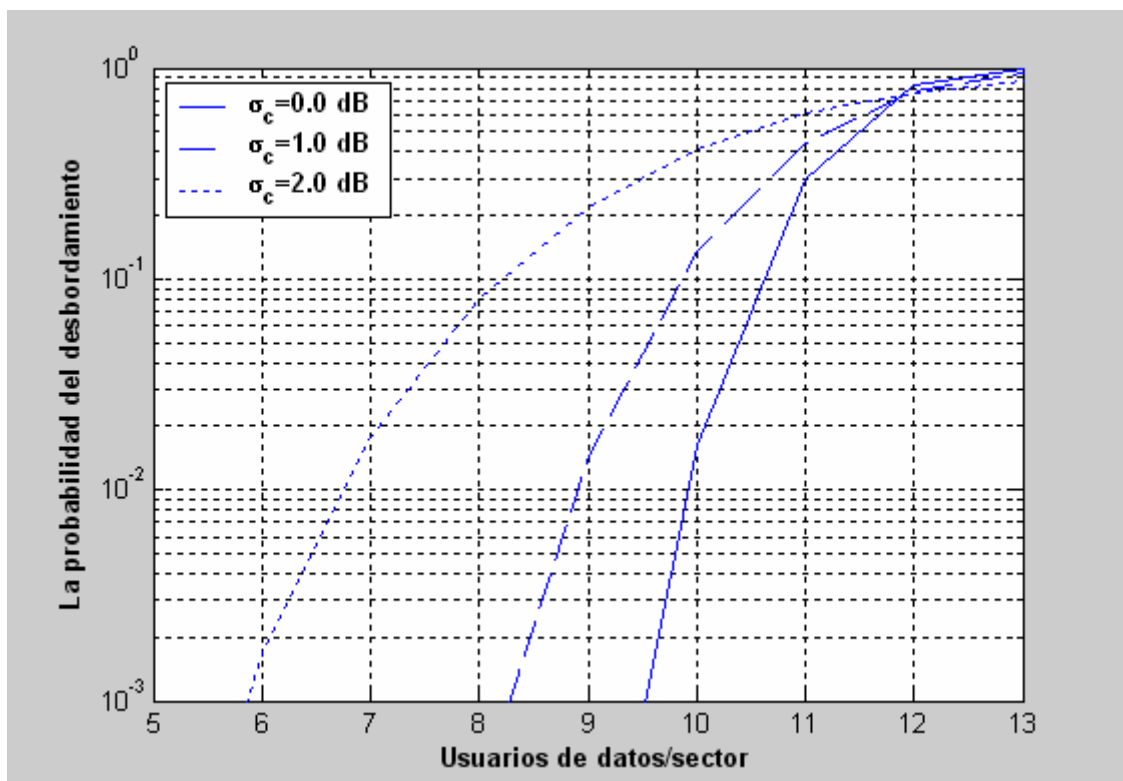


Figura 5.8: Capacidad del uplink del sector (Sin curvas)

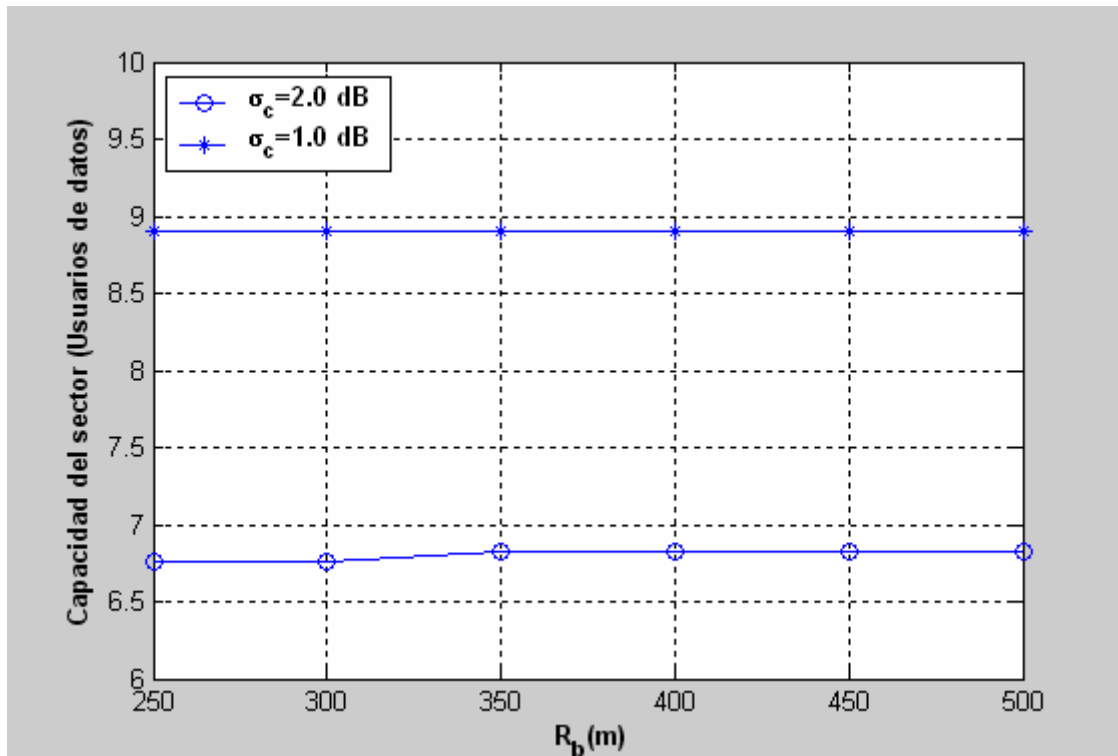


Figura 5.9: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

Nuevamente, sucede lo mismo que para voz, pero en este caso sólo para  $\sigma_c = 2$  dB.

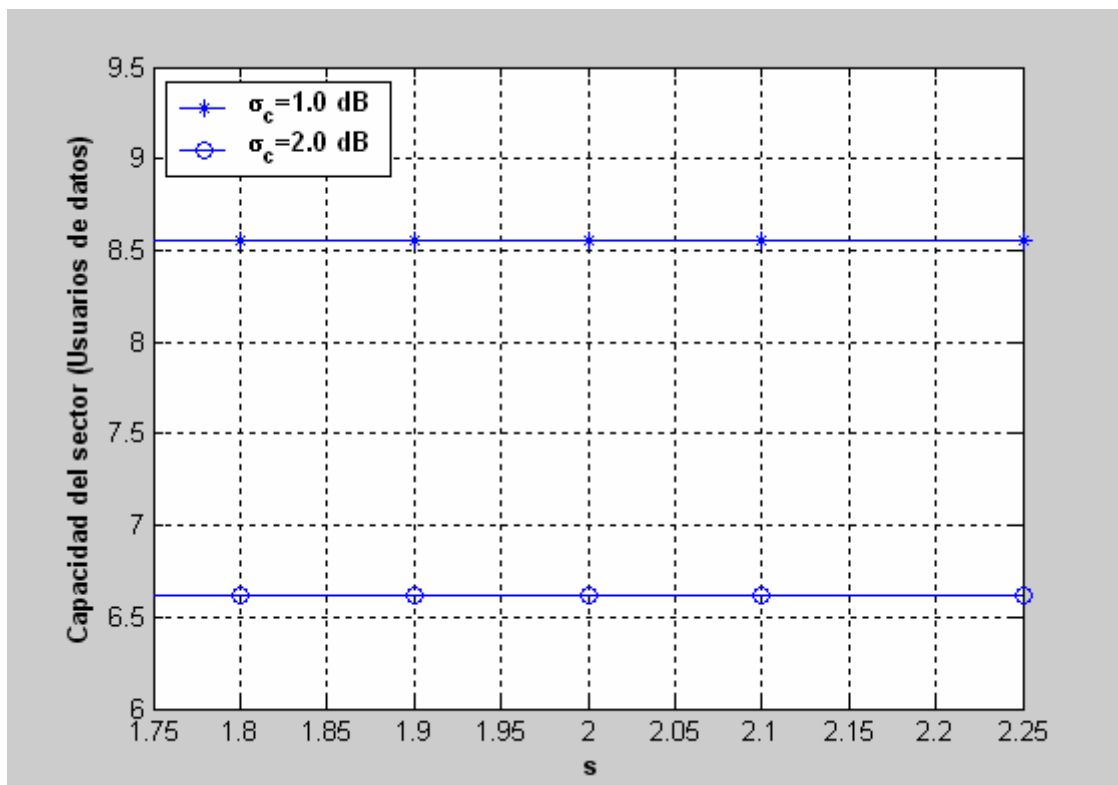
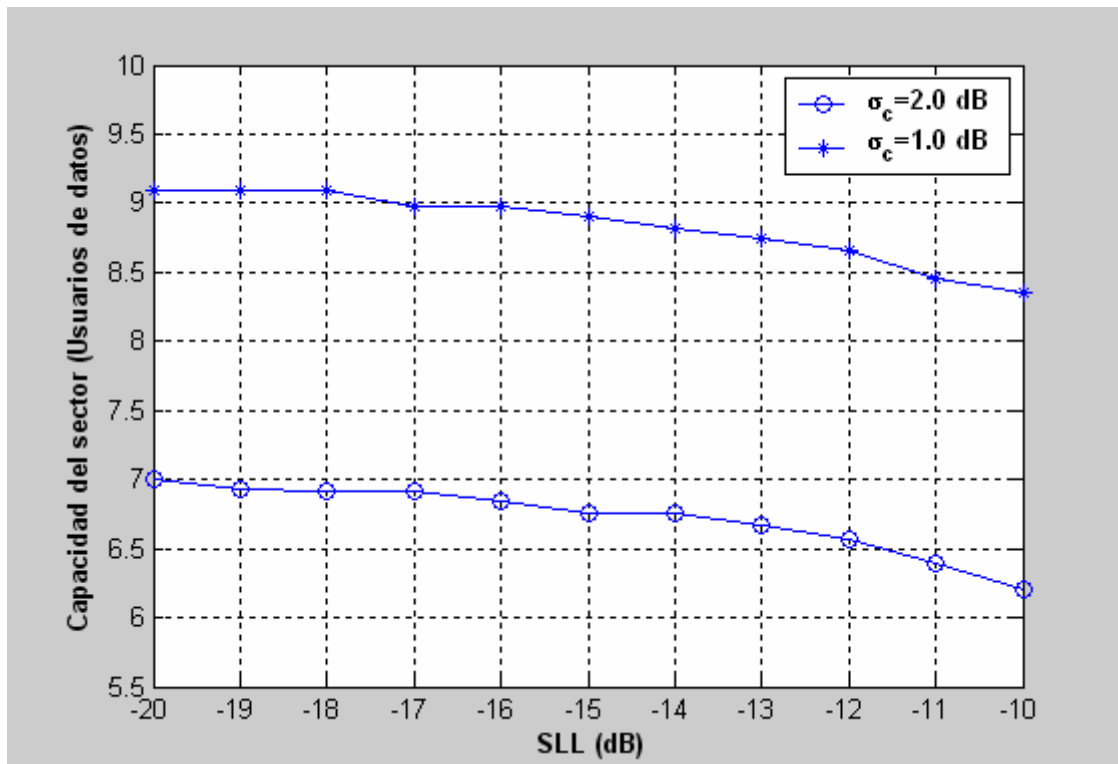


Figura 5.10: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $s$

Si analizamos detenidamente el comportamiento para una variación del punto de corte en la Figura (5.8), podremos observar como un incremento de este se traduce en un ascenso de la capacidad. Nuevamente, está relacionado con las fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias mencionadas anteriormente. Si se analizan detenidamente, un ascenso de  $R_b$  provoca un descenso de las pérdidas ocasionadas por interferencia. En las fórmulas (5.7) y (5.8), se puede comprobar detenidamente este hecho.

Generalmente, el exponente de la ley de propagación de la Figura (5.10) no va a afectar a la capacidad en los túneles, este hecho como consecuencia va a provocar que los resultados que se obtengan sean similares en el rango tomado bajo estudio.

Cabe destacar, como siempre, un aumento del nivel de lóbulos secundarios provoca un descenso de la capacidad del número de usuarios. Su variación, apenas, provoca cambios hasta no alcanzar los -14dB.



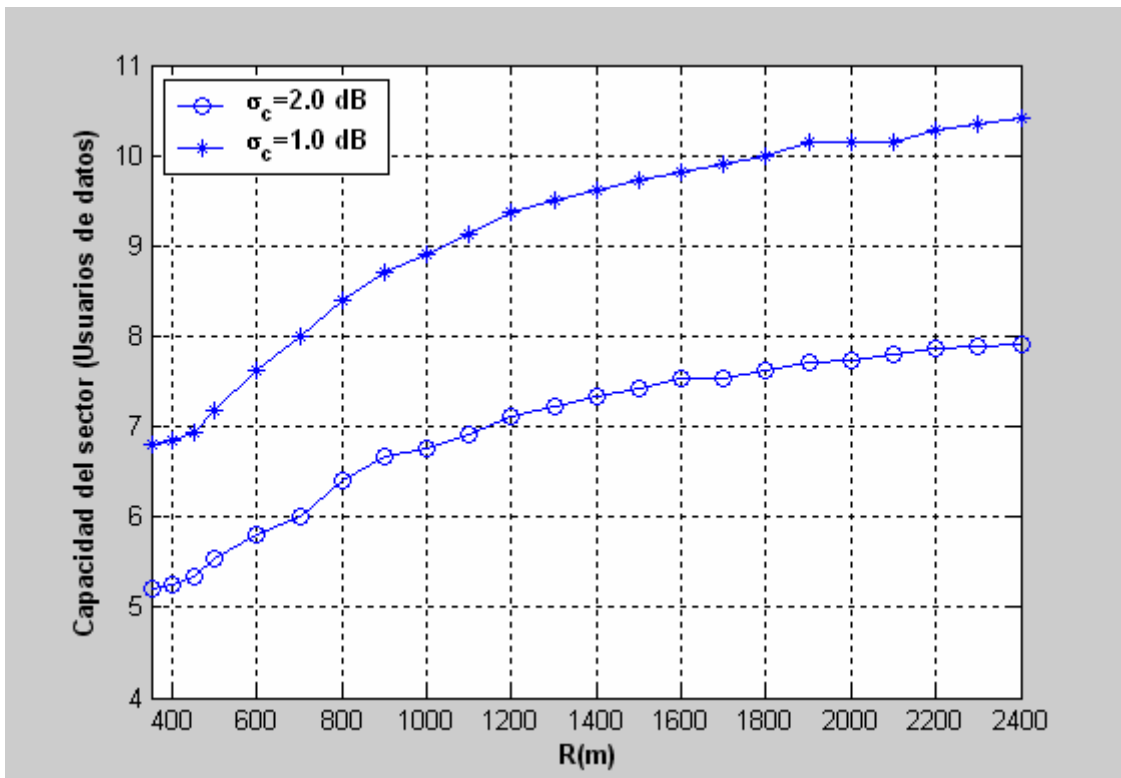
**Figura 5.11: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**

Nuevamente, un incremento del nivel de lóbulos secundarios se traduce en un descenso de la capacidad, si nos remitimos a la fórmula de interferencias (2.17) y (2.28), expresadas en el primer capítulo, se comprobará como éstas estarán formadas por un término genérico y otro cuyo valor es:

$(1 + sll)$

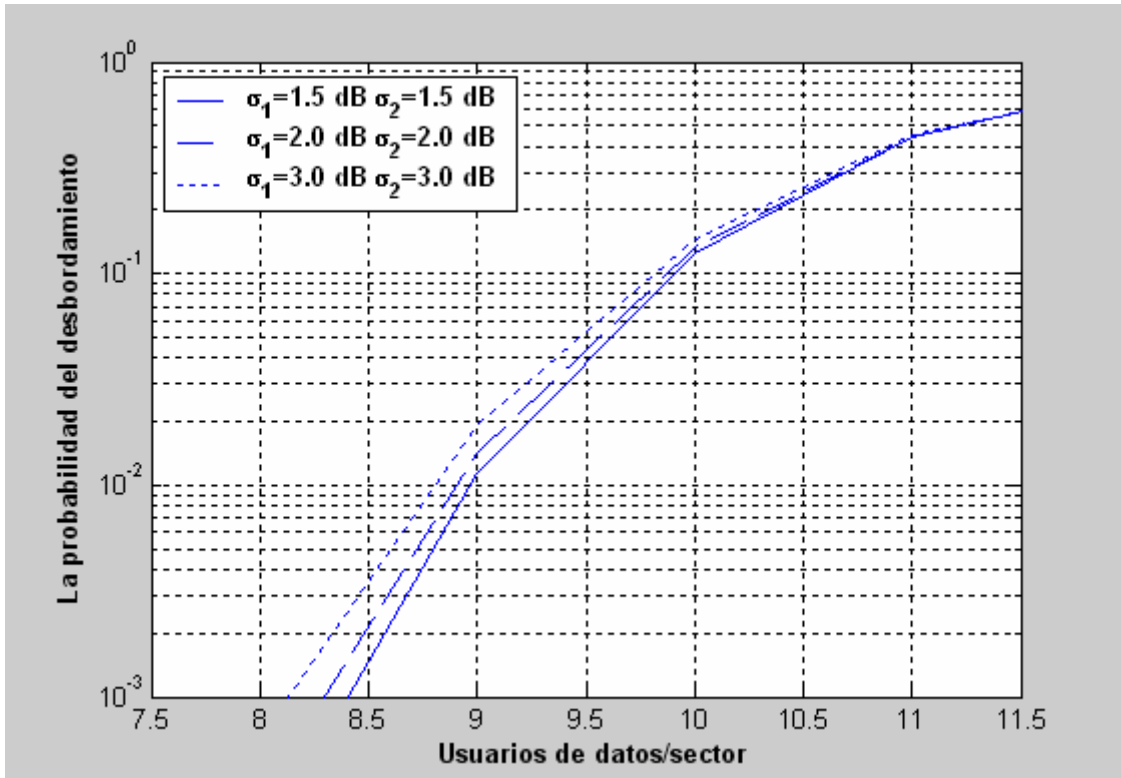
$$sll = 10^{\frac{SLL}{10}} \text{ (sll expresado en unidades naturales)}$$

Sus valores rondarán entre -20 y -10 dB, lo que se traduce en una variación entre el 1% y el 10% del que se tendría con un nivel de lóbulos secundarios muy bajo (-3dB por ejemplo). Si se aprecia detenidamente la gráfica superior, se podrá comprobar un descenso cercano al 10% al comparar el punto de mayor capacidad y aquel con un el valor más pequeño.



**Figura 5.12: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**





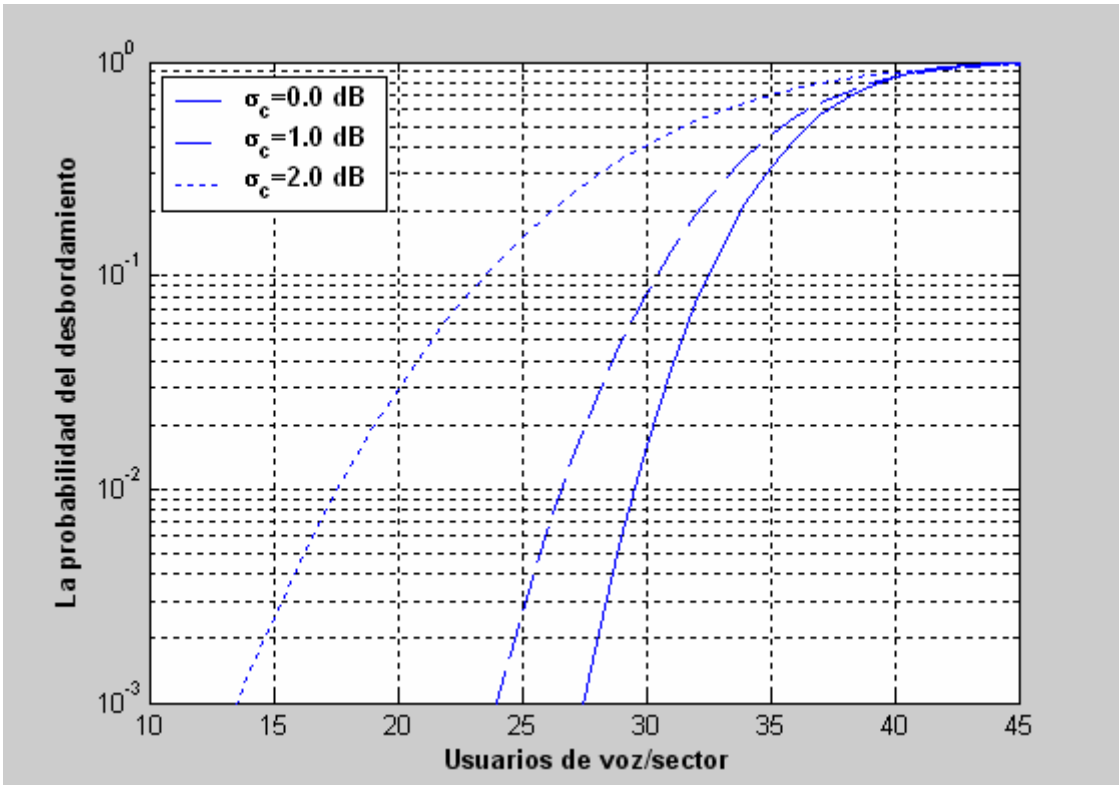
**Figura 5.13: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

En la Figura (5.12), observamos un comportamiento irregular comparado con cualquier estudio anterior motivado por la aplicación del modelo híbrido. En cuanto a la Figura (5.13), una variación de los parámetros no se traduce en una variación muy grande de la capacidad como en casos anteriores.

### 5.1.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

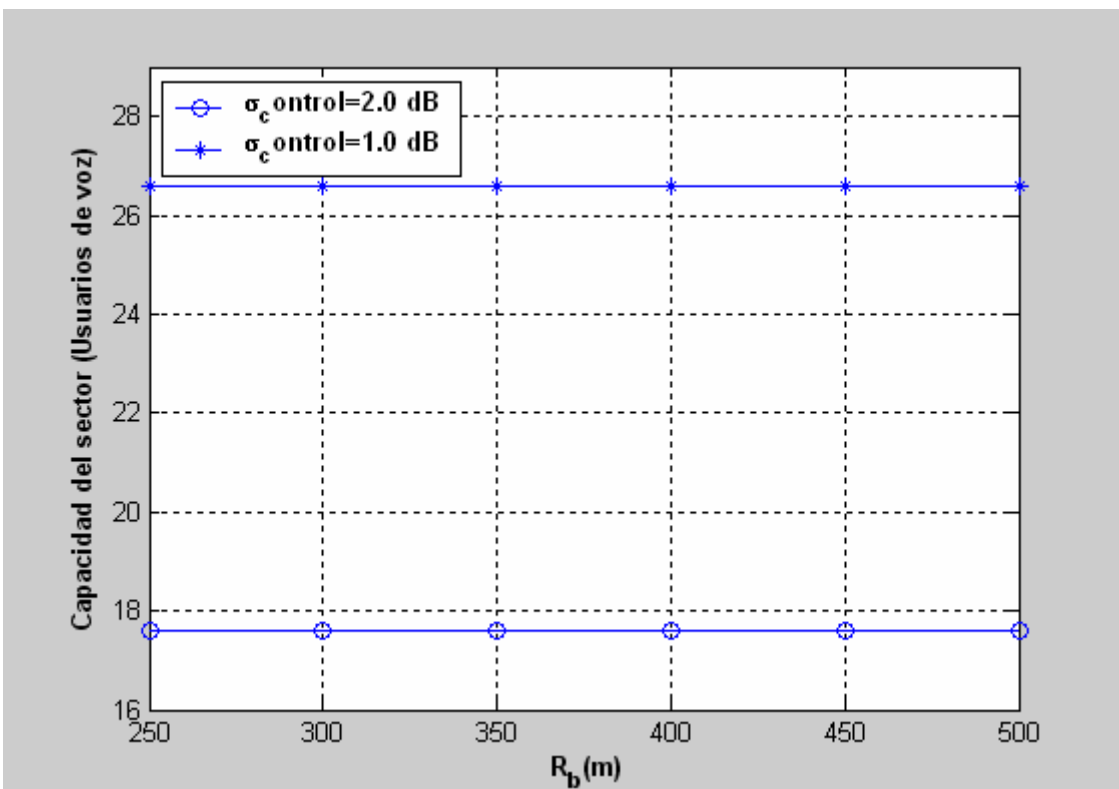
En este estudio, se plantea la posibilidad de dar dos servicios de forma simultánea al usuario. Para ello, será necesario recurrir a una fórmula que difiere someramente de las mencionadas anteriormente.

A continuación trataremos de desarrollar brevemente las expresiones utilizadas para extraer las conclusiones y las figuras que vienen a continuación. En primer lugar, para comprender los siguientes desarrollos, ver fórmulas (5.19), (5.20) y (5.21):

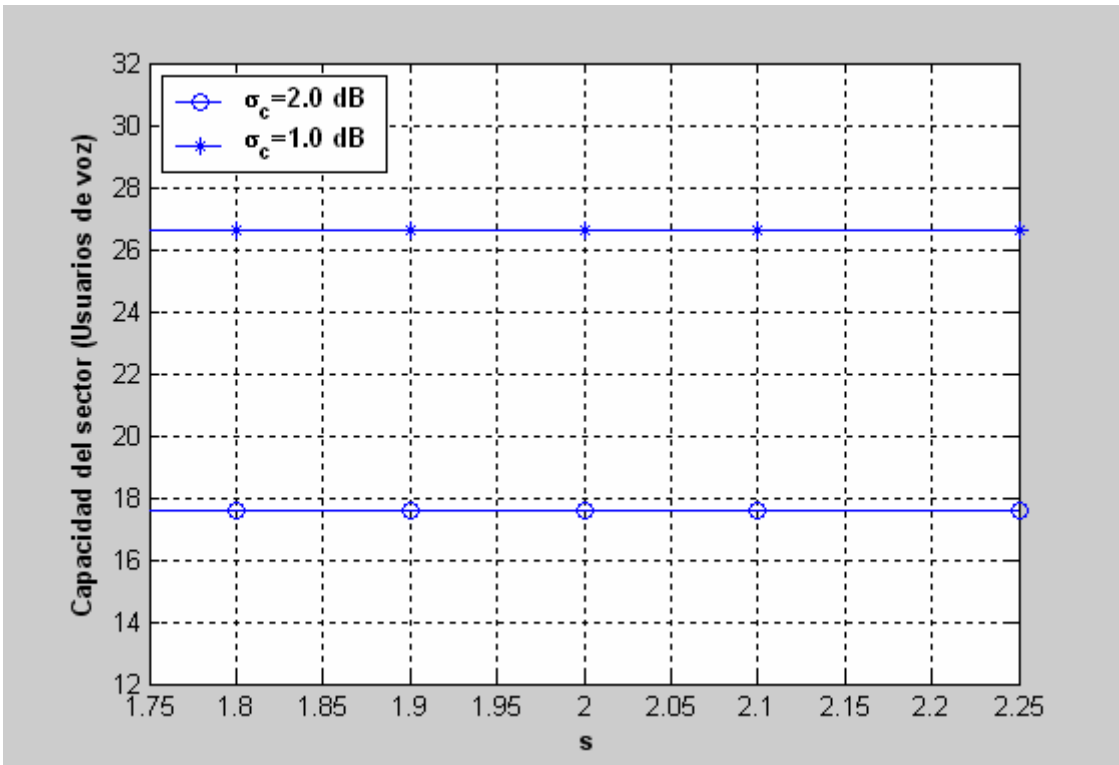


**Figura 5.14: Probabilidad del desbordamiento del sector existiendo 5 usuarios de datos**

Nuevamente, en la Figura (5.14), observamos como la capacidad para servicio de voz y datos conjunto desciende ligeramente.

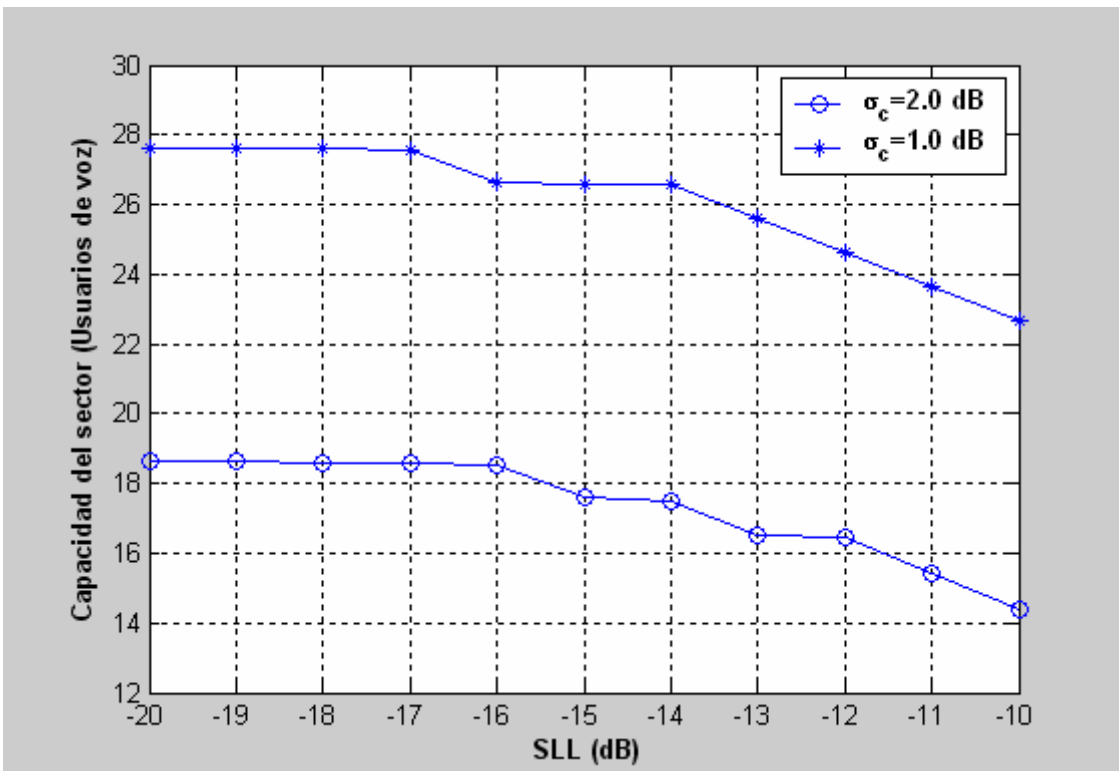


**Figura 5.15: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**



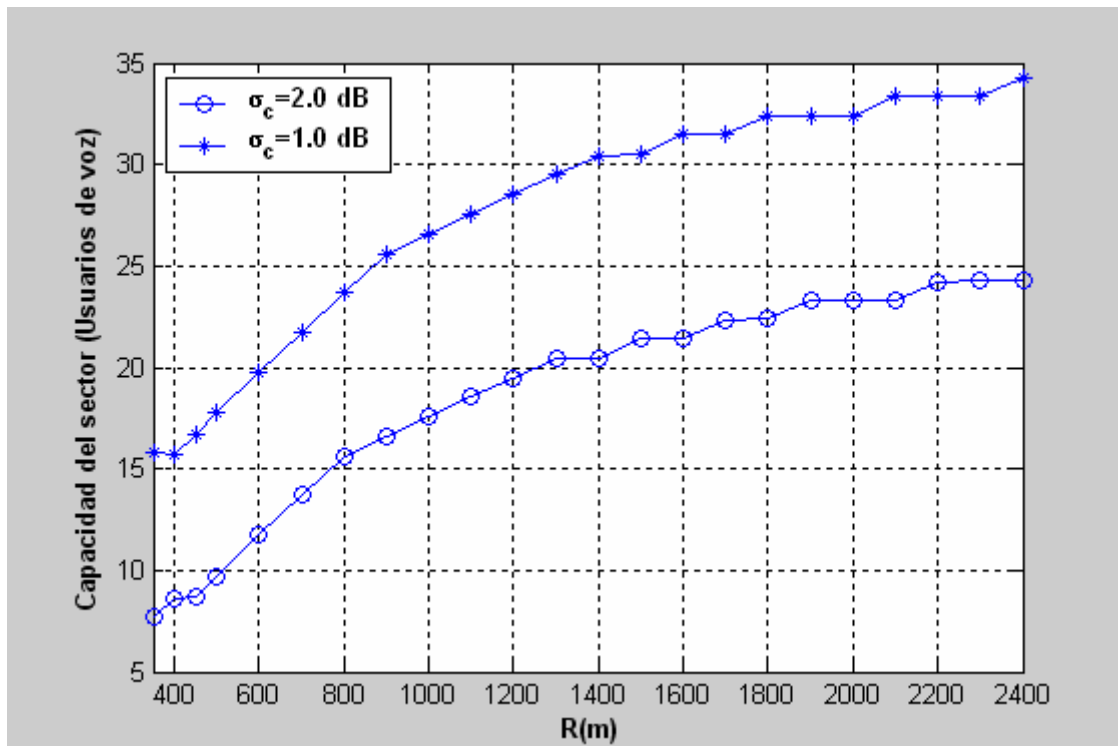
**Figura 5.16: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación s**

En la Figura (5.16), podemos observar nuevamente como con el exponente de propagación apenas varía la capacidad.



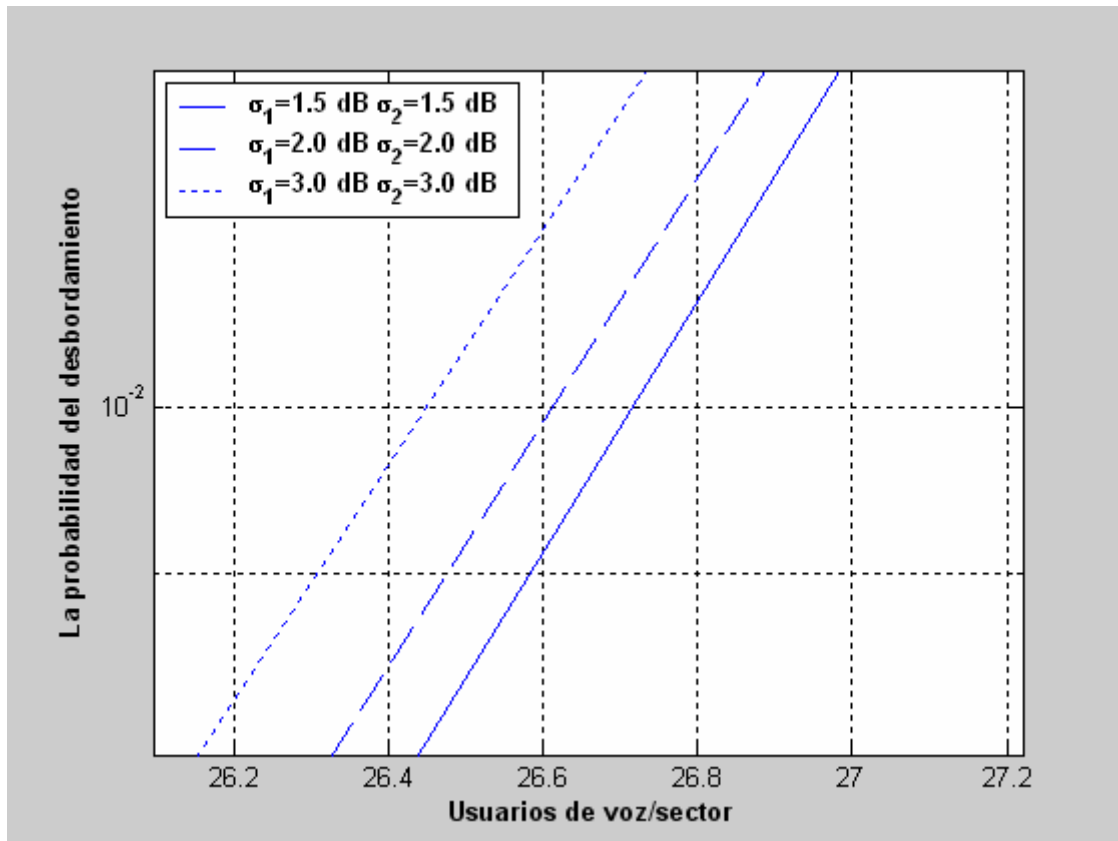
**Figura 5.17: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**

El comportamiento en la Figura (5.17) es mucho más parecido al de la superficie salvo con la diferencia que la capacidad es menor.



**Figura 5.18: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

En la Figura (5.18), la capacidad tiende a crecer de manera constante sin llegar a un punto en esta gráfica a estabilizarse.



**Figura 5.19: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$**

Se ha aplicado un zoom en la Figura (5.19), con el fin de apreciar las ligeras diferencias que aparecen al variar la desviación ocasionada por  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$ . Un aumento de éstas se traduce en un descenso de la capacidad. Esto se debe a que si analizamos las fórmulas de la media y la varianza para el cálculo de las interferencias, se podrá comprobar que un aumento de éstas implica un incremento de ambos factores (media y varianza).

### 5.1.6 Análisis de diferentes casos para voz en función de las curvas en túneles

La existencia de curvas va a generar diversos efectos en la capacidad de usuarios, que deben ser mencionados por su especial relevancia. En primer lugar, se ha realizado un estudio de las curvas en los dos primeros sectores. Esto es así porque el efecto de las interferencias es mucho menor cuanto más lejanas están las curvas del sector bajo estudio. Además la existencia de curvas en sectores lejanos hace que las interferencias que llegan al sector bajo

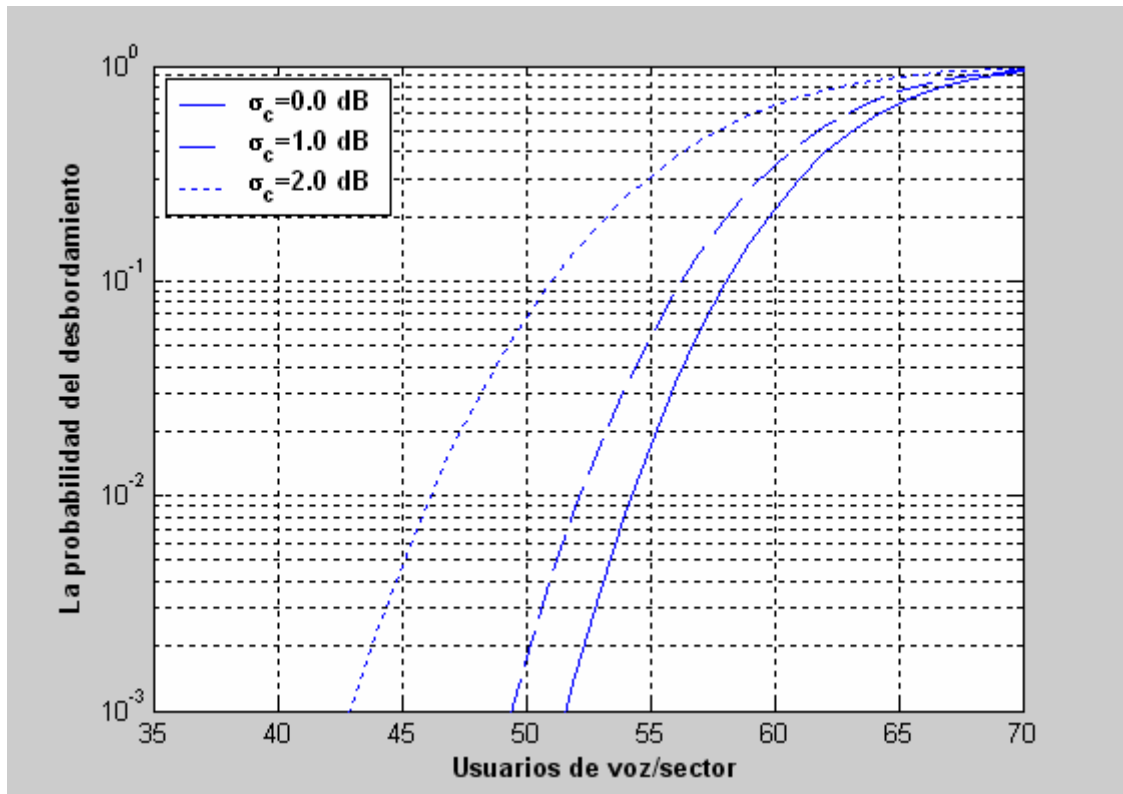
estudio tengan menor influencia, alcanzando unas pérdidas de menor magnitud y afectando a nuestro sistema bajo estudio en menor grado.

Otro aspecto a destacar es como conforme la curva está más próxima a la estación base, su efecto traducido en pérdidas será menor.

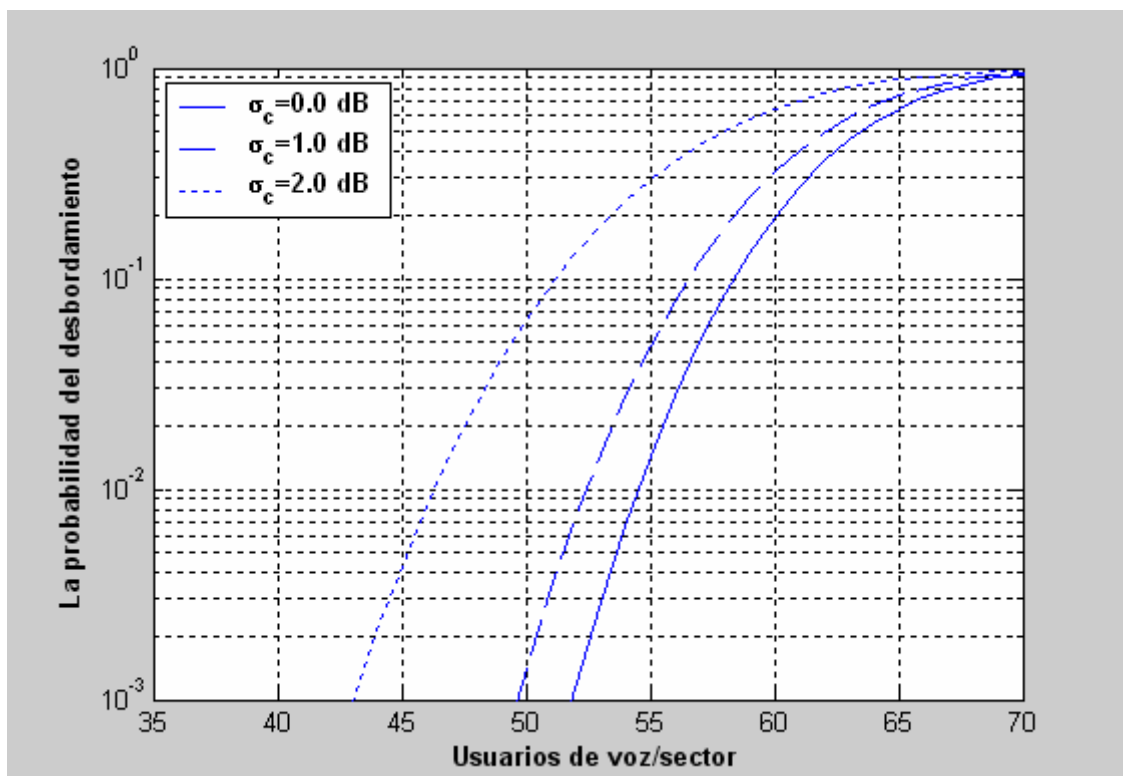
Las pérdidas ocasionadas por las curvas serán mayores en función de cómo sean de cerradas, se obtendrán mayores pérdidas en una curva abrupta que en una recta ligeramente curvada. En los resultados obtenidos, se han elegido unas pérdidas de aproximadamente 3dB. Este valor corresponde a una curva genérica; en el caso de que hubiera más de una el resultado se vería incrementado dependiendo de si el usuario es afectado por esa segunda curva o no.

Generalmente, la aparición de curvas va a provocar el aumento de la capacidad de usuarios. Esto es así debido a que en parte, elimina interferencias al no poder llegar la señal de otros usuarios interferentes con un mismo nivel de potencia. Este hecho no implica que la existencia de muchas curvas mejore la situación, ya que por otra parte, la aparición de una curva adicional genera unas pérdidas extra.

Por tanto, es beneficiosa la existencia de alguna curva en la contribución de la capacidad, siempre y cuando no nos encontremos ante una situación con curvas muy cerradas.



**Figura 5.20:** Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha del sector



**Figura 5.21:** Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha del sector

En la Figura (5.20) y (5.21) se observará como la aparición de curvas se traduce en un aumento de la capacidad.

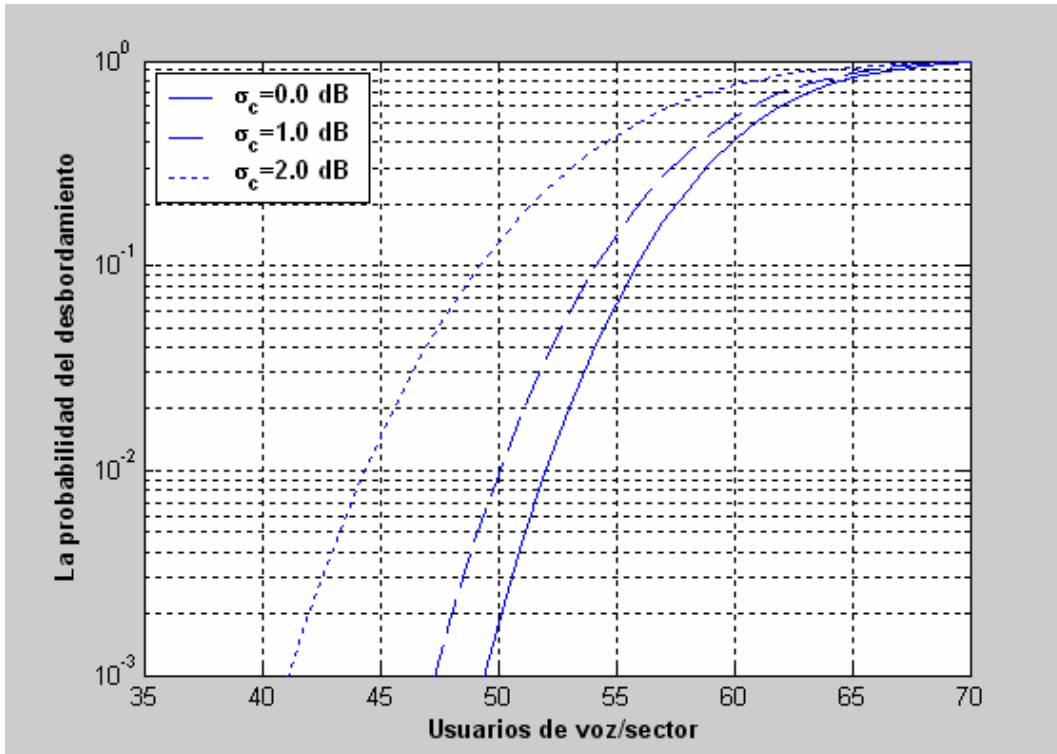


Figura 5.22: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la izquierda del sector

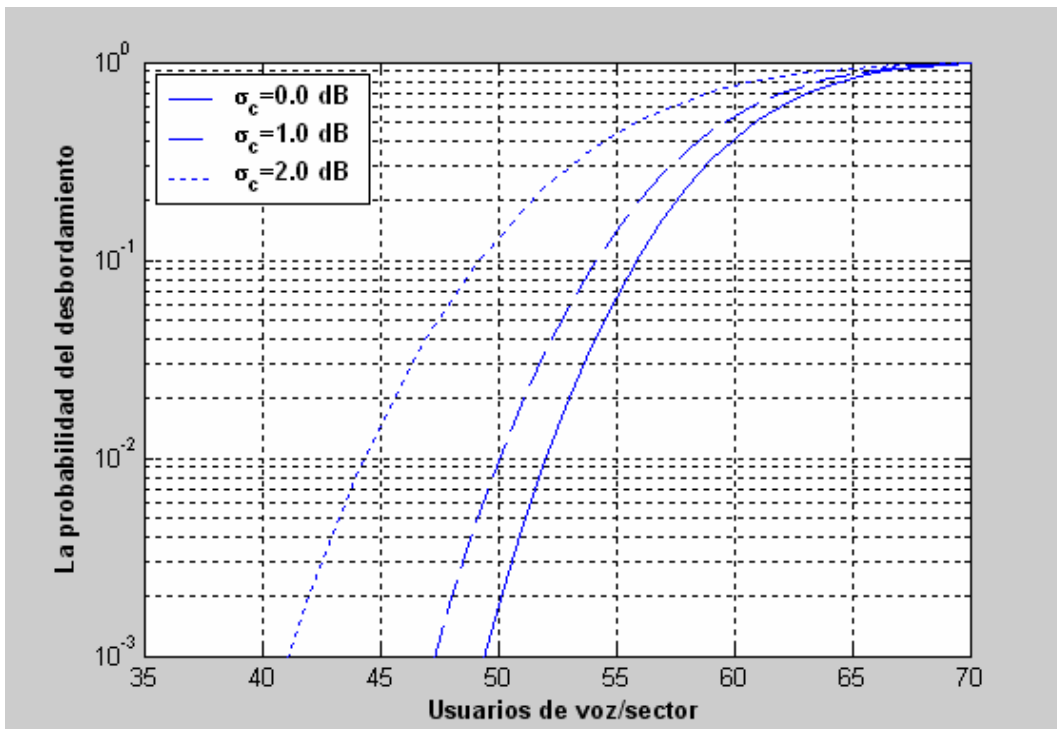
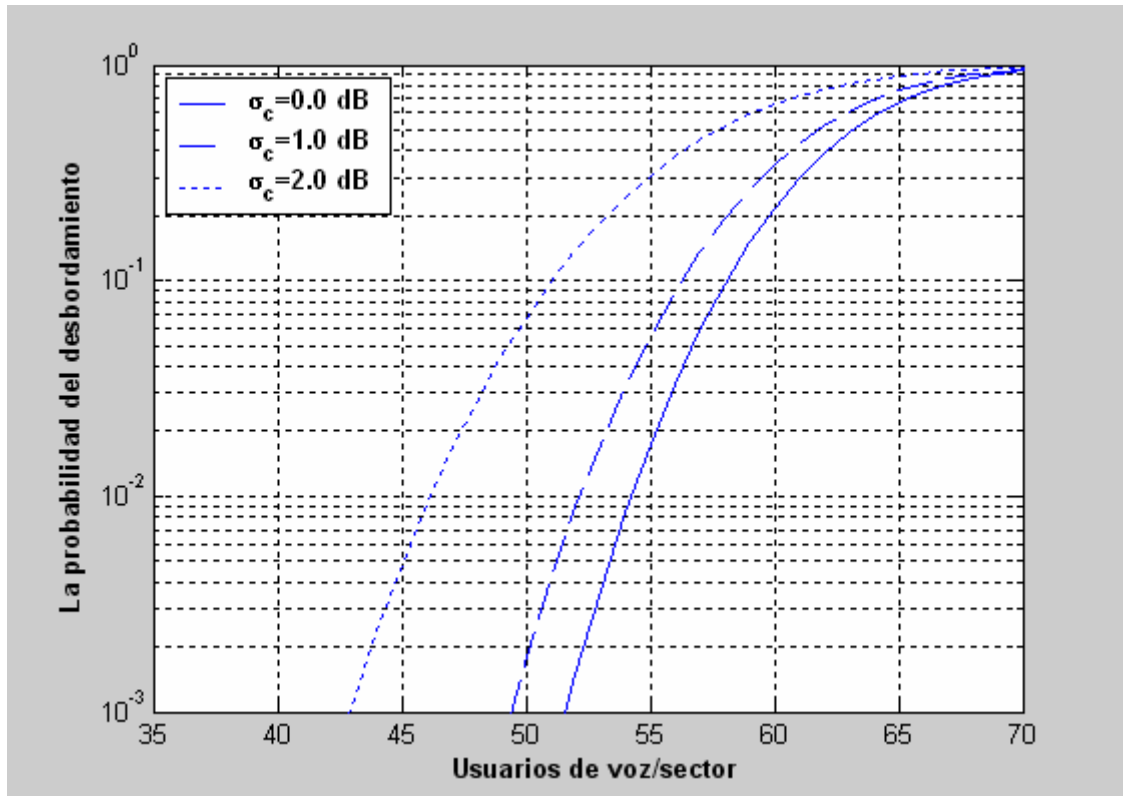


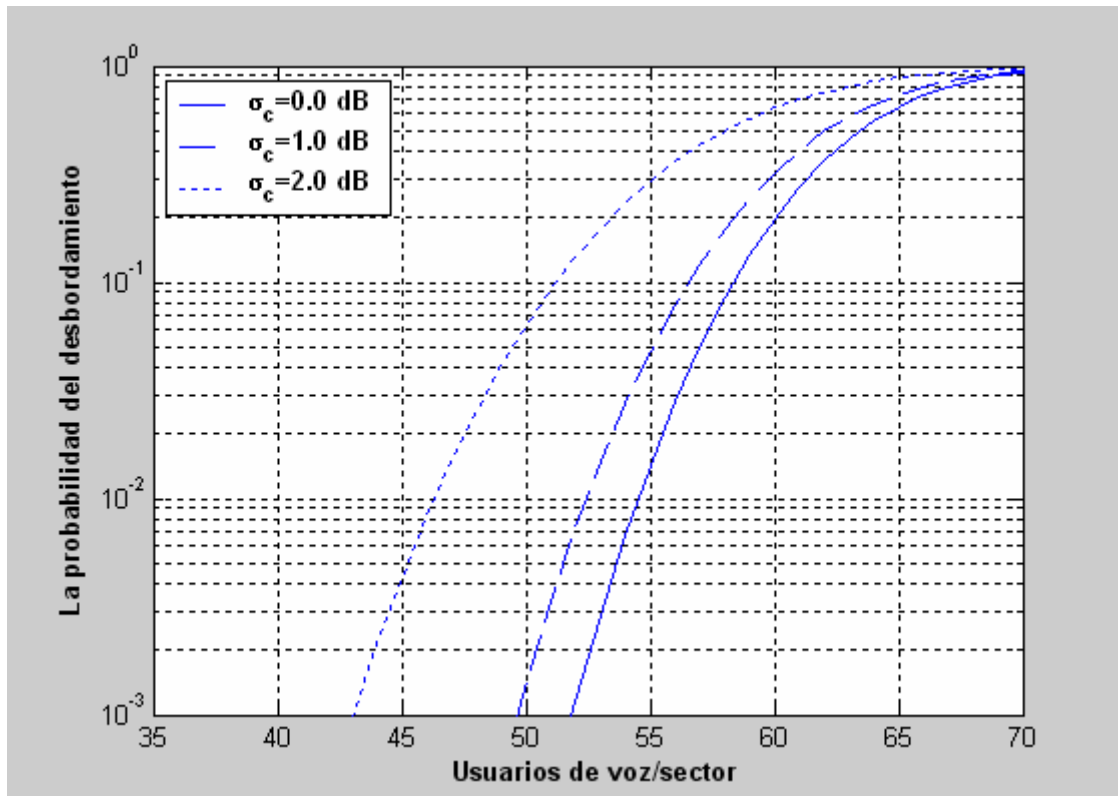
Figura 5.23: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la izquierda del sector





**Figura 5.24: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la izquierda y otra a la derecha del sector**

Las curvas a la izquierda del sector apenas van a afectar a los resultados que obtengamos de capacidad. Independientemente de la colocación de éstas ya sea a 100 metros o a 1000 metros, su influencia es mínima.



**Figura 5.25: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha y una a la izquierda del sector**

Podemos apreciar en la Figura (5.25) como la aparición de una curva a la izquierda del sector bajo estudio no implica un cambio muy significativo de la capacidad.

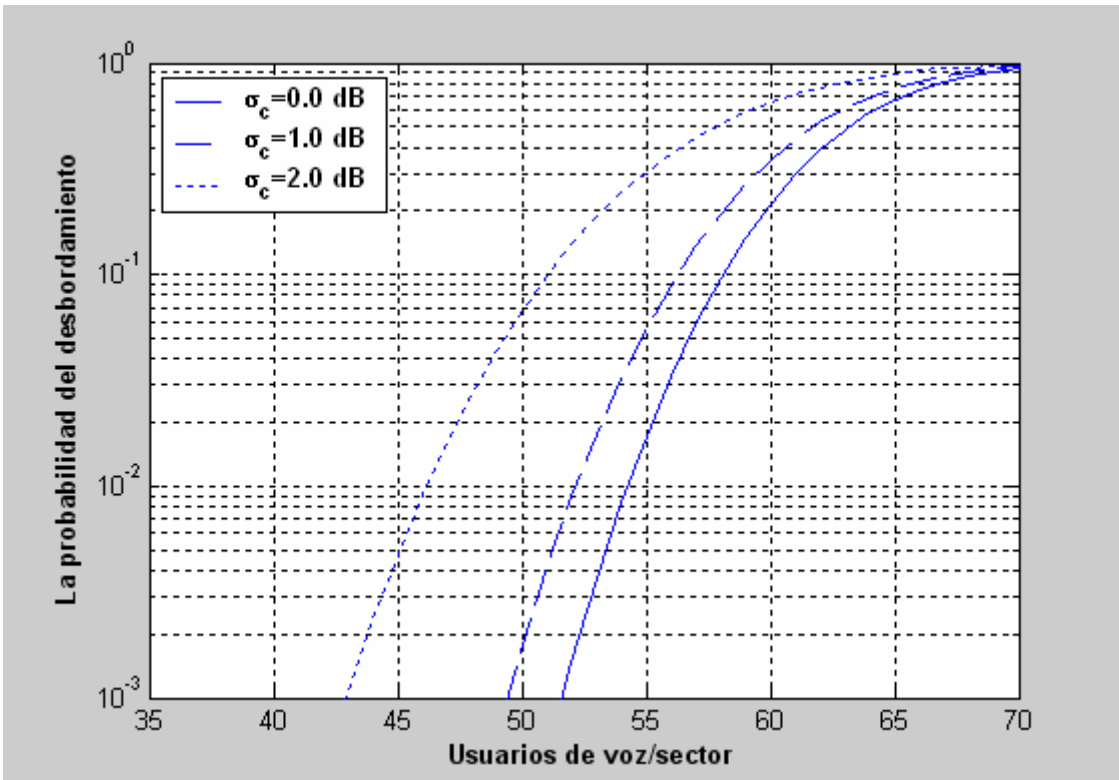


Figura 5.26: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha y dos a la izquierda del sector

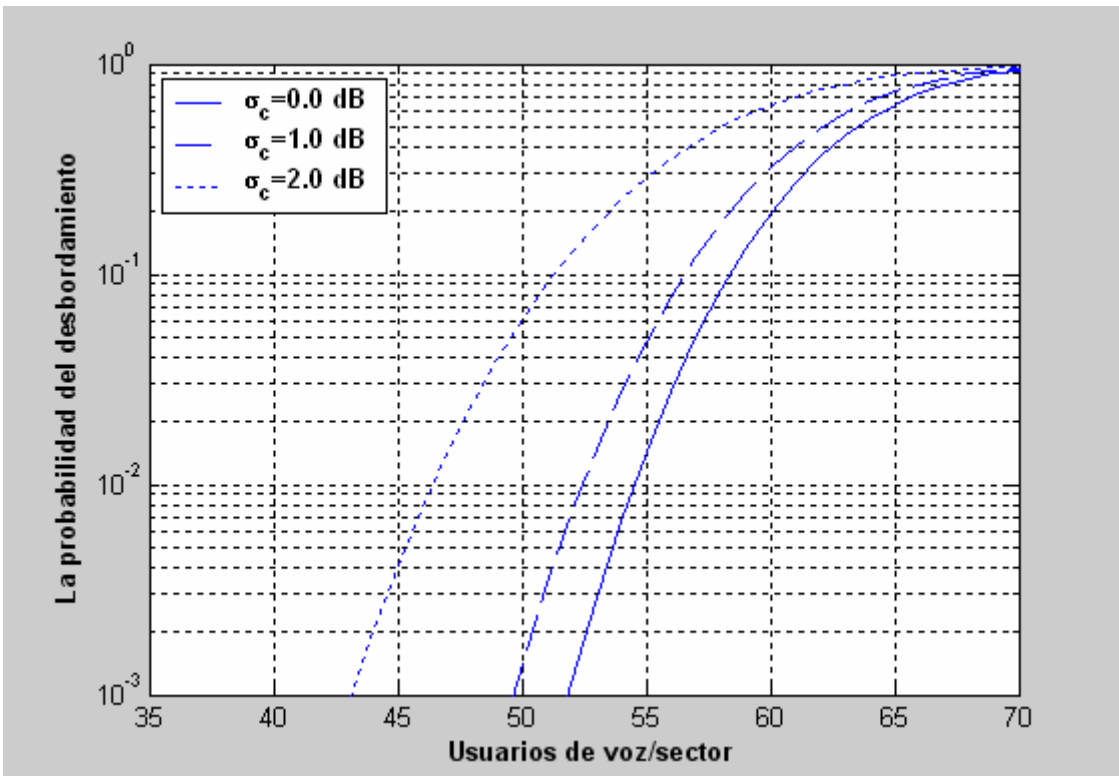


Figura 5.27: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha y dos a la izquierda del sector

Tabla 5.1: Variación de la capacidad para los distintos casos

Tipo de curvas	$\sigma_c=0.0$ (dB)	$\sigma_c=1.0$ (dB)	$\sigma_c=2.0$ (dB)
Sin curvas	52.134	50.10	44.46
1Dcha	54.35	52.27	46.26
2Dcha	54.62	52.5	46.42
1Izqda	52.135	50.165	44.465
2Izqda	52.138	50.17	44.47
1Dcha 1Izqda	54.35	52.27	46.26
2Dcha 1Izqda	54.625	52.55	46.45
2Izqda 1Dcha	54.39	52.276	46.27
2Dcha 2Izqda	54.625	52.56	46.51

Tabla 5.2: Variación del radio de cobertura para los distintos casos

$d_{curva1}$ (m)	$d_{curva2}$ (m)	R (m)
100	1900	986
200	1800	986
300	1700	986
400	1600	986
500	1500	986
600	1400	986
700	1300	986
800	1200	986
900	1100	986
1000	1000	1000

Tabla 5.3: Variación del radio de cobertura para los distintos casos

$d_{curva1}$ (m)	$d_{curva2}$ (m)	R(m)
100	1800	986
200	1800	986
300	1800	986
400	1800	986
500	1800	986
600	1800	986
700	1800	986
800	1800	986
900	1800	986
1000	1800	1011

**Tabla 5.4: Variación del radio de cobertura para los distintos casos**

$d_{\text{curva1}}$ (m)	$d_{\text{curva2}}$ (m)	R (m)
100	1600	986
200	1600	986
300	1600	986
400	1600	986
500	1600	986
600	1600	986
700	1600	986
800	1600	986
900	1600	986
1000	1600	1011

Como podremos observar en la tabla (5.4), la aparición de más curvas genera un mínimo aumento de la capacidad debida a la disminución de las interferencias ocasionadas por los usuarios conectados a otras estaciones base.

Hemos elegido colocar como máximo dos curvas de forma que una de ellas siempre se encuentre a una distancia inferior de la estación base que la otra.

Como se puede comprobar analizando la tabla (5.1), las curvas colocadas a la derecha tendrán un mayor efecto beneficioso que las colocadas en la zona afectada por el nivel de los lóbulos secundarios. Para verificar este hecho, desde un punto de vista empírico, se ha observado como las curvas colocadas a la izquierda (zona afectada por el sll) aportan un ascenso de la capacidad casi despreciable.

### **Análisis del efecto del coeficiente de propagación en el modo de guías de ondas**

Como se ha podido comprobar empíricamente, los resultados variarán ligeramente en función de las pérdidas ocasionadas por las curvas. Las curvas afectarán a la hora de calcular el radio de cobertura, conforme los valores de éstas sean mayores, harán que este crezca bastante.

Para  $n_g = 0.01$  (constante de las guías de onda), cada unidad en dB ocasionada por las curvas provocará un descenso de la región de cobertura de 50 metros.

Si  $n_g = 0.015$ , cada unidad en dB ocasionada por las curvas provocará un descenso de la región de cobertura de aproximadamente 30 metros.

Por tanto, un mínimo aumento de este coeficiente para guías de onda provocará un descenso de la región de cobertura.

No obstante, aporta como ventaja que en algunos estudios realizados, su aumento provoca un ascenso de la capacidad.

$\uparrow n_g \rightarrow \uparrow$ Capacidad  
 $\uparrow n_g \rightarrow \downarrow$ Región de cobertura R

Por otra parte, los cambios producidos en el radio de cobertura son más destacables y se comentarán a continuación.

**Tabla 5.5: Variación del radio de cobertura para los distintos casos**

Tipo de curvas	R (m)
<b>Sin curvas</b>	<b>1000</b>
<b>1Dcha</b>	<b>938.5</b>
<b>2Dcha</b>	<b>998.5</b>
<b>1Izqda</b>	<b>998.5</b>
<b>2Izqda</b>	<b>998.5</b>
<b>1Dcha 1Izqda</b>	<b>938.5</b>
<b>2Dcha 1Izqda</b>	<b>998.5</b>
<b>1Dcha 2Izqda</b>	<b>938.5</b>
<b>2Dcha 2Izqda</b>	<b>998.5</b>

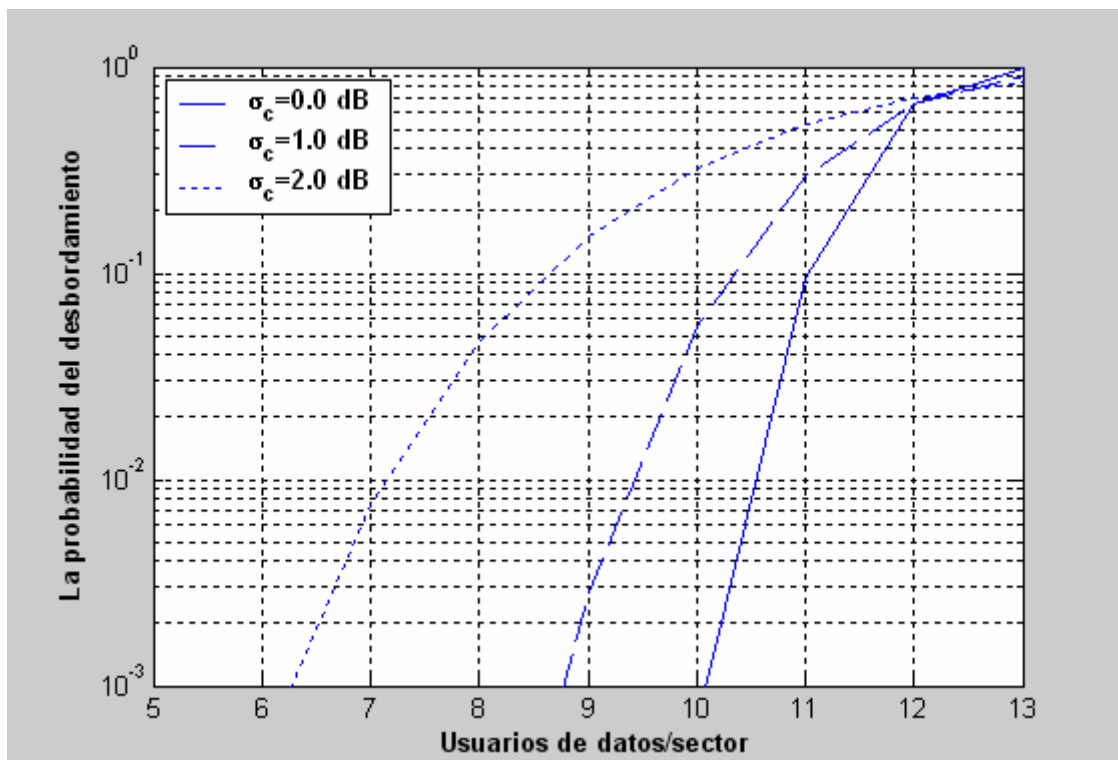
A continuación, analizaremos varios casos para observar los efectos provocados por su variación existiendo una curva a la derecha a 500 metros del punto de referencia del sector bajo estudio:

**Tabla 5.6: Variación del radio de cobertura y de la capacidad para los distintos casos**

$n_g$	R (m)	Capacidad para $\sigma_c=1.0$ (dB)
0.01	836	52.27
0.015	896	56
0.02	926	57.87
0.025	938.5	58.85

Los efectos ocasionados por la variación de  $n_g$  o los diferentes modos de guía de onda en la tabla (5.6) hacen que las pérdidas de 3dB originadas por una curva influyan menos en la variación de la región de cobertura.

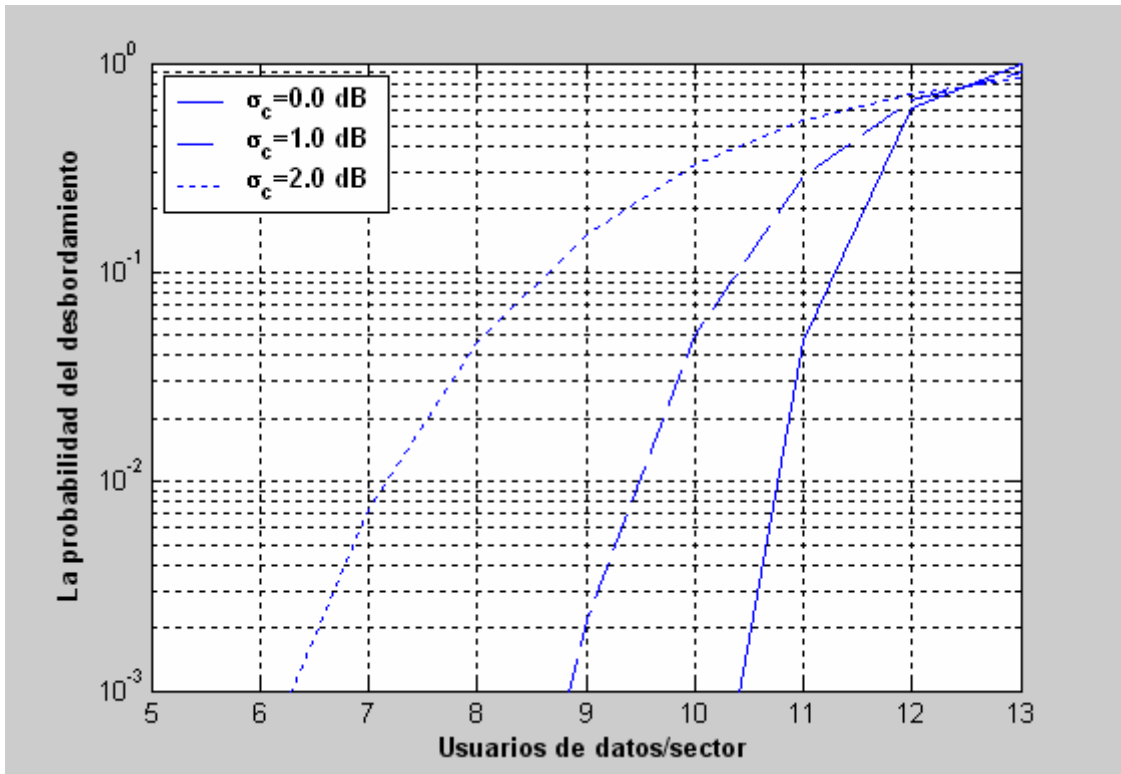
### 5.1.7 Análisis de diferentes casos para datos en función de las curvas



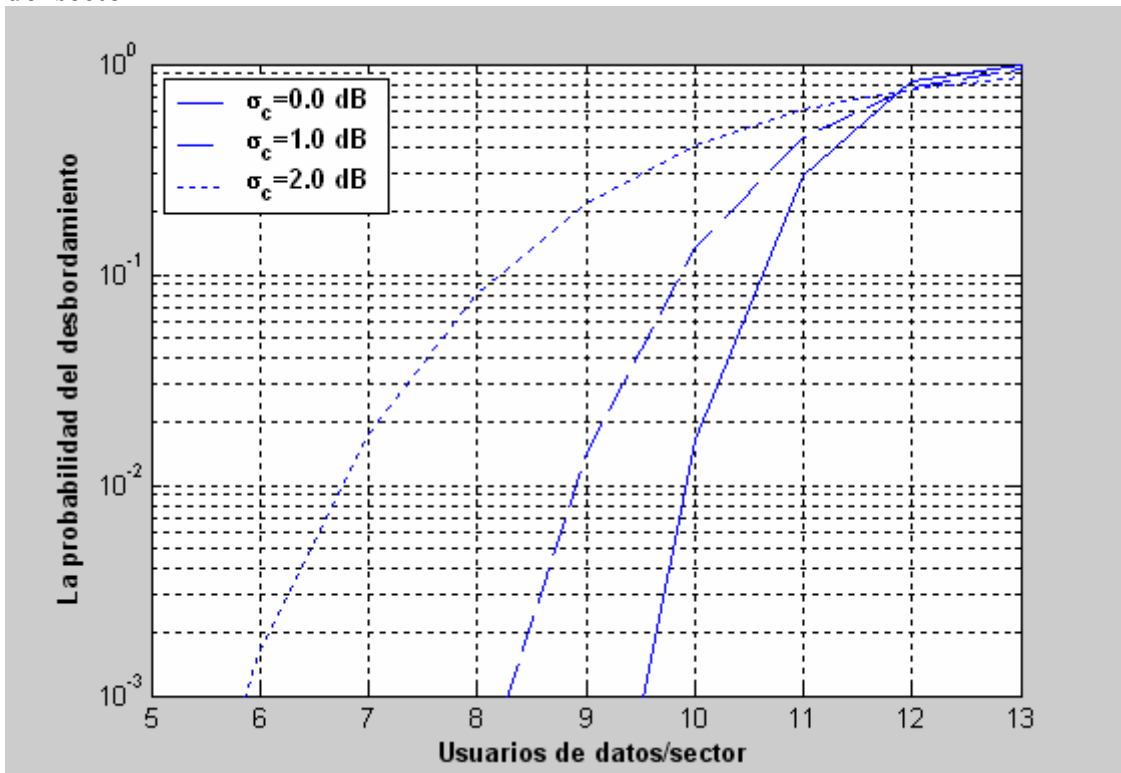
**Figura 5.28: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha del sector**

En la Figura (5.28) crece aproximadamente un usuario para una  $\sigma_c=0\text{dB}$ . Lo cual implica un crecimiento aproximado para servicio de datos de un 10%. Es por tanto, una cifra bastante destacable. Cabe recordar que a lo largo de

cada escenario y los sucesivos, se habla de usuarios con cifras decimales. Esto se realiza con objeto de obtener mayor precisión a la hora de extraer resultados.



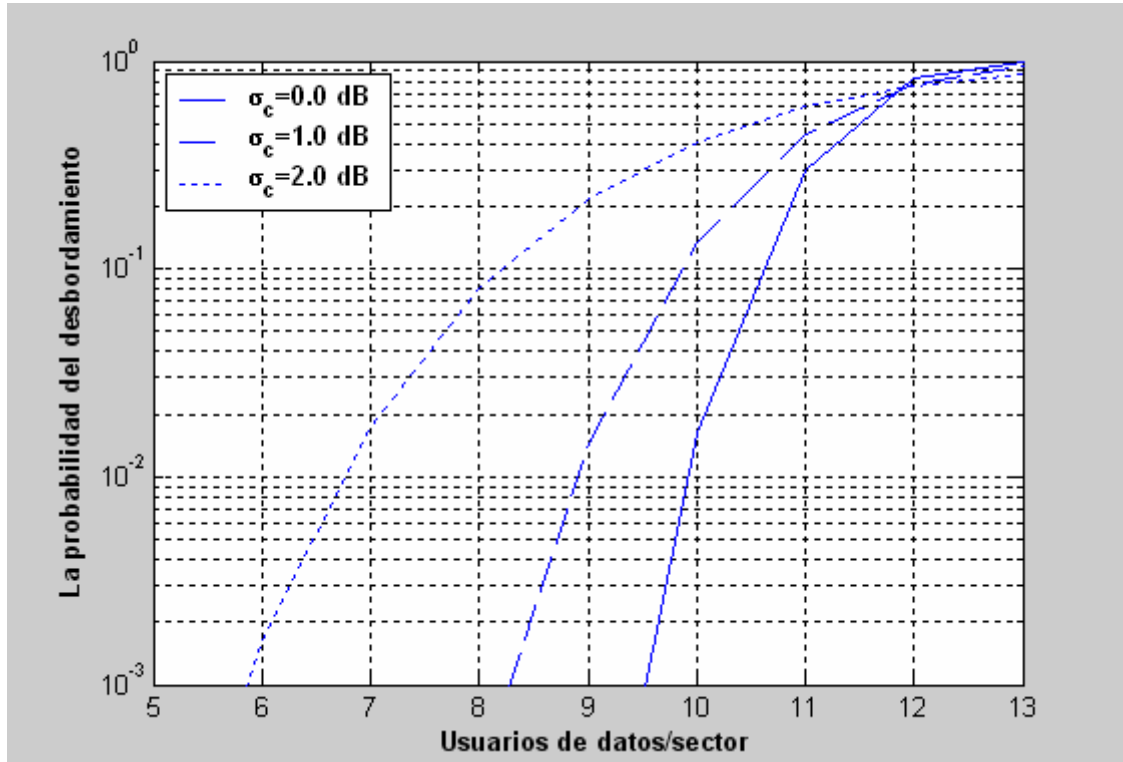
**Figura 5.29: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha del sector**





**Figura 5.30: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la izquierda del sector**

Podemos observar nuevamente en la Figura (5.30) y la Figura (5.31) como la capacidad apenas varía por la aparición de curvas a la izquierda. Mientras que en la Figura (5.29) el aumento de la capacidad es considerable al encontrarse las dos curvas a la derecha.



**Figura 5.31: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la izquierda del sector**

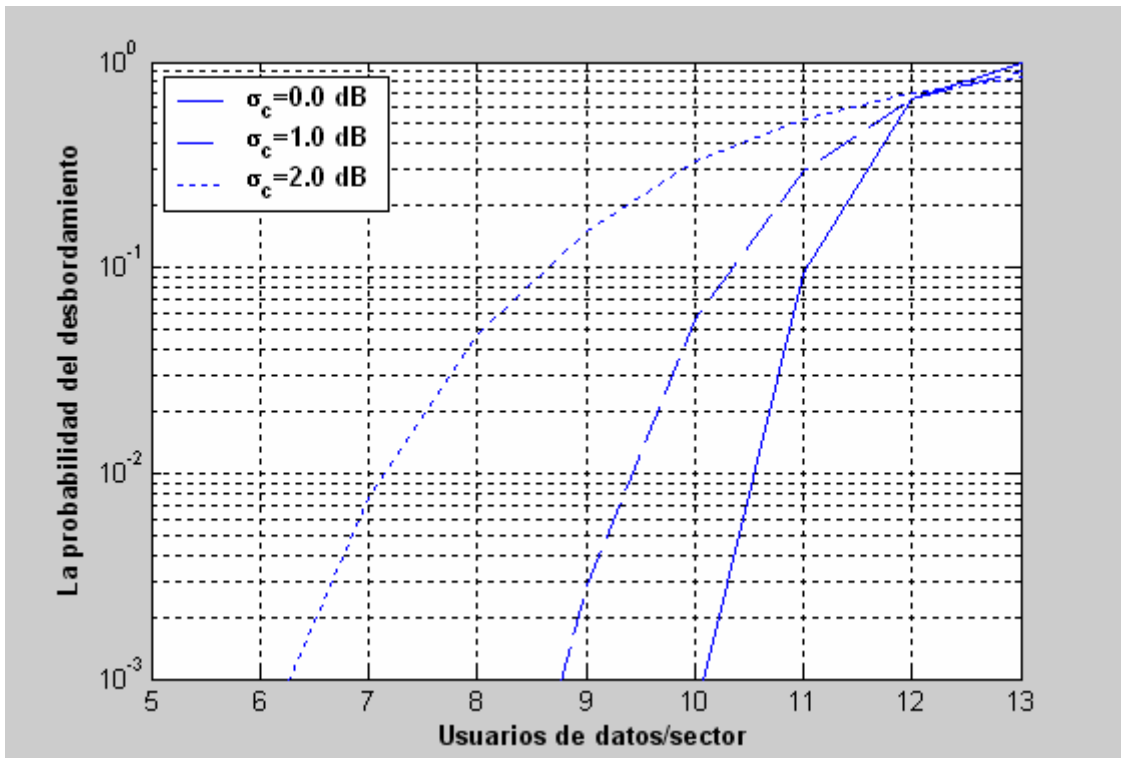


Figura 5.32: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha y una curva a la izquierda del sector

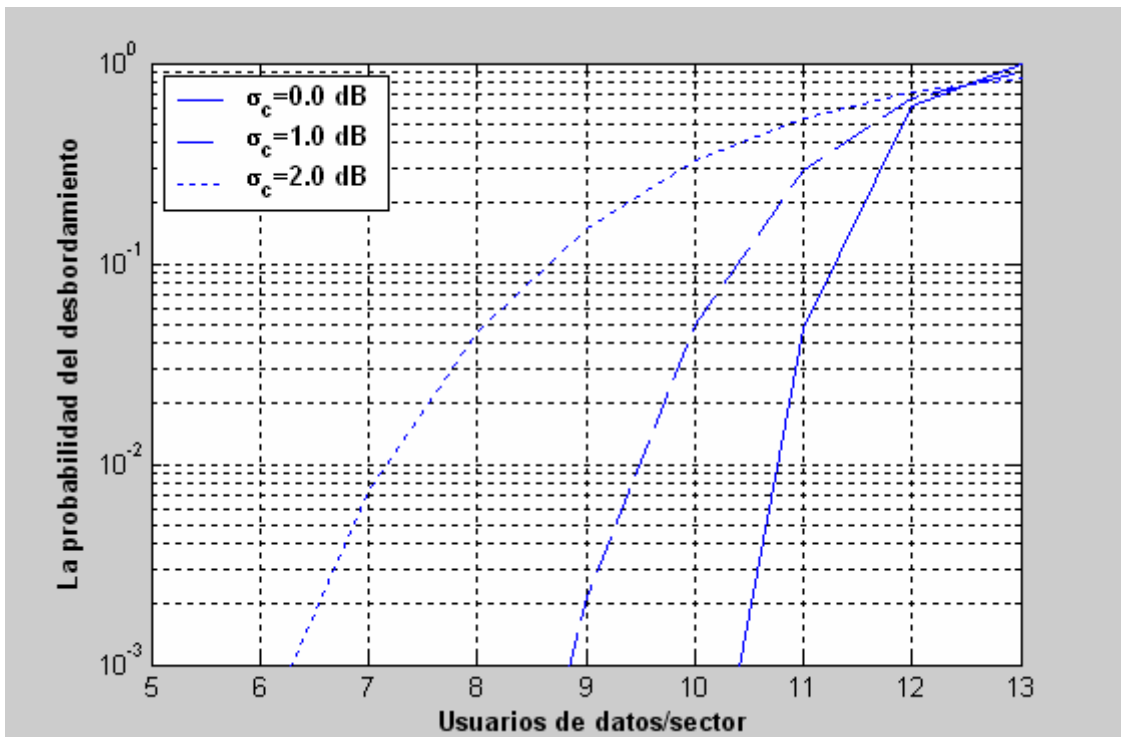
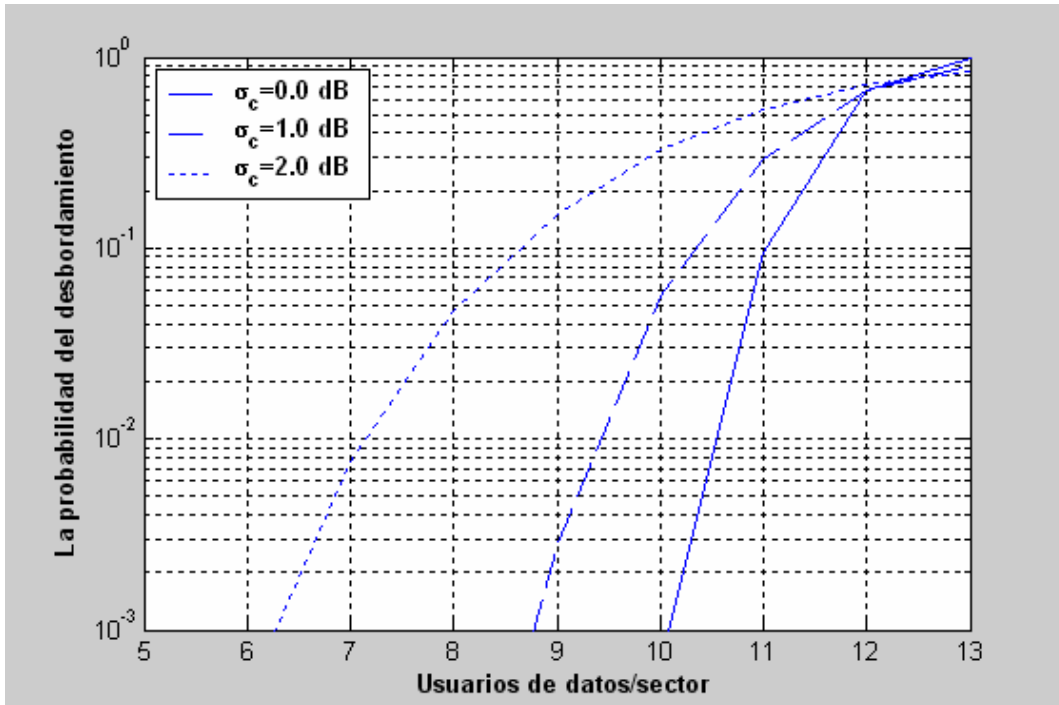
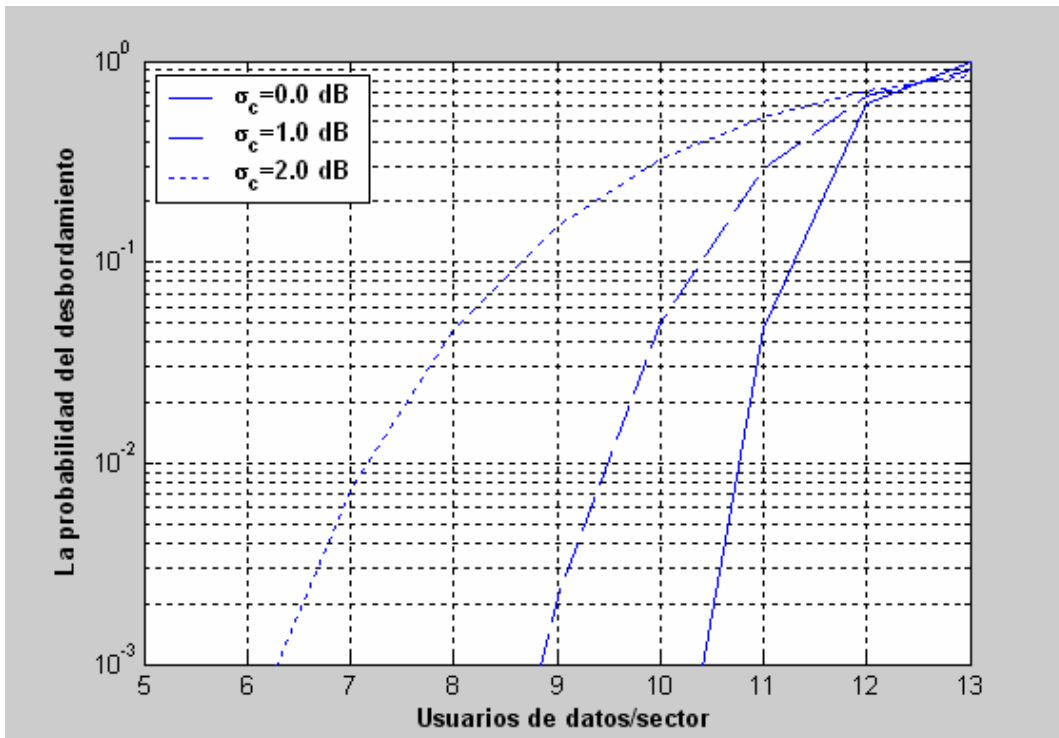


Figura 5.33: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha y una curva a la izquierda del sector



**Figura 5.34: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha y dos curvas a la izquierda del sector**

En las Figuras (5.32), (5.33), (5.34) y (5.35), el aumento de la capacidad se debe nuevamente a las curvas a la derecha y apenas se ve motivado por las curvas de la izquierda para cada uno de los cuatro casos mencionados.



**Figura 5.35: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha y dos curvas a la izquierda del sector**

A continuación, en las tablas (5.7) y (5.8) se mencionan los resultados obtenidos en cuanto a capacidad para cada caso para una probabilidad del desbordamiento del 1%.

**Tabla 5.7 Capacidad del uplink del sector para distintas  $\sigma_c$**

Tipo de curvas	$\sigma_c=0.0$ (dB)	$\sigma_c=1.0$ (dB)	$\sigma_c=2.0$ (dB)
Sin curvas	9.92	8.9	6.76
1Dcha	10.55	9.42	6.95
2Dcha	10.76	9.5	7.17
1Izqda	9.922	8.95	6.765
2Izqda	9.92	8.9	6.76
1Dcha 1Izqda	10.56	9.43	6.97
2Dcha 1Izqda	10.77	9.51	7.17
2Izqda 1Dcha	10.57	9.425	6.98
2Dcha 2Izqda	10.77	9.52	7.17

Podemos observar en la tabla (5.7), como los cambios ocasionados en la capacidad de número de usuarios, son mínimos. De aquí se puede extraer que las pérdidas ocasionadas en la transmisión de datos son mucho menores, esto se debe a que se parte de un valor de potencia de transmisión mucho más elevado que para voz.

A continuación, analizaremos varios casos para observar los efectos provocados por su variación existiendo una curva a la derecha a 500 metros del punto de referencia del sector bajo estudio:

**Tabla 5.8: Variación del radio de cobertura y de la capacidad para distintos  $n_g$**

$n_g$	R (m)	$\sigma_c=1.0$ (dB)
0.01	840	9.42
0.015	895	10.175
0.02	925	10.55
0.025	940	10.76

Fundamentalmente, el efecto será parecido para el nivel de lóbulos secundarios, sólo que su efecto en la variación de la región de cobertura y de la capacidad de número de usuarios será menor.

Una observación apreciable en la tabla (5.8), sobre el coeficiente del modo de propagación, es que provoca un efecto diferente sobre cada uno de los parámetros de la tabla anterior.

La capacidad, nuevamente, vuelve a aumentar debido a que los valores obtenidos en las pérdidas ocasionadas por las interferencias descienden de forma relevante.

En cuanto al radio de cobertura, tiene que ver con el aumento considerable de las pérdidas básicas, de forma que el punto en el cual las pérdidas de la estación base bajo estudio y la estación base interferente alcanzan el mismo valor antes para una distancia inferior a la de la situación inicial.

Como ya sabemos, el punto en el cual las pérdidas ocasionadas para la estación base bajo estudio y la estación base interferente son iguales, será la región de cobertura que se tomará como referencia.

### 5.1.8 Análisis de diferentes casos para estudio conjunto (voz y datos) en función de las curvas

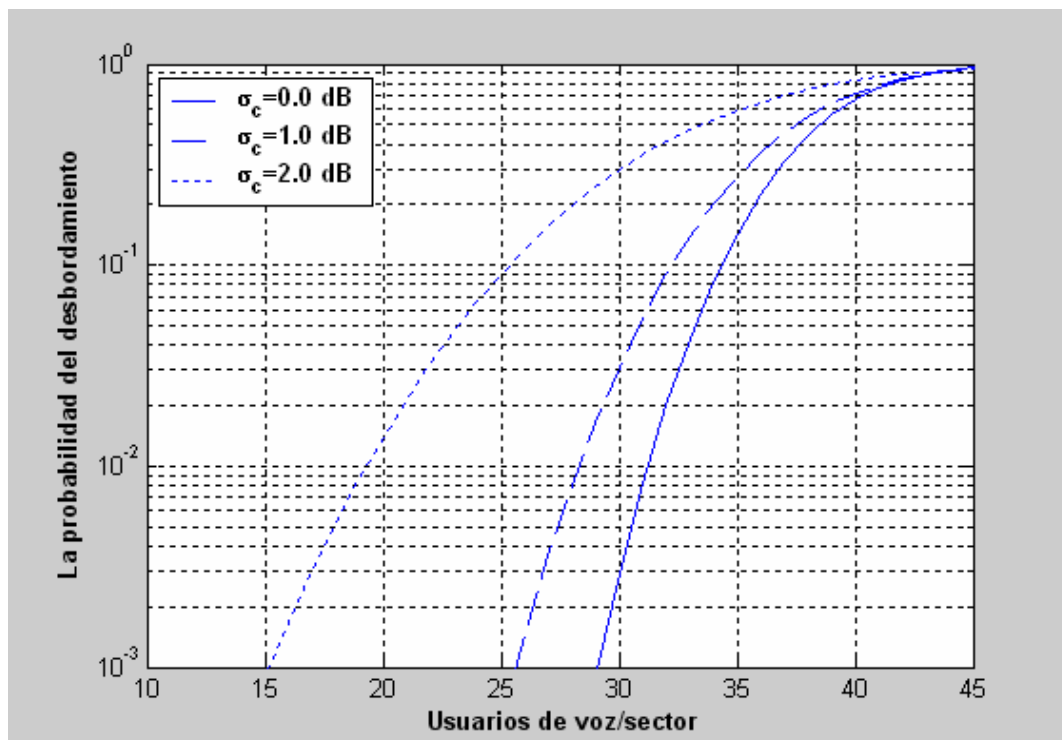
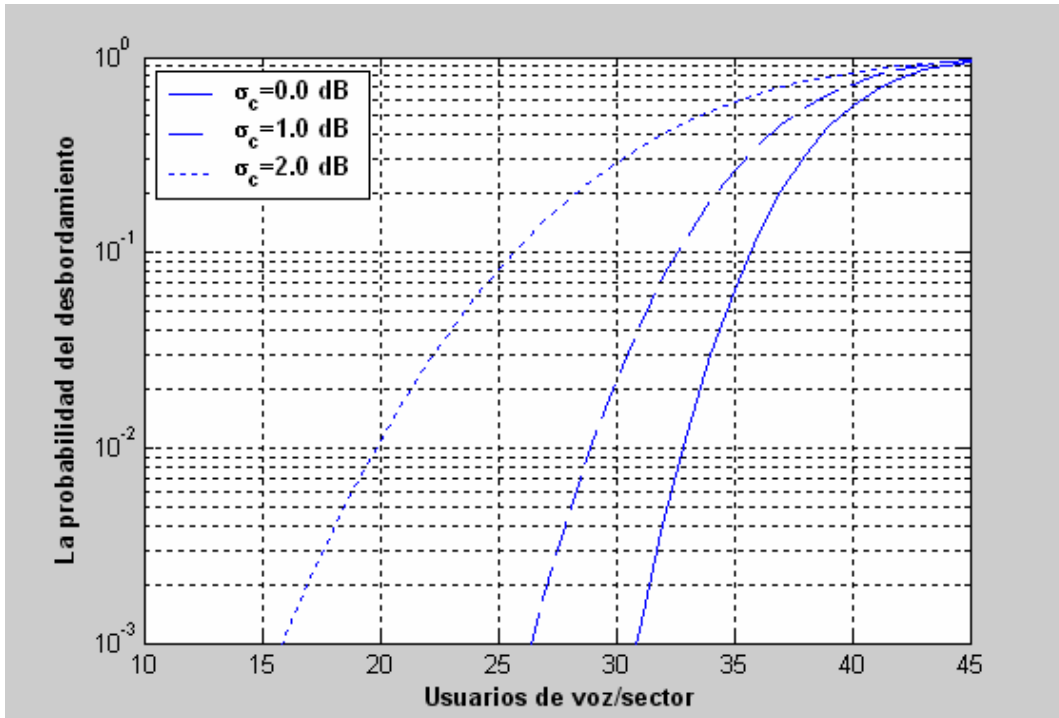
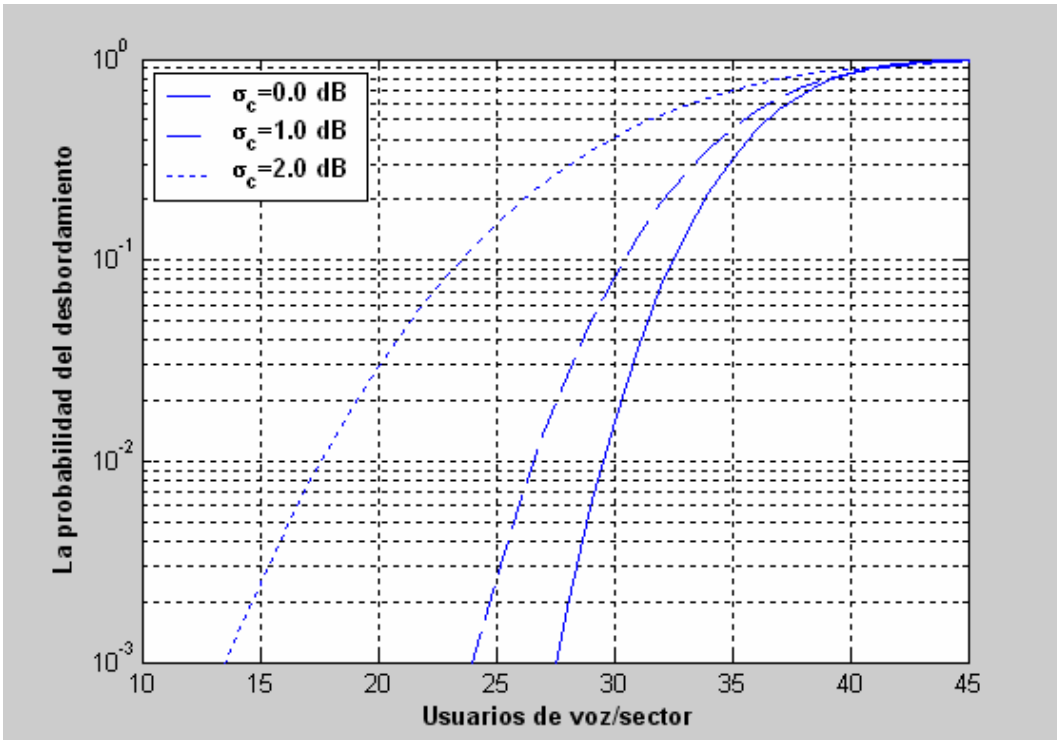


Figura 5.36: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha a 500 metros del sector



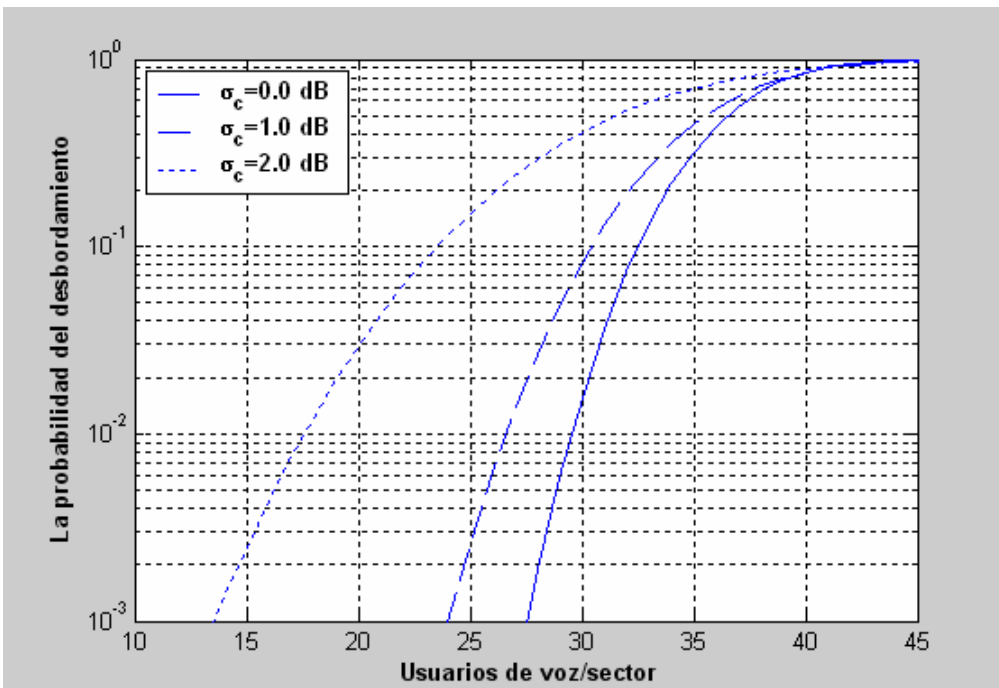
**Figura 5.37: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha a 500 metros del sector**

Observamos en las Figuras (5.36) y (5.37) como nuevamente se produce un ascenso apreciable de la capacidad. Ya se hable de un servicio por separado o conjunto las consecuencias que se derivan de la aparición de curvas en el lugar bajo estudio van a ser las mismas, es decir, un aumento notable de la capacidad con curvas a la derecha del sector bajo estudio y un aumento de ésta muy pequeño a la izquierda del sector bajo análisis.



**Figura 5.38: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la izquierda a 500 metros del sector**

En la Figura (5.38) y en las anteriores figuras se ha tomado la distancia de 500 metros por seguir un acuerdo a la hora de realizar comparaciones y poder observar como afecta una curva en el punto medio de la región de cobertura.



**Figura 5.39: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la izquierda a 500 metros del sector**

Nuevamente, las curvas a la izquierda no afectan apenas a los resultados obtenidos de capacidad. Queda presente de nuevo claramente en la Figura (5.39) si la comparamos con la Figura (5.14).

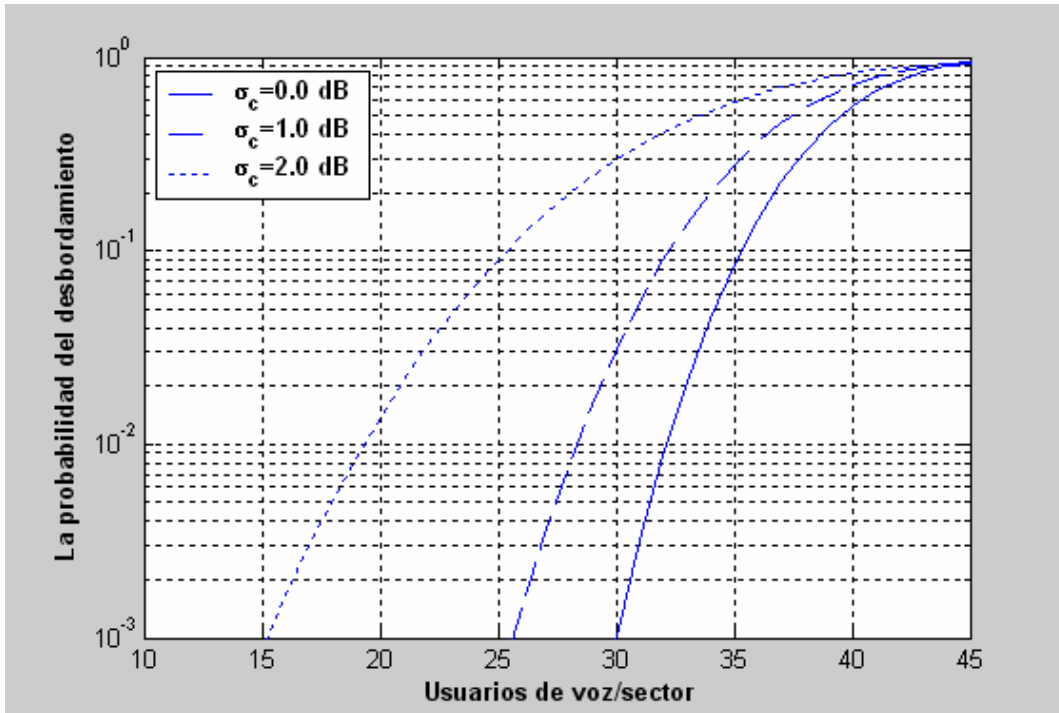
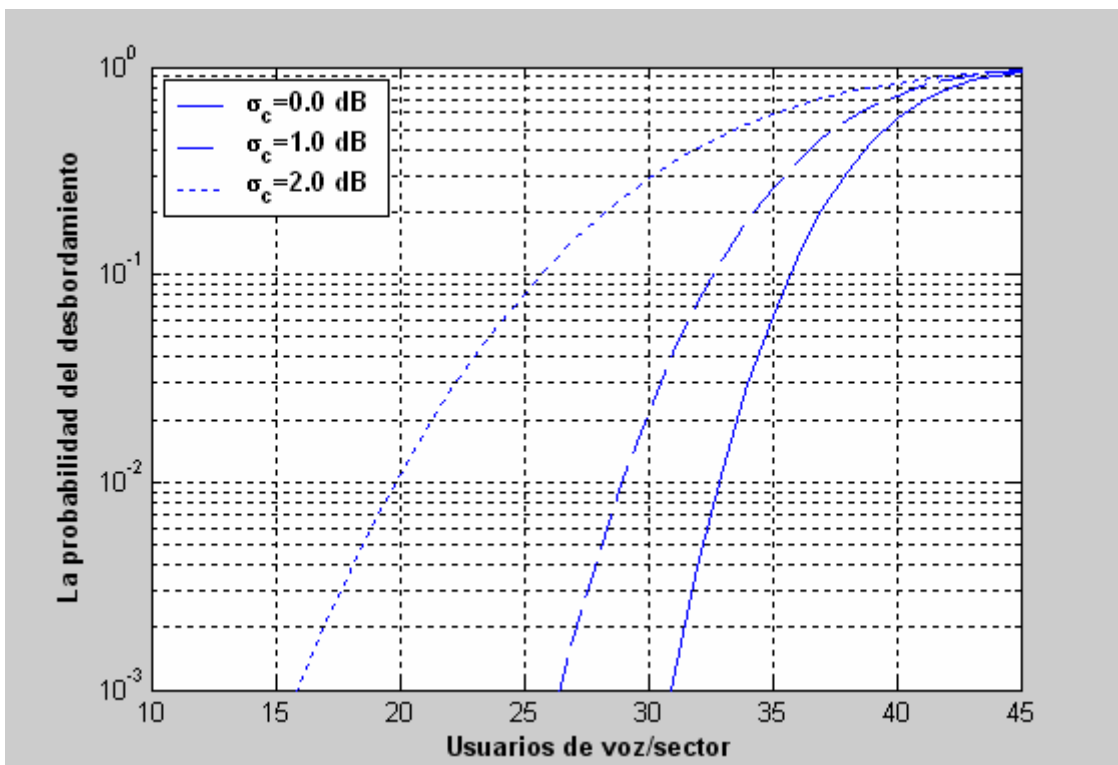
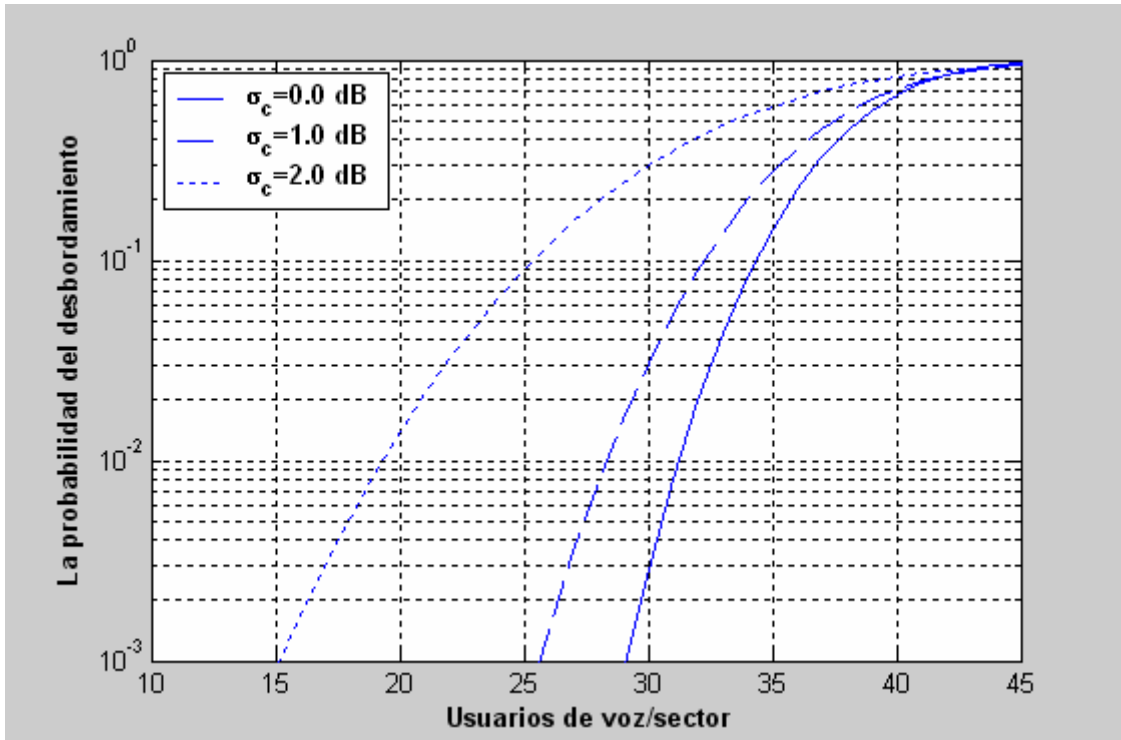


Figura 5.40: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha y una curva a la izquierda a 500 metros del sector

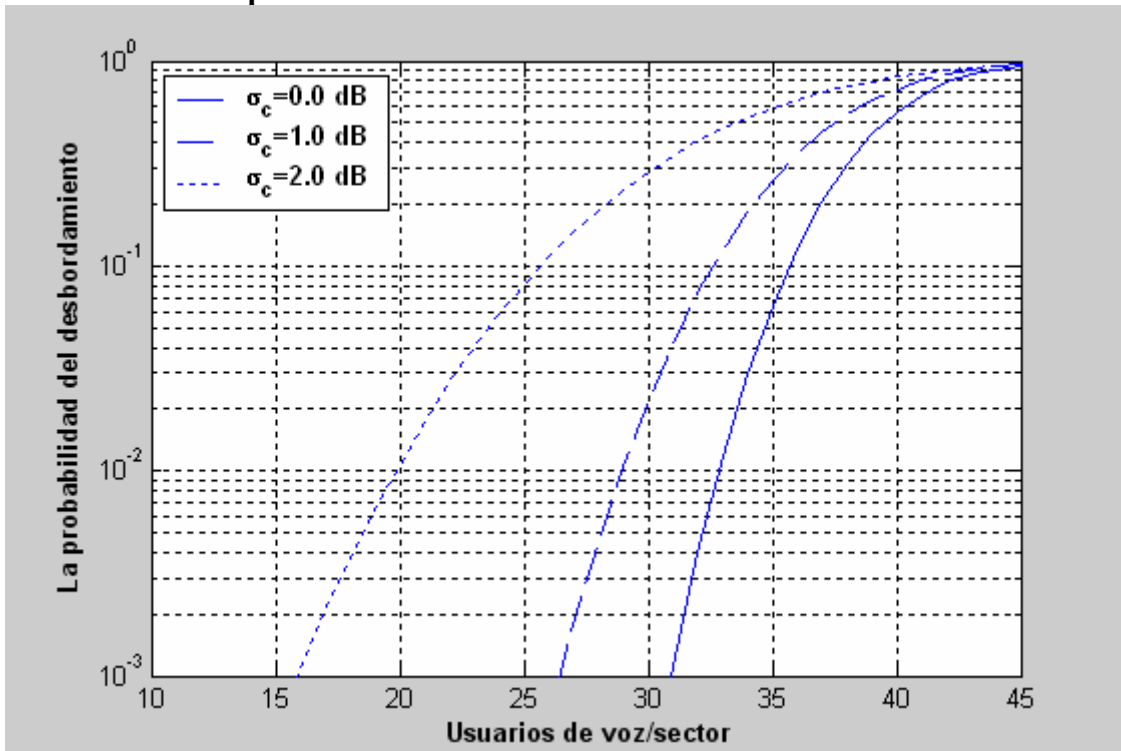




**Figura 5.41: Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha y una curva a la izquierda a 500 metros del sector**



**Figura 5.42: Probabilidad del desbordamiento existiendo una curva a la derecha y dos curvas a la izquierda a 500 metros del sector**



**Figura 5.43 Probabilidad del desbordamiento existiendo dos curvas a la derecha y dos curvas a la izquierda a 500 metros del sector**

Desde la Figura (5.40) a la (5.43), nuevamente observamos que la variación de capacidad viene dada por la aparición de curvas a la derecha del sector de referencia. Si esas curvas las estudiáramos para otro sector y se encontraran a la derecha de dicho sector hipotético, la capacidad del nuevo sector si vendría dada por una subida.

Cabe destacar que en nuestros estudios siempre tomaremos un sector de referencia y los demás se tomarán como sectores interferentes. En nuestro caso, volvemos a hablar de cinco sectores donde cuatro de los cuales generaran interferencia al sector bajo estudio.

En la tabla (5.9) podemos observar como varía la capacidad en función de la colocación de las curvas para el servicio conjunto de voz y de datos.

**Tabla 5.9: Capacidad del uplink del sector para distintas  $\sigma_c$**

Tipo de curvas	$\sigma_c=0.0$ (dB)	$\sigma_c=1.0$ (dB)	$\sigma_c=2.0$ (dB)
Sin curvas	29.53	26.60	17.58
1Dcha	31.22	28.32	19.3
2Dcha	32.83	28.93	20
1Izqda	29.55	26.60	17.61
2Izqda	29.55	26.61	17.62
1Dcha 1Izqda	32.15	28.34	19.32
2Dcha 1Izqda	32.86	28.95	20
2Izqda 1Dcha	31.24	28.34	19.31
2Dcha 2Izqda	32.86	28.95	20.08

A continuación analizaremos varios casos para observar los efectos provocados por su variación existiendo una curva a la derecha a 500 metros del punto de referencia del sector bajo estudio:

**Tabla 5.10: Capacidad del uplink del sector para distintas  $\sigma_c=1$ dB**

$n_g$	R (m)	$\sigma_c=1.0$ (dB)
0.01	840	28.32
0.015	895	32.26
0.02	925	34.22
0.025	940	35

En resumen viendo las tablas (5.9) y (5.10), los efectos ocasionados para usuarios de datos y voz-datos son los mismos que los mencionados para voz.

## **5.2 Estudio para microcélulas en forma de puro (Cigar-Shaped) para servicio de metro**

### **5.2.1 Introducción**

Cabe destacar que el comportamiento en un túnel equivale a realizar una emisión de ondas electromagnéticas sobre una guía de onda. Apareciendo un coeficiente  $n$ , también llamado coeficiente de las guías de onda. Como era de esperar, anteriormente se constató que un incremento de este término provoca un ascenso de la capacidad del número de usuarios. Esto se debe a que coeficiente refleja el número de dB que hay presente por unidad de longitud.

Por tanto, cuanto mayor sea, mejores serán las condiciones de propagación en el túnel bajo estudio.

Por otra parte, en los sucesivos análisis llevados a cabo, se ha estudiado detenidamente el resultado de la capacidad del número de usuarios para diferentes escenarios. Si se observa detenidamente, en todos ellos, se han utilizado los mismos valores con cada uno de los parámetros necesarios para realizar los cálculos. Este hecho relevante se debe a que se ha supuesto que cada uno de los estudios corresponde a un medio similar donde las desviaciones producidas en las variables aleatorias presentes en el sistema son siempre las mismas. Como bien se puede deducir, esta idea se puede aplicar a los estudios teóricos, pero en la práctica siempre podrá haber algún factor que no se haya tenido en cuenta. Por este motivo, hablamos de parámetros auxiliares que sumamos a las fórmulas que vienen determinados por una variable aleatoria.

En el estudio que se irá detallando sucesivamente, se ha decidido analizar el peor caso, para el cual el metro se encuentra justo en el borde de la región de cobertura. Por tanto, la capacidad que se obtenga como resultado de cálculos sucesivos será la peor que se pueda obtener para un servicio de metro.

Con los resultados obtenidos, se podrá decidir si variar los parámetros para mejorar la capacidad de forma que cuando un viajero de metro utilice el servicio de telefonía móvil tenga una alta probabilidad de poder ser atendido.

Por generalizar el caso, se ha elegido un metro de 80 metros de longitud, de los cuales 40 metros se encuentran dentro de la región de cobertura y los otros 40 metros se encuentran fuera, pudiendo ser atendido el usuario por otra estación base. Como bien se puede deducir, estamos hablando de uno de los peores casos que se pueden dar en el servicio de metro para el estudio de su capacidad.

## 5.2.2 Modelo de propagación

En primer lugar, hablaremos de las pérdidas básicas de propagación presentes en las expresiones (5.35) y (5.36) [3]:

$$L_p(dB) \approx K + 10 \log_{10}(r^s) + L_1 + \xi_1 \quad \text{si } r \leq R_b \quad (5.35)$$

$$L_p(dB) \approx K + 10 \log_{10}(R_b^s) + n(R - R_b) + L_2 + \xi_2 \quad \text{si } r > R_b \quad (5.36)$$

Las pérdidas  $L_1$  y  $L_2$  indican unas pérdidas ocasionadas por curvas.

$h_b$  es la altura de la antena de la estación base.

$h_m$  es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\xi_1$  y  $\xi_2$  son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  respectivamente. Generalmente, estas variables aleatorias alcanzan valores inferiores a 10 dB. A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar:

$$s = 1.75 \text{ a } 2.25$$

$$\sigma_1 = 1.5 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 1.5 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

A continuación, se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. En el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco microceldas.

A continuación, se expondrán unas fórmulas de pérdidas ocasionadas por interferencias de señal. En el modelo utilizado para el análisis de la capacidad en el uplink se han utilizado cinco microceldas [12].

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} \leq R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(10 * \log r_{im}^s + L_{bim}) / 10}}{10^{(10 * \log r_{id}^s + L_{bid}) / 10}} \quad (5.37)$$

- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} \leq R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(10 * \log r_{im}^s + L_{bim}) / 10}}{10^{(10 * \log R_b^s + n(r_{im} - R_b) + L_{bid}) / 10}} \quad (5.38)$$

- Si  $r_{id} \leq R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(10 * \log R_b^s + n(r_{im} - R_b) + L_{bim}) / 10}}{10^{(10 * \log r_{id}^s + L_{bid}) / 10}} \quad (5.39)$$

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $L(r_{id}, r_{im})$  es

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{(n(r_{im} - R_b) + L_{bim}) / 10}}{10^{(n(r_{id} - R_b) + L_{bid}) / 10}} \quad (5.40)$$

$\xi_{id}$  y  $\xi_{im}$  poseen las relaciones de:

- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_1$
- Si  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_1$  y  $\xi_{im} = \xi_2$
- Si  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$  entonces  $\xi_{id} = \xi_2$  y  $\xi_{im} = \xi_2$

La expresión (5.41) se utilizará en las relaciones posteriores:

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) = \begin{cases} 1, \rightarrow L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im}) / 10} \leq 1 \\ 0, \rightarrow \text{resto} \end{cases} \quad (5.41)$$

Se asume una densidad uniforme de usuarios en cada sector  $\rho = N_u / R$  [3].

$$E[I_{s0}]_r \approx \alpha_s \rho_s \int_{s0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) U(r) dr \quad (5.42)$$

donde a su vez el parámetro  $f$  viene dado por (5.43):

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right] = \\ &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \end{aligned} \quad (5.43)$$

$\beta = \frac{\ln 10}{10}$ , siendo  $\alpha$  el factor de actividad (0.63 para voz y 1.0 para datos).

A continuación hallaremos una relación para  $\sigma^2$  dada por las expresiones (5.44), (5.45) y (5.46):

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_1$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad (5.44)$$

- Cuando  $r_{id} < R_b$  y  $r_{im} > R_b$  o  $r_{id} > R_b$  y  $r_{im} < R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_1$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad (5.45)$$

- Cuando  $r_{id}$  y  $r_{im} > R_b$ ,  $\sigma_{id} = \sigma_2$  y  $\sigma_{im} = \sigma_2$  y por tanto

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \quad (5.46)$$

La función  $Q(x)$  viene dada por (5.46):

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (5.47)$$

Donde el valor esperado intercelular teniendo en cuenta las dos regiones es:

A continuación, se hará un análisis detenido de la esperanza referida a las interferencias intercelulares e intracelulares como medida de estas.

Cabe destacar, que las medidas más utilizadas serán la esperanza y la desviación estándar, que como veremos se analizarán justo a continuación [3]:

$$E[I_{s1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s1} L(r_{id}, r_{im}) E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}\right] U(r) dr \quad (5.48)$$

Las interferencias ocasionadas por la parte derecha de la región S1 vienen dadas por la expresión (5.49):

$$E[I]_{r,s} = E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s} \quad (5.49)$$

Finalmente, la fórmula que se obtiene teniendo en cuenta el nivel de lóbulos secundarios es la siguiente:

$$E[I]_{inter,s} = E[I]_{r,s} (1 + SII) \quad (5.50)$$

Potencia interferente intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} \quad (5.51)$$

Potencia interferente intracelular:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha N_u (1 + SII) \quad (5.52)$$

Potencia interferente final:

$$E[P]_{inf,t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (5.53)$$

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P]_{inf,t} = \sum_{s=1}^M E[P]_{inf,t,s} \quad (5.54)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación expresaremos las fórmulas correspondientes a la varianza directamente relacionadas con la desviación estándar.

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (5.55)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (5.56)$$

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} dr \quad (5.57)$$

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im})\right]^2 =$$

$$= e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\{1/L(r_{id}, r_{im})\}\right] \quad (5.58)$$

La varianza de señal interferente debido a la región  $S_1$  en la fórmula siguiente (5.59):

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \{p\alpha_s E[(10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10})^2] - q\alpha_s^2 E[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}]\} dr$$

Varianza de la interferencia intercelular:

$$\text{var}[I]_{inter,s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\} (1 + Sll) \quad (5.60)$$

Varianza de interferencia intracelular:

$$\text{var}[I]_{int ra,s} = Nu (1 + Sll) (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (5.61)$$

Varianza de interferencia total:

$$\text{var}[I]_{t,s} = \text{var}[I]_{inter,s} + \text{var}[I]_{int ra,s} \quad (5.62)$$

Varianza de la potencia total interferente:

$$\text{var}[P_{intf}]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (5.63)$$

La varianza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$\text{var}[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (5.64)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto 'M' alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

Por otra parte, exponemos la fórmula (5.65), correspondiente a la probabilidad de desbordamiento, de vital importancia en cada uno de los estudios realizados a lo largo de todo el proyecto.

$$P_{out} = Q\left[\frac{E(P)_{t,s|N_u=N_{uMEDIO}} - E(P)_{t,s|N_u=N}}{\sqrt{\text{var}(P)_{t,s|N_u=N}}}\right] \quad (5.65)$$

Finalmente, F es un factor que viene dado por la fórmula (5.66):



$$F = \frac{\text{Interferencia Interceular}}{\text{Interferencia Intraceular}} = \frac{E[P]_{\text{inter},s}}{E[P]_{\text{intra},s}} \quad (5.66)$$

**Parámetros:**

$G_{\text{tx}}=0$  dB

$G_{\text{rx}}=12$  dB

$P_{\text{txVOZ}}=18.6$  dBm

freq= 1950 MHz

$P_{\text{txDATOS}}=25$  dBm

$N_{\text{DATOS}} = \text{Variable}$

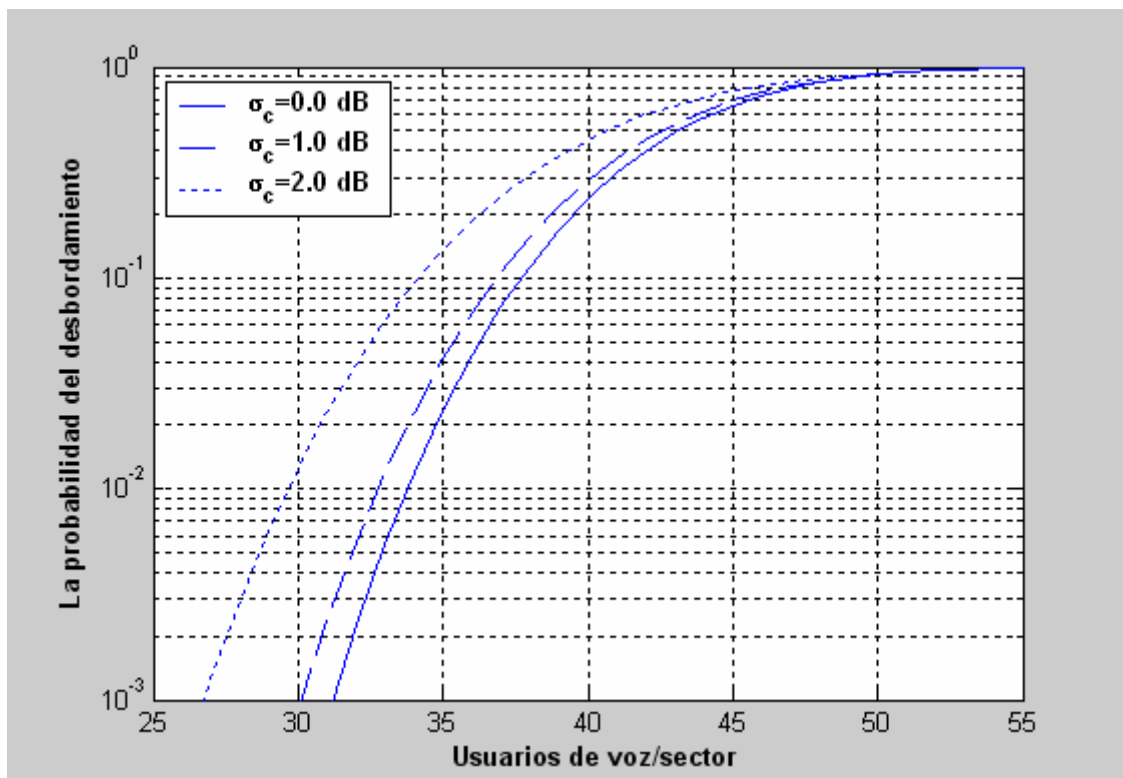
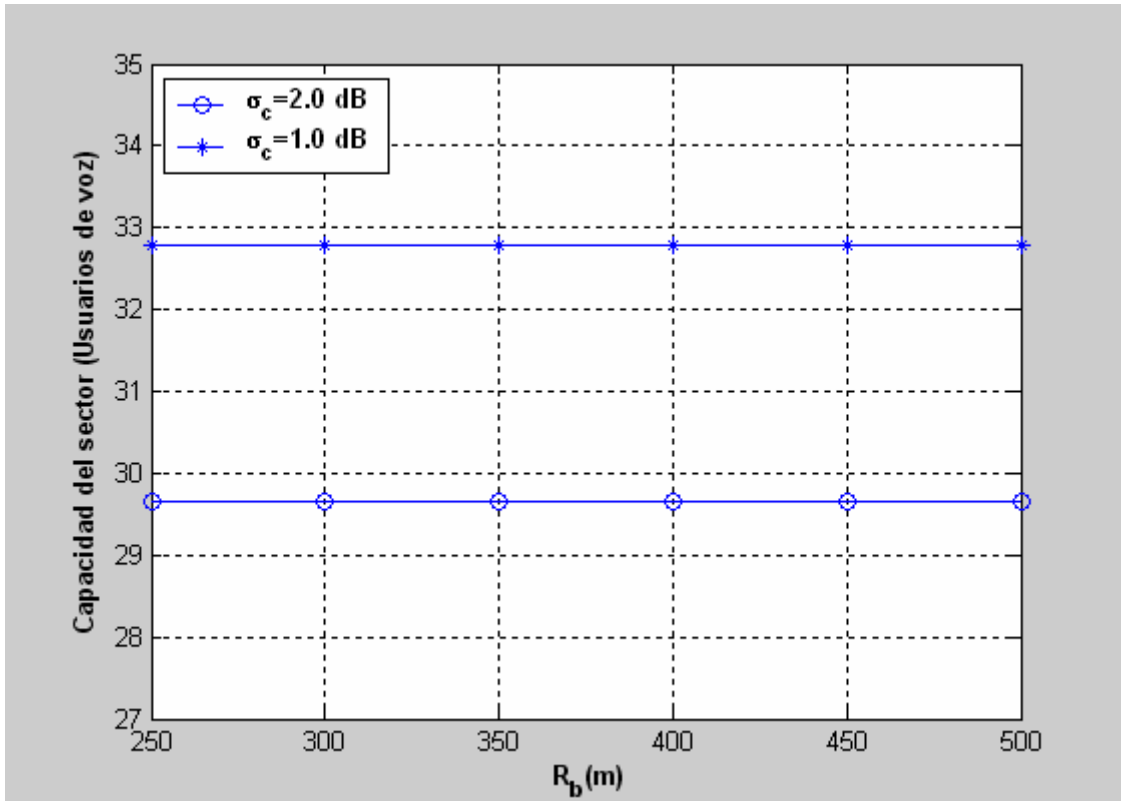
**5.2.3 Análisis numérico para voz**

Figura 5.44: Probabilidad del desbordamiento

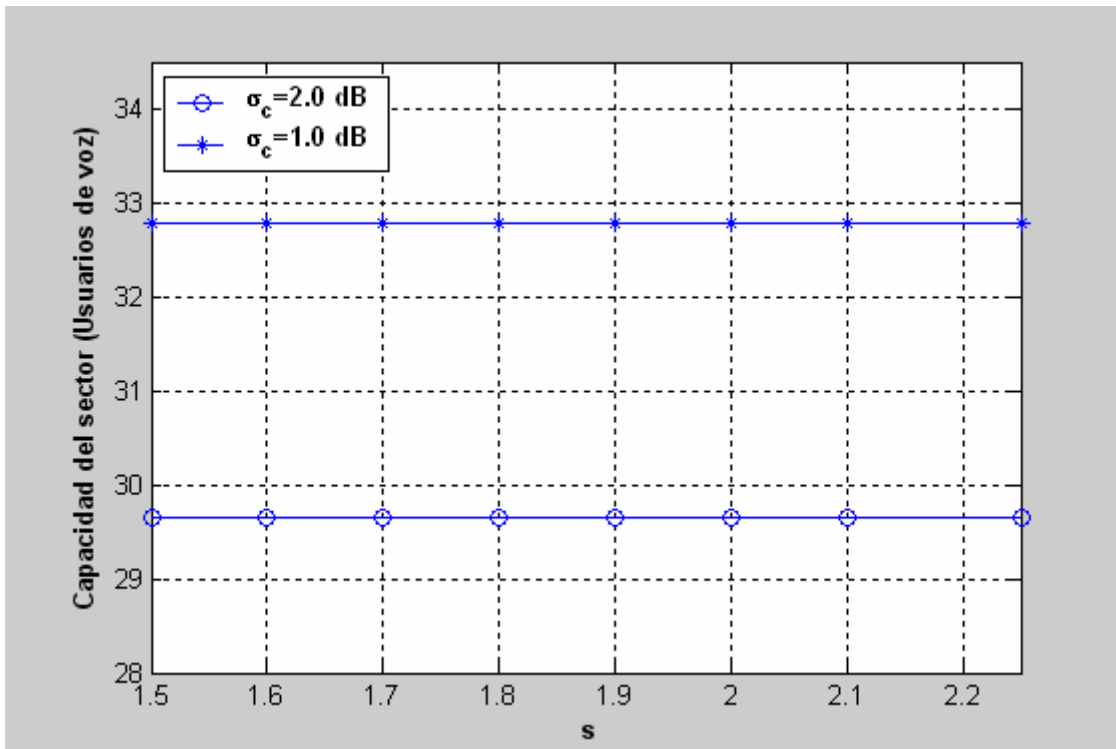


**Figura 5.45: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte**

En la Figura (5.44), podemos observar un descenso de la capacidad si comparamos con el servicio de trenes estudiado en el capítulo 3.

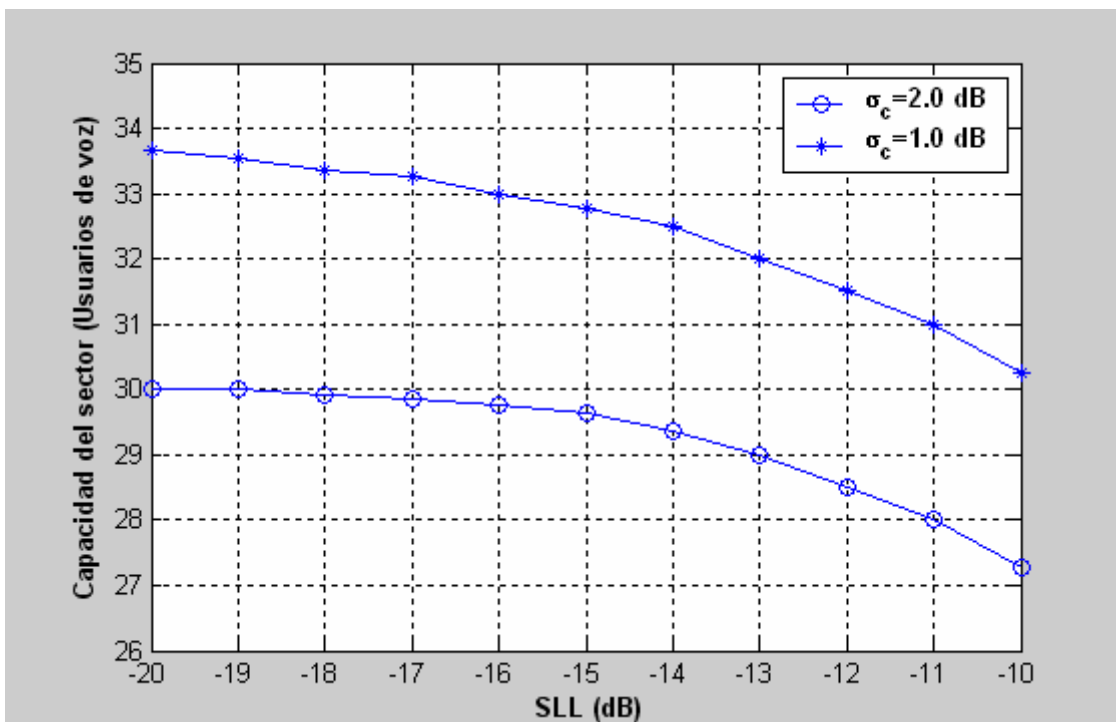
El aumento del punto de corte, en la figura (5.44), ocasiona ligeras variaciones en la capacidad que apenas son percibidas en la realidad.

En cuanto a la Figura (5.45) los cambios no son muy destacados respecto a los primeros estudios, es decir, no va a afectar apenas a los resultados que se obtengan referidos a la capacidad.



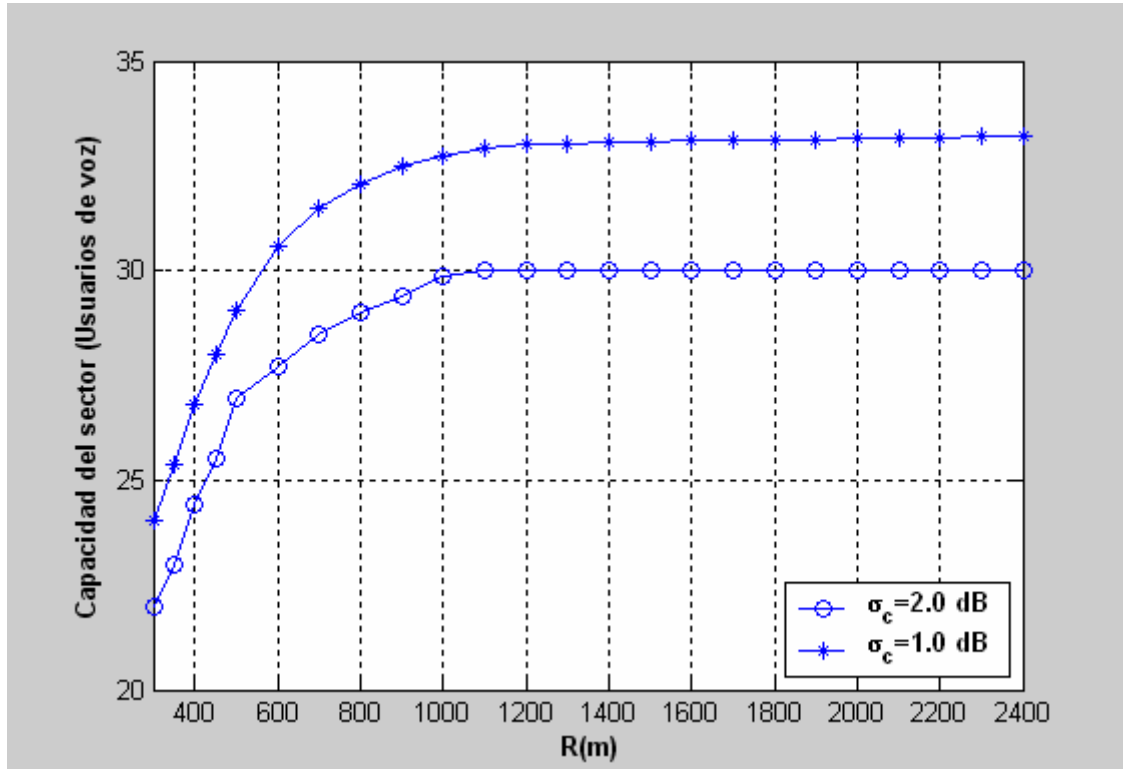
**Figura 5.46:** Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $s$

En cuanto a la Figura (5.46), podemos constatar que sucede lo mismo que en la Figura (5.45), es decir, la variación del exponente de propagación no va a provocar un incremento de la capacidad.



**Figura 5.47:** Capacidad del uplink del sector en función del SLL

Cabe destacar como el nivel de lóbulos secundarios en la Figura (5.46), varía suavemente; como ya sucedía en otras situaciones viene fundamentalmente influenciado por un ajuste de la precisión en las fórmulas utilizadas para el cálculo de la capacidad.



**Figura 5.48: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura**

En la Figura (5.48), se puede observar el comportamiento del sistema y como llega un punto aproximadamente 1000 metros para ambos casos, en los que la capacidad no se ve incrementada en mayor medida.

En la Figura (5.49), podrá observarse que a diferencia de estudios anteriores, un aumento de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se traduce en un aumento de la capacidad. Nuevamente, viene influido por las características especiales de un túnel en el que están presentes nuevos parámetros como  $n_g$  o la aplicación del modelo híbrido de propagación.

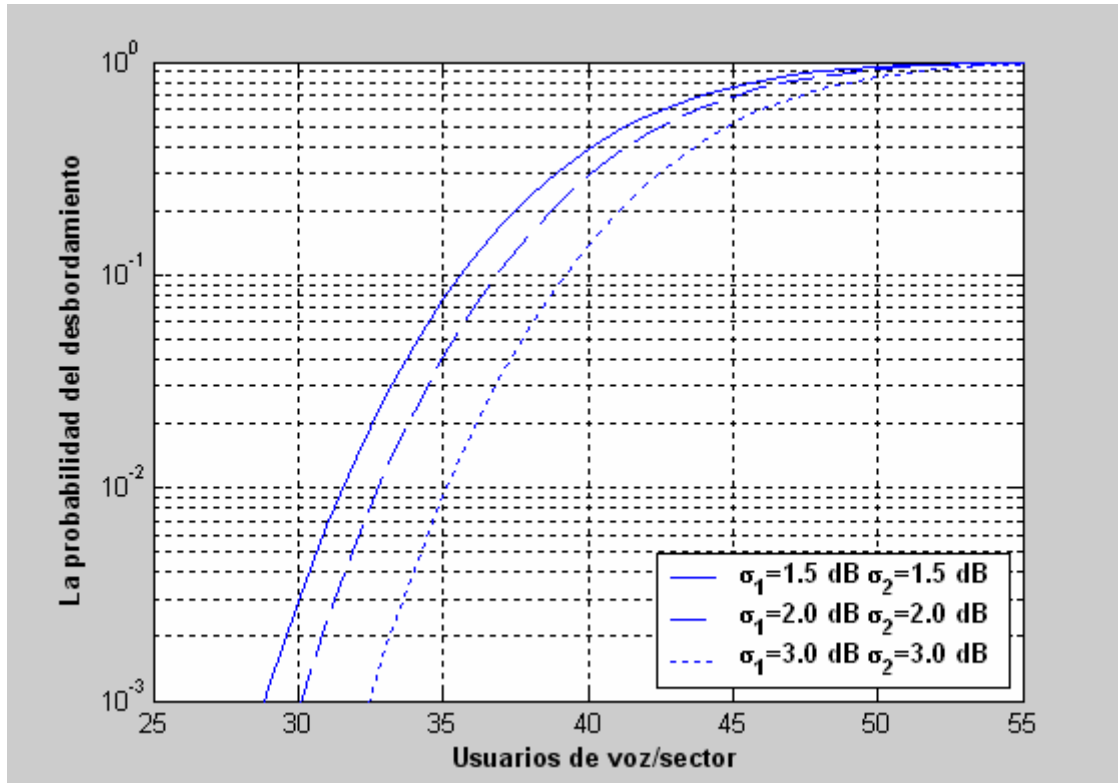


Figura 5.49: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$

A continuación analizaremos varios casos para observar los efectos provocados por su variación existiendo una curva a la derecha a 500 metros del punto de referencia del sector bajo estudio:

Tabla 5.11: Capacidad del uplink del sector

$n_g$	R(m)	$\sigma_c=1.0$ dB
0.01	1011	32.78
0.015	1008.5	33.5
0.02	1006	33.8
0.025	1003.5	34.27

Como se había mencionado anteriormente, los resultados se han comparado con los obtenidos en el estudio de la capacidad en el servicio de trenes. Como era de esperar, se ha producido un descenso significativo del número de usuarios de voz. Este hecho vuelve a reflejarse al igual que la comparación en el estudio de la capacidad en autopistas y túneles.

Para la realización de los cálculos, nuevamente, ha sido necesario tener que recurrir a utilizar las mismas fórmulas de pérdidas que las utilizadas en un servicio de transmisión de información en túneles. Si se observan las fórmulas,

la utilización del coeficiente presente en las guías de onda hace que las pérdidas ocasionadas por interferencias sean mayores que las que se habían obtenido en estudios anteriores.

Un aspecto significativo que se puede observar en la tabla (5.11), es que un aumento de la desviación típica ocasionada por dos variables aleatorias se traduce en un ascenso de la capacidad; cuando en casos anteriores en la superficie terrestre esto se reflejaba como un descenso de la capacidad. Por otra parte, los valores que alcancen estos dos parámetros nunca serán superiores a 3 dB al contrario de lo que sucede en un estudio realizado en el exterior.

En cuanto al radio de cobertura, una vez se alcancen valores superiores a 1000 metros, no va a suponer un aumento de la capacidad significativo, tendiendo a estabilizarse a un valor constante; si comparamos con el estudio realizado en autopistas difiere en que no se produce un descenso de la capacidad, este fenómeno viene influido por un comportamiento similar al de las guías de onda.

Desde un punto de vista práctico, el radio de cobertura oscilará entre 1000 y 1500 metros, pero se pretende realizar un estudio más exhaustivo para valores inferiores o superiores a estos con el fin de barajar las múltiples posibilidades que se puedan dar en el diseño de un sistema de comunicaciones utilizando WCDMA.

Por otra parte, todos estos cálculos suponen velocidades del metro inferiores a 120 km/h. En la práctica, se puede comprobar que salvo raras excepciones este tipo de vehículos de transporte no puede viajar más deprisa por el sucesivo número de paradas que debe realizar cada un corto periodo de tiempo.

## 5.2.4 Análisis numérico para datos

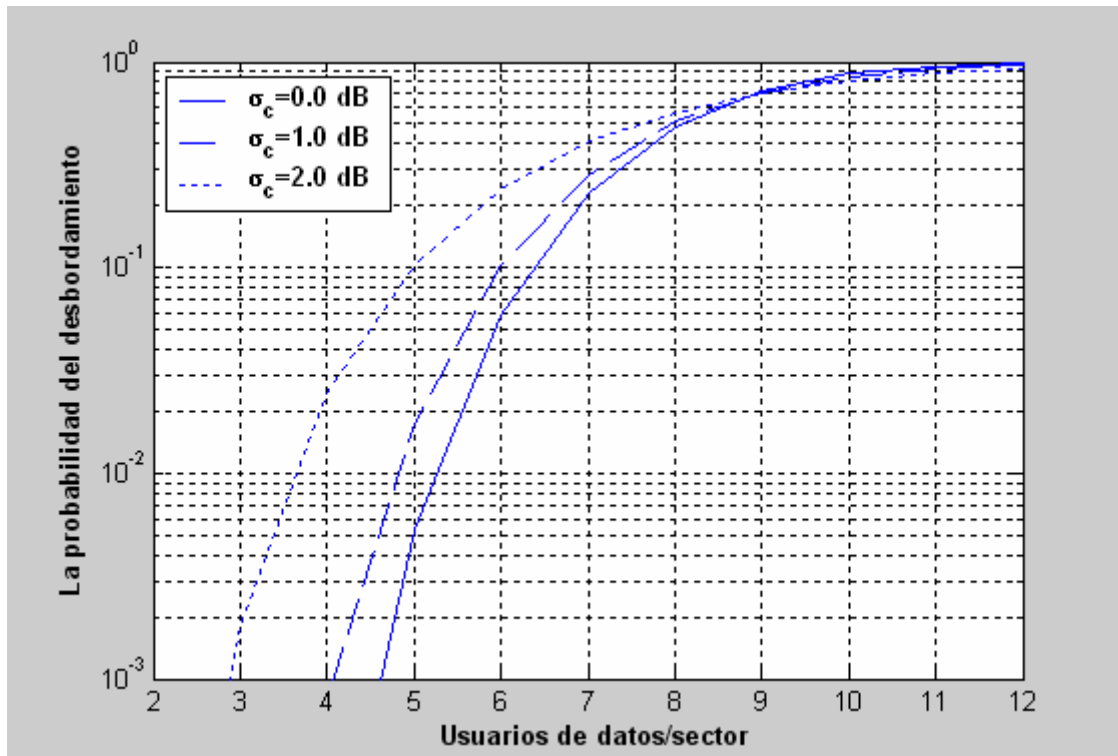


Figura 5.50: Probabilidad del desbordamiento

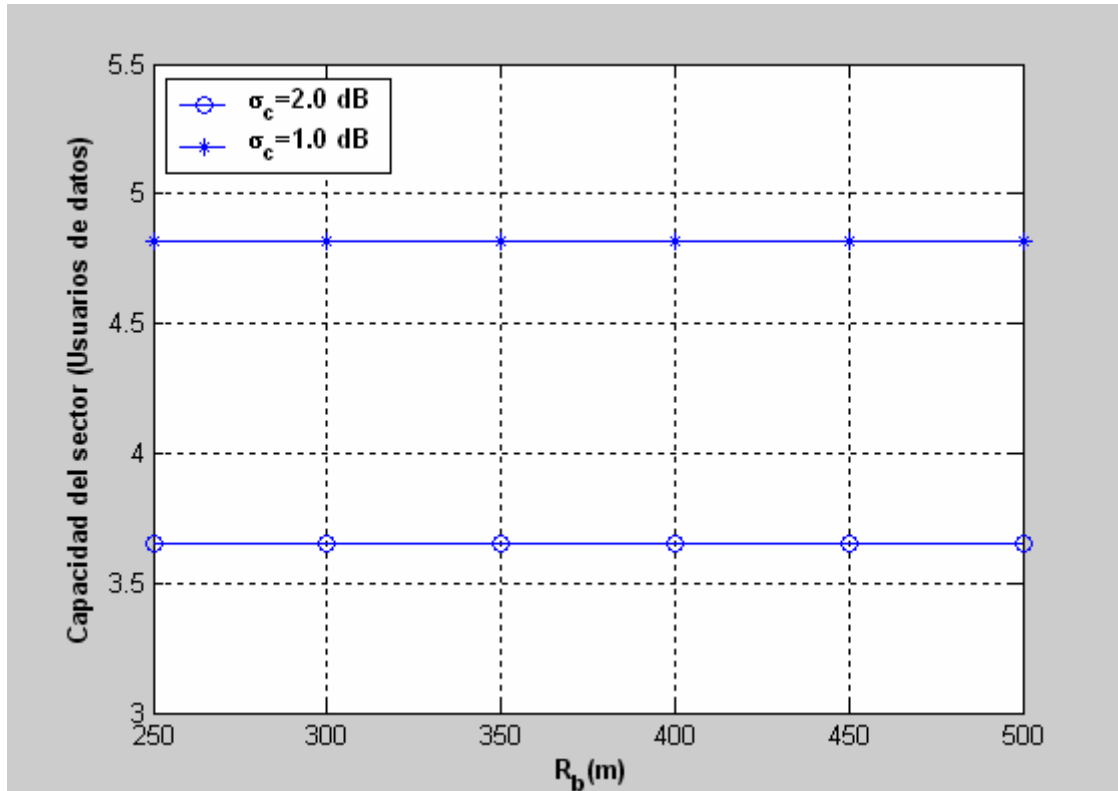
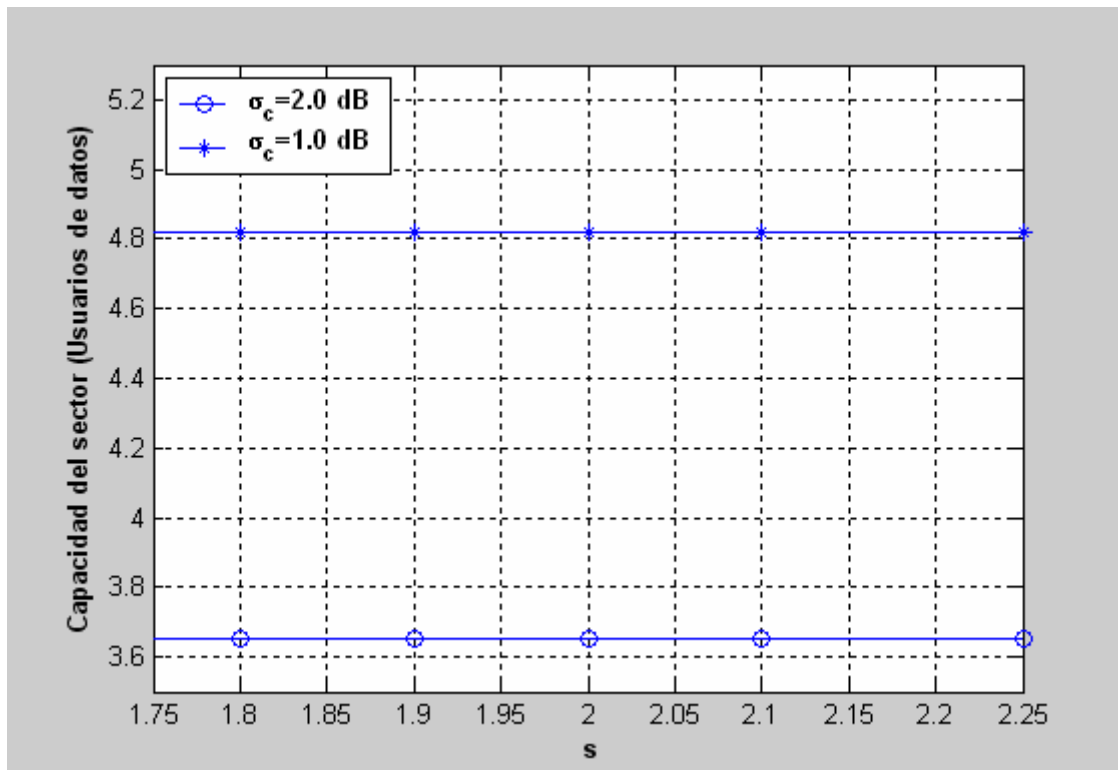


Figura 5.51: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

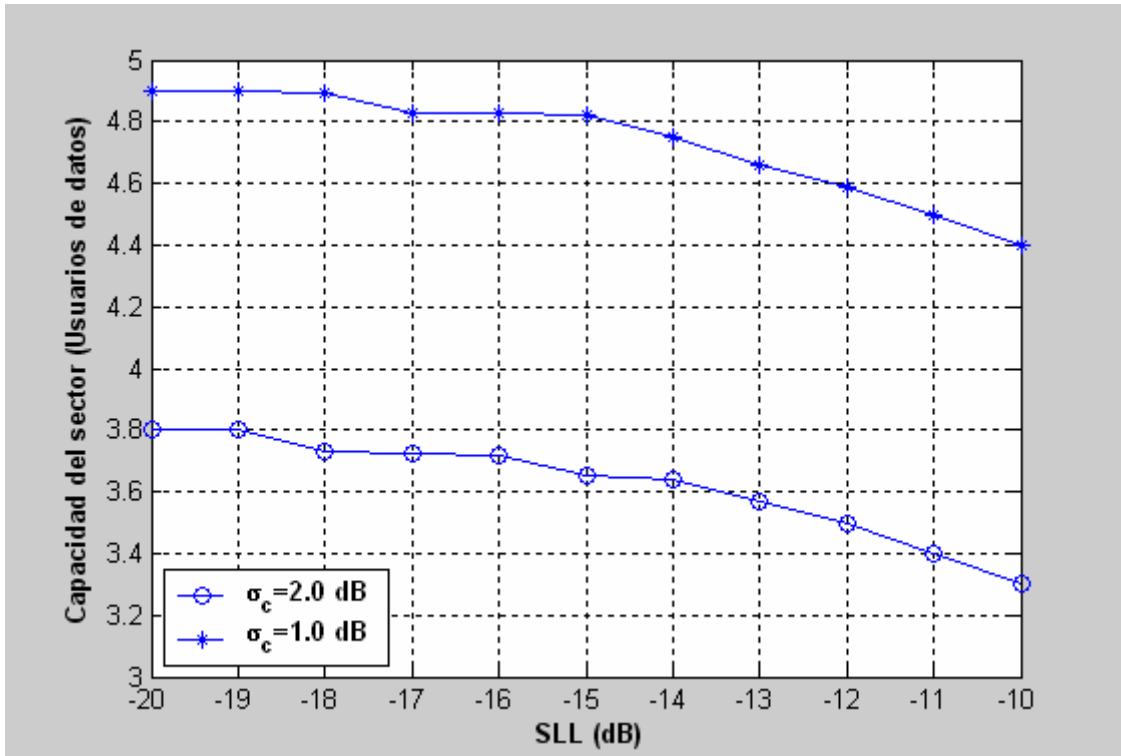
Como se puede observar en la Figura (5.50), se produce un descenso considerable de la capacidad comparando con el estudio realizado para trenes utilizando el mismo tipo de microceldas (Cigar-Shaped); cabe recordar que el estudio realizado supone el peor caso para el cual el metro se encuentra en el borde del sector.



**Figura 5.52: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación  $s$**

Basándonos en las fórmulas utilizadas y en la Figura (5.52), veremos como este parámetro afecta a las pérdidas ocasionadas por interferencias. Si se analiza detenidamente la fórmula y se le da valores para obtener diversos resultados, veremos como el exponente de propagación no provoca grandes cambios en las pérdidas ocasionadas. Este fenómeno se debe principalmente a que afecta por igual al numerador y al denominador de la fórmula bajo estudio.





**Figura 5.53: Capacidad del uplink del sector en función del SLL**

En la Figura (5.53), se puede observar un comportamiento algo diferente pudiendo apreciarse un descenso considerable a partir de -14dB.

Como ya se intuye, esta situación viene influida por el estudio de la capacidad para vagones de metro en un túnel en lugar de la superficie donde el comportamiento es completamente diferente debido a que las pérdidas por interferencias extracelulares son radicalmente distintas.

En cuanto a los resultados obtenidos referidos al radio de cobertura y los errores de desviación de las dos variables aleatorias Gaussianas, son bastante similares a los de voz salvo que como ya sabemos, difieren en los resultados de capacidad en el número de usuarios.

Por otro lado, si volvemos a destacar el hecho de que en los túneles de metro un aumento del error de desviación de estas dos variables aleatorias de las fórmulas bajo estudio provocan un ascenso de la capacidad destacable.

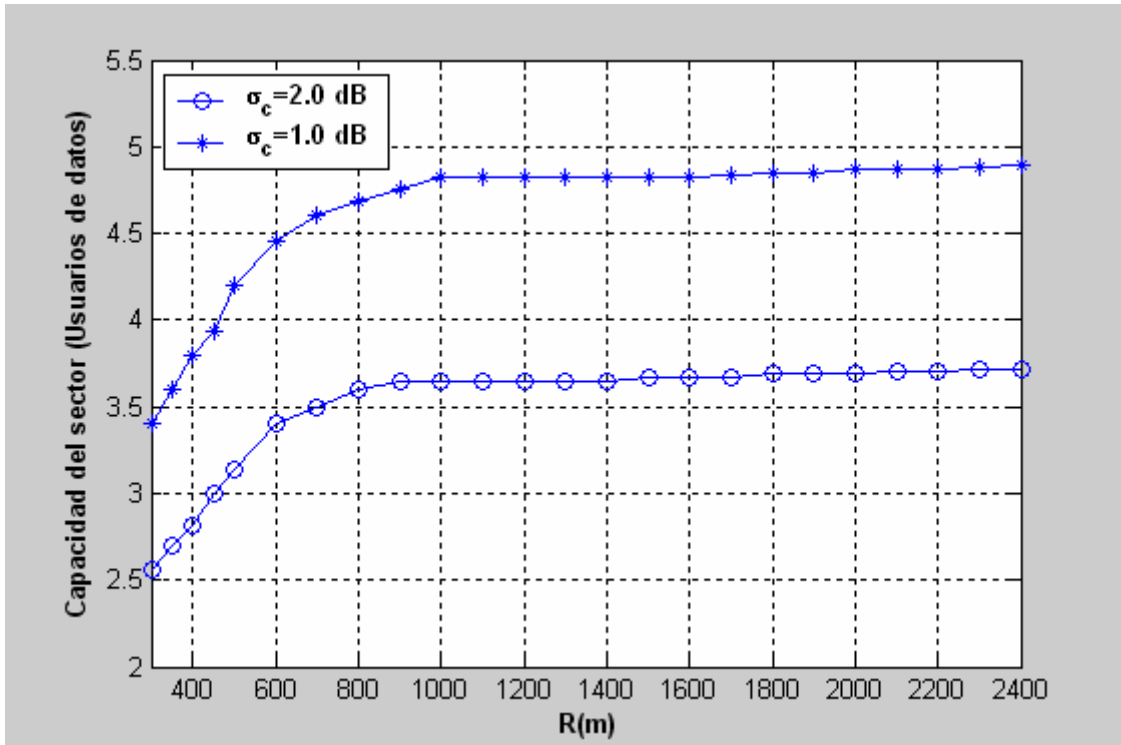


Figura 5.54: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura

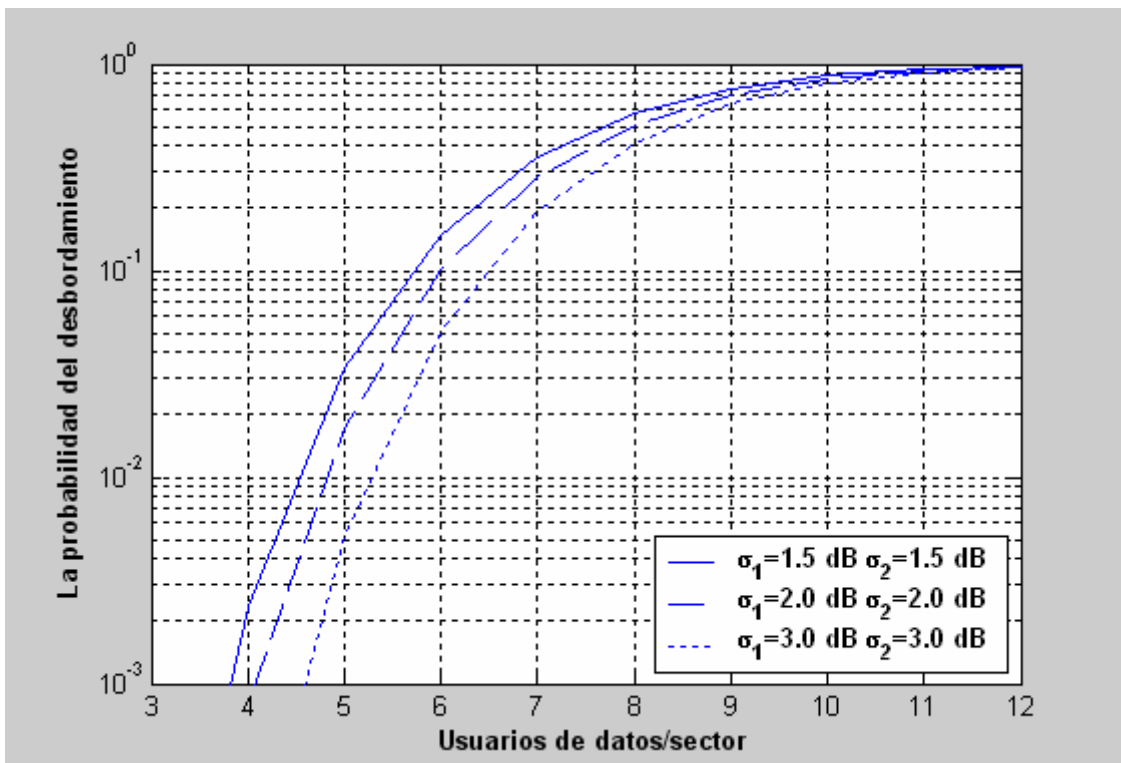


Figura 5.55: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$

Nuevamente, en la Figura (5.54), se puede observar como a partir de 1000 metros la capacidad se estabiliza. Este es un aspecto que también se cumple para el servicio de voz. Suponemos que llegará un valor de la región de

cobertura para el cual la capacidad del sistema bajo estudio descienda considerablemente.

En cuanto a la Figura (5.55), nuevamente vuelve a suceder que un incremento de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  provoca un aumento de la capacidad; en este caso de hasta casi un usuario de datos.

A continuación analizaremos varios casos para observar los efectos provocados por su variación existiendo una curva a la derecha a 500 metros del punto de referencia del sector bajo estudio:

**Tabla 5.12: Variación del radio de cobertura y de la capacidad**

$n_g$	R (m)	Capacidad para $\sigma_c = 1$ (dB)
<b>0.01</b>	<b>1003.5</b>	<b>4.82</b>
<b>0.015</b>	<b>1003.5</b>	<b>4.92</b>
<b>0.02</b>	<b>1001</b>	<b>5.04</b>
<b>0.025</b>	<b>1001</b>	<b>5.14</b>

En la tabla (5.12), podemos observar como un aumento del coeficiente de las guías de onda siempre va a ocasionar un aumento de la capacidad.

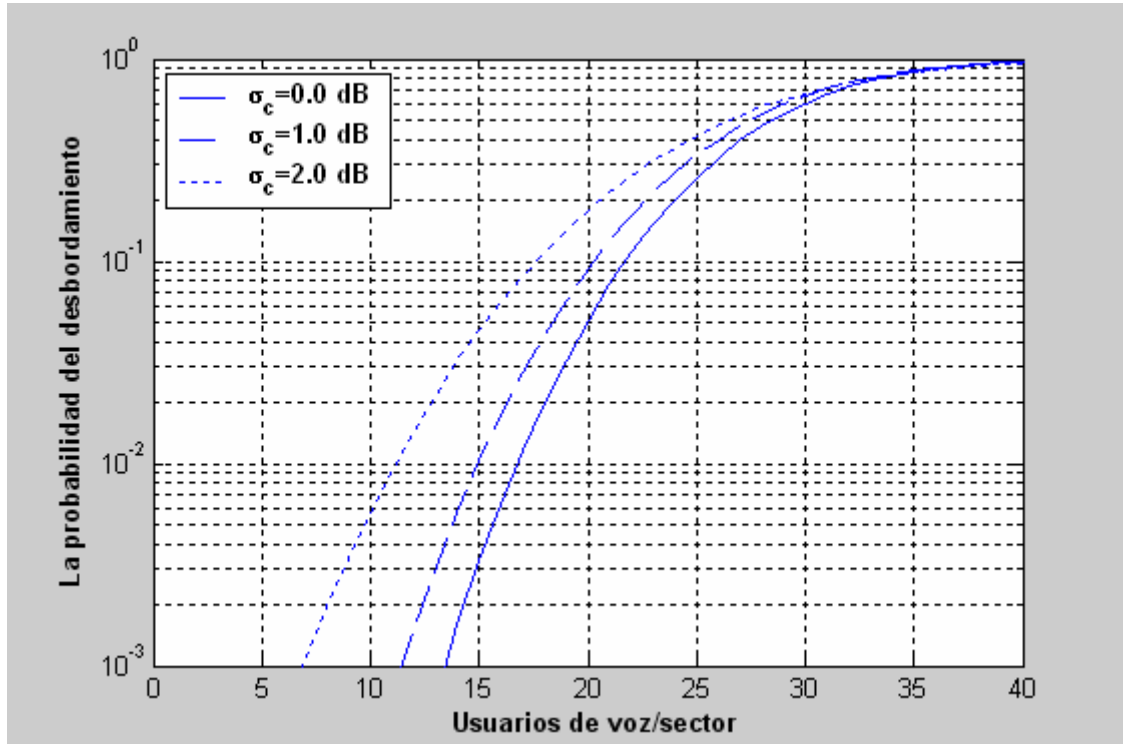
En este estudio no se ha tenido en cuenta el factor adicional de pérdidas ocasionado por las curvas, ya que las conclusiones que obtendríamos serían similares. Por lo tanto, el efecto ocasionado por las curvas tanto para coches como para metro es similar.

Por otro lado, provocará un ascenso del radio de cobertura lo que se traducirá en un ligero ascenso de la capacidad del sistema en la zona bajo estudio.

Un aumento de 5 centésimas de este coeficiente ( $n_g$ ) provoca un aumento de la capacidad de aproximadamente 0.1 usuarios. Como ya sabemos, estos resultados son evidentemente teóricos, ya que en la práctica no se puede hablar de fracciones de usuarios. El tratar en todos los casos con los decimales para el número de usuarios es una forma de aproximarse al verdadero valor que se obtiene, pero como ya se sabe, en la práctica el resultado será ligeramente diferente.

### 5.2.5 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

En este estudio, se plantea la posibilidad de dar dos servicios de forma simultánea al usuario. Para ello, será necesario recurrir a una fórmula que difiere someramente de las mencionadas anteriormente.



**Figura 5.56: Capacidad del uplink del sector de voz existiendo 3 usuarios de datos**

En la Figura (5.56), nuevamente se observa como el estudio realizado en servicio de metro obtiene una capacidad menor que el servicio de trenes realizado en la superficie. Todo ello, como se había comentado al comienzo del capítulo 5, viene motivado por la aparición de nuevos parámetros y la utilización del modelo híbrido de propagación.

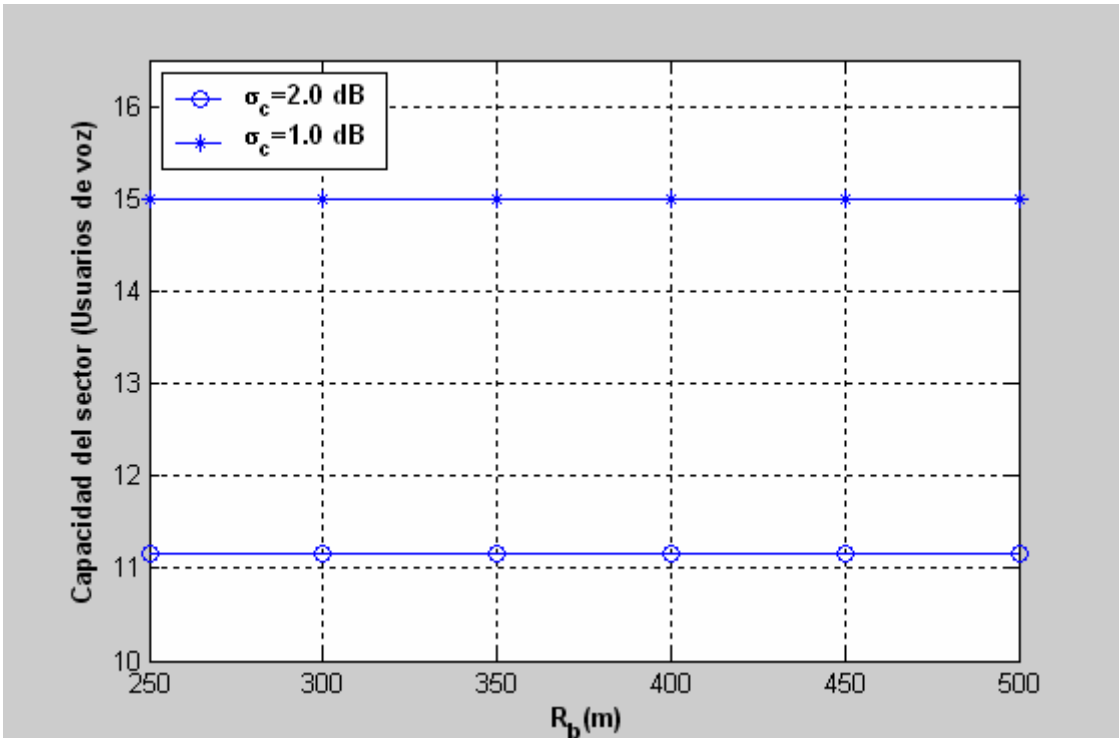


Figura 5.57: Capacidad del uplink del sector en función del punto de corte

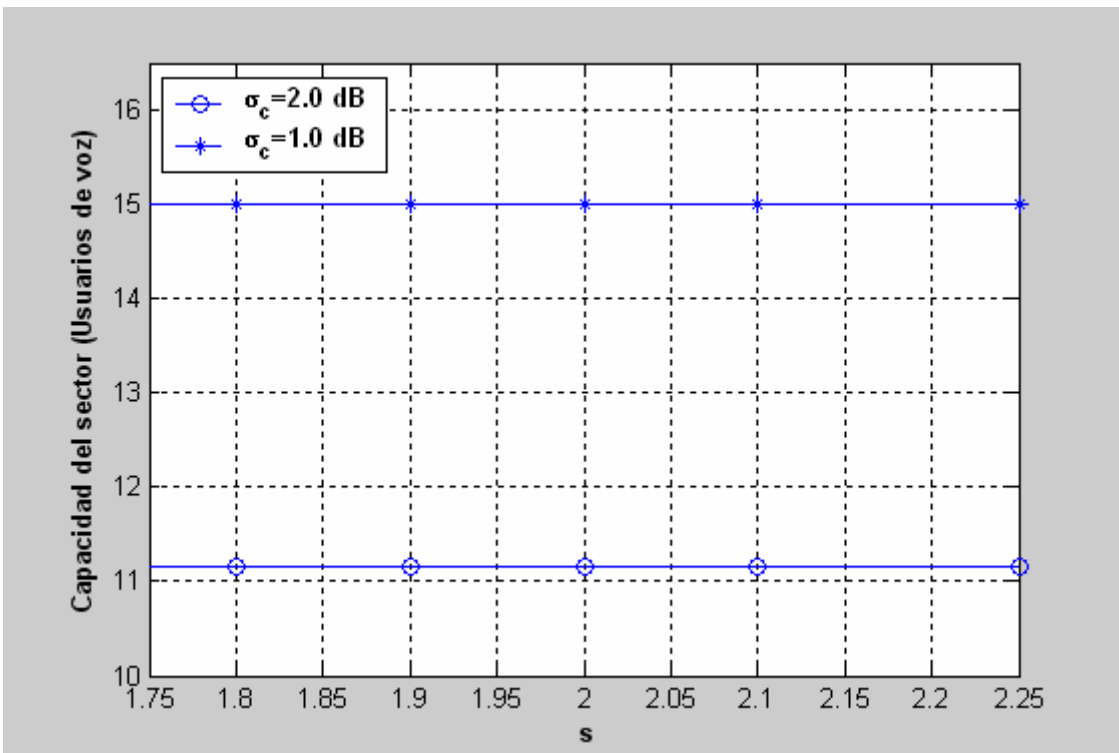


Figura 5.58: Capacidad del uplink del sector en función del exponente de propagación s

Nuevamente, el punto de corte, en la Figura (5.57), y el exponente de propagación en la Figura (5.58), no provocan apenas cambios en la capacidad

del sistema analizado. Fundamentalmente, el punto la variación del punto de corte afectará cuando se disponga de un radio de cobertura menor que este.

Posteriormente, en la Figura (5.59), podemos observar un comportamiento similar para el parámetro del nivel de lóbulos secundarios al obtenido en los estudios anteriores. Quizás se aprecie una menor finura en cada uno de los saltos de 1dB. Esto se debe a que la precisión utilizada en las fórmulas es algo menor con el fin de por otro lado optimizar la rapidez de los cálculos.

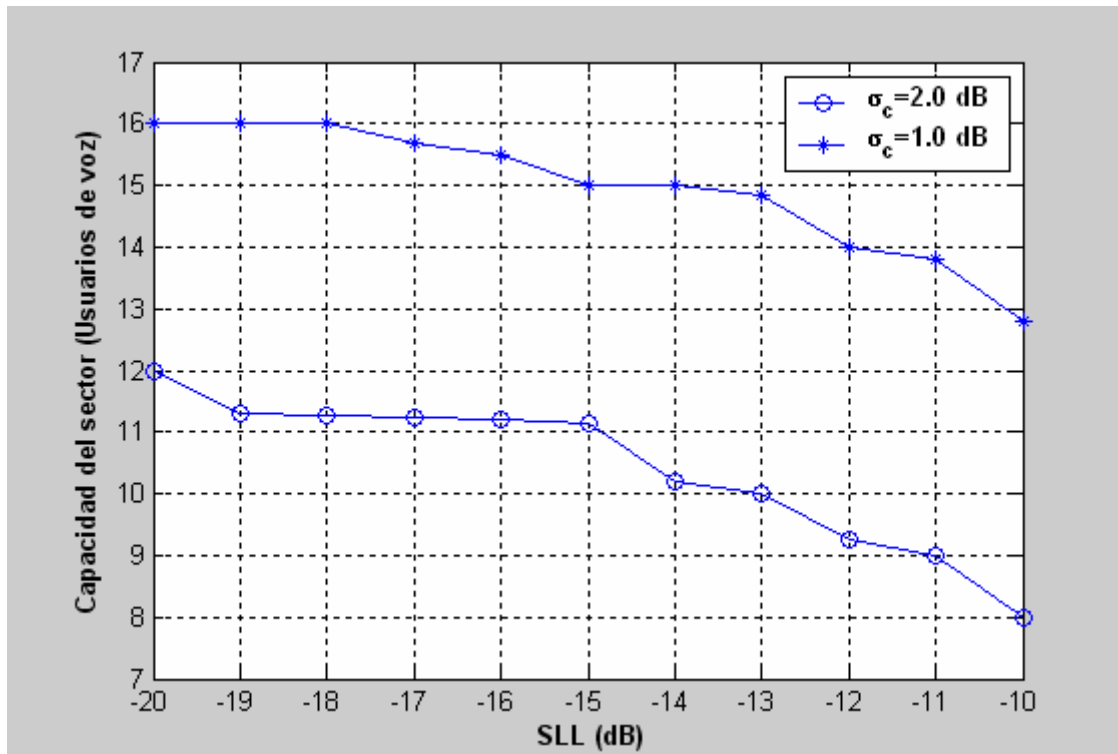


Figura 5.59: Capacidad del uplink del sector en función del SLI

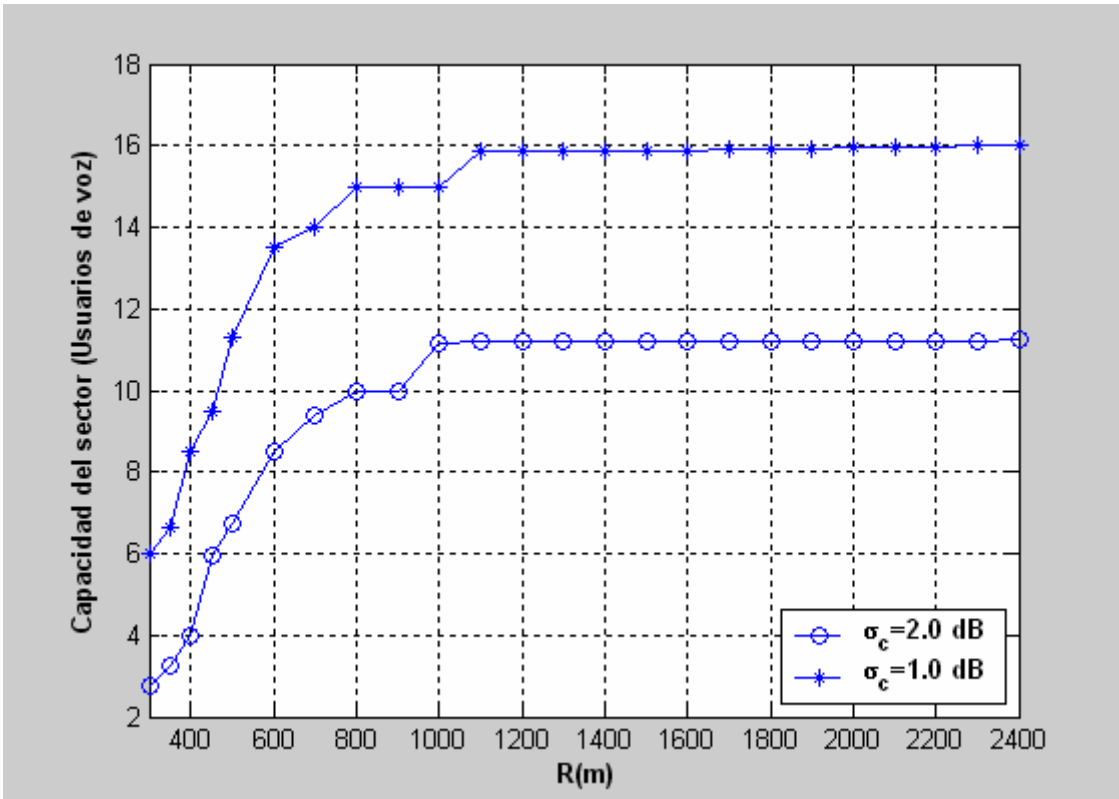
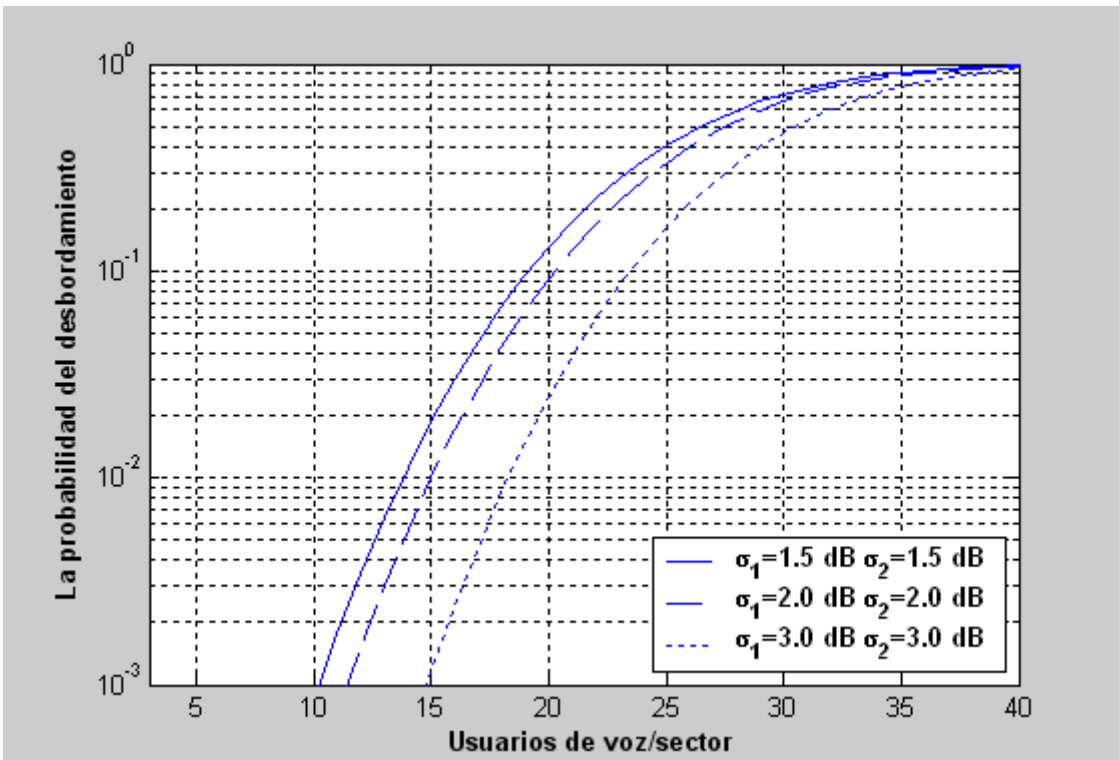


Figura 5.60: Capacidad del uplink del sector en función de la región de cobertura

Los valores que se obtendrán para un radio de cobertura inferior al punto de corte, en la Figura (5.60), serán muy pequeños comparados con los que se tienen para un rango típico entre 1000 y 1500 metros.



**Figura 5.61: Capacidad del uplink del sector en función de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$** 

A continuación analizaremos varios casos para observar los efectos provocados por su variación existiendo una curva a la derecha a 500 metros del punto de referencia del sector bajo estudio:

**Tabla 5.13: Variación del radio de cobertura y de la capacidad**

$n_g$	R (m)	Capacidad para $\sigma_c=1.0$ (dB)
<b>0.01</b>	<b>1003.5</b>	<b>15</b>
<b>0.015</b>	<b>1003.5</b>	<b>16</b>
<b>0.02</b>	<b>1001</b>	<b>17.12</b>
<b>0.025</b>	<b>1001</b>	<b>17.36</b>

El aumento de 5 centésimas en el coeficiente de guía de onda en la tabla (5.13), provoca un aumento de hasta un usuario en el estudio de la capacidad. No obstante, esta situación afecta levemente en la práctica y no deberá preocupar a la entidad que realice las correspondientes instalaciones.



## 6. Capacidad y estadísticos de interferencia del enlace ascendente del sistema WCDMA para macrocélulas

### 6.1 Introducción

Se consideran en esta categoría aquellas células cuyo radio está entre unos cientos de metros y unos pocos kilómetros. Dentro de este tipo de células existen también categorías según el tipo de entorno que hay en ellas. Básicamente se suelen considerar los siguientes entornos:

- *Rural*: Ausencia de edificios o presencia de pocos edificios de pequeña altura.
- *Urbana* (ciudad pequeña): Ciudades pequeñas o edificios de muy poca altura.

Fundamentalmente, se presentará un análisis realizando un control de potencia en un sistema sometido a desvanecimiento multitrayecto. Por otra parte, se tendrán en cuenta los efectos producidos por las interferencias intracelulares y extracelulares.

Para ello será fundamental realizar un estudio muy profundo basándonos en la probabilidad de desbordamiento utilizada en los casos anteriores para el estudio de las microcélulas.

La aplicación del control de potencia tiene sus ventajas, pero por otra parte no se consigue un control de potencia óptimo debido a las limitaciones que lleva consigo. Fundamentalmente, afectan de forma directa a la capacidad del sistema.

Como ya se sabe el control de potencia en los sistemas CDMA ha recibido una especial atención en los últimos años. Fundamentalmente, los estudios se simplifican y se hace referencia constantemente a la interferencia intracelular y extracelular como factores clave del estudio. Cabe recordar la existencia de otros fenómenos como el desvanecimiento por sombra.

No obstante, de una forma indirecta el efecto del multitrayecto se analiza cuando se recurre a las fórmulas de las interferencias.

A continuación en el siguiente apartado se abrirá un pequeño paréntesis con el fin de aclarar los conceptos básicos de los desvanecimientos multitrayecto

## **6.2 Desvanecimientos multitrayecto en radioenlaces**

A continuación, se realizará una breve explicación del efecto del multitrayecto y como este puede utilizarse para sacar mayor rendimiento al sistema utilizando receptores RAKE para las macroceldas.

### Consideraciones generales

El desvanecimiento multitrayecto se origina, como es sabido, por interferencia entre el rayo directo y los rayos reflejados:

- a) En la superficie terrestre.
- b) En capas atmosféricas.

Los desvanecimientos por reflexión en el suelo pueden ser profundos y de larga duración, sobre todo cuando la reflectividad del terreno es elevada (llanuras, mares, etc). Puede controlarse tratando de bloquear el rayo reflejado mediante un sistema de recepción adecuado.

El mecanismo b) se debe a que la antena radia un haz de rayos con diferentes ángulos de salida. Para alguno de estos rayos, la existencia de capas atmosféricas con variaciones anormales de la refractividad puede producir condiciones de reflexión, permitiendo transportarlos a la antena receptora. Esta modalidad de multitrayecto troposférico está sujeta a variaciones aleatorias. Su importancia o grado de influencia aumenta con la frecuencia y de un modo especial con la longitud del vano. Este tipo de desvanecimiento es el más severo de los que se dan en condiciones de cielo despejado, sobre todo cuando adquiere carácter selectivo ya que entonces se genera una distorsión de amplitud y fase en la señal recibida, que degrada la calidad del enlace lo cual puede provocar interrupciones del servicio.

## Consecuencias del desvanecimiento multitrayecto

La distorsión ocasionada por el desvanecimiento multitrayecto provoca en los radioenlaces digitales tres tipos de efectos no deseados para la transmisión:

### 1) Interferencia entre símbolos

Como consecuencia de la dispersión temporal debida a la propagación multitrayecto, se produce interferencia entre símbolos. La función de transferencia del medio modifica la función de transferencia total y, por tanto, ya no se cumplen ahora las condiciones de diseño inicial, es decir, ausencia de interferencias entre símbolos y mínima BER. Esto ocasiona un aumento en la tasa de errores superior a la que originaría una atenuación no selectiva de igual valor medio, por lo que contribuye a degradar la calidad del enlace.

El fenómeno de dispersión puede despreciarse para velocidades de bits inferiores a 10Mbits/s, es decir, para radioenlaces de baja capacidad, debiéndose tener en cuenta para velocidades superiores a 20Mbits/s. Estas degradaciones no pueden compensarse aumentando la potencia, puesto que la distorsión por desvanecimiento multitrayecto ha reducido a casi a cero la abertura del diagrama de ojo. Para lograr que los radioenlaces digitales satisfagan las exigencias relativas a las interrupciones en presencia de desvanecimiento multitrayecto, deben utilizarse técnicas especiales, como son las de códigos correctores de errores con entrelazado.

El empleo simultáneo de estas técnicas, proporciona una mejora superior al producto de las que brinda cada una por separado, lo que constituye un efecto sinérgico muy importante.

### 2) Efectos en la recuperación de la portadora

En los sistemas que emplean la demodulación coherente, es necesaria la reconstrucción de la portadora de referencia en el receptor. En la práctica, nunca puede recuperarse exactamente la portadora y habrá siempre un error de fase, cuyo efecto consiste en rotar la constelación de las señales en relación con su posición óptima para la demodulación. En ausencia de

propagación multitrayecto ese efecto no es importante, pero las distorsiones de la señal producidas por la propagación por trayectos múltiples pueden provocar una degradación.

### 3) Efectos en la recuperación de la temporización

La señal recibida debe muestrearse a la velocidad de símbolo (en cada canal de la constelación) para la recuperación de los símbolos individuales que se transmitieron. Casi todos los métodos de recuperación de la temporización funcionan según el principio de hacer máxima la energía de la señal en el instante de muestreo. Esto equivale a efectuar el muestreo en la cresta del impulso recibido.

En presencia de desvanecimiento selectivo, es punto puede no ser óptimo, realizándose el muestreo en lugares donde el ojo no está en las mejores condiciones de abertura, lo cual afectará desfavorablemente a la tasa de errores VER y, por tanto, a la calidad de la señal recibida.

## 6.3 Fórmulas utilizadas

Número de usuarios por unidad de área:

$$\rho_s = \frac{2N}{3\sqrt{3}} \quad (6.1)$$

Las nuevas fórmulas de la esperanza y desviación estándar dependen de parámetros tales como los caminos (M), el número de usuarios interferentes (N) y el número de brazos del receptor RAKE ( $L_f$ )

Fórmulas de esperanza para interferencia intercelular e intracelular [7]:

$$E \left[ \frac{I_{out}}{S} \right]_s = \rho_s \cdot \frac{L_f}{M-1} \cdot f \cdot N \cdot e^{\beta^2 \frac{\sigma_\theta^2}{2}} \quad (6.2)$$

$$E \left[ \frac{I_{in}}{S} \right]_s = \eta \cdot N \cdot e^{\beta^2 \frac{\sigma_\theta^2}{2}} \quad (6.3)$$

Fórmulas de varianza para interferencia intercelular e intracelular:

$$\text{Var}\left(\frac{I_{out}}{S}\right)_s = \eta \cdot \frac{L_f(L_f + 1)}{(M - 1)(M - 2)} \cdot g \cdot N \cdot e^{2\beta^2\sigma_\theta^2} - \eta^2 \cdot \frac{L_f^2}{(M - 1)^2} \cdot h \cdot N \cdot e^{\beta^2\sigma_\theta^2} \quad (6.4)$$

$$\text{Var}\left(\frac{I_{in}}{S}\right)_s = \eta \cdot N \cdot e^{2 \cdot \beta^2 \cdot \sigma_\theta^2} - \eta^2 \cdot q \cdot N \cdot e^{\beta^2 \cdot \sigma_\theta^2} \quad (6.5)$$

Los factores de interferencia f,g,h,q son extraídos de tablas.

A continuación se expone una relación señal a ruido para poder apreciar qué parámetros influyen en el sistema:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\left(\frac{W}{R_b}\right) \cdot e^{\beta\theta_0}}{\xi} = \frac{\left(\frac{W}{R_b}\right) \cdot e^{\beta\theta_0}}{e^\Omega} \quad (6.6)$$

La probabilidad de desbordamiento viene dada por la relación:

$$P_{out} = P(P_e \geq \alpha) \quad (6.7)$$

Por otra parte, los **parámetros utilizados** en el código de Matlab y en sus correspondientes simulaciones son los siguientes:

d = 0.7Km	La distancia viene expresada en km
P <sub>n</sub> = -100 dBm	Potencia de ruido -100dBm
P <sub>n</sub> = 10 <sup>(Pn/10)</sup>	
G <sub>tx</sub> = 0 dB	
G <sub>rx</sub> = 12 dB	
P <sub>tx</sub> = 19 dBm	
freq = 1950 MHz	
a=0	para hm=1.5 metros
b=1	para d ≤ 20km
σ <sub>o</sub> =1.0	
r=1.65	gamma para 95% de usuarios bien atendidos

### - Fórmulas específicas del modelo de propagación

Se aplica el modelo de COST 231 para un rango de frecuencias concreto que es con el que realidad estamos trabajando entre 1500 MHz y 2000 MHz.

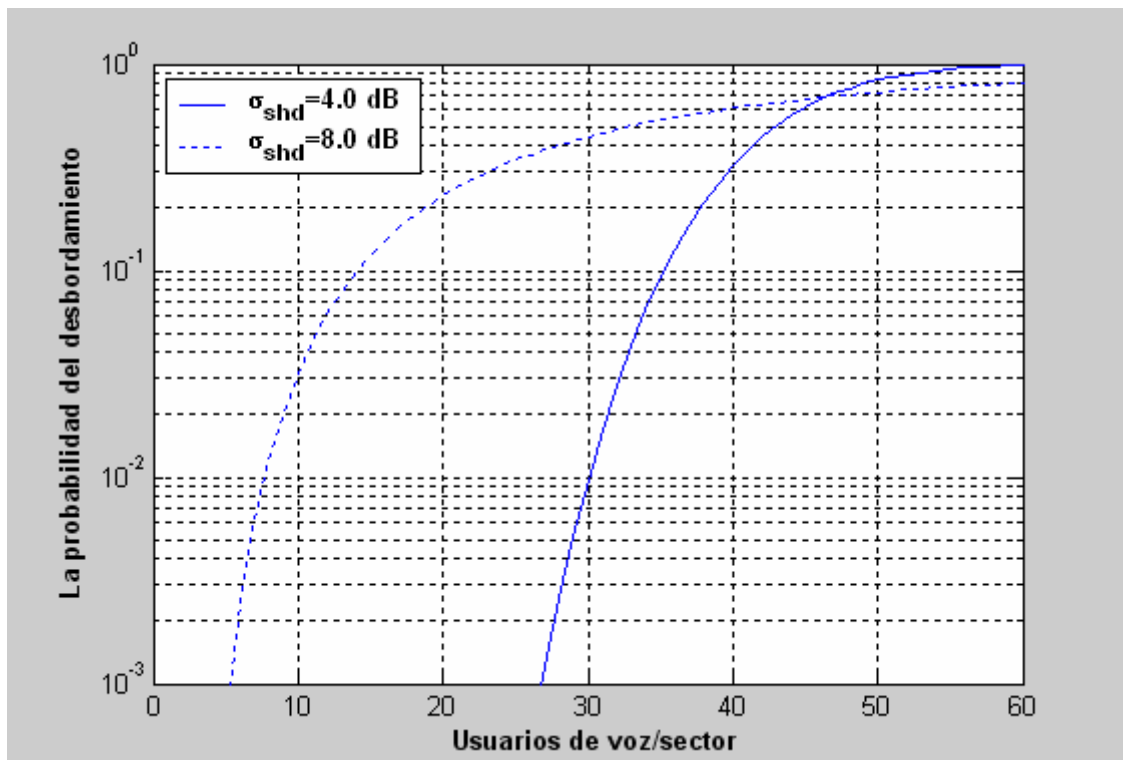
$$h_t = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_r \quad (6.8)$$

En la fórmula (6.8), se ha elegido un valor de 5.6 metros siendo el exponente de propagación 4.

$$L = 46.3 + 33.9 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_t - a + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_r)(\log_{10} d)^b + \gamma\sigma_0 \quad (6.9)$$

En la fórmula (6.9), el término  $\gamma\sigma_0$  dependerá fundamentalmente de si hablamos de una ciudad o un entorno rural.

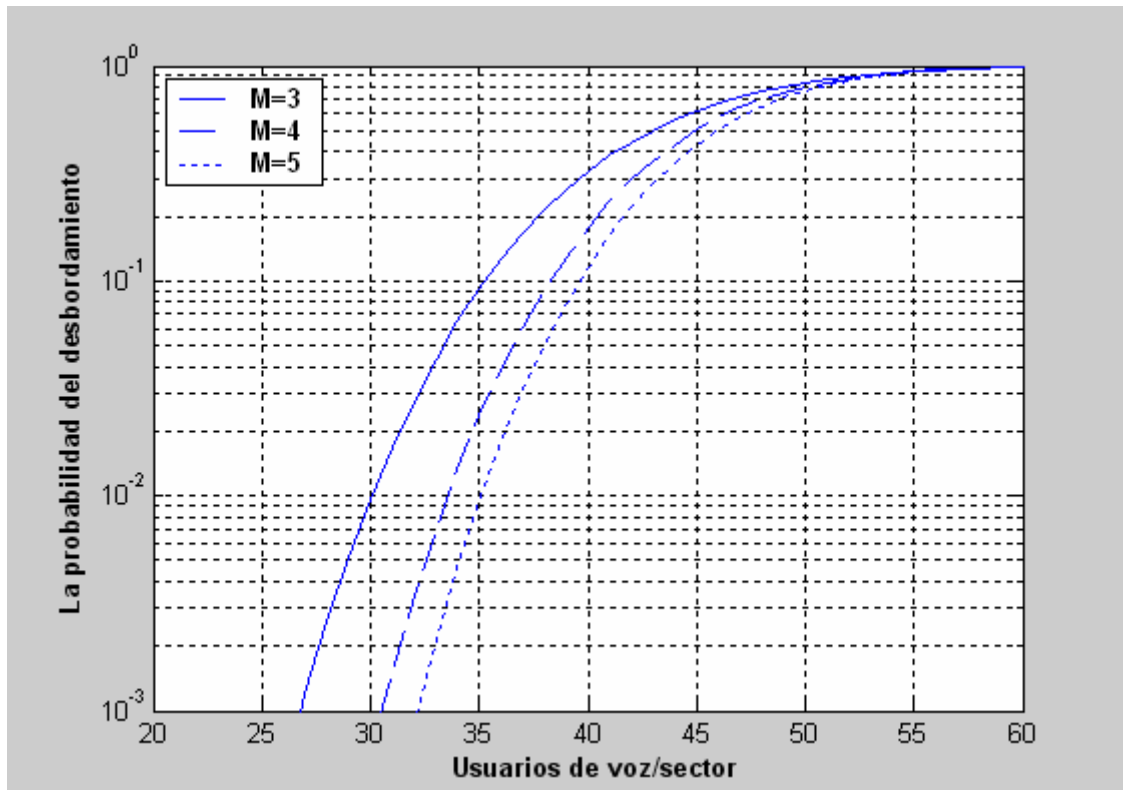
### 6.4 Análisis numérico para voz



**Figura 6.1: Probabilidad del desbordamiento**

En la Figura (6.1), podemos observar como un incremento de  $\sigma_{shd}$  provoca un aumento de la capacidad. Fundamentalmente, este estudio se ha

realizado con el mismo número de brazos que de multitrayectos o caminos alternativos que haya tomado la señal hasta su destino.



**Figura 6.2: Capacidad del uplink del sector en función del número de brazos del receptor RAKE para  $\sigma_{shd}=4$  dB**

Se puede apreciar en la Figura (6.2), como un mayor número de brazos favorece el comportamiento del sistema para el servicio de voz aumentando de esta forma la capacidad. Para poder contrastar los tres casos, se ha fijado la  $\sigma_{shd}$  a 4dB, valor típico en este tipo de estudio.

Por otra parte, en cuanto al radio de cobertura, se producirá un leve descenso de la capacidad por encima de los 500 y 600 metros, afectará más rápidamente la bajada conforme  $\sigma_{shd}$  sea menor. Este aspecto relevante se venía ya observando anteriormente en los estudios de las microceldas. Nuevamente, si volvemos a las fórmulas matemáticas, se podrán extraer las mismas conclusiones por un camino diferente.

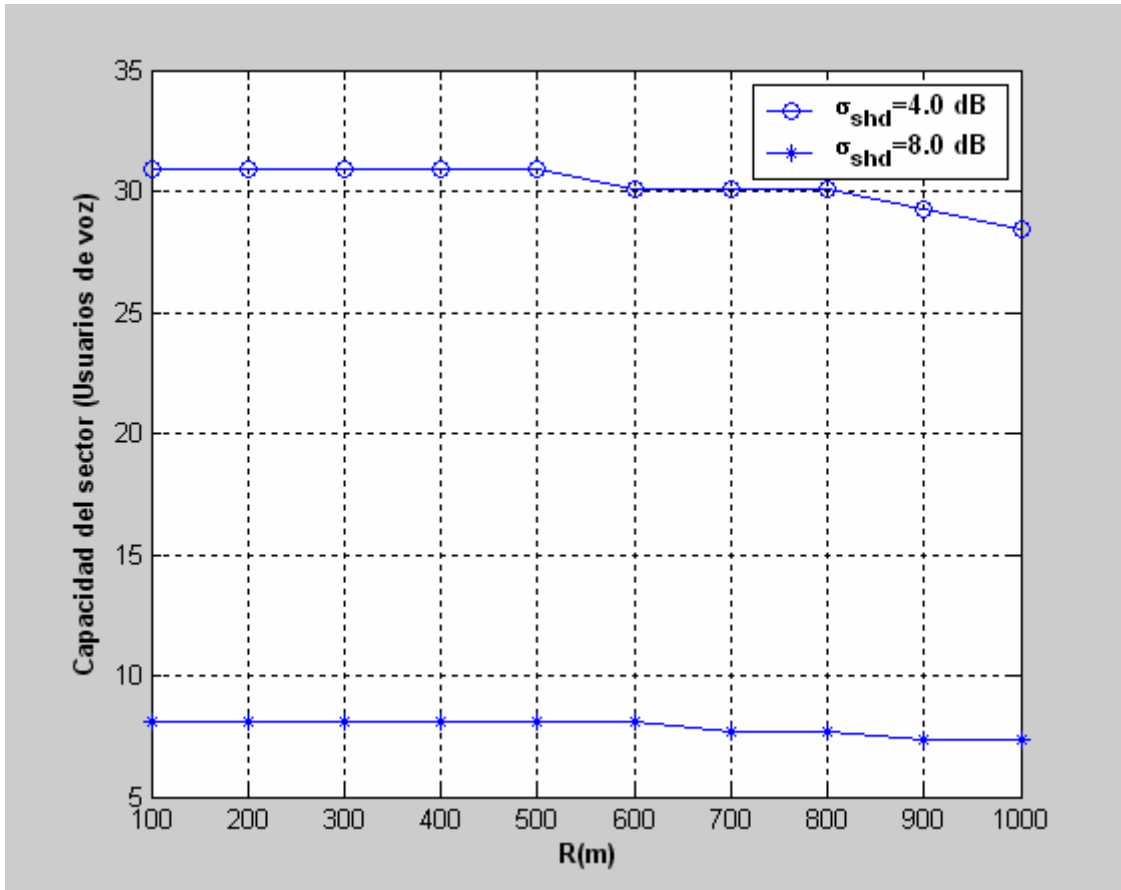


Figura 6.3: Capacidad del uplink del sector de voz en función del radio de cobertura

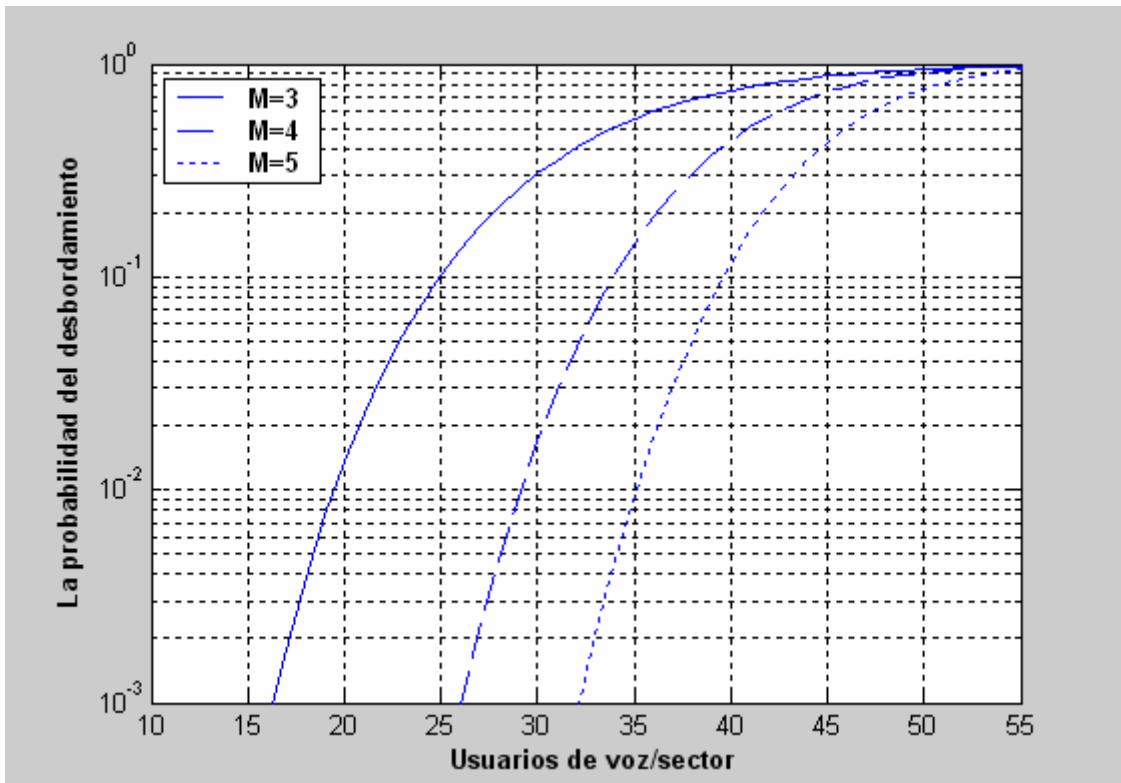


Figura 6.4: Capacidad del uplink del sector para  $L_r=5$  (5 multitrayectos)



En la Figura (6.4), se puede apreciar un ascenso de la capacidad conforme aumenta el número de brazos del receptor RAKE. Desde un punto de vista técnico, un mayor número de brazos hará mucho más eficiente el sistema. Generalmente, el número de multitrayectos será mayor o igual al número de brazos del sistema. El caso mejor será aquel en el cual el número de multitrayectos es igual al número de brazos de nuestro receptor. Por norma general, en la práctica tenderá a darse mayor número de multitrayectos que de brazos presentes en el sistema.

Por otra parte, podemos observar comparando con el estudio de las microceldas, un descenso de la capacidad de número de usuarios. Por tanto, un aumento de la región de cobertura en un determinado punto, se traduce en un descenso de la capacidad.

## 6.5 Análisis numérico para datos

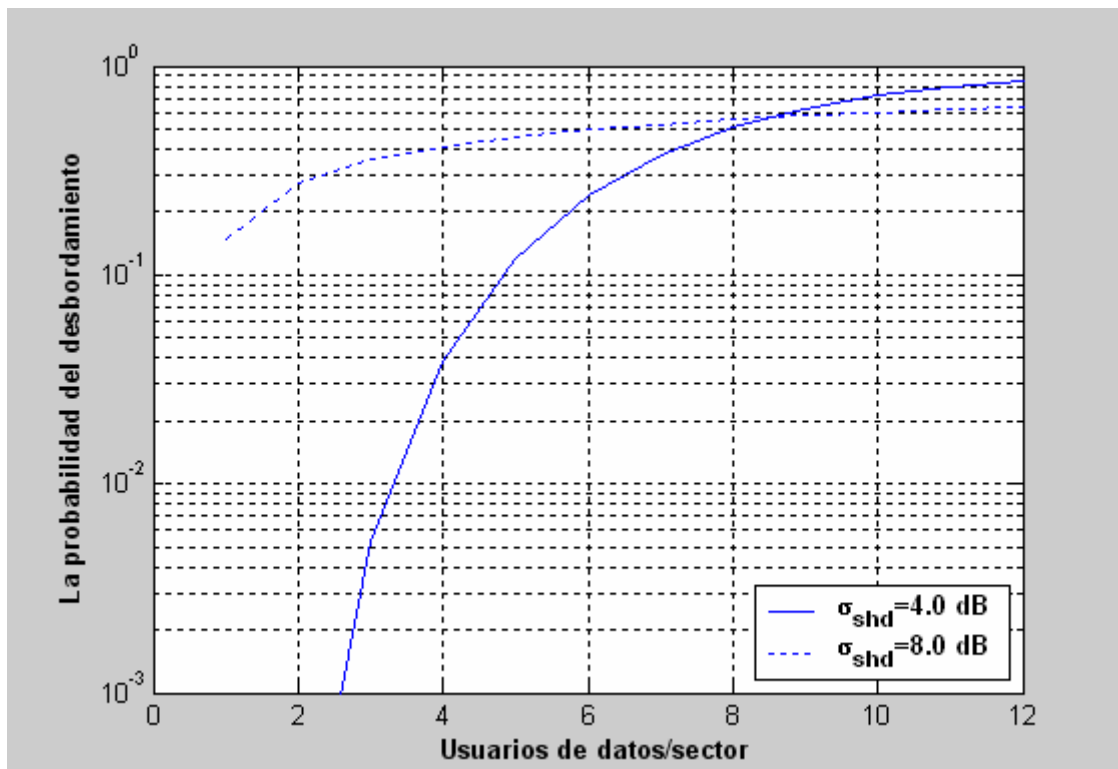
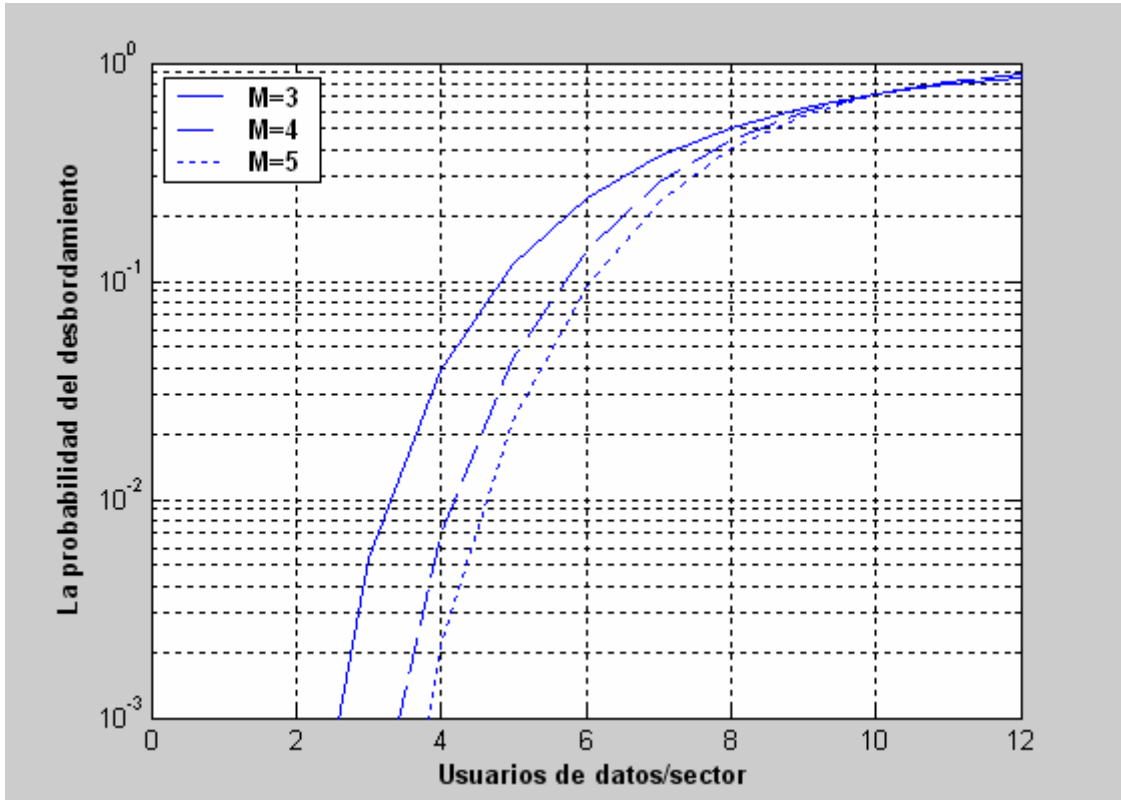


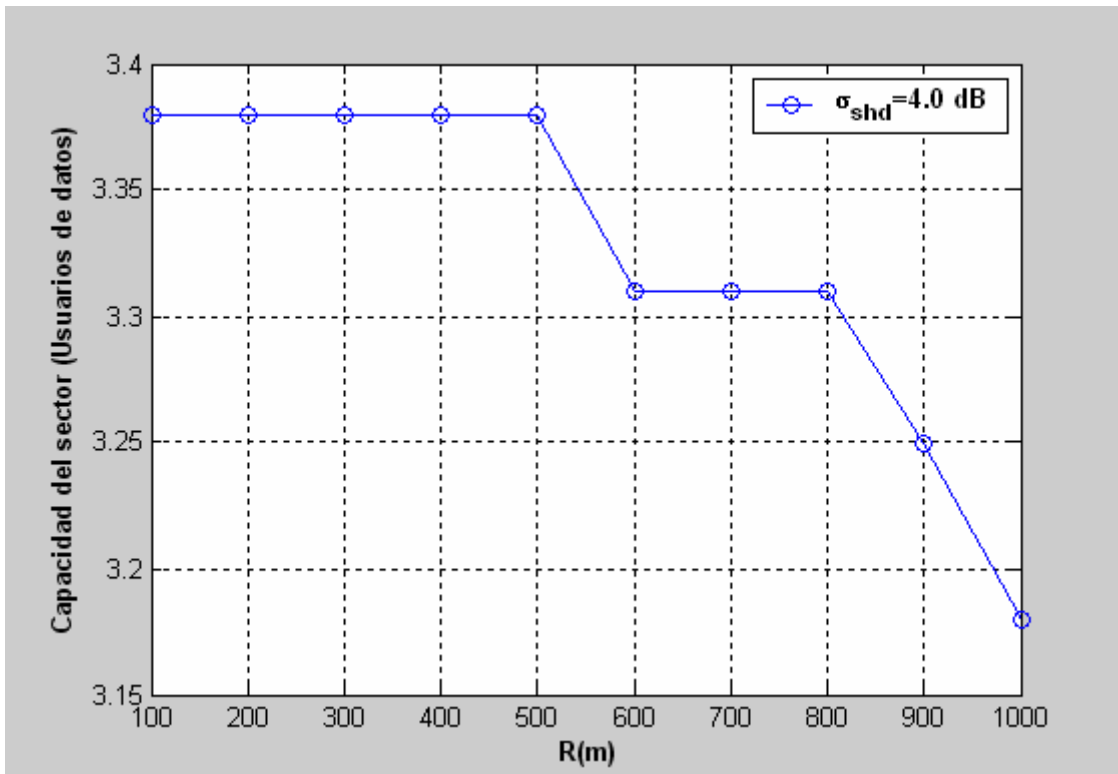
Figura 6.5: Probabilidad del desbordamiento para datos

Comparando la Figura (6.5) con los estudios de microceldas del tipo Cigar-Shaped en autopistas, podemos comprobar como la capacidad descende en 5 o 6 usuarios aproximadamente. No obstante, independientemente del tipo de estudio que tomemos de microceldas el resultado obtenido nos da unas cifras de capacidad mucho menores.



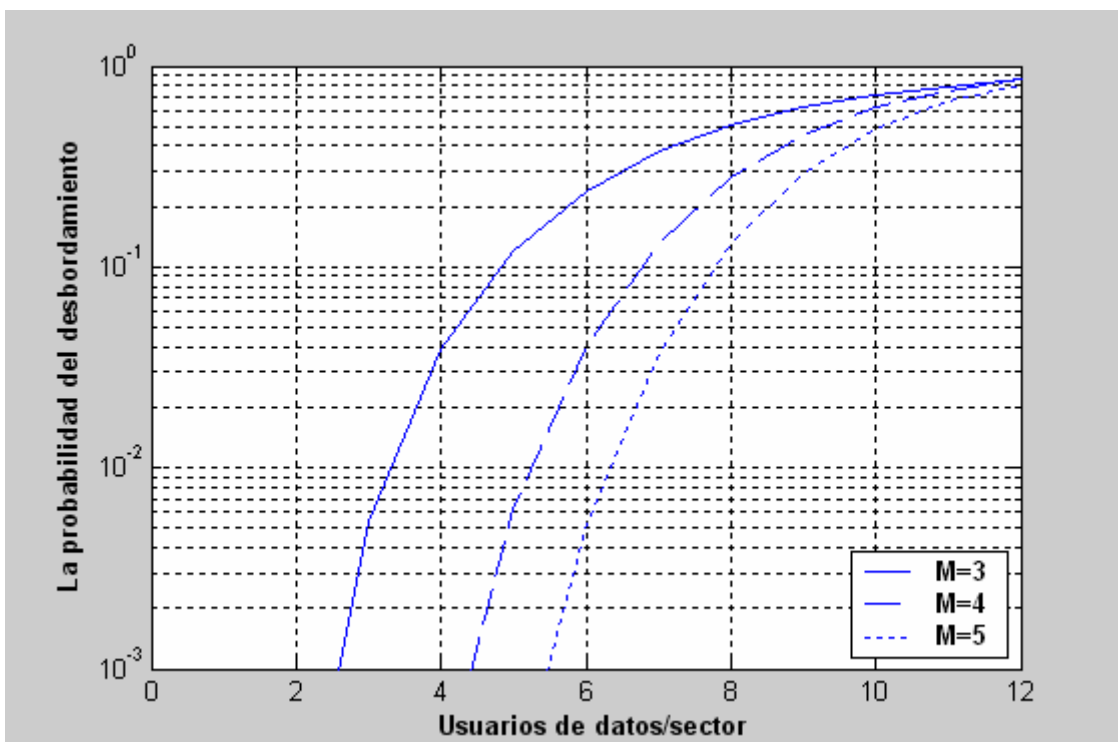
**Figura 6.6: Probabilidad del desbordamiento para voz en función del número de brazos del receptor RAKE para  $\sigma_{shd}=4$  dB**

En la Figura (6.6) se puede observar, lo que se había deducido en el caso estudiado para voz. Un aumento del número de brazos se va a traducir en un aumento de la capacidad.



**Figura 6.7:** Capacidad del uplink del sector de voz en función del radio de cobertura.

En la Figura (6.7), se puede apreciar como directamente un incremento del valor de la región de cobertura se traduce directamente en un descenso de la capacidad.



### Figura 6.8: Capacidad de número de usuarios para $L_f=5$ (5 multitrayectos)

En la Figura (6.8), podemos observar nuevamente para el servicio de datos como un incremento del número de brazos del receptor multitrayecto se traduce en un incremento de la capacidad. Desde un punto de vista, técnico un mayor número de brazos implica poder recibir mayor número de señales desfasadas y la obtención de mayor información. Por tanto, lo que antes se consideraban interferencias ahora se considera como información adicional para poder realizar una mejor reconstrucción de la señal original.

### 6.6 Análisis numérico para estudio conjunto (voz y datos)

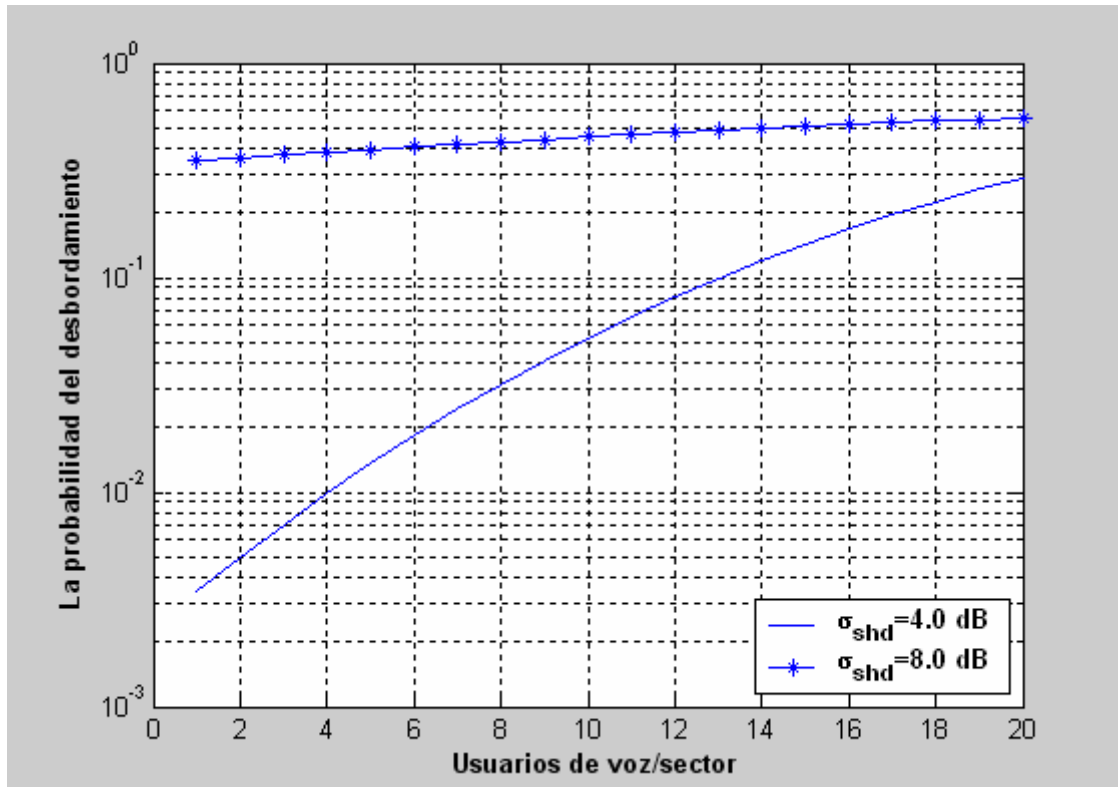


Figura 6.9: Probabilidad del desbordamiento

En la Figura (6.9), observamos como la existencia de usuarios de datos hace que la caída de usuarios de voz sea muy elevada. De ahí a obtener una capacidad de unos cuatro usuarios para un outage (probabilidad del desbordamiento) del 1%.

En cuanto a la Figura (6.10) no hay aspectos destacados salvo que las características mencionadas en servicio de voz y datos vuelven a cumplirse para el estudio conjunto de servicio de voz/datos.

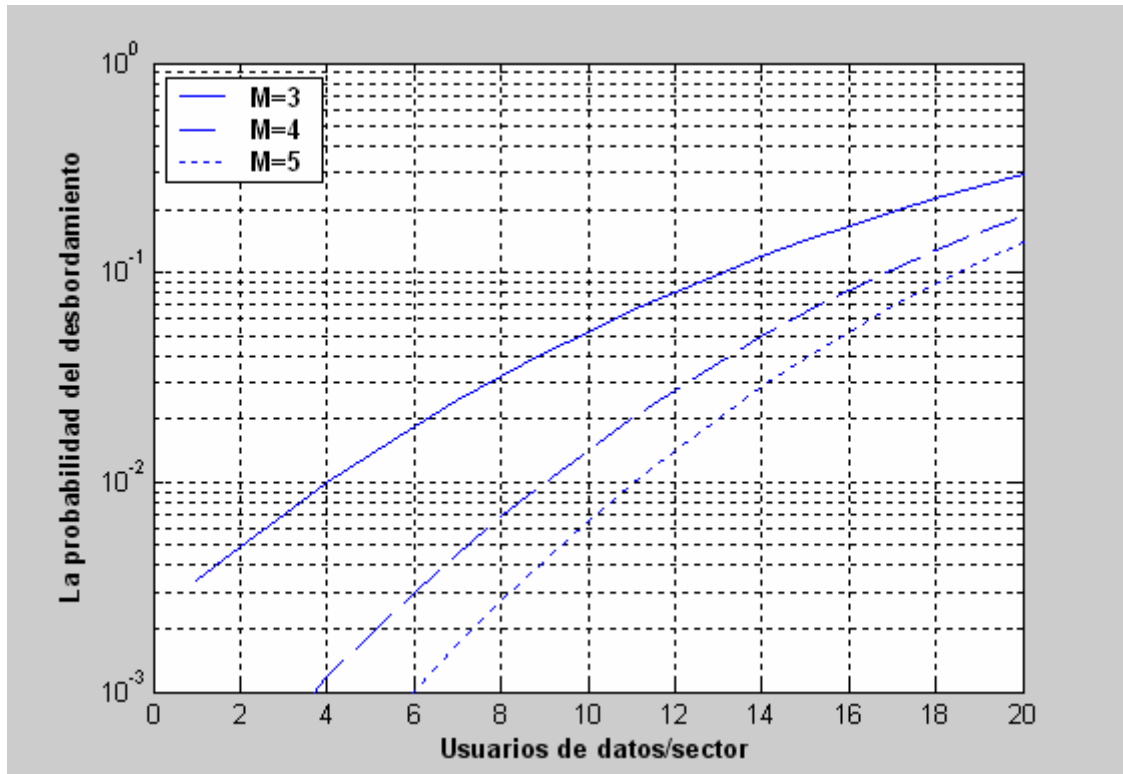


Figura 6.10: Probabilidad del desbordamiento en función del número de brazos del receptor RAKE para  $\sigma_{shd}=4$  dB

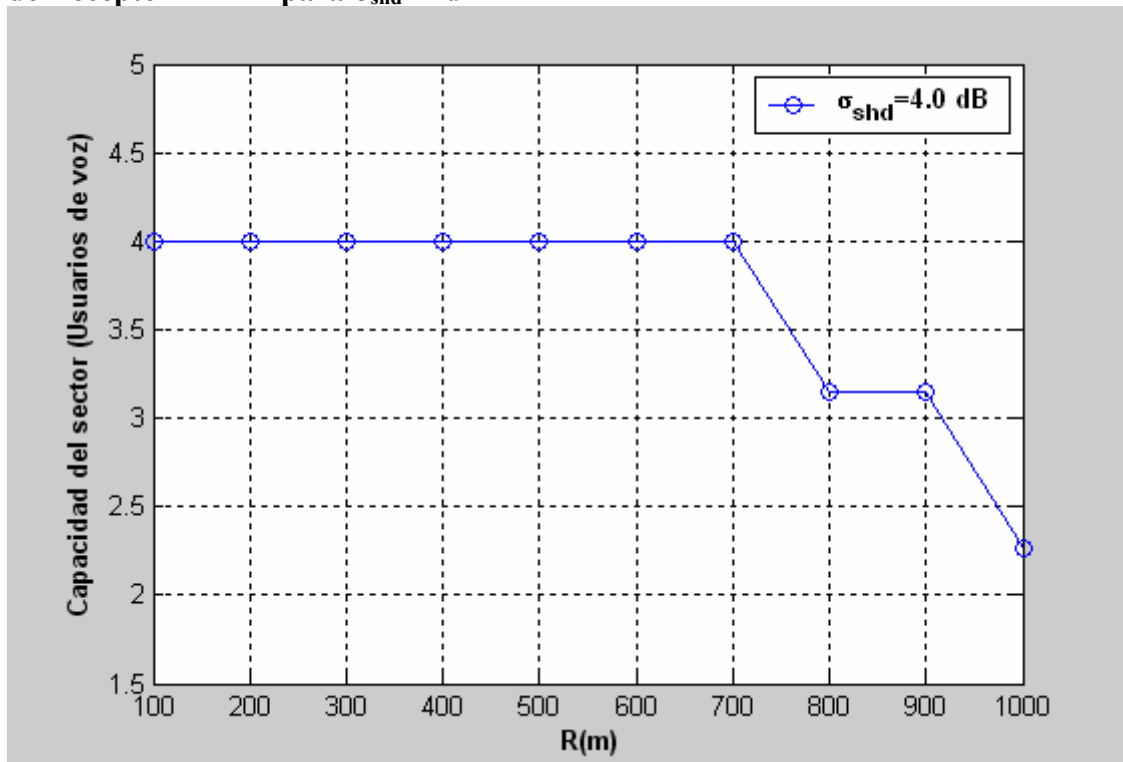
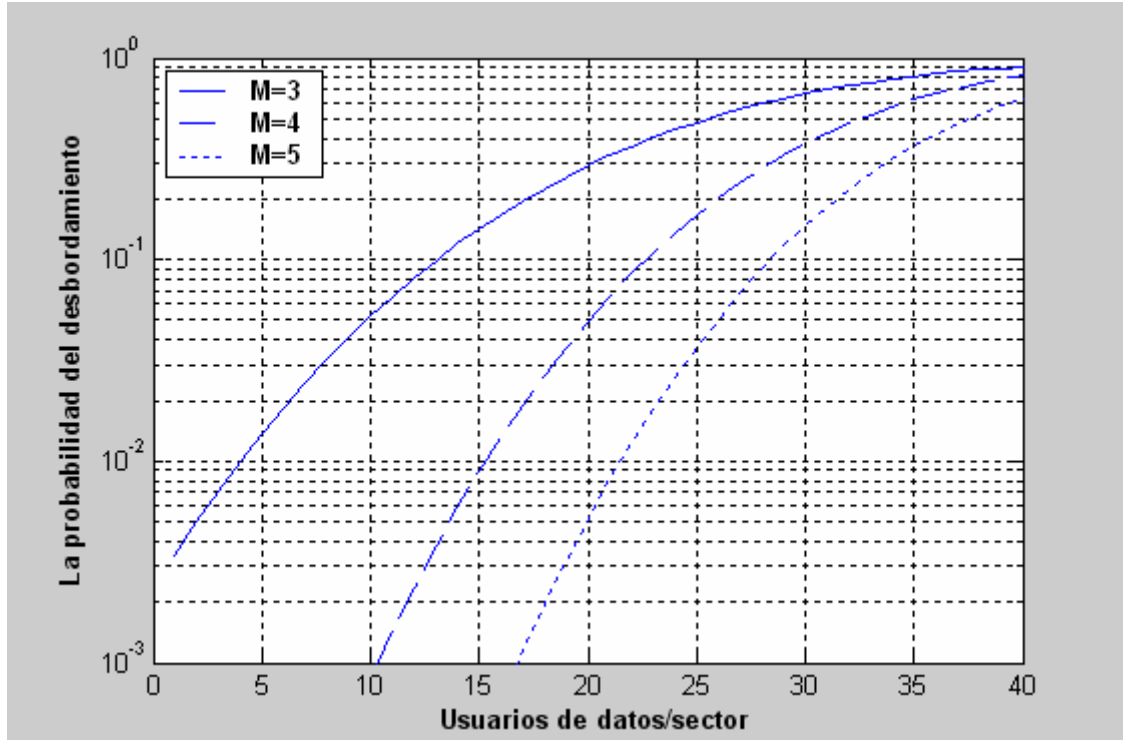


Figura 6.11: Capacidad del uplink del sector para voz en función del radio de cobertura

En la Figura (6.11), podemos observar una caída de la capacidad bastante más elevada que en los casos de voz y datos. Por tanto, un estudio que requiera usuarios de voz y datos deberá tener muy en cuenta que radio de cobertura elegir.



**Figura 6.12: Probabilidad del desbordamiento del sector para  $L_f = 5$  para  $\sigma_{shd}=4$**

Siempre un aumento del número de brazos se va a ver traducido en un aumento de la capacidad al poderse hacer mejor frente al fenómeno del multitrayecto; este fenómeno podemos observarlo para el servicio conjunto de voz y datos en la Figura (6.12). Aunque siempre de alguna forma el multitrayecto podrá afectarnos si el número de caminos o multitrayectos de la señal es mayor que el número de brazos del sistema bajo estudio.

## 7. Conclusiones

Durante la realización de este proyecto se ha tratado de realizar un estudio previo de cada caso para luego poder llevarlo a cabo con una mayor profundidad. En primer lugar, se han descrito los conceptos básicos necesarios para poder comprender en que consiste la tecnología o la nueva filosofía "CDMA".

Posteriormente se ha llevado a cabo un estudio de la capacidad utilizando microceldas en diferentes tipos de entornos. Fundamentalmente, se han podido observar las consecuencias de su utilización y las posibles mejoras que se pueden realizar modificando aquellos parámetros que de alguna forma, están relacionados con este tipo de microceldas.

De alguna forma, su estudio nos ha permitido contrastar múltiples casos y como llegar a optimizar el sistema en función en cada caso de aquellas variables que se puedan modificar. Fundamentalmente, el nivel de lóbulos secundarios, los exponentes de propagación, el punto de corte y la región de cobertura han jugado un papel muy importante en este asunto.

Todos estudios se han pretendido analizar con diferentes tipos de microcélulas en función del entorno bajo estudio. Fundamentalmente, se ha hecho hincapié en microceldas del tipo Cigar-Shaped utilizadas en autopistas u otro tipo de vías de comunicación como pueden ser los trenes (microceldas con forma de puro), Cross-Shaped utilizadas en ciudades (microceldas con forma de cruz) y T-Shaped utilizadas en cruces de vías (microceldas con forma de T, que son las más utilizadas en la actualidad y permiten cubrir diferentes entornos.

Una de las ideas que se extraen es que la capacidad para estudios con microceldas del tipo Cigar-Shaped es máxima, en segundo lugar, se encuentran las del tipo T-Shaped y en tercer lugar las microceldas del tipo Cross-Shaped. Otro aspecto destacado es que la capacidad en autopistas para microceldas del tipo Cross-Shaped es mayor que en ciudades.

Finalmente, el último estudio realizado se ha llevado a cabo con macroceldas con el fin de poder contrastar de alguna manera las posibles diferencias que puede haber utilizando otro tipo de sistemas y como de esta forma se pretende comprobar como el uso de este tipo de microceldas es mucho más

óptimo que el tener que recurrir a otros sistemas existentes también para abastecer al número de usuarios presentes en un determinado lugar bajo estudio. Por tanto, los estudios se pueden traducir en la obtención de una mayor capacidad por sector para microceldas que para macroceldas.

Este proyecto pretende enfocar de una forma clara como los diferentes escenarios son influidos por diferentes parámetros que se utilizan a lo largo del proyecto fin de carrera para cada caso específico.

Dependiendo de si se realiza en un entorno externo o interno (túneles) se tendrán en cuenta unos parámetros u otros.

Desde un punto de vista objetivo, se ha realizado expresando cada uno de los parámetros de una forma gráfica con el fin de aportar una mayor claridad al lector y no tener que recurrir cada vez a las mismas fórmulas para explicar cada evento resultante de los estudios llevados a cabo.

Por otra parte existen varias líneas de investigación abiertas; se ha profundizado mucho en el estudio de la ganancia del lóbulo principal y del lóbulo secundario, pero en un futuro se podrá realizar un análisis más detenido sobre las características de las antenas y sus correspondientes diagramas de radiación. Otro aspecto a destacar ha sido que se ha estudiado exhaustivamente la capacidad de las microceldas y bastantes parámetros que le afectan, pero en el estudio de las macroceldas, se ha llevado a cabo un análisis más genérico, dejando aquí otra puerta abierta para su futuro análisis. Cabe decir que otra línea abierta de investigación es el estudio de la capacidad en el downlink de gran importancia con su futuro desarrollo en proyectos posteriores.

Finalmente, hay que destacar que los estudios no tienen en cuenta en las autopistas que haya usuarios caminando o que existan bares o áreas de descanso cerca de éstas. Sucede lo mismo al mencionar al servicio de trenes. Se ha supuesto que no hay usuarios caminando por las vías. Estas ideas se dejan expuestas para una futura mayor profundización.



## BIBLIOGRAFÍA:

---

- [1] Vicente Burillo Martínez, Leandro de Haro Ariet, José María Hernández Rábanos y Fundación Airtel Vodafone,. “*Sistemas de comunicaciones móviles de Tercera Generación*” *IMT-2000 (UMTS)*.
- [2] Autores: Harri Holma and Antti Toskala, Ed Wiley, “*WCDMA for UMTS*“, Radio Access For Third Generation Mobile Communications.
- [3] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón and Leandro Haro Ariet, “ *W-CDMA Uplink Practical Capacity and Interference Statistics of Rural Highways Cigar-Shaped Microcells with imperfect Power Control and Finite Transmitted Power*”, (2006).
- [4] Andrea Abrardo, Member, IEEE, Giovanni Giambene, Associate Member, IEEE, and David Sennati, Member, IEEE. “*Capacity Evaluation of a Mixed-Traffic WCDMA System in the Presence of Load Control*”, (2003).
- [5] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón and Leandro Haro Ariet, “*WCDMA Uplink Capacity and Interference Statistics of a Long Tunnel Cigar-Shaped Microcells Using the Hybrid Model of Propagation with Imperfect Power Control*”, (2004).
- [6] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón and Leandro Haro Ariet, “*WCDMA Uplink Capacity and Interference Statistics of Highways Shaped Microcells with imperfect Power Control and Finite Transmitted Power*”, (2006).
- [7] Juan M. Romero-Jerez, Concepción Téllez- Labao, and Antonio Díaz-Estrella, “*Effect of Power Control Imperfections on the Reverse Link of Cellular CDMA Networks Under Multipath Fading*”, (2004).
- [8] Tutoriales de Matlab.
- [9] Andrea Abrardo, Member, IEEE, and David Sennati, Student Member IEEE, “*Outage Statistics in CDMA Mobile Radio Systems*”.
- [10] Loutfi Nuaymi, Xavier Lagrange, Philippe Godlewski, “*A Power Control for 3G WCDMA System A Power Control for 3 G WCDMA System*”.
- [11] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, “*W-CDMA uplink capacity and interference statistics of cigar-shaped microcells in over-ground train service with imperfect power control and finite transmitted power*”.
- [12] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, “*On the Capacity and interference Statistics of Street W-CDMA Cross-Shaped Micro Cells in Manhattan Environment (Uplink Analysis)*”.

[13] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, “WCDMA uplink capacity and interference statistics of cigar-shaped microcells in over-ground train service with imperfect power control and finite transmitted power”.

[14] Jin-Ghoo Choi, Young-June, and Saewoong Bahk, “Power-Based Admission Control for Multiclass Calls in QoS-Sensitive CDMA Networks”.

## CÓDIGO UTILIZADO

---

### Código implementado para microceldas

```

%Calculo del outage para un entorno rural utilizando Cigar-Shaped para
%estudio conjunto de voz y datos.
%-----
clear all;
close all;
clc;
%-----
Gp=256;
%-----
sll=-15;
sll=10^(sll/10);
%-----
alfa=0.63;
%-----
epsilon=0.9375;
%-----
Rb=300;
R=1000;
s1=2.0;
s2=4.0;
sigma1=3.0;
sigma2=6.0;
Pn=-100;
Pn=10.^(Pn/10);
f_extra=0.131;
%-----
%Voz
Gtx=0;
Grx=12;
%Potencia transmitida, este valor lo iremos variando para comprobar la capacidad en
las curvas de outage
Ptx=18.7;%18.6
freq= 1950;
lambda=300/freq;
Lb=20*log10(4*pi/lambda) + 10*s1*log10(Rb);
Lp=Lb + 10*s2*log10(R/Rb) + 2.33*sigma2
Prx=Ptx+ Grx+Gtx -Lp;
Prx=10^(Prx/10);
%-----
%Datos: Potencia mayor que voz
Ptx2=25;
Prx2=Ptx2+ Grx+Gtx -Lp;
Prx2=10^(Prx2/10);
Nd=9.7;
Nd=4.85;

```

```

%-----
correlacion=0.5;
%-----
beta1=log(10)/10;
beta2=log(10)/5;
var_a=2*(1-correlacion)*sigma1^2;% if rm,ro<Rb
sigma_a=(var_a/2)^0.5;      %desviaciones tipicas
var_b=(sigma1-sigma2)^2+2*(1-correlacion)*sigma1*sigma2;% if rm<Rb,ro>Rb
sigma_b=(var_b/2)^0.5;
var_c=2*(1-correlacion)*sigma2^2;% if rm,ro>Rb
sigma_c=(var_c/2)^0.5;
%6 veces lo mismo para 6 casos
Exp1_a=exp((beta1*sigma_a)^2);
Exp1_b=exp((beta1*sigma_b)^2);
Exp1_c=exp((beta1*sigma_c)^2);
Exp2_a=exp(((beta2*sigma_a)^2));
Exp2_b=exp(((beta2*sigma_b)^2));
Exp2_c=exp(((beta2*sigma_c)^2));
%-----
sigma_control=[0.0 1.0 2.0];
aux2=1;
%-----
for df=1:length(sigma_control);
    for df2=1:2
        if(df2==1)
            alfa=0.63;
            Gp=256;
            snr_deseado=7;
        else
            alfa=1;
        end
    end
%-----
sigma_control_array=sigma_control(df);%Desviacion referida al control de potencia
varianza_control=sigma_control_array^2;
pce=exp((beta1^2*varianza_control)/2);
p=exp(2*(beta1^2*varianza_control));
q=exp(beta1^2*varianza_control);

sa1=beta1*((var_b)^0.5);
sa2=10/((var_b)^0.5);
sb1=beta1*((var_b)^0.5);
sb2=10/((var_b)^0.5);
sc1=beta1*((var_c)^0.5);
sc2=10/((var_c)^0.5);
%-----
% Uplink Analysis.
%-----
sum_media=0.0;
sum_varianza=0.0;
n=0;

```

```

for rid=0.001*R:0.01*R:1.0*R;
    rim=2*R-rid;
    if rid<Rb;
        L=(Rb^(s1-s2))*(rim^s2/rid^s1);% loss====>Lb
        fraccion_L=sb2*log10(1/L);
        resta=sb1-fraccion_L;
        resta_norm=resta/1.414;
        f=alfa*Exp1_b*0.5*erfc(resta_norm);
        integral_media=L*f;
        intal=alfa*L*Exp1_b;
        Ldup=L^2;
        sb_1=2*sb1;
        resta=sb_1-fraccion_L;
        resta_norm=resta/1.414;
        g=alfa*Exp2_b*0.5*erfc(resta_norm);
        integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
    else
        L=((rim/rid)^s2);
        fraccion_L=sc2*log10(1/L);
        resta=sc1-fraccion_L;
        resta_norm=resta/1.414;
        f=alfa*Exp1_c*0.5*erfc(resta_norm);
        integral_media=L*f;
        intal=alfa*L*Exp1_c;
        Ldup=L^2;
        sb_1=2*sc1;
        resta=sb_1-fraccion_L;
        resta_norm=resta/1.414;

        g=alfa*Exp2_c*0.5*erfc(resta_norm);
        integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
    end;
    sum_media=sum_media+integral_media;
    sum_varianza=sum_varianza+integral_varianza;
    n=n+1;
end;
int0=sum_media/n;
intv0=sum_varianza/n;
%-----
sum_media=0.0;
sum_varianza=0.0;
n=0;
for rim=0.001*R:0.01*R:R;
    rid=2*R-rim;
    if rim<Rb;
        L=(Rb^(s2-s1))*(rim^s1/rid^s2);
        fraccion_L=sb2*log10(1/L);
        resta=sb1-fraccion_L;
        resta_norm=resta/1.414;
        f=alfa*Exp1_b*0.5*erfc(resta_norm);

```

```

integral_media=L*f;
Ldup=L^2;
sb_1=2*sb1;
resta=sb_1-fraccion_L;
resta_norm=resta/1.414;
g=alfa*Exp2_b*0.5*erfc(resta_norm);
integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
else
L=((rim/rid)^s2);
fraccion_L=sc2*log10(1/L);
resta=sc1-fraccion_L;
resta_norm=resta/1.414;
f=alfa*Exp1_c*0.5*erfc(resta_norm);
integral_media=L*f;
Ldup=L^2;
sb_1=2*sc1;
resta=sb_1-fraccion_L;
resta_norm=resta/1.414;
g=alfa*Exp2_c*0.5*erfc(resta_norm);
integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
end;
sum_media=sum_media+integral_media;
sum_varianza=sum_varianza+integral_varianza;
n=n+1;
end;
int1=sum_media/n;
intv1=sum_varianza/n;

sum_media=0.0;
sum_varianza=0.0;
n=0;
for rim=0.001*R:0.01*R:R;
rid=2*R+rim;
if rim<Rb;
L=(Rb^(s2-s1))*(rim^s1/rid^s2);
f=alfa*Exp1_b;
integral_media=L*f;
Ldup=L^2;
g=alfa*Exp2_b;
integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
else
L=((rim/rid)^s2);
f=alfa*Exp1_c;
integral_media=L*f;
Ldup=L^2;
g=alfa*Exp2_c;
integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
end;
sum_media=sum_media+integral_media;
sum_varianza=sum_varianza+integral_varianza;

```

```

    n=n+1;
end;
int2=sum_media/n;
intv2=sum_varianza/n;
%-----
sum_media=0.0;
sum_varianza=0.0;
n=0;
for rim=0.001*R:0.01*R:R;
    rid=4*R-rim;
    if rim<Rb;
        L=(Rb^(s2-s1))*(rim^s1/rid^s2);
        f=alfa*Exp1_b;
        integral_media=L*f;
        Ldup=L^2;
        g=alfa*Exp2_b;
        integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
    else
        L=((rim/rid)^s2);
        f=alfa*Exp1_c;
        integral_media=L*f;
        Ldup=L^2;
        g=alfa*Exp2_c;
        integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
    end;
    sum_media=sum_media+integral_media;
    sum_varianza=sum_varianza+integral_varianza;
    n=n+1;
end;
int3=sum_media/n;
intv3=sum_varianza/n;
%-----
sum_media=0.0;
sum_varianza=0.0;
n=0;
for rim=0.001*R:0.01*R:R;
    rid=4*R+rim;
    if rim<Rb;
        L=(Rb^(s2-s1))*(rim^s1/rid^s2);
        f=alfa*Exp1_b;
        integral_media=L*f;
        Ldup=L^2;
        g=alfa*Exp2_b;
        integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
    else
        L=((rim/rid)^s2);
        f=alfa*Exp1_c;
        integral_media=L*f;
        Ldup=L^2;
        g=alfa*Exp2_c;

```

```

    integral_varianza=Ldup*(q*g-p*f*f);
end;
sum_media=sum_media+integral_varianza;
sum_varianza=sum_varianza+integral_varianza;
    n=n+1;
end;
int4=sum_media/n;
intv4=sum_varianza/n;
%-----
if (df2==1)
intout_v=(int0+int1+int2+int3+int4)*(1+sll);
int1=0;
intv1=0;
varianza=((intv0+intv1+intv2+intv3+intv4)*(1+sll));
varianza_intra=((p*alfa)-(q*alfa^2))*(1+sll);
varianza_total_v=varianza + varianza_intra;
intin_v=(1+sll)*pce*alfa;
else
    intout_d=(int0+int1+int2+int3+int4)*(1+sll);
int1=0;
intv1=0;
varianza=((intv0+intv1+intv2+intv3+intv4)*(1+sll));
varianza_intra=((p*alfa)-(q*alfa^2))*(1+sll);
varianza_total_d=varianza + varianza_intra;
intin_d=(1+sll)*pce*alfa;
end
%-----
restringir=0.0;
snr_deseado=7.0;
if(df2==2)
for Nu=1:100; %Calculo de number_up conjunto
int=((intout_v*Nu)+(intin_v*(Nu-1)));
    int2=(intout_d*Nd+intin_d*(Nd-1));
    snr(Nu)=10*log10((epsilon*Prx*Gp)/(Prx*int+Prx2*int2+Pn));
    if snr(Nu) < snr_deseado;
        if restringir < 0.5;
            number_up=Nu-0.5
        end;
        restringir=1;
    end;
end;
for N=1:100;

varianza=(Prx^2*varianza_total_v*N + Prx2^2*varianza_total_d*Nd)^0.5;
    x= Prx*(number_up-N)/(varianza); %multiplicamos por la potencia de VOZ
    outage(N,df)=0.5*erfc(x/1.414);
end;
end;
end;
end;

```



```

semilogy(outage(:,1))
hold on
semilogy(outage(:,2),'--')
hold on
semilogy(outage(:,3),':')
grid on
axis([10 50 0.001 1])
xlabel('\bf Usuarios de voz/sector')
ylabel('\bf La probabilidad del desbordamiento')
legend('\bf \sigma_c=0.0 dB', '\bf \sigma_c=1.0 dB', '\bf \sigma_c=2.0 dB', 2)
zoom

```

## Código implementado para macroceldas

```

%Calculo del outage para voz en Macroceldas
%-----
% Uplink Analysis.
%-----
clear all;
close all;
clc;
%-----
Gp=256;

epsilon=0.9375;
%-----
sigma_control_array=[4 8];
f_array=[0.489 0.8364];
g_array=[0.1712 3.557];
h_array=[0.0659 0.0639];
q_array=[0.8004 0.6091];
mu=[4];
%----CALCULO DE LAS PERDIDAS-----
d=0.7;      %La distancia viene expresada en km
f=1950;     %La frecuencia viene expresada en MHz
Pn=-100;    %Potencia de ruido -100dBm
Pn=10.^(Pn/10)
Gtx=0;
Grx=12;
Ptx=19;     % 23dBm equivalen a 2W 25dBm equivalen a 3.16W
freq=1950;
lambda=300/freq;
%-----APLICACION DE MODELO DE HATA-----
ht=5.6;%(44.9 - 6.55*log10(ht) ) outage del 95%
hm=1.5;
a=0;%para hm=1.5 metros
b=1;% para d<=20km

```

```

sigma_o=1.0;
gamma=1.65;% 95% de usuarios bien atendidos
L=46.3+33.9*log10(f)-13.82*log(ht)-a + (44.9 - 6.55*log10(ht)
)*(log10(d))^b)+gamma*sigma_o;
% L=140;hay que ajustar ht para que el exponente de propagacion sea 4 (44.9
% + 6.55*log10(ht) ) outage del 95%
Prx=Ptx+ Grx+Gtx -L;
Prx=10^(Prx/10);%Trabajamos con Unidades naturales
%-----
%-----
for df=1:(length(sigma_control_array));
    sigma_control=sigma_control_array(df);
    %-----
    %--Parametros para macroceldas
    %-----
    M=3;
    nu=0.63;%Factor de actividad
    f=f_array(df);
    g=g_array(df);
    h=h_array(df);
    q=q_array(df);
    % N=1;

    beta=log(10)/10;
    % %-----
    % %-----CALCULO DE MEDIAS Y VARIANZAS
    % %-----
    restringir=0.0;
    snr_deseado=7.0;
    for Nu=1:100;%Se ha añadido mayor precision aumentando el paso en 10 mas

    %-----
    %    media_intra(Nu)=nu*Nuu*exp((beta^2)*(sigma_o^2)/2);
    %    media_extra(Nu)=nu*f*(M/(M-1))*Nuu*exp((beta^2)*(sigma_o^2)/2);
    media_intra(Nu)=nu*exp((beta^2)*(sigma_o^2)/2);
    media_extra(Nu)=nu*f*(M/(M-1))*exp((beta^2)*(sigma_o^2)/2);

    %    a(Nu)=nu*((M*(M+1))/((M-1)*(M-2)))*g*Nuu*exp(2*(beta^2)*(sigma_o^2));
    %    b(Nu)=(nu^2)*((M^2)/((M-1)^2))*h*Nuu*exp((beta^2)*(sigma_o^2));
    a(Nu)=nu*((M*(M+1))/((M-1)*(M-2)))*g*exp(2*(beta^2)*(sigma_o^2));
    b(Nu)=(nu^2)*((M^2)/((M-1)^2))*h*exp((beta^2)*(sigma_o^2));
    varianza_out(Nu)=a(Nu)-b(Nu);

    %    varianza_intra(Nu)=nu*Nuu*exp(2*(beta^2)*(sigma_o^2))-
    nu^2*q*Nuu*exp((beta^2)*(sigma_o^2));
    %    varianza_total(Nu)=varianza_out(Nu) + varianza_intra(Nu);
    varianza_intra(Nu)=nu*exp(2*(beta^2)*(sigma_o^2))-
    nu^2*q*exp((beta^2)*(sigma_o^2));
    varianza_total(Nu)=varianza_out(Nu) + varianza_intra(Nu);

```

```

int=((media_extra(Nu)*Nu)+(media_intra(Nu)*(Nu-1)));
snr(Nu)=10*log10((epsilon*Prx*Gp)/(Prx*int+Pn));
if snr(Nu) < snr_deseado;
    if restringir < 0.05;
        number_up=Nu-0.05;
    end;
    restringir=1;
end;
end;
for N=1:100;
    % N2=N/10;
    varianza_outage=(Prx^2*varianza_total(N)*N)^0.5;
    x=Prx*(number_up-N)/(varianza_outage);
    outage(N,df)=0.5*erfc(x/1.414);
end;
end;
end;
%-----
%-----REPRESENTACIONES GRAFICAS
%-----
semilogy(outage(:,1))
hold on
semilogy(outage(:,2),':')
grid on
axis([0 60 0.001 1])
xlabel('\bf Usuarios de voz/sector')
ylabel('\bf La probabilidad del desbordamiento')
legend('\bf \sigma_c=4.0 dB', '\bf \sigma_c=8.0 dB',2)
zoom

```

## Anexo1 PRESUPUESTO

---

- 1) **Ejecución Material**
  - Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.000 €
  - Alquiler de impresora láser durante 6 meses..... 50€
  - Material de oficina..... 150€
  - Total de ejecución material ..... 2.200 €
  
- 2) **Gastos generales**
  - 16 % sobre Ejecución Material ..... 352 €
  
- 3) **Beneficio Industrial**
  - 6 % sobre Ejecución Material ..... 132 €
  
- 4) **Honorarios Proyecto**
  - 640 horas a 15 € / hora..... 9600 €
  
- 5) **Material fungible**
  - Gastos de impresión..... 80 €
  - Encuadernación..... 6 €
  
- 6) **Subtotal del presupuesto**
  - Subtotal Presupuesto ..... 12370 €
  
- 7) **I.V.A. aplicable**
  - 16% Subtotal Presupuesto ..... 1979.2 €
  
- 8) **Total presupuesto**
  - Total Presupuesto..... 14349 €

Madrid, Marzo de 2008

Tutor: Bazil Taha Ahmed

Fdo.: Guillermo Colmena Muñoz  
Ingeniero Superior de Telecomunicación

## Anexo2 PLIEGO DE CONDICIONES

---

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un sistema de cálculo de capacidad de WCDMA. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la

misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.