

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES**



**TESIS DOCTORAL**

**Caracterización Experimental y Modelado de Canal  
MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN**

**Autor: Oscar Fernández Fernández**

**Directores: Marta Domingo Gracia y Rafael P. Torres Jiménez**

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la  
obtención del título de Doctor por la Universidad de Cantabria**

**Santander, Mayo de 2007**

# Capítulo 5

## Capacidad de los sistemas MIMO

### 5.1 Introducción

La gran ventaja de los sistemas MIMO frente a los SISO es mejorar significativamente la capacidad del canal sin necesidad de aumentar ni la potencia transmitida ni el ancho de banda utilizado. Los estudios realizados por Winters [1], Foschini [2] y Telatar [3, 4] en el campo de la teoría de la información abren la puerta a este área de investigación que actualmente se encuentra en pleno auge.

Fue Telatar [4] quien, en la década de los 90, propuso expresiones de capacidad para los sistemas MIMO equivalentes a las expresiones de capacidad propuestas años atrás por Shannon para canales SISO [5]. Estas expresiones prometen alta eficiencia espectral que aumenta linealmente con el número de antenas [4, 6, 7].

Sin embargo estas expresiones muestran un límite superior de la capacidad sujeto a condiciones ideales de funcionamiento, principalmente la ortogonalidad entre los diferentes subcanales del sistema MIMO. Numerosos estudios analizan la capacidad del canal cuando estas condiciones de funcionamiento no son ideales, mostrando como el rendimiento del canal sufre una importante degradación con respecto del comportamiento ideal. Así [8-10] muestran como la correlación espacial produce una disminución de la capacidad y [11-13] presentan el efecto *keyhole*, un fenómeno que reduce la capacidad del canal incluso en ausencia de correlación.

Aunque gran parte de los trabajos publicados se centran en el estudio de canales MIMO de banda estrecha, también aparece en la literatura trabajos enfocados al estudio de canales MIMO selectivos en frecuencia. Cioffi en [7] plantea una de las primeras propuestas para explotar mediante OFDM los sistemas MIMO en canales dispersivos. El uso de MIMO junto con OFDM es una propuesta que, introduciendo poca complejidad, permite abarcar una nueva dimensión de diversidad, el dominio frecuencial [7, 14, 15]. En [15] se proponen técnicas en la capa física que utilizan MIMO-OFDM para obtener eficiencias espectrales de hasta 10 bits/s/Hz.

La bondad del canal MIMO puede estudiarse bien a través de la probabilidad de error en el sistema o mediante el análisis de la capacidad. En este trabajo se evalúa el rendimiento de los canales MIMO desde la segunda perspectiva, es decir a partir del análisis de la capacidad, presentando la capacidad del canal MIMO como límite superior de la eficiencia espectral y con independencia de los esquemas de transmisión y codificación utilizados.

En este capítulo se desarrollarán las expresiones de capacidad del canal MIMO obtenidas desde el punto de vista de la teoría de la información y desde el punto de vista de la ingeniería de comunicaciones que permite una interpretación de la misma a partir de las características físicas del canal. A partir de estas expresiones se definirán los conceptos de capacidad ergódica y capacidad outage.

Posteriormente, se extenderá el cálculo de la capacidad a canales selectivos en frecuencia mostrando la mejora en capacidad obtenida gracias a la diversidad frecuencial del sistema MIMO-OFDM.

Dada la importancia de los valores propios de la matriz  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ , en el cálculo de la capacidad se muestra como estos valores propios relacionan directamente las características físicas del canal con la eficiencia espectral. Se verá como la magnitud de los valores propios está condicionada por la correlación espacial entre subcanales y por tanto limita la capacidad. Finalmente se presentan parámetros que limitan la capacidad, como la correlación espacial, el efecto *keyholes*, la selectividad frecuencial o la estadística de los desvanecimientos.

Una vez definida la base teórica así como las dependencias de la capacidad con diferentes parámetros, se presentarán los resultados de capacidad y valores propios de canales MIMO planos y selectivos en frecuencia obtenidos a partir de las campañas de medida presentadas en el capítulo 3.

## 5.2 Capacidad en sistemas MIMO

Una medida de las prestaciones del canal MIMO se expresa en función de la capacidad, es decir, de la tasa binaria máxima por Hertzio que se puede obtener cuando la probabilidad de error tiende asintóticamente a cero, a medida que se aumenta el tamaño del bloque de información transmitida. Tomando como referencia la expresión de capacidad de Shannon para canales SISO, la eficiencia espectral en los sistemas MIMO queda determinada por dos parámetros, la relación señal a ruido (SNR) y el número de subcanales equivalentes con sus respectivas ganancias dadas por los valores propios de  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ . En los canales MIMO el número de subcanales equivalentes así como su ganancia constituyen la principal ventaja sobre los sistemas tradicionales de una entrada y una salida (SISO).

La capacidad del canal MIMO se puede interpretar desde dos puntos de vista diferentes, bien desde el punto de vista de la teoría de la información, bien desde el punto de vista de la ingeniería de comunicaciones. La teoría de la información obtiene la capacidad del canal a partir del cálculo riguroso de la información mutua máxima; la ingeniería de comunicaciones la obtiene a partir del modelo equivalente del canal MIMO. Esta segunda visión facilita la interpretación de la capacidad desde un punto de vista más intuitivo en función de las características del canal radio.

Para una correcta presentación de los resultados obtenidos en distintas situaciones, tanto para SISO como para MIMO ha sido necesario una normalización de la respuesta del canal respecto a su ganancia. La normalización se realiza bien para cada matriz de canal medido, bien para cada área local [16]. Si se calcula por cada matriz de canal, el factor de normalización de H vendrá dado por

$$\sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |h_{ij}|^2} \quad (5.1)$$

mientras que si se realiza por cada conjunto de medidas, es decir por cada área local, el factor de normalización será (5.2), donde P indica el número de puntos en del área local.

$$\sqrt{\frac{1}{PMN} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |h_{ij}^p|^2} \quad (5.2)$$

Ambas normalizaciones permiten realizar interpretaciones similares de la capacidad media pero interpretaciones diferentes de la capacidad outage, es decir, de la capacidad mínima garantizada un amplio porcentaje del tiempo. Al normalizar según la primera

norma, se garantiza para cada matriz que la norma de Frobenius, o norma euclídea,  $\|\mathbf{H}\|_F^2$ , sea igual a  $MN$ . Como cada punto del área local está normalizado a un valor medio, en conjunto las capacidades no muestran variaciones dentro del área local. La segunda sí permite incorporar las variaciones entorno al valor medio en los valores de capacidad y cumple que el valor medio de la norma de Frobenius,  $E[\|\mathbf{H}\|_F^2]$ , valga  $MN$ .

Dado que las medidas mantienen la estacionariedad del canal dentro de cada área local, resulta más ventajoso utilizar la segunda normalización, obteniéndola a partir del conjunto de medidas.

### 5.2.1 Interpretación desde la teoría de la información

Desde el punto de vista de la teoría de la información [4, 17], para canales MIMO Gaussianos [18] la información mutua viene definida por la expresión (5.3), para el caso en que el vector de entrada  $\mathbf{x}$  sea Gaussiano complejo circular simétrico de media cero.

$$I = \log_2(\det(\mathbf{I}_N + 1/\sigma^2 \mathbf{Q}\mathbf{H}^H\mathbf{H})) = \log_2(\det(\mathbf{I}_M + 1/\sigma^2 \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H)) \quad (5.3)$$

En esta expresión,  $\mathbf{I}_G$  es la matriz identidad de orden  $G$ ,  $\mathbf{Q}$  la matriz de covarianzas de la señal de entrada  $\mathbf{x}$  dada por  $\mathbf{Q}=E[\mathbf{x}\cdot\mathbf{x}^H]$ ;  $\mathbf{I}_M+\mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H$  es la matriz de covarianzas de la señal de salida  $\mathbf{r}$  y  $\sigma^2$  es la potencia media de ruido. Se ha utilizado el logaritmo en base 2 con el fin de obtener la información mutua en bits/s/Hz. Algunos autores utilizan la base  $e$  para expresar la información mutua en nats/s/Hz.

La capacidad del canal se obtiene para la información mutua máxima dada por  $C=E_{\mathbf{H}}[I_{\max}]$ , siendo  $E_{\mathbf{H}}[\cdot]$  el valor esperado sobre las realizaciones de  $\mathbf{H}$ . Esta información mutua máxima se consigue optimizando la matriz de covarianza  $\mathbf{Q}$ , cuya traza representa la potencia de cada una de las señales  $x_i$ .

A partir de la descomposición en valores propios, la matriz hermítica  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  se puede descomponer en  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}=\mathbf{U}^H\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}$ . De esta forma la información mutua puede expresarse como:

$$I = \log_2(\det(\mathbf{I}_N + 1/\sigma^2 \mathbf{\Lambda}^{1/2}\mathbf{U}\mathbf{Q}\mathbf{U}^H \mathbf{\Lambda}^{1/2})) \quad (5.4)$$

Para obtener la información mutua máxima, se debe maximizar la covarianza de la señal de entrada  $\mathbf{Q}$ , lo que es equivalente a maximizar  $\mathbf{Q}'=\mathbf{U}\mathbf{Q}\mathbf{U}^H$ . Se verifica que la traza de la matriz  $\mathbf{Q}'$  es igual a la de  $\mathbf{Q}$  gracias a lo cual se mantiene la potencia transmitida.

Para cualquier matriz no negativa  $\mathbf{A}$ ,  $\det(\mathbf{A}) \leq \prod_i A_{ii}$  luego

$$I = \log_2(\det(I_N + 1/\sigma^2 \Lambda^{1/2} \mathbf{Q}' \Lambda^{1/2})) \leq \log_2 \left( \prod_i (1 + 1/\sigma^2 Q_{ii}' \cdot \lambda_i) \right) \quad (5.5)$$

Cuando  $\mathbf{Q}'$  sea una matriz diagonal las expresiones a ambos lados de la desigualdad coincidirán y solo es necesario determinar los elementos  $q_{ii}'$  de dicha diagonal.

Si se conoce el canal en el transmisor y en el receptor (*Channel State Information*, CSI), la asignación de potencia puede optimizarse para obtener la información mutua máxima. Aplicando el algoritmo de *water-filling* [19] se calcula cada uno de los  $q_{ii}'$  según la expresión (5.6).

$$q_{ii}' = \mu - \frac{1}{\lambda_i}, \quad i = 1, \dots, K \quad (5.6)$$

donde el parámetro  $\mu$  representa el nivel de potencia al que se “llena” cada subcanal. Dado que  $q_{ii}'$  es la potencia transmitida asignada al subcanal  $i$ -ésimo, para ubicar notaciones se designa como  $P_i$ . El algoritmo de *water-filling* asigna mayor potencia a los canales con mayor ganancia.

$$\frac{1}{\lambda_1} + P_1 = \frac{1}{\lambda_2} + P_2 = \dots = \frac{1}{\lambda_K} + P_K = \mu \quad (5.7)$$

Así la información mutua es:

$$I = \log_2 \left[ \prod_i (1 + 1/\sigma^2 P_i \cdot \lambda_i) \right] = \sum_{i=1}^K \log_2 (1 + P_i / \sigma^2 \cdot \lambda_i) \quad (5.8)$$

Luego la capacidad ergódica o de Shannon es:

$$C = E[I] = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_i}{\sigma^2} \lambda_i \right) \right] (\text{bits} / \text{s} / \text{Hz}) \quad (5.9)$$

Si únicamente se dispone de la información del canal en el receptor, no se puede aplicar la técnica de *water-filling*. En consecuencia, la potencia está repartida por igual entre los elementos de la diagonal  $\mathbf{Q}' = \frac{P_T}{N} I_N$ . En este caso la capacidad viene dada por:

$$C = E[I_{\max}] = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{N \cdot \sigma^2} \lambda_i \right) \right] (\text{bits} / \text{s} / \text{Hz}) \quad (5.10)$$

Se observa que esta capacidad obtenida con asignación uniforme de potencia (*uniform power allocation*) es menor o igual que la obtenida a través del reparto de potencia por *water-filling*.

### 5.2.2 Interpretación desde la ingeniería de comunicaciones

En ingeniería de comunicaciones [18, 20, 21] el modelo equivalente interpreta el canal MIMO como  $K$  canales paralelos e independientes (canales propios o *eigenmodos* [8]) con ganancia en potencia  $\lambda_i$  con  $i=1,2,\dots,K$ . Si la capacidad de cada uno de estos canales complejos Gaussianos viene dada por la fórmula tradicional de Shannon (5.11), al estar desacoplados, la capacidad total del sistema vendrá dada por la suma de todas las capacidades individuales (5.12).

$$C = E[I] = E \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{P}{\sigma_n^2} |h|^2 \right) \right] \quad (5.11)$$

$$C = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_i}{\sigma_n^2} \lambda_i \right) \right] \quad (5.12)$$

donde  $P_i$  es la potencia asignada al subcanal  $i$ -ésimo y  $\sigma_n^2$  representa la potencia de ruido en la antena receptora.

Si sólo se dispone de información del canal en el receptor, la potencia asignada a cada canal será la misma. Se reparte la potencia total  $P_T$  equitativamente entre los  $N$  transmisores,  $P_i = P_T/N$  (*uniform power allocation*). Así la capacidad será:

$$C = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_i}{\sigma_n^2} \lambda_i \right) \right] = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{N \cdot \sigma_n^2} \lambda_i \right) \right] \quad (5.13)$$

Puede verse que esta expresión es equivalente a la presentada en (5.10) por la teoría de la información. De nuevo, para maximizar la capacidad será necesario conocer el canal también en el transmisor permitiendo así una distribución óptima de la potencia entre los subcanales (*water-filling*).

$$C = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_i}{\sigma_n^2} \lambda_i \right) \right] \quad (5.14)$$

donde  $P_i = \mu - \frac{1}{\lambda_i}$ ,  $i = 1, \dots, K$ , verificándose que  $\sum_{i=1}^K P_i = P_T$

### 5.2.3 Observaciones sobre la capacidad

De forma general, independientemente del punto de análisis bajo el que se interpreta la capacidad, en sistemas operando con SNR baja o con desvanecimientos correlados, el producto  $P_i \lambda_i / \sigma_n^2$  en algunos subcanales es pequeño, próximo a cero. Estos subcanales contribuyen de manera poco significativa en la expresión (5.12). Así aunque un canal de rango  $K$  dispone de  $K$  grados de libertad, el número de canales que realmente aportan al enlace, es decir los grados de libertad efectivos, son menores  $K_0 < K$ . Así solo  $K_0$  canales contribuyen a la capacidad, mientras que la aportación de  $K - K_0$  canales es prácticamente despreciable. El reparto de potencia mediante *water-filling* contribuye a que la potencia se asigne a los  $K_0$  subcanales que realmente contribuyen.

En un sistema MIMO de  $M$  antenas transmisoras y  $N$  antenas receptoras, con rango de  $\mathbf{H}$  igual a  $K$ , la capacidad del canal será máxima [16] cuando todos los valores propios son iguales. Así, si el número de receptores es superior al de transmisores,  $M < N$ ,  $\max(K) = \min(M, N) = M$ . Dado que se verifica que la suma de los valores propios es igual a  $MN$ , se obtiene que  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_K = N$ .

Así la capacidad máxima será:

$$C = E \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2 M} N \right) \right] = M \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2 M} N \right) \quad (5.15)$$

En este caso la SNR mejora un factor  $N/M$  gracias a que se dispone de un mayor número de receptores. Si el número de transmisores es superior al de receptores se pierde esa ganancia por diversidad.

La capacidad será mínima cuando todos los valores propios sean nulos exceptuando el primer valor propio,  $\lambda_1 = MN$ ,  $\lambda_i = 0$  para  $i \neq 1$ . En este caso el canal MIMO se reduce al caso del canal SIMO. Solo presenta una ganancia en potencia gracias a la diversidad en recepción (5.16).

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2 M} MN \right) = \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2} N \right) \quad (5.16)$$

Para valores elevados de SNR se verifica que el crecimiento de la capacidad en función de la SNR es prácticamente lineal, y la pendiente responde al  $\min(M, N)$ , es decir:

$$C \approx \min\{M, N\} \log_2(SNR) \quad (5.17)$$

En condiciones ideales y alta SNR al aumentar 3dB la SNR en el sistema MIMO la capacidad mejora casi  $n=\min(M,N)$  bit/s/Hz a diferencia del sistema SISO que solo aumenta 1 bit/s/Hz.

## 5.3 Conceptos de Capacidad

Dependiendo del tipo de canal analizado, ergódico o no ergódico se hablará de capacidad ergódica y capacidad outage respectivamente. La capacidad ergódica representa la capacidad media del canal, es decir la velocidad de transmisión de datos que puede alcanzar un sistema MIMO utilizando un cierto ancho de banda, mientras que la capacidad outage da una idea de la fiabilidad operativa del sistema, indicando la velocidad de transmisión de datos mínima garantizada en un alto porcentaje de tiempo.

### 5.3.1 Capacidad Ergódica

La capacidad ergódica [6, 23] o de Shannon es la capacidad media obtenida a partir de las expresiones (5.9) o (5.12), es decir, la capacidad media del canal. Como se apuntó anteriormente, la capacidad ergódica representa la tasa máxima de transmisión, libre de errores, soportada por el canal a medida que aumenta el tamaño del bloque de información transmitido.

Se puede hablar de capacidad ergódica [14] cuando el tiempo de transmisión es lo suficientemente largo como para mostrar las propiedades ergódicas del canal multicamino.

### 5.3.2 Capacidad Outage

Cuando los bloques de información transmitida se reducen, el transmisor sólo ve unas pocas realizaciones de los coeficientes del canal y por tanto deja de ser ergódico; estrictamente la capacidad de Shannon será cero. Para estas situaciones se cuantifica la capacidad a partir de la capacidad outage. Se define la capacidad outage al  $q\%$ ,  $C_{out,q}$  como la tasa de información garantizada en el  $(100-q)\%$  de las realizaciones del canal o como la tasa por debajo de la cual se transmitirá el  $q\%$  de las ocasiones [23] (peor caso):

$$P(I < C_{out,q}) = q\% \quad (5.18)$$

La probabilidad de outage (o de fallo) para una cierta velocidad de transmisión  $R$  se define como la probabilidad de que la información mutua caiga por debajo de esa tasa  $R$

$$P_{\text{out}}(R) = P(I \leq R) \quad (5.19)$$

Determinar la capacidad outage resulta útil para evaluar el rendimiento de aplicaciones de transmisión de datos, cuyos retardos deben estar limitados, por ejemplo en aplicaciones de voz y multimedia. Valores de  $q$  típicos para este tipo de aplicaciones son 1%, 3% ó 10%.

En la Figura 5.1 se muestra la capacidad ergódica y outage de sistema MIMO con diferentes configuraciones en función de la relación señal a ruido

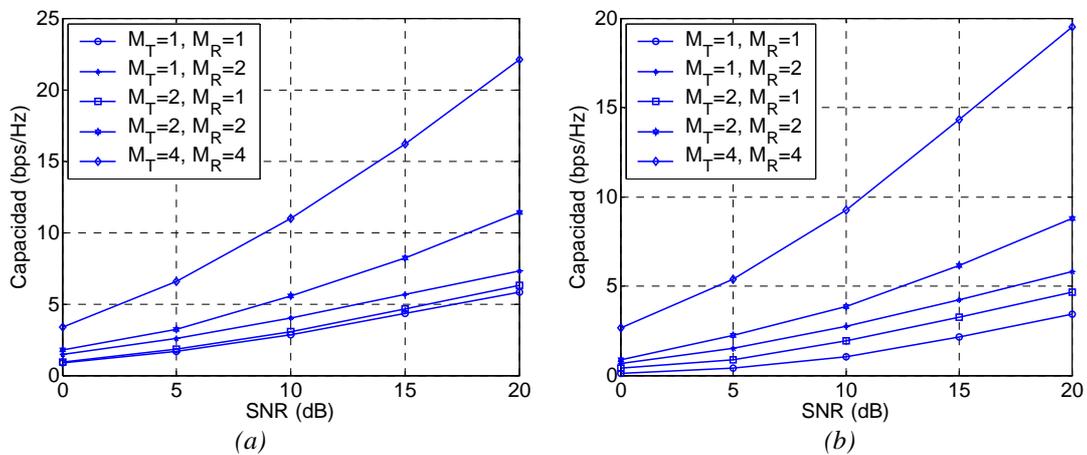


Figura 5.1. Capacidad media(a) y outage (b) 10% para distintas configuraciones y SNRs [23]

## 5.4 Capacidad en sistemas de banda ancha

Cuando el comportamiento del canal es selectivo en frecuencia, es necesario aplicar alguna estrategia que permita mitigar esta selectividad. En sistemas monoportadora, para adaptar la transmisión al comportamiento del canal, se recurre al uso de ecualizadores de canal que pre-distorsionan la señal transmitida. Sin embargo, la implementación de este tipo de ecualizadores presenta serios inconvenientes ya que requiere un conocimiento del estado del canal en el transmisor y añade complejidad al sistema, sobre todo en los sistemas MIMO.

En sistemas multiportadora, como la multiplexión ortogonal por división en frecuencia (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplex*), el canal selectivo de ancho de banda  $B$  se divide en  $Q$  subcanales de ancho de banda  $B/Q$  garantizando que en ese ancho de banda el canal presenta un comportamiento similar, pudiéndose considerar como plano [24]. Este sistema puede implementarse de una manera fácil y eficiente en el dominio

discreto utilizando la transformada rápida de Fourier Inversa (IFFT) como modulador y la transformada rápida de Fourier (FFT) como demodulador. Su principal ventaja es que no requiere conocer el canal en el extremo transmisor, aunque disponer de la información del mismo, en recepción y transmisión, puede permitir que la estrategia de transmisión se adapte al canal.

Dada estas ventajas, OFDM está muy utilizada en multitud de estándares, como IEEE 802.11a, IEEE 802.16, HIPELAN/2 o el estándar Digital Video Broadcasting (DVB-T). La eficiencia espectral está entorno a los 2.7 b/s/Hz para IEEE802.11a o entre 0.7-3.82 b/s/Hz en el estándar IEEE802.16.

El uso combinado de MIMO-OFDM promete una mejora importante de la eficiencia espectral, alcanzando unos valores de 10 bits/s/Hz en redes LAN/MAN [15]. En canales MIMO-OFDM la capacidad del canal se puede considerar como el promedio de las capacidades obtenidas a través de los  $Q$  canales de banda estrecha.

$$C = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q C_q = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \left[ \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2 M} \lambda_i^q \right) \right] \quad (5.20)$$

La matriz de canal, normalizada previamente respecto a la potencia promedio de los  $MN$  subcanales MIMO en los  $Q$  tonos de la función de transferencia y en los  $n$  puntos medidos viene dada por la expresión (5.21).

$$\sqrt{\mathbb{E}_{n \text{ pto}} \left[ \frac{1}{QMN} \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |h_{ij}^q|^2 \right]} \quad (5.21)$$

donde  $\mathbb{E}_{n \text{ pto}} [\cdot]$  representa el valor medio sobre las  $n$  realizaciones de canal medidas.

En los sistemas MIMO la dispersión temporal no introduce mejoras desde el punto de vista de capacidad ergódica [25, 26] pero sí desde el punto de vista de capacidad outage, dado que se añade un grado de libertad en la diversidad [14].

Según (5.20) la capacidad en un canal MIMO-OFDM es el valor esperado de capacidad obtenido sobre el conjunto de capacidades de los canales MIMO de banda estrecha. La distribución de cada una de estas capacidades de banda estrecha  $C_q$  es independiente del tono correspondiente  $q$  [14]. Así todas las  $C_q$  tienen igual varianza dada por  $\sigma_C^2$ .

La dispersión de la distribución de probabilidad de la capacidad determina el comportamiento de los extremos de la función de distribución, es decir, la capacidad de outage. Esta varianza depende de la dispersión del retardo, que a su vez está relacionada

con la selectividad frecuencial, y de la varianza de la capacidad de los canales de banda estrecha ( $\sigma_c^2$ ), es decir de su estadística de los desvanecimientos. Si el canal es plano en frecuencia todos los tonos presentan simultáneamente el mismo comportamiento luego la varianza de la capacidad es:

$$\text{var}\{C\}=\sigma_c^2 \quad (5.22)$$

En un canal incorrelado en frecuencia, las diferentes  $C_q$  están totalmente incorreladas y la varianza de la capacidad es:

$$\text{var}\{C\}=(1/Q)\sigma_c^2 \quad (5.23)$$

Se observa que al reducir la varianza se obtiene una mejora importante en la capacidad outage frente al caso de banda estrecha.

La estadística de los desvanecimientos en cada uno de los canales de banda estrecha condiciona el valor de  $\sigma_c^2$ . Para un canal tipo Rayleigh formado por componentes en fase y cuadratura Gaussianas de media cero y varianza  $\sigma^2$ , la varianza  $\sigma_c^2$  adquiere un valor proporcional a  $0.43\sigma^2$ . Si la estadística pasa a ser de tipo Rice, la varianza de los desvanecimientos se reduce. Al aumentar el parámetro  $K$  de la estadística de Rice, la componente fuerte predomina sobre las componentes Rayleigh, reduciéndose la variación entorno a la media; así, para  $K$  muy altos, la distribución de probabilidad se aproxima a una delta. La reducción de la varianza de la estadística de los desvanecimientos con el parámetro  $K$  se refleja en una reducción de la varianza de la capacidad  $\sigma_c^2$ .

## 5.5 Valores Propios

En el capítulo 2 se ha visto que los valores singulares de la matriz del canal  $\mathbf{H}$  juegan un papel fundamental a la hora de caracterizar el sistema MIMO dado que, al igual que la matriz  $\mathbf{H}$ , los valores propios agrupan toda la información del canal, grados de libertad, correlación entre subcanales y permiten determinar la eficiencia espectral del sistema. Concretamente, los valores propios ( $\lambda_i$ ) son el cuadrado de los valores singulares ( $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ ) y representan la ganancia en potencia de los diferentes subcanales equivalente independientes generados en el canal MIMO equivalente; esto permite obtener la capacidad del sistema como la suma de las capacidades de los diferentes subcanales.

El estudio de los valores propios permite conocer el rendimiento del canal MIMO de manera directa sin necesidad de fijar una relación señal a ruido, como ocurre en el cálculo de la capacidad del canal.

Los valores singulares se pueden obtener bien realizando la descomposición en valores singulares (SVD) sobre la matriz  $\mathbf{H}$ , bien mediante la descomposición en valores propios (EVD) de la matriz de correlación instantánea o matriz de Wishart,  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  o  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$ .

Así, tal como se ha descrito en el apartado 2.6, mediante la descomposición en valores singulares la matriz  $\mathbf{H}$  se puede describir como:

$$\mathbf{H}=\mathbf{U}\cdot\mathbf{D}\cdot\mathbf{V}^H \quad (5.24)$$

Las columnas de  $\mathbf{U}$  y  $\mathbf{V}$  representan los vectores propios de entrada y salida de  $\mathbf{H}$  mientras que  $\mathbf{D}$  es una matriz diagonal cuyos elementos son los valores singulares  $\mathbf{D}=\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_K)$ , con  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_K > 0$ , siendo  $K=\text{rank}(\mathbf{H})$ .

La descomposición en valores propios se aplica a la matriz de correlación instantánea,  $\mathbf{R}$ , obtenida como  $\mathbf{R}=\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  si  $M \geq N$  o como  $\mathbf{R}=\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  si  $M < N$  siendo  $(\cdot)^H$  la operación transposición hermítica. Así, aplicando la descomposición en valores propios, se obtiene que  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H = \mathbf{U}\mathbf{\Gamma}\mathbf{U}^H$  y  $\mathbf{H}^H\mathbf{H} = \mathbf{V}\mathbf{\Gamma}\mathbf{V}^H$ , siendo  $\mathbf{\Gamma}=\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K)$  con  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_K > 0$

Para la descomposición en valores propios o en valores singulares, la matriz de canal  $\mathbf{H}$  ha sido normalizada de acuerdo con (5.2) cumpliéndose que  $E[||\mathbf{H}||_F^2]=MN$ . De esta forma, se garantiza que el valor esperado de la traza de  $\mathbf{R}$ , suma de los valores propios, es igual a  $MN$ :

$$E[Tr(\mathbf{R})] = E\left[\sum_i \lambda_i\right] = MN \quad (5.25)$$

Dado que los elementos de la matriz  $\mathbf{H}$  son variables aleatorias, también lo serán los valores propios, por lo que su comportamiento se describe mediante su función de distribución. El conocimiento de la distribución de los valores propios resulta fundamental para obtener la distribución de la capacidad del canal y para determinar la estrategia de transmisión:

- Si hay un valor propio predominante, como ocurre por ejemplo en canales correlados, es preferible transmitir solo sobre dicho valor propio, operación conocida como *eigenbeamforming*. Si bien en este caso no se aprovecha la ganancia en diversidad sí la ganancia en array.
- Si los valores propios tienen amplitud significativa, poca correlación, es preferible utilizar todos los valores propios significativos con lo que se aumenta la ganancia en diversidad o en multiplexación.

Algunos autores [27] presentan la estadística del valor singular más pequeño dado que determina la distancia mínima entre dos vectores recibidos, otros presentan la estadística del valor propio más grande [28] o la distribución conjunta completa de los valores propios de la matriz de Wishart [29] o pseudo-Wishart [30]. Los valores propios permiten también asignar de manera óptima la potencia por los diferentes subcanales o ramas del canal MIMO (*water-filling*).

En un sistema 2x2 la capacidad se puede calcular a partir de los valores propios según (5.13):

$$C(\lambda_1, \lambda_2, SNR) = \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{M} \lambda_1 \right) + \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{M} \lambda_2 \right) \quad (5.26)$$

De acuerdo con (5.25) la suma de los valores propios viene dado por  $MN$ . Para el caso 2x2,  $\lambda_1 + \lambda_2 = 2 \cdot 2$ . La capacidad del canal se puede expresar de acuerdo con (5.26) en función de uno solo de los valores propios. En la Figura 5.2 se representa la variación de la capacidad con el valor propio  $\lambda_2$  para una SNR de 15dB.

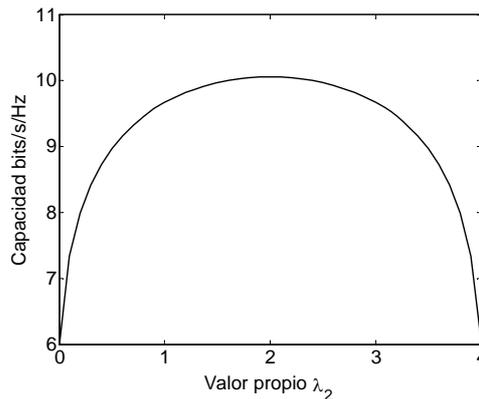


Figura 5.2. Capacidad en función del segundo valor propio  $\lambda_2$

El canal ideal con capacidad máxima se obtiene cuando ambos valores propios adquieren el mismo valor. De manera general se puede decir que en un sistema MIMO  $M \times N$  ideal de rango  $K$ , la capacidad será máxima cuando los valores propios  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_K = MN/K$

La relación entre el valor propio superior y el inferior viene dada por el número de condicionamiento, más conocido por su término inglés *condition number*,  $\kappa$ . El número de condicionamiento es una forma compacta de evaluar la ganancia del canal MIMO respecto al SISO aunque no aporta información sobre la distribución de los valores propios. En un sistema MIMO 2x2:

$$\kappa = \lambda_1 / \lambda_2 \quad (5.27)$$

Si el canal MIMO es ideal, se cumple que  $\kappa=1$  dado que ambos valores propios son iguales. Para canales reales, es deseable que este parámetro sea lo menor posible para que la matriz del canal esté bien condicionada, es decir las filas y columnas sean linealmente independientes. En el caso contrario, se dice que está mal condicionada anunciando que existe algún tipo de dependencia entre filas o columnas, es decir, existe correlación.

La Figura 5.3 muestra los valores propios y el *condition number* en función de la correlación introducida en uno de los extremos del canal mediante el modelo de Kronecker. Se observa que a menor correlación mayor es el segundo valor propio y por tanto menor el *condition number*.

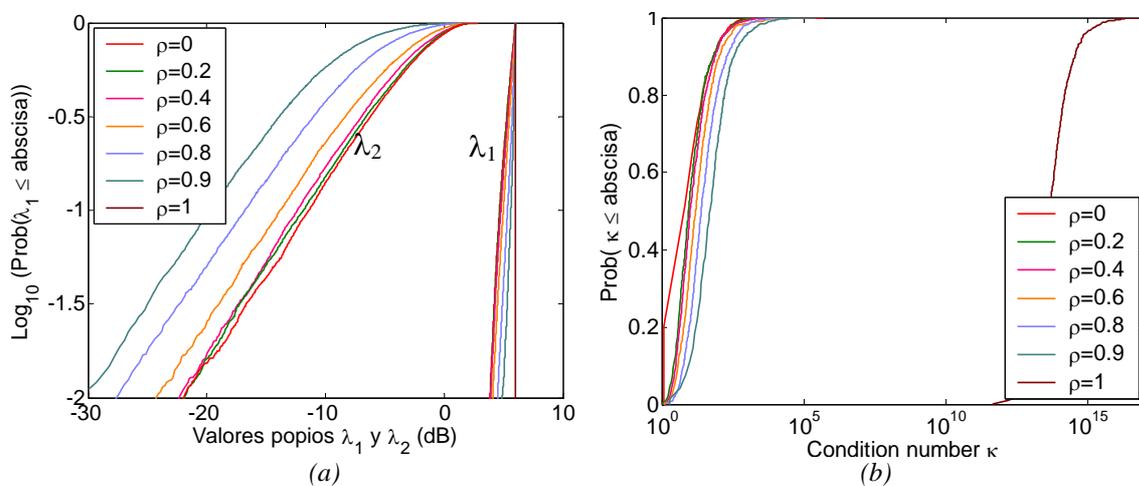


Figura 5.3. CDF de los valores propios (a) y del condition number (b) para un canal MIMO con diferente correlación en transmisión, según modelo de Kronecker y SNR=30dB

## 5.6 Factores que limitan la capacidad

Existen varios factores que reducen la capacidad del canal respecto al caso ideal o de Rayleigh presentado por Telatar [4]. Entre estos factores se puede destacar la pobreza de *scattering* en el entorno, la presencia de línea de vista, las características de las antenas, etc. La influencia de estos factores deriva en un aumento de la correlación espacial entre los subcanales del sistema MIMO, disminuyendo el rango de la matriz respuesta al impulso (filas o columnas linealmente dependientes) y en consecuencia el canal presenta una reducción de la capacidad.

En ocasiones aunque el escenario sea rico en *scattering* y presente baja correlación espacial, se producen fenómenos que reducen el rango de la matriz de canal. Estos fenómenos, denominados *Keyhole* o *pinhole*, han sido estudiados por diversos autores [11-13].

Los canales MIMO-OFDM presentan una ganancia por diversidad frecuencial que permite un incremento de la capacidad. Si aumenta el ancho de banda de coherencia o disminuye la variación de las amplitudes de los tonos se reduce la diversidad frecuencial y por tanto la ganancia en capacidad introducida.

### 5.6.1 Influencia de la correlación espacial

Como sistema de diversidad espacial, es importante que la correlación entre los diferentes coeficientes del canal sea lo menor posible. Diversos autores [8-10] han mostrado que la capacidad se degrada significativamente con la correlación espacial entre los subcanales y aunque la capacidad aun crece linealmente con la SNR, cuando esta es alta, el factor de escalado es menor que en el caso incorrelado [31].

En la Figura 5.4 se muestra la capacidad media en función de la SNR para un sistema MIMO 2x2 para diversos valores de correlación,  $\rho$ . La presencia de correlación modifica la distribución de los valores propios, aumentando la dispersión entre los mismos y haciendo que la ganancia en potencia de los subcanales generados sea menor, de manera que se reduce el número de subcanales significativos.

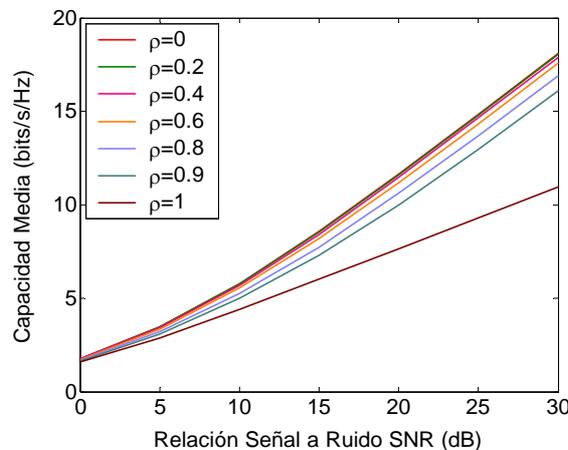


Figura 5.4. Capacidad media en un sistema 2x2 en función de la SNR y la correlación según el modelo de Kronecker.

Dado que la capacidad se calcula a través de la función logaritmo, los valores propios inferiores,  $\lambda_2$  y siguientes, tienen una gran influencia en la capacidad. Por ejemplo, se ha visto como en un sistema MIMO 2x2  $\lambda_1 + \lambda_2 = 2 \cdot 2$ ; si los canales son tipo Rayleigh, los valores medios de los valores propios en un canal incorrelado son  $\lambda_1 = 3.5$  y  $\lambda_2 = 0.50$  permitiendo una capacidad de 18.75 bits/s/Hz para una SNR de 30 dB. Una caída en  $\lambda_2$ , aunque sea pequeña introduce un cambio significativo en la capacidad; así, para  $\lambda_1 = 3.8$  y  $\lambda_2 = 0.2$  la capacidad cae 1.2 bits/s/Hz, equivalente a una reducción de la SNR en 1.5 dB.

La Figura 5.5 muestra la variación de la capacidad de un sistema 2x2 con distinto grado de correlación en transmisión para una SNR=30dB. La tabla adjunta muestra como a medida que aumenta la correlación en uno de los extremos del canal la capacidad ergódica se ve reducida.

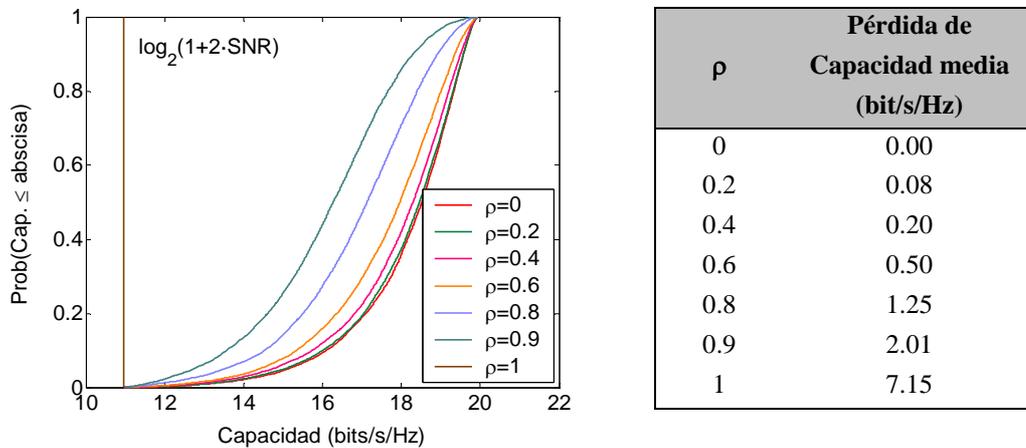


Figura 5.5. CDF de la capacidad con SNR=30dB en función de la correlación según el modelo de Kronecker.

## 5.6.2 Influencia de los keyholes

Se ha visto que la reducción de los valores de correlación conlleva una mejora de la capacidad pero el razonamiento inverso no siempre es correcto, un rango bajo no implica necesariamente correlación. La capacidad del sistema MIMO no depende únicamente de la correlación entre sus subcanales sino que efectos como *keyhole* o *pinhole* [11-13] reducen el rango de la matriz del canal

El efecto *keyhole* [37] o *pinhole* [12] degenera el canal haciendo que la matriz  $\mathbf{H}$  disponga de un solo grado de libertad, incluso cuando transmisor y receptor están en un entorno rico en *scattering*. *Keyhole* [12] aparece en situaciones donde transmisor y receptor están muy distanciados o en situaciones en que la propagación entre transmisor y receptor se produce a través de efectos como difracciones o propagación por guía de onda que reducen el rango de la matriz de canal. Entornos reales para esta segunda situación son túneles o pasillos [13].

Mientras que la correlación reduce el rango de la matriz disminuyendo la ganancia por diversidad y por multiplexado, el *keyhole* reduce la ganancia por multiplexación espacial pero no la ganancia por diversidad [12].

El fenómeno *keyhole* se genera en aquellos canales donde, siendo la correlación baja, el rango de la matriz de canal también lo es, [32]. Sin embargo, este fenómeno se extiende

en ocasiones a aquellos canales donde se reduce el rango de la matriz de canal, lo que abarca también a canales con correlación. Gesbert en [12, 36] presenta un modelo de canal denominado canal MIMO de doble *scattering* en el que modela por separado ambos efectos, *keyhole* y correlación.

### 5.6.3 Influencia de la dispersión temporal

En sistemas de banda ancha, se aprovecha el dominio frecuencial para añadir un nuevo grado de diversidad. Esta diversidad permite obtener ganancias en la capacidad, en particular en la capacidad outage. Al disminuir la dispersión temporal (aumento del ancho de banda de coherencia) la selectividad en frecuencia es menor, se incrementa la varianza de la capacidad y en consecuencia se reduce la ganancia en capacidad outage que introduce la diversidad frecuencial.

En la Figura 5.6 se muestra la función de distribución acumulada de un canal Rayleigh de banda ancha con comportamiento plano o selectivo en frecuencia. Se observa como la diversidad frecuencial permite obtener una menor variabilidad en la capacidad y por tanto mejorar la capacidad outage frente al canal plano en frecuencia. En este ejemplo, para una SNR de 30 dB la capacidad del sistema MIMO-OFDM en un canal selectivo en frecuencia es 2.58 bit/s/Hz superior a la del canal plano.

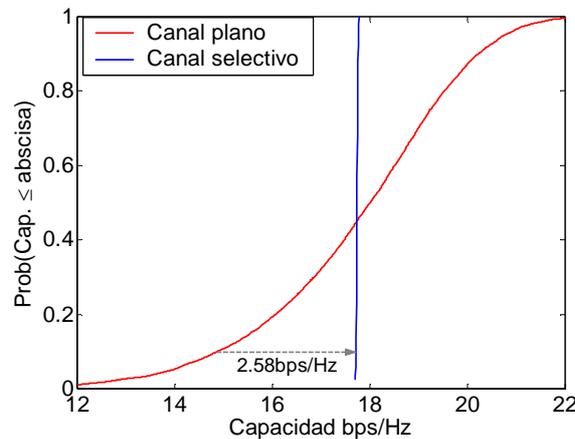


Figura 5.6. Capacidad de un canal MIMO-OFDM para SNR=30dB con desvanecimiento plano y selectivo en frecuencia.

### 5.6.4 Influencia de la estadística de los desvanecimientos

Telatar propone en [4] las expresiones de capacidad para canales MIMO cuyos elementos son Gaussianos complejos, independientes e idénticamente distribuidos, de media cero y varianza  $\sigma^2$ . La envolvente de estos canales sigue una distribución de

Rayleigh. Cuando la media de estos elementos deja de ser cero, la envolvente pasa a seguir una distribución tipo Rice. Esta distribución tipo Rice indica la presencia de una componente que predomina sobre el resto. Este predominio se puede interpretar como una reducción de la riqueza de *scattering* o de la dispersión angular y por tanto se produce un aumento de la correlación espacial y una reducción de la capacidad. En la Figura 5.7a se presenta un ejemplo de la variación de la capacidad del canal para una SNR=30 dB en función del parámetro K de la distribución de Rice. Por otra parte, la presencia de este tipo de desvanecimiento produce unas variaciones en los elementos la matriz del canal menores que en el caso Rayleigh y por tanto la capacidad presenta menor variabilidad.

La estadística de variación de la envolvente de cada tono de un sistema MIMO-OFDM también tiene su impacto sobre la capacidad del sistema. Se ha visto (apartado 5.4) que la varianza de la capacidad del sistema MIMO-OFDM depende linealmente de la varianza de la capacidad de cada uno de los tonos. La presencia de canales tipo Rice reduce la varianza de la capacidad frente a canales tipo Rayleigh. Sin embargo, dado el incremento de la correlación producido por los canales Rice, el resultado global no se traduce en una mejora en la capacidad outage, como ocurre con la reducción de la varianza producida por la diversidad frecuencial, sino que se traduce en una reducción de la capacidad del canal MIMO-OFDM. La curva de la función de distribución adquiere mayor pendiente dada la menor variabilidad pero se desplaza en conjunto hacia rangos menores de capacidad.

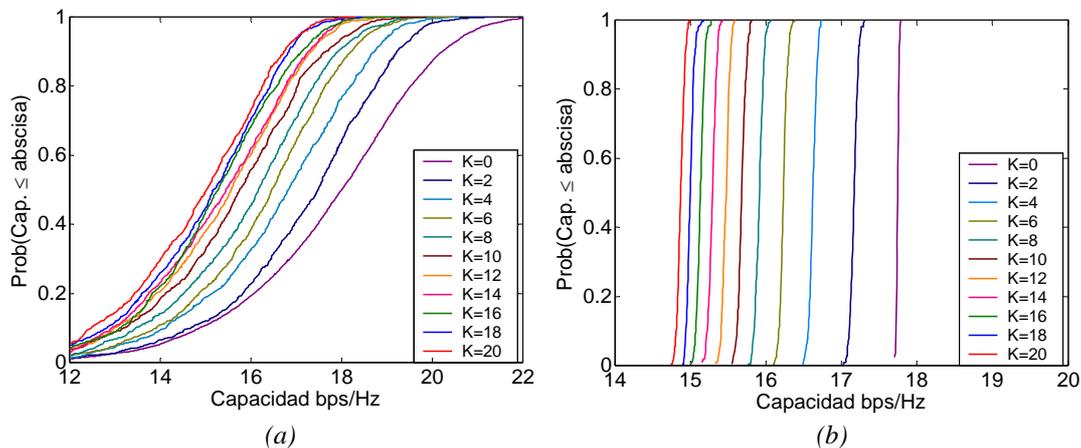


Figura 5.7. Variación de la capacidad para SNR=30dB en función del parámetro K de la distribución de Rice, para el canal plano en frecuencia (a) y para el canal selectivo en frecuencia (b)

## 5.7 Resultados

En este apartado se presenta la estadística de la capacidad del canal en los diferentes escenarios de medida acompañada de las distribuciones de los valores propios

correspondientes. La obtención de la capacidad a partir de las medidas realizadas requiere un procesamiento previo, tanto en las medidas de banda estrecha como en las de banda ancha

En banda estrecha se conforma virtualmente el array receptor [34, 35] mediante el desplazamiento de la antena receptora a lo largo de un área local. En cada una de las medidas se obtiene dos trayectorias, una por cada transmisor  $s_1(x)$  y  $s_2(x)$ , siendo  $x_i$  cada uno de los puntos de medida. A partir de estas trayectorias se extraen realizaciones de la matriz respuesta al impulso. Así la realización  $i$ -ésima de la matriz respuesta al impulso en este área local se obtiene según:

$$\mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} s_1(x_i) & s_2(x_i) \\ s_1(x_i + \Delta x) & s_2(x_i + \Delta x) \end{pmatrix} \quad (5.28)$$

El parámetro  $\Delta x$  se selecciona tal que la separación entre antenas receptoras sea de  $\lambda/2$ . En los escenarios exteriores-interiores y en el escenario interior de oficinas, la trayectoria de 2.1 m se compone de 8192 puntos de medida. Para una frecuencia de 2.4 GHz y una separación eléctrica de  $\lambda/2$ , la matriz  $i$ -ésima de canal,  $\mathbf{H}_i$  requiere un  $\Delta x$  de 242 puntos. En el escenario hall cada trayectoria dispone de 4000 puntos, por lo tanto  $\Delta x=120$  puntos.

Los osciladores de rubidio incorporados en el sistema de medida que permiten la sincronización en fase del transmisor y receptor introducen cierta deriva de fase. Según [33, 34] estas variaciones de fase introducidas por el oscilador de rubidio se eliminan en el cálculo de la capacidad. Así, la capacidad se obtiene directamente de las trayectorias medidas sin usar la aproximación de fase mínima.

En banda ancha se mide directamente realizaciones de la matriz respuesta del canal. En este caso las variaciones de fase en las funciones de transferencia medidas impiden el cálculo de la capacidad directamente a partir de las medidas. Para este cálculo la fase de cada función de transferencia se aproxima mediante su fase mínima obtenida a partir de la información del módulo mediante la transformada de Hilbert desarrollada en el capítulo 3.

En cada área local se miden 16 posiciones con orientación horizontal y 16 con orientación vertical. Dado el comportamiento similar en las diferentes orientaciones se combinan las 32 realizaciones para obtener la estadística de la capacidad del canal.

## 5.7.1 Capacidad banda estrecha

### 5.7.1.1 Escenarios Interiores

#### Escenario hall

El escenario hall es un entorno de tipo abierto, con pocos obstáculos entorno al transmisor o al receptor. En las Figuras 5.8 y 5.9 se presenta la estadística de la capacidad en las áreas LOS y NLOS. Estos parámetros estadísticos quedan reflejados en la Tabla 5.1. Puede verse que, en las áreas LOS, la capacidad presenta un comportamiento diferente en función de la orientación relativa entre los arrays.

La orientación paralela, Figura 5.8b, presenta valores altos de capacidad gracias a la baja correlación presente en esta orientación. La capacidad media alcanza valores de 16.68 bps/Hz, es decir, 1.1 bps/Hz por debajo del límite superior marcado por el canal Rayleigh incorrelado, mientras que la capacidad outage está 0.6 bps/Hz por debajo de dicho límite. La pérdida en capacidad outage es menor que la pérdida en la capacidad media dado que la estadística de los desvanecimientos es de tipo Rice con  $K=4.9$ .

Al pasar a la orientación perpendicular, Figura 5.9b, la estadística de los desvanecimientos continua siendo de tipo Rice, pero con  $K=2.2$ . La capacidad es notablemente inferior a la orientación anterior, 2 bps/Hz menos en la capacidad media y 1.7 bps/Hz en la capacidad outage. Esta diferencia es debida a la mayor correlación entre subcanales que reduce la magnitud del segundo valor propio (Figura 5.9a) reduciendo por tanto la correspondiente capacidad. Se observa en la orientación paralela, Figura 5.8a, como la diferencia con el segundo valor propio  $\lambda_2$  del canal Rayleigh incorrelado es de unos 5 dB (valor mediano) mientras que al pasar a orientación perpendicular, Figura 5.9a, pasa a ser de aproximadamente 10dB

En las situaciones NLOS el comportamiento de la capacidad mejora ligeramente proporcionando valores más altos. Gracias a la mayor riqueza de *scattering* y la ausencia de componentes predominantes, la estadística de los desvanecimientos en ambas orientaciones es de tipo Rayleigh. Esta riqueza también contribuye a disminuir la correlación entre los canales, reflejándose en una menor dispersión de los valores propios.

En la orientación paralela la capacidad media asciende hasta 17 bps/Hz, próximo al límite superior, mientras que la orientación perpendicular mejora su comportamiento en capacidad con respecto a la situación con línea de vista pero sigue presentando un comportamiento más pobre frente a la otra orientación. La diferencia entre ambas

orientaciones se reduce a poco más de 1 bps/Hz en capacidad media y a casi 2 bps/Hz respecto al límite superior.

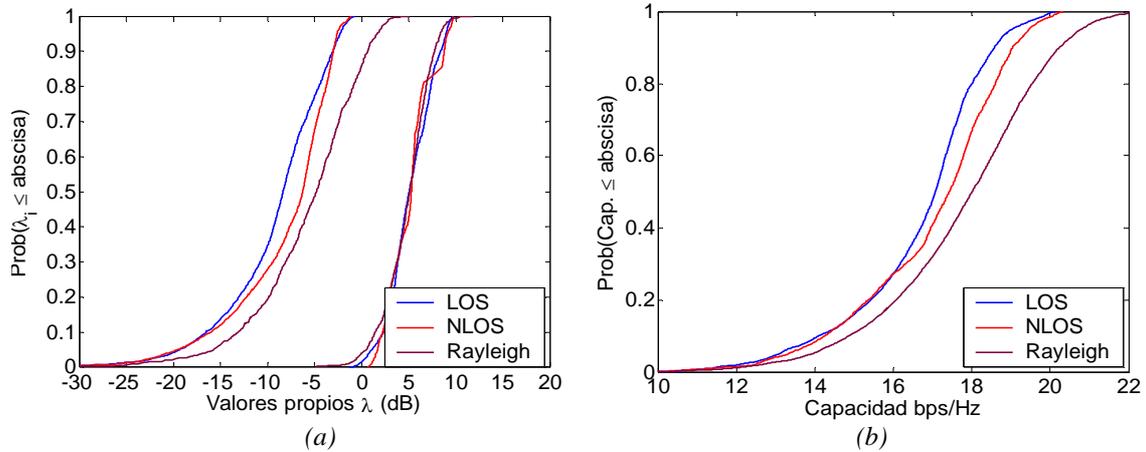


Figura 5.8. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS y NLOS del escenario hall con SNR=30dB orientación paralela.

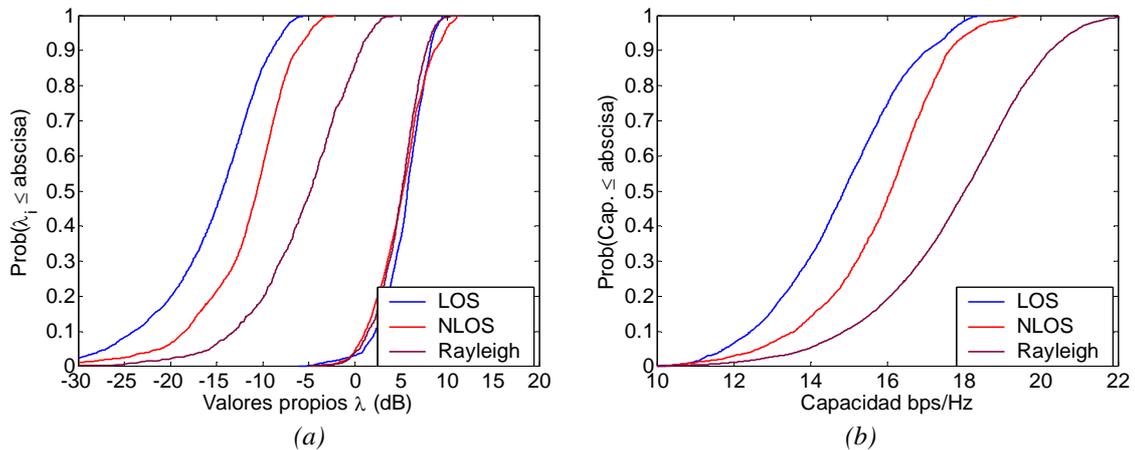


Figura 5.9. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS y NLOS del escenario oficinas con SNR=30dB orientación perpendicular.

		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	K-Rice
Paralela	LOS	14.1	16.7	3.1	5
	NLOS	14.3	17.0	3.6	0
Perpendicular	LOS	12.5	14.8	2.9	2
	NLOS	13.6	15.8	2.7	0
Rayleigh		14.7	17.8	4.4	0

Tabla 5.1. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS en el escenario hall con SNR=30dB.

### Escenario oficinas

El escenario de oficinas presenta un área con línea de vista situada en un pasillo que une las oficinas y una situación NLOS dentro de una de uno de los despachos, ver Figura 3.14b. En las Figuras 5.10 y 5.11 se presenta la estadística de la capacidad en las áreas

LOS y NLOS. Estos parámetros estadísticos quedan reflejados en la Tabla 5.2. Los resultados muestran como en las áreas NLOS, para ambas orientaciones, los canales presentan baja correlación y por tanto el canal presenta valores propios próximos al límite superior establecido por el canal Rayleigh incorrelado. Este comportamiento permite obtener una capacidad alta, con valores medios de 17.5 bps/Hz.

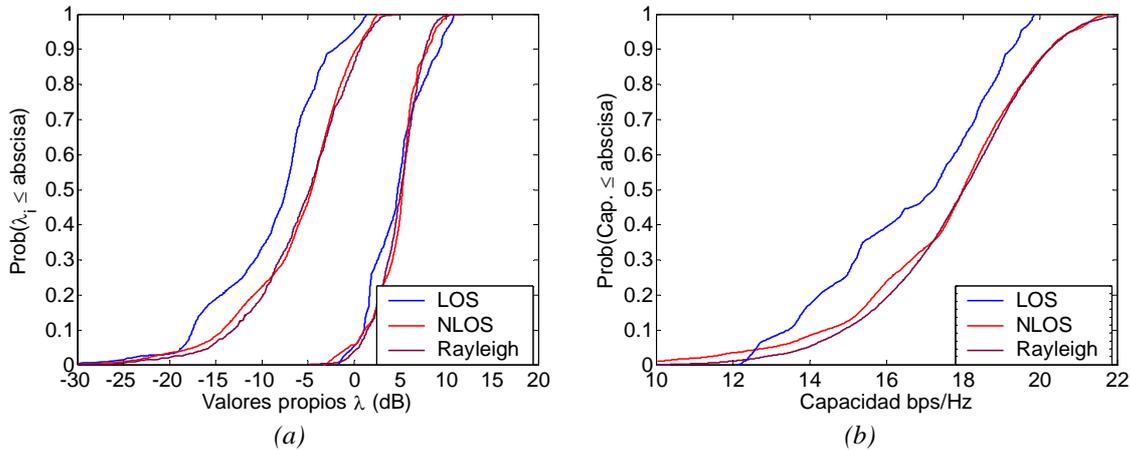


Figura 5.10. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB orientación paralela

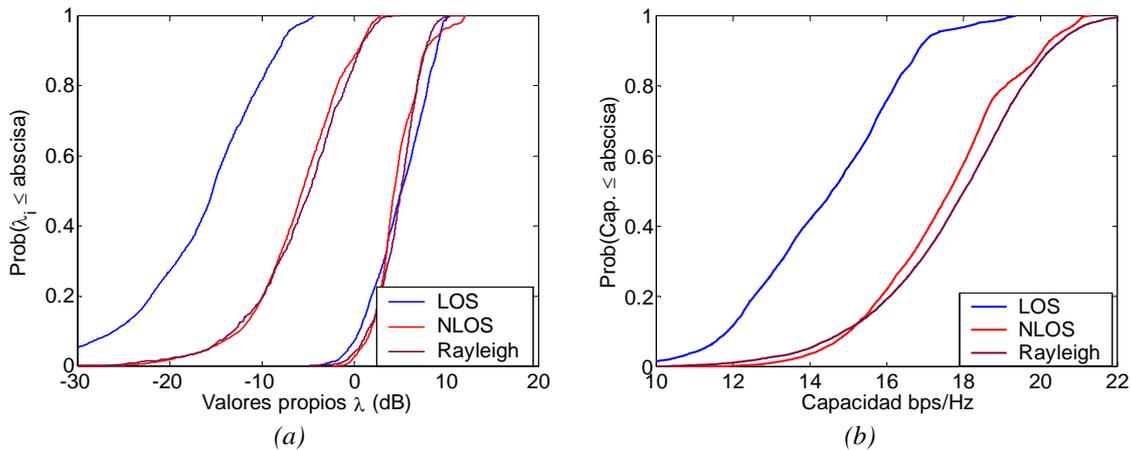


Figura 5.11. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB orientación perpendicular

		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	K-Rice
Paralela	LOS	13.5	16.6	4.9	2
	NLOS	14.4	17.6	5.7	1
Perpendicular	LOS	11.9	14.4	4.0	3
	NLOS	15.0	17.5	3.5	0
Rayleigh		14.7	17.8	4.4	0

Tabla 5.2. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB.

En las áreas LOS nuevamente se observa una notable influencia de la orientación entre arrays. Así, en la orientación paralelo se obtiene una capacidad de 16.6 bps/Hz, 2.2

bps/Hz superior a la obtenida en la orientación perpendicular. En esta orientación, donde ambos arrays están perpendiculares, la correlación tanto en transmisión como en recepción es elevada con valores del coeficiente de correlación entre 0.7 y 0.8 lo que reduce el segundo valor propio  $\lambda_2$  (Figura 5.11a).

### 5.7.1.2 Escenarios Exteriores – Interiores

#### Escenario oficinas

En este entorno típico de oficinas la situación LOS se encuentra dentro de una de ellas, la NLOS en un pasillo intermedio y la HNLOS en una sala de reuniones en el medio de la planta analizada. En las Figuras 5.12 y 5.13 se presenta la estadística de la capacidad en las áreas LOS y NLOS. Estos parámetros estadísticos quedan reflejados en la Tabla 5.3.

En las área LOS la presencia del rayo directo condiciona el espectro de potencia en azimut (PAS) propiciando valores de correlación altos, entrono a 0.65. Para orientación paralela se observa como la capacidad media es 2.4 bps/Hz inferior a la capacidad en el canal Rayleigh incorrelado, mientras que para la orientación perpendicular la capacidad medida está casi 3 bps/Hz por debajo de dicho límite.

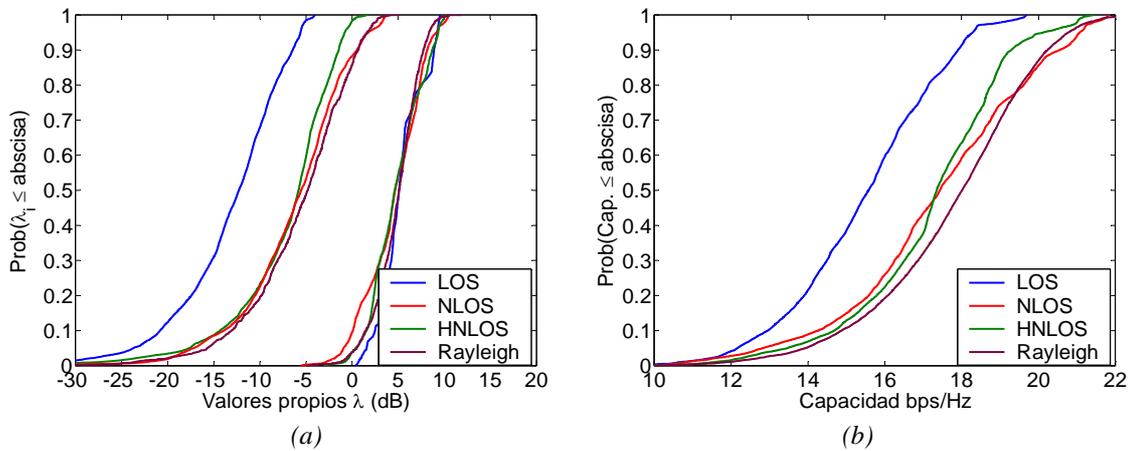


Figura 5.12. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB orientación paralela

En el área NLOS y HNLOS, la mayor riqueza de *scattering* y la ausencia de componentes multicamino predominantes permiten descorrelar los diferentes subcanales, presentando unos coeficientes de correlación muy bajos, inferiores a 0.4. El *scattering* tiende a ser más uniforme lo que reduce la dependencia de la capacidad con la orientación entre arrays. Se observa como la capacidad del canal es alta, con valores medios entono a 17 bps/Hz y valores de capacidad outage entre 14.3 y 14.7 bps/Hz.

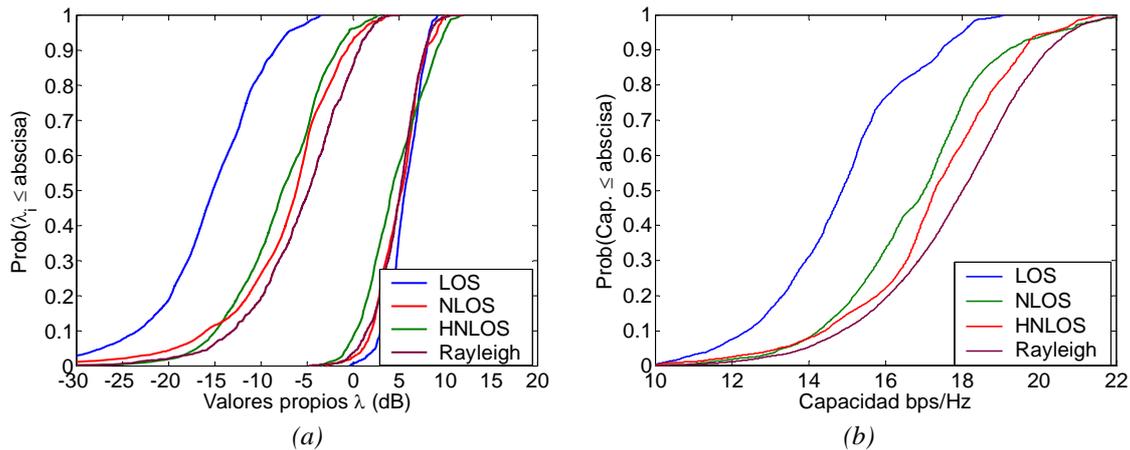


Figura 5.13. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB orientación perpendicular

		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	K-Rice
Paralela	LOS	13.0	15.5	3.6	8
	NLOS	14.3	17.4	5.8	0
	HNLOS	14.7	17.2	3.9	0
Perpendicular	LOS	12.4	14.8	3.5	7
	NLOS	14.4	17.2	4.4	1
	HNLOS	14.3	16.8	4.2	0
Rayleigh		14.7	17.8	4.4	0

Tabla 5.3. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB.

### Escenario laboratorios

El escenario laboratorios es un entorno donde las áreas LOS y NLOS se encuentran rodeadas de gran cantidad de *scatterers*. En las Figuras 5.14 y 5.15 y la Tabla 5.4 se presentan los resultados de capacidad obtenidos en este escenario. En el área LOS, se ha observado como el rayo directo predomina sobre el resto de componentes multicamino presentando un parámetro  $K$  de Rice alto, entorno a 7, lo que se traduce en un empobrecimiento del *scattering* (Reducción de la dispersión angular). Para ambas orientaciones se obtiene una pérdida importante de capacidad frente al canal incorrelado tipo Rayleigh, entorno a 4 bps/Hz en la capacidad media y entre 4 y 5 bps/Hz en la capacidad outage. Esta pérdida en capacidad es debida a la alta correlación presente, valores de correlación entorno a 0.9, reflejada en la importante caída del segundo valor propio  $\lambda_2$  con respecto al caso incorrelado.

En el área NLOS la atenuación del rayo directo permite un espectro de potencia en azimut más uniforme y por tanto menores valores de correlación, inferiores a 0.5. En la orientación paralela la pérdida en la capacidad respecto al límite superior es mucho menor

que en el caso LOS, 0.8bps/Hz tanto en capacidad outage como media, mientras que en la orientación perpendicular, una correlación ligeramente superior produce una caída mayor en la capacidad con respecto al caso Rayleigh incorrelado, de 1.6 bps/Hz en capacidad ergódica y 2.8 bps/Hz en capacidad outage.

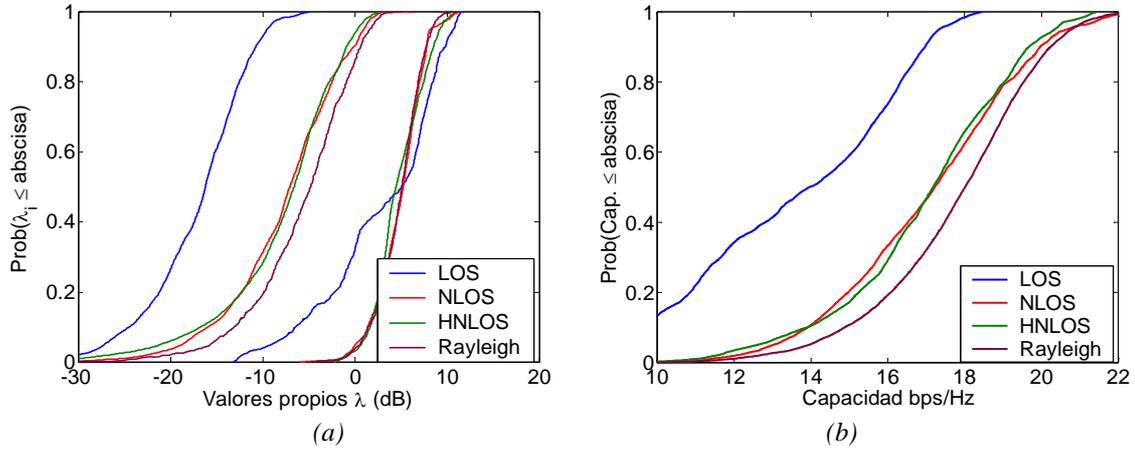


Figura 5.14. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario laboratorios con SNR=30dB orientación paralela

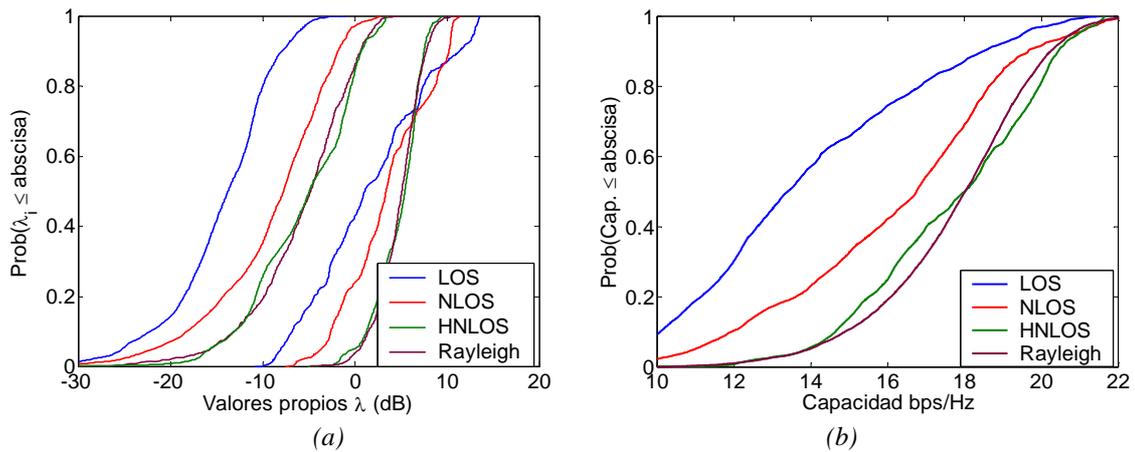


Figura 5.15. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario laboratorios con SNR=30dB orientación perpendicular

		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	K-Rice
Paralela	LOS	9.6	13.5	8.7	1
	NLOS	13.9	17.1	5.6	0
	HNLOS	13.9	17.0	5.2	2
Perpendicular	LOS	10.1	13.9	9.6	6
	NLOS	11.9	16.2	8.9	2
	HNLOS	14.6	17.7	5.4	1
Rayleigh		14.7	17.8	4.4	0

Tabla 5.4. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario laboratorios con SNR=30dB.

En áreas HNLOS, el comportamiento oscilante de la correlación produce, para una separación de  $\lambda/2$ , que la orientación paralela presente correlación en recepción entrono a 0.4 mientras que en la orientación perpendicular esta correlación es muy baja, entorna a 0.1. Así la orientación perpendicular presenta una capacidad muy próxima al límite superior, con valores de 17.7 bps/Hz mientras que en la situación paralela la capacidad es ligeramente menor, 17 bps/Hz.

### Escenario salón de actos

El salón de actos es un escenario abierto, con pocos obstáculos próximos al receptor. Las Figuras 5.16 y 5.17 presentan la distribución de probabilidad acumulada de los valores propios y la capacidad en las áreas LOS, NLOS y HNLOS para ambas orientaciones. La Tabla 5.5 presenta los valores de capacidad media y outage de las CDF anteriores.

Se observa como, a diferencia de los escenarios anteriores, para la orientación paralela, la capacidad del canal en las tres áreas, LOS, NLOS y HNLOS, presenta valores elevados y similares de capacidad; en la situación LOS la capacidad ergódica alcanza 17 bps/Hz, pasa a 16.6 bps/Hz en la situación NLOS y asciende a 17.5 bps/Hz en la situación HNLOS. Este comportamiento también se refleja en la capacidad outage. Se observa como los valores propios, en concreto  $\lambda_2$ , presentan un comportamiento similar.

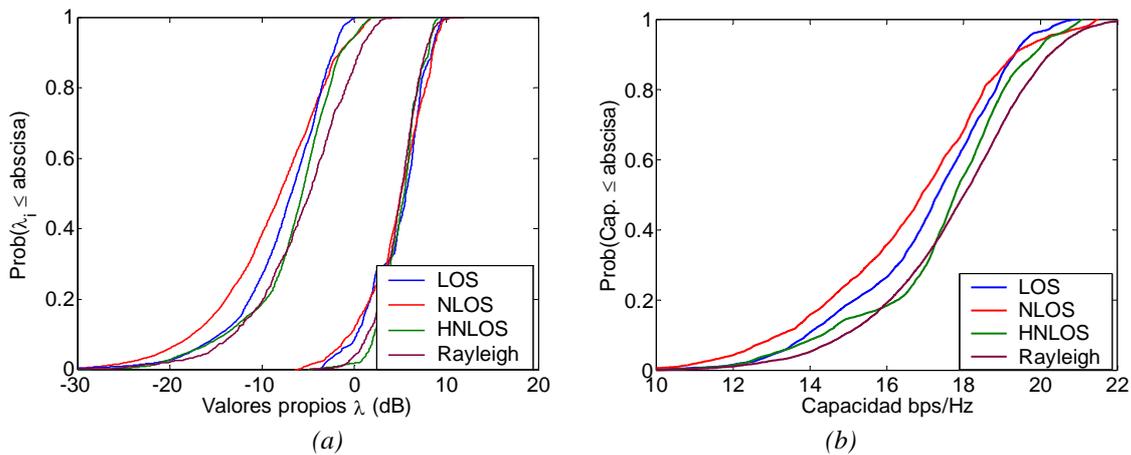


Figura 5.16. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario salón de actos con SNR=30dB orientación paralela

Por otra parte, en la orientación perpendicular, la capacidad presenta un descenso notable respecto a la orientación paralela. Así en los escenarios LOS y NLOS la capacidad se encuentra entrono a 2.2 bps/Hz por debajo del límite superior presentado por el canal tipo Rayleigh incorrelado, tanto en la capacidad outage como en la capacidad media. En la situación HNLOS la correlación es menor y se observa como el valor propio  $\lambda_2$  se aproxima al caso Rayleigh incorrelado, aportando mayor capacidad.

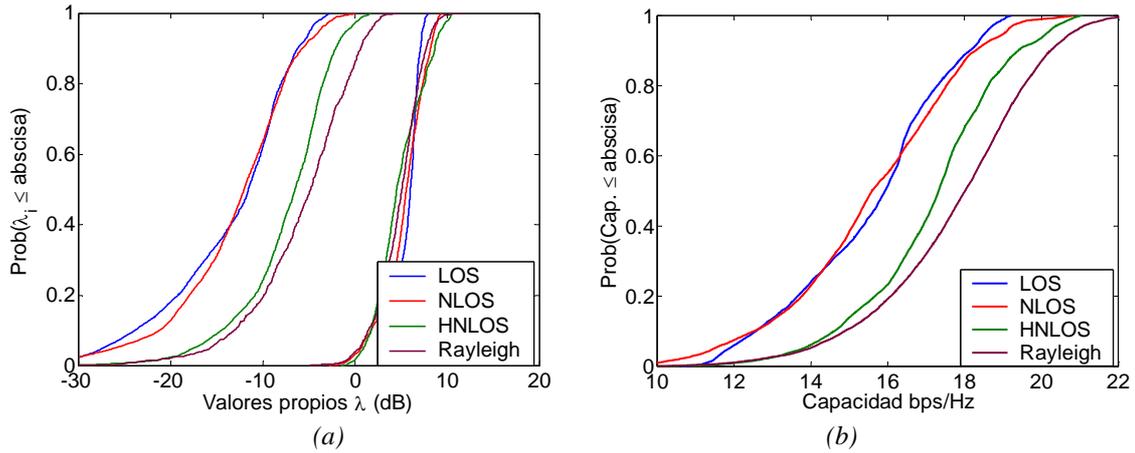


Figura 5.17. Valores propios (a) y capacidad (b) en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario salón de actos con SNR=30dB orientación perpendicular

		Capacidad Outage	Capacidad	Desviación	K-Rice
		10% (bps/Hz)	media (bps/Hz)	estándar	
Paralela	LOS	13.9	17.0	4.3	3
	NLOS	13.2	16.6	5.9	1
	HNLOS	14.3	17.5	4.3	2
Perpendicular	LOS	12.6	15.6	4.0	10
	NLOS	12.5	15.6	5.0	3
	HNLOS	14.6	17.1	3.5	2
Rayleigh		14.7	17.8	4.4	0

Tabla 5.5. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario salón de actos con SNR=30dB.

### 5.7.2 Capacidad Banda ancha

Los canales MIMO de banda ancha explotan la diversidad frecuencial para obtener una mejora en la capacidad outage respecto al canal de banda estrecha. Como se mostró en el capítulo 3, a diferencia del sistema de medida de canal en banda estrecha que utiliza un array virtual en recepción, las medidas de canal en banda ancha se realizan mediante un sistema de dos antenas transmisoras y receptoras simultáneamente.

Los resultados de capacidad en banda ancha presentados muestran su estadística comparada en primer lugar con la obtenida en banda estrecha si solo se transmitiese a través de uno de los tonos. Estas curvas se comparan con la CDF de la capacidad obtenida en un canal MIMO 2x2 Rayleigh ideal totalmente selectivo en frecuencia o totalmente plano en frecuencia, es decir, de banda estrecha. Estas curvas sirven de referencia para evaluar la pérdida de capacidad que experimenta el sistema MIMO en los escenarios evaluados.

La capacidad en estos escenarios se evalúa solo en función de la presencia de línea de vista y no en función de la orientación entre arrays como en banda estrecha, dado que la correlación en banda ancha presenta un comportamiento similar para ambas orientaciones.

### 5.7.2.1 Escenarios interiores

En el primero de los escenarios interiores, el escenario Hall, la capacidad presenta un comportamiento similar en ambas áreas, LOS y NLOS, dado que la correlación presente es similar. La capacidad outage presenta valores entre 14.7 y 15 bps/Hz mientras que la capacidad media adquiere valores en torno a 15.5 bps/Hz. Ambas áreas presentan un ancho de banda de coherencia entre 50 y 60 MHz. Esta selectividad frecuencial introduce ganancia por diversidad frecuencial de 2 bps/Hz en la capacidad outage con respecto al canal de banda estrecha, Tabla 5.6.

El segundo escenario, el escenario de oficinas, presenta mayor diferencia entre la capacidad en áreas LOS y áreas NLOS. En las áreas de línea de vista, la capacidad media alcanza valores de 15.5 bps/Hz, similar a la situación LOS del escenario hall. La correlación en transmisión y en recepción observada produce una reducción en la capacidad media 2.2 bps/Hz respecto al límite superior. En las áreas NLOS, donde la correlación es menor, la capacidad media presenta valores asciende a 16.7 bps/Hz. Los anchos de banda de coherencia permiten una ganancia en la capacidad outage por diversidad frecuencial respecto al canal de banda estrecha de 0.9 bps/Hz en el área LOS y de 1.8 bps/Hz en el área NLOS.

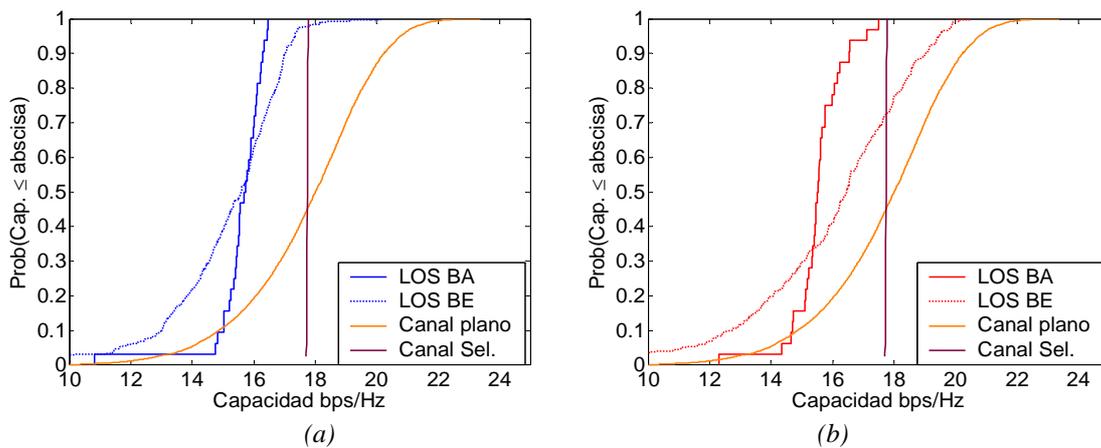


Figura 5.18. Capacidad en las áreas LOS (a) y NLOS (b) en el escenario hall con SNR=30dB.

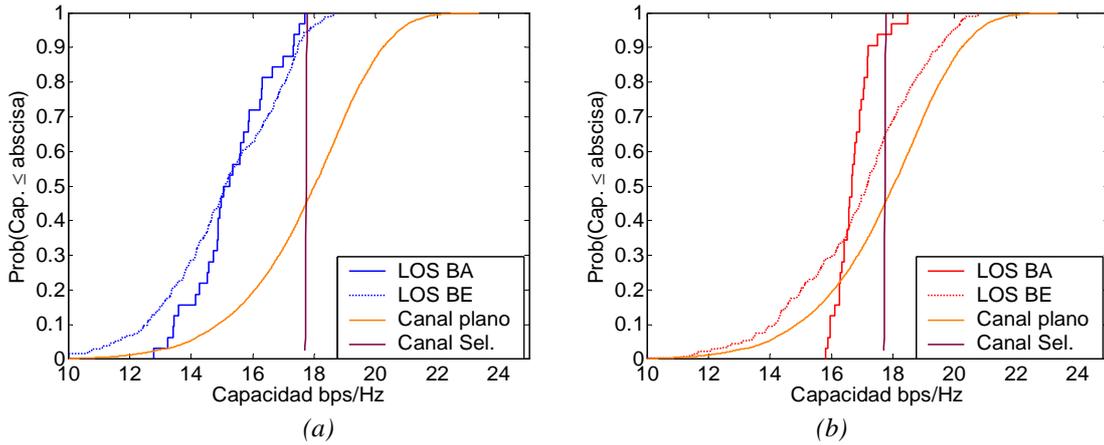


Figura 5.19. Capacidad en las áreas LOS (a) y NLOS (b) en el escenario oficinas con SNR=30dB.

Área		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	B <sub>COH</sub> (MHz)	K-Rice 10%-90%
Hall	LOS BE	13.0	15.2	3.5	60	0 – 0.6
	LOS BA	15.0	15.6	1.0		
	NLOS BE	12.6	16.0	6.7	49	0 – 1.1
	NLOS BA	14.7	15.5	0.8		
Oficinas	LOS BE	12.6	15.1	3.9	59	0 – 3.6
	LOS BA	13.5	15.3	1.7		
	NLOS BE	14.2	16.9	4.4	47	0 – 0.5
	NLOS BA	16.0	16.7	0.3		
Rayleigh	Plano	14.7	17.8	4,4	-	0
	Select.	17.7	17.7	0,002	-	0

Tabla 5.6. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS en los escenarios interiores con SNR=30dB.

### 5.7.2.2 Escenarios mixtos, exteriores – interiores

La Figura 5.20 y la Tabla 5.7 presentan las funciones de distribución de probabilidad acumulada de la capacidad en las tres áreas estudiadas del primer escenario mixto, el escenario de laboratorios, comparadas con la correspondiente capacidad en banda estrecha así como los valores de capacidad media y outage correspondientes. Así, en el escenario de laboratorios se observa una notable influencia de la línea de vista en la capacidad del canal MIMO. Así, en el área LOS debido a la alta correlación en transmisión y recepción se obtiene una capacidad media muy por debajo del límite fijado por el canal MIMO de tipo Rayleigh incorrelado, 11.84 bps/Hz. Sin embargo, en el área NLOS, aunque la correlación en transmisión se mantiene alta, en recepción baja notablemente y se obtiene una mejoría notable en la capacidad media, 3 bps/Hz, alcanzando ésta valores de 14.8 bps/Hz. Al pasar a zonas HNLOS, la mejora presentada en capacidad para una SNR fija es aun mayor, gracias a que la correlación es baja, alcanzando valores de capacidad media de 16.25 bps/Hz.

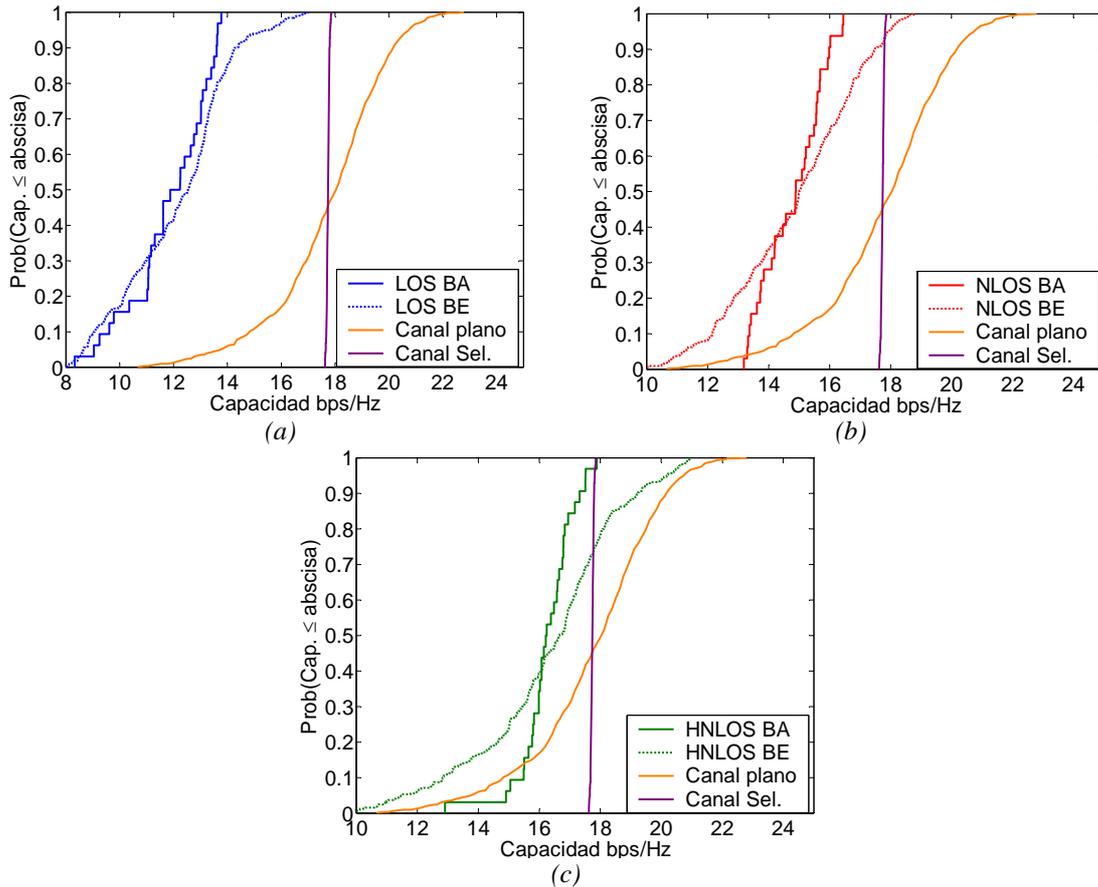


Figura 5.20. Capacidad en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario laboratorios con SNR=30dB.

Desde el punto de vista frecuencial, el área LOS presenta un comportamiento plano, con un ancho de banda de coherencia elevado, 100 MHz. Este comportamiento se refleja en la distribución de capacidad, cuya pendiente es similar a la del canal Rayleigh plano propuesto como uno de los límites superiores. En las áreas NLOS y HNLOS, con anchos de banda de 67 y 36 MHz respectivamente, se observa como la curva de capacidad adquiere mayor pendiente, tendiendo a la marcada por el límite superior del canal selectivo.

Área	Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	B <sub>COH</sub> (MHz)	K-Rice 10%-90%
LOS BE	9.0	12.1	4.1	-	
LOS BA	9.5	11.8	2.2	108	4-20
NLOS BE	12.2	14.9	4.2	-	
NLOS BA	13.4	14.8	1.0	67	0-4
HNLOS BE	12.8	16.3	5.7	-	
HNLOS BA	15.4	16.3	0.9	36	0-1
Rayleigh Plano	14.7	17.8	4,4	-	0
Rayleigh Select.	17.7	17.7	0,002	-	0

Tabla 5.7. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario laboratorios con SNR=30dB.

El escenario de oficinas, cuyos resultados de capacidad se presentan en la Figura 5.21 y la Tabla 5.8, también presenta un carácter muy condicionado por la línea de vista. Así, en el área LOS la capacidad es de 13.5 bps/Hz, superior a la capacidad del escenario laboratorios en esta área, pero, debido a la correlación en transmisión y recepción, aun muy por debajo del límite superior. Al pasar a situaciones sin línea de vista, el estudio de la correlación muestra como aunque la correlación en recepción baja, la correlación en transmisión mantiene valores aun considerables, entre 0.5 y 0.7. Así la capacidad media del canal, asciende a valores de 15.2 y 15.7 para las áreas NLOS y HNLOS respectivamente, aún 2 bps/Hz por debajo del límite superior.

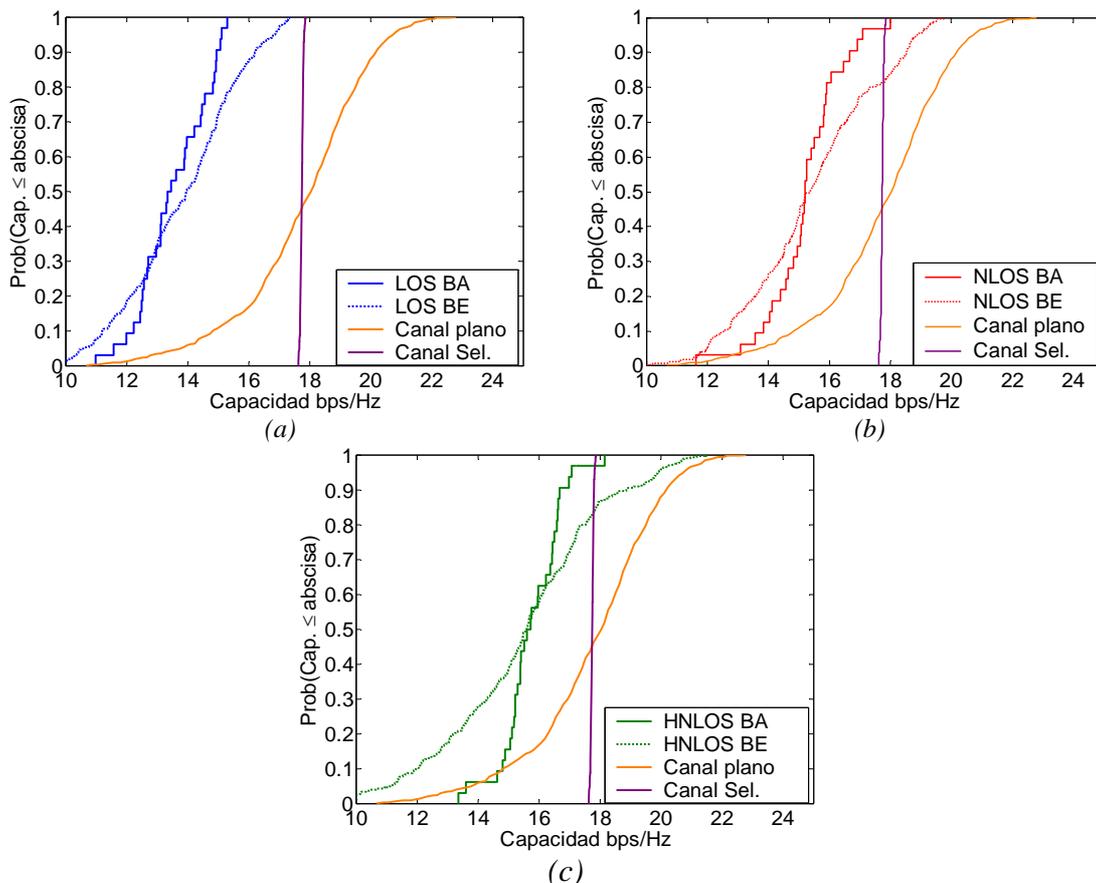


Figura 5.21. Capacidad en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB.

Desde el punto de vista frecuencial, al igual que en el escenario anterior, el ancho de banda de coherencia elevado del canal con línea de vista, 104 MHz, reduce la ganancia por diversidad espacial, presentando la distribución de probabilidad acumulada de la capacidad una pendiente muy similar a la mostrada por el canal plano. Al pasar a situaciones sin línea de vista, el canal pasa a tener un comportamiento más selectivo en frecuencia, con un ancho de banda de coherencia de 65 MHz en la situación NLOS y 46 MHz en el área HNLOS que incrementan la pendiente de la función de distribución y por tanto reducen la dispersión de la capacidad entorno a su capacidad media. Éste comportamiento más selectivo se traduce en una mayor ganancia por diversidad

frecuencial que mejora la capacidad outage al 10% respecto a la situación en banda estrecha en 1.25 bps/Hz en el caso NLOS y 2.8 bps/Hz en el caso HNLOS.

Área		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	B <sub>COH</sub> (MHz)	K-Rice 10%-90%
LOS	BE	11.2	13.8	3.4	-	
	BA	12.2	13.5	1.3	104	2-14
NLOS	BE	12.5	15.4	4.5	-	
	BA	13.8	15.2	1.5	65	0-3
HNLOS	BE	12.0	15.5	6.7	-	
	BA	14.8	15.7	1.0	46	0-2
Rayleigh Plano		14.7	17.8	4,4	-	0
Rayleigh Select.		17.7	17.7	0,002	-	0

Tabla 5.8. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario oficinas con SNR=30dB.

El tercer escenario mixto, el escenario salón de actos, presenta al igual que en los escenarios anteriores un carácter condicionado por la presenta de línea de vista. Así en las áreas LOS aunque la correlación en recepción y cruzada son bajas, la correlación en transmisión presenta valores elevados que producen una perdida notable en la capacidad respecto al límite superior. Se observa en la Figura 5.22(a) y en la Tabla 5.10 como la capacidad en el área LOS se encuentra muy por debajo del límite superior, con una capacidad media de 13.3 bps/Hz, casi 4.3 bps/Hz menos que dicho límite superior. Al pasar a situaciones NLOS, la correlación en transmisión desciende ligeramente permitiendo un crecimiento en la capacidad de 1.5 bps/Hz alcanzando valores de 14.8 bps/Hz pero aun muy por debajo del límite superior. Por último en las situaciones la correlación en transmisión sufre una nueva caída, permitiendo que la capacidad ascienda hasta 16 bps/Hz.

En el dominio de la frecuencia, se observa como aunque la selectividad frecuencial aumenta al pasar de LOS hasta HNLOS, la ganancia en capacidad por diversidad frecuencial presentada en la Tabla 5.9 es muy similar en los tres casos, adquiriendo valores entre 1.1 y 1.3 bps/Hz. Este comportamiento, diferente a los casos anteriores, viene motivado principalmente por el número de muestras utilizadas para obtener la estadística de la capacidad. Un número mayor de muestras permitiría obtener una CDF menos escalonada que reflejaría la mejora esperada por diversidad frecuencial.

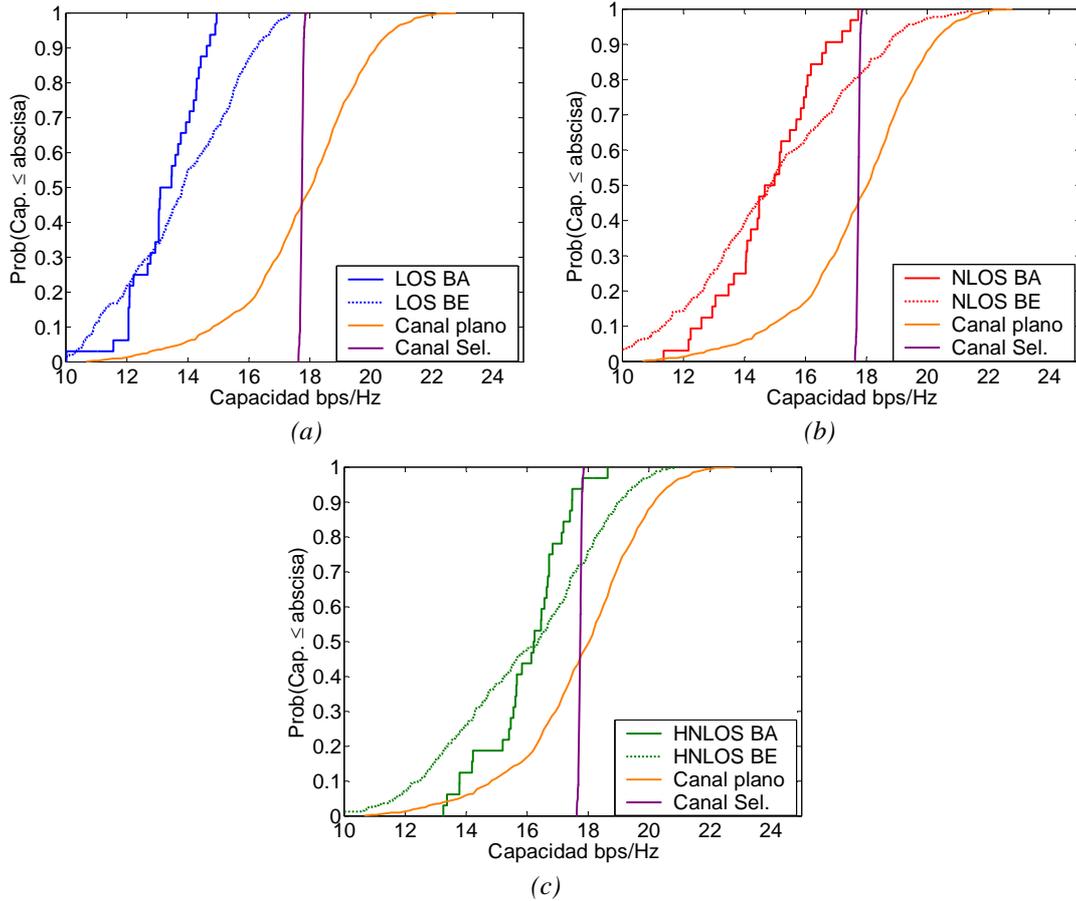


Figura 5.22. Capacidad en las áreas LOS (a), NLOS (b) y HNLOS (c) en el escenario salón de actos con SNR=30dB.

Área		Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	B <sub>COH</sub> (MHz)	K-Rice 10%-90%
LOS	BE	10.9	13.8	3.7	108	3-18
	BA	12.0	13.3	1.3		
NLOS	BE	11.3	15.0	7.8	-	0-3
	BA	12.5	14.8	2.6	50	
HNLOS	BE	12.4	15.9	6.7	-	0-1
	BA	13.8	16.0	1.8	46	
Rayleigh Plano		14.7	17.8	4,4	-	0
Rayleigh Select.		17.7	17.7	0,002	-	0

Tabla 5.9. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS, NLOS y HNLOS en el escenario salón de actos con SNR=30dB.

### 5.7.2.3 Escenarios exteriores

Los escenarios exteriores, dadas sus características físicas, presentan una correlación elevada que degrada significativamente la correlación. Se observa en ambos escenarios exteriores, Figuras 5.23 y 5.24 y Tabla 5.10, como la curva de distribución de la

capacidad se encuentra muy por detrás de la representada como límite superior. En el escenario azotea la capacidad media es de 12.4 bps/Hz al usar antenas omnidireccionales y muy similar, 12.9 bps/Hz, al usar antenas direccionales, ambos casos, muy por debajo de los 17.7 bps/Hz de capacidad media del canal Rayleigh incorrelado.

El escenario terraza, cuando el extremo receptor dispone de antenas omnidireccionales, presenta una la capacidad similar al escenario azotea. Sin embargo, al usar antenas omnidireccionales, la capacidad es superior, 14.7 bps/Hz.

Desde el punto de vista frecuencial, el sistema con antenas direccionales presenta anchos de banda de coherencia elevados. Dado que el comportamiento de los tonos es de tipo Rice con valores de K altos, la ganancia por selectividad frecuencial presente en la capacidad outage se encuentra en torno a 1 bps/Hz.

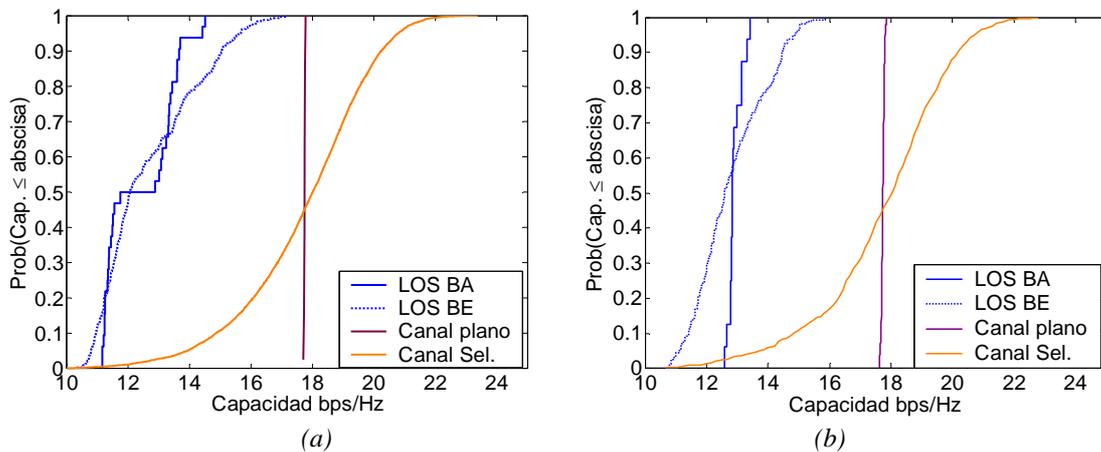


Figura 5.23. Capacidad en las áreas LOS con antenas omnidireccionales (a) y direccionales (b) en el escenario azotea con  $SNR=30dB$ .

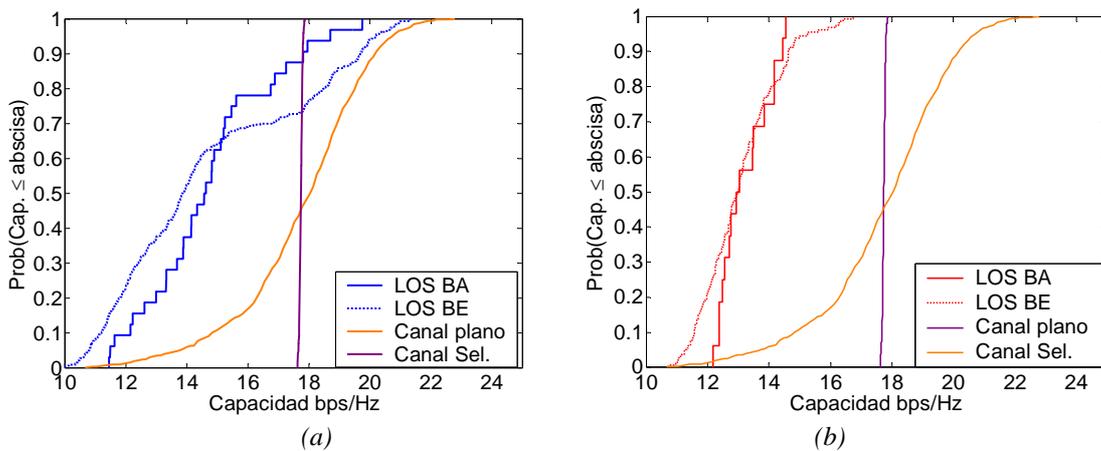


Figura 5.24. Capacidad en las áreas LOS con antenas omnidireccionales (a) y direccionales (b) en el escenario terraza con  $SNR=30dB$ .

Al usar antenas omnidireccionales, en el escenario azotea el comportamiento es similar al presentado en el caso anterior, ancho de banda de coherencia elevado y parámetro K de

Rice entre 5 y 10 minimizando la ganancia en capacidad outage por selectividad frecuencial. Sin embargo el escenario terraza presenta un comportamiento diferente, con un ancho de banda de coherencia muy reducido y gran dispersión del parámetro K de la estadística de variación de los tonos. Estos factores permiten capacidad mayor que en los casos anteriores pero una ganancia por selectividad frecuencial entrono a 1 bps/Hz.

	Área	Capacidad Outage 10% (bps/Hz)	Capacidad media (bps/Hz)	Desviación estándar	B <sub>COH</sub> (MHz)	K-Rice 10%-90%
Azotea	LOS BE	11.0	12.7	2.5	-	
	LOS BA	11.2	12.4	1.3	80	5-10
	LOS D BE	11.4	12.8	1.4	-	
	LOS D BA	12.7	12.9	0.1	110	11-21
Terraza	LOS BE	11.2	14.7	10.0	-	
	LOS BA	12.2	14.7	4.4	6	0-29
	LOS D BE	11.6	13.1	1.5	-	
	LOS D BA	12.4	13.2	0.7	98	6-18
Rayleigh	Plano	14.7	17.8	4.4	-	0
	Select.	17.7	17.7	0.002	-	0

Tabla 5.10. Valores de capacidad outage 10%, media, desviación estándar en las áreas LOS en los escenarios exteriores con SNR=30dB.

## 5.8 Conclusiones

La capacidad del canal MIMO es una medida del límite superior del rendimiento del canal. A diferencia de la probabilidad de error del sistema (BER), la capacidad muestra la eficiencia espectral máxima de manera independiente al esquema de modulación utilizado. Esta eficiencia espectral únicamente depende de la relación señal a ruido en el receptor y de la propia matriz de canal  $\mathbf{H}$ . A partir de la descomposición en valores propios, se traslada la dependencia de  $\mathbf{H}$  a los valores propios de la matriz  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ . El modelo equivalente del canal MIMO presentado previamente en el capítulo 2 permite una interpretación rápida e intuitiva de dicha dependencia..

Aunque a priori las expresiones de capacidad de Telatar muestran que los sistemas MIMO pueden ofrecer eficiencias espectrales de decenas de bps/Hz, los resultados presentados en este capítulo muestran que estas prestaciones tan altas se cumplen solo bajo ciertas condiciones. Estos resultados demuestran que la suposición realizada por muchos autores asumiendo que el canal MIMO está compuesto por canales Gaussianos incorrelados es demasiado optimista y se plantea únicamente como un límite superior de la capacidad.

En canales reales se ha observado la influencia de diferentes efectos que degradan el rendimiento del canal MIMO. En el capítulo 4 se presentó la influencia de factores como la separación entre antenas, la orientación entre antenas o las características del entorno sobre la correlación. En este capítulo se ha completado el análisis mostrando la influencia de la correlación en el rendimiento del canal en las distintas áreas y escenarios.

### **Banda estrecha**

En sistemas de banda estrecha se ha mostrado que la presencia de una línea de vista entre transmisores y receptores condiciona la riqueza del *scattering* y por tanto los niveles de capacidad. Para un nivel de SNR fijo de 30dB la capacidad en áreas LOS en los escenarios exteriores-interiores se encuentra entre 2 y 4 bps/Hz por debajo de la situación HNLOS según la riqueza de *scattering* aportada por el escenario.

En interiores esta diferencia entre LOS y NLOS es menos notable, con diferencias entre 0.5-1 bps/Hz. Sin embargo, si se observa una gran dependencia de la capacidad con la orientación relativa entre arrays, principalmente en situaciones de línea de vista. Así en las situaciones LOS se observa una diferencia entorno a 2 bps/Hz entre la orientación paralela y la orientación perpendicular.

En las situaciones NLOS el comportamiento en ambos escenarios es ligeramente diferente. Así en el escenario Hall, aunque la línea de vista está obstruida por un muro, el resto de componentes multicamino pueden llegar al receptor sin obstáculos intermedios, lo que no ocurre en las oficinas en las que todas las componentes deben atravesar al menos la pared que separa la oficina del pasillo. Esta diferencia en el escenario hace que en el escenario oficinas la capacidad para ambas orientaciones sea similar, entorno a 17.5 bps/Hz mientras que en el escenario Hall la orientación paralela continua siendo superior en capacidad a la perpendicular, situándose la capacidad media casi 1.2 bps/Hz por encima.

En los escenarios exteriores interiores la influencia de orientación relativa entre arrays en la capacidad es menos notable, destacando ligeramente en situaciones LOS y en alguna de las situaciones NLOS, con diferencias entre 0.2 y 1.4 bps/Hz.

### **Banda ancha**

En los sistemas de banda ancha, se añade un nuevo orden de diversidad, la diversidad frecuencial. La selectividad en frecuencia contribuye a que los tonos de un sistema MIMO-OFDM sufran variaciones más independientes entre ellos y por tanto permite

obtener ganancia por diversidad frecuencial. Los resultados de capacidad obtenidos en banda ancha comparados con la capacidad de un único tono, muestran que la ganancia por diversidad frecuencial se manifiesta en la capacidad outage, manteniendo la capacidad media prácticamente constante.

En los escenarios interiores, para ambos escenarios y orientaciones, se observa como la ganancia por diversidad frecuencial introduce una mejora en la capacidad outage 10% de entre 1.5-2 bps/Hz. En los escenarios mixtos, los resultados muestran que, al igual que ocurre para canales de banda estrecha, para una SNR fija de 30 dB, la capacidad en áreas LOS es entre 2 y 4 bps/Hz inferior a la situación NLOS. Gracias a la ganancia por diversidad frecuencial, la capacidad outage 10% del canal en banda ancha es entre 1 y 2 bps/Hz superior a la capacidad obtenida a partir de un único tono. Esta ganancia implica que se incrementa la eficiencia espectral mínima por encima de la cual se trabaja en el 90% de las ocasiones.

En los escenarios exteriores se ha observado como la mayor riqueza de *scattering* del escenario terraza introduce una importante mejora en capacidad con respecto al escenario azotea. Si en el escenario terraza se usan antenas direccionales en vez de antenas omnidireccionales, se desecha gran parte de componentes del espectro azimutal, produciendo así resultados similares al escenario azotea donde, dada la pobreza de scattering, la capacidad presenta un comportamiento similar para ambos tipos de antenas.

## 5.9 Bibliografía

- [1] J. Winters, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, Vol. 5, pp. 871-878, Junio 1987.
- [2] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in fading environments when using multi-element antennas," *Bell Labs Technology Journal*, pp-41-59, 1996.
- [3] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," AT&T Bell Laboratories, BL0 112 170-950 615-07TM, 1995.
- [4] I. E. Telatar, "Capacity of multiple antenna Gaussian channels," *European Transactions on Communications*, Vol. 10, No. 6, Nov./Dec. 1999, pg 585-595.
- [5] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise" *Proceeding of the IRE and waves and electrons*. pp. 10-21, January 1949.

- [6] G. J. Foschini, M.J. Gans “On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas” *Wireless Personal Communications*, Vol. 6 , Issue 3, Marzo 1998, pp. 311-335.
- [7] G. G. Railegh y J. M. Cioffi “Spatio – Temporal Coding for Wireless Communications” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 46, Issue: 3, Marzo 1998, pp. 357-366.
- [8] D. Shiu, G. Foschini, M. Gans, J. Khan “Fading Correlation And Its Effect On The Capacity Of Multielement Antenna Systems” *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 48, pp. 502-513, Mar. 2000.
- [9] C. Chuah, J.M. Kahn, D. Tse, “Capacity of multi-antenna array systems in indoor wireless environment,” *Proceedings IEEE GLOBECOM*, VOL. 4, Nov. 1998, pp.1894-1899.
- [10] V. Raghavan, A. M. Sayeed, “Mimo capacity scaling and saturation in correlated environments,” *IEEE International Conference on Communications 2003. ICC '03*. Vol. 5, pp. 3006 - 3010, May 2003.
- [11] H. Shin, J. H. Lee “Capacity of Multiple-Antenna Fading Channels: Spatial Fading Correlation, Double Scattering, and Keyhole” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 49, No. 10, Octubre 2003
- [12] D. Gesbert, H. Bolcskei, D. Gore, and A. Paulraj, “MIMO Wireless Channels: Capacity and Performance Prediction,” *IEEE Globecom 2000*, pp. 1083-1088, Nov. 2000.
- [13] D. Chizhik, G. J. Foschini and R. A. Valenzuela, “Capacities of multi-element transmit and receive antennas: Correlations and Keyholes,” *IEE Electronic Letters*. , Vol. 36, No. 13, pp. 1099-1100, June 2000.
- [14] H. Boleskei, D. Gesbert, A.J. Paulraj, “On the capacity of OFDM-based multi-antenna systems,” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, No. 2, Febrero 2002, pp. 225-234
- [15] G.L. Stuber, J.R. Barry, S.W. McLaughlin, Ye Li, M.A. Ingram, T.G. Pratt, “Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, Issue 2, Febrero 2004, pp. 271- 294
- [16] P. Kyritsi “Multiple Element Antenna Systems in an Indoor Environment” PhD Thesis, Stanford University, USA Noviembre 2001.
- [17] A. Hottinen, O. Tirkkonen, R. Wichman, “Multi-antenna transceiver techniques for 3G and beyond” John Wiley & Sons, cop. 2003.
- [18] J. Kermoal “Measurement, Modelling and Performance Evaluation of the MIMO

- Radio Channel” PhD Thesis, Aalborg University, Denmark Agosto 2002.
- [19] T. M. Cover y J. A. Thomas, “Elements of Information Theory,” New York: Wiley, 1991.
- [20] B. Vucetic, J. Yuan, “Space-time coding,” John Wiley & Sons, cop. 2003.
- [21] J. B. Andersen, “Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends,” *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, Vol. 18, No. 11, Pg 2172-2178, Nov. 2000.
- [22] S. N. Diggavi, N. Al-Dhahir, A. Stamoulis, A.R. Calderbank “Great Expectations: The Value of Spatial Diversity in Wireless Networks” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 2, Feb 2004, pg. 219-270.
- [23] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, H. Bölcskei “An Overview of MIMO Communications- A Key to Gigabit Wireless” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 2, Feb 2004, pg. 198-218.
- [24] H. Bölcskei, D. Gesbert, and A. J. Paulraj, “On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, pp. 225-234, Feb. 2002.
- [25] L.H. Ozarow, S. Shamai and A.D. Wyner, “Information theoretic considerations for cellular mobile radio,” *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*, vol 43, pp. 359-378, May 1994.
- [26] E. Biglieri, J. Proakis and S. Shamai, “Fading channels: Information-theoretic and communications aspects,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, pp.2619-2692, Oct. 1998.
- [27] G. Burel “Statistical Analysis of the smallest singular value in MIMO transmission systems” *WSEAS Inf. Conf. on Signal, Speech and Image Processing*, Skiathos Island, Greece, Septiembre 25-28, 2002.
- [28] M. Kang, M.-S. Alouini “Largest Eigenvalue of Complex Wishart Matrices and Performance Analysis of MIMO MRC Systems” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, No. 3, Abril 2003.
- [29] M. Chiani, M. Z. Win, A. Zanella, R. K. Mallik, y J.H. Winters, “Bounds and approximations for optimum combining of signals in the presence of multiple co-channel interferers and thermal noise” *IEEE Transactions in Communications.*, vol 51 pp 296-307, Febrero 2003.
- [30] R. K. Mallik “The pseudo-wishart distribution and its application to MIMO Systems” *IEEE transactions on information theory*, vol. 49, No 10, Octubre 2003.

- [31] C-N. Chuah, D. N. C. Tse, J. M. Kahn y . A. Valenzuela “Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol 48, No. 3, March 2002.
- [32] P. Almers, F. Tufvesson, A. F. Molisch, “Measurement of keyhole effect in a wireless multiple-input multiple-output (MIMO) channel,” *IEEE communications letters* vol. 7, no8, pp. 373-375 2003
- [33] R. Jaramillo “Caracterización Experimental de Canales MIMO en Escenarios Exterior-Interior para Aplicaciones WLAN y FBWA”, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 2006
- [34] Richard Jaramillo, Oscar Fernandez, Rafael P. Torres “Empirical Analysis of 2x2 MIMO Channel in Outdoor-Indoor Scenarios for FBWA Applications,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 48, Issue 6, pp57-69, Diciembre 2006
- [35] O. Fernández, M. Domingo, R.P. Torres, “Empirical Analysis of the Correlation of MIMO Channels in Indoor Scenarios at 2GHz,” *IEE Proceedings Communications*, Vol. 152, No. 1, February 2005, pp. 82 -88.
- [36] D. Gesbert, H. Bölcskei, D. Gore, A. Paulraj, “Outdoor MIMO Wireless Channels: Models and Performance Prediction,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, pp. 1926-1934, Diciembre 2002
- [37] D. Chizhik, G.J. Foschini, R. A. Valenzuela, “Capacities of multielement transmit and receive antennas: Correlations and keyholes,” *IEE Electronic Letters*, Vol. 36, pp. 1099-1100, Junio 2000.