

Sistemas MIMO como Alternativa para el Control del Efecto Multitrayectoria y de la Interferencia Co-Canal en Sistemas de Radio Móvil Satelital y Terrestre

Alexis Paolo García Ariza

E³T- Universidad Industrial de Santander
paolo_1@ieee.org

Fecha de recepción: 29-07-2004

Fecha de aceptación: 17-11-2004

ABSTRACT

The Multiple Inputs Multiple Outputs -MIMO- Systems are advanced technique both the radio signal fading control, problem associated to multipath effects, and co-channel interference mitigation in mobile systems, using array antennas and space-time processing.¹ This technique lets improve the wireless systems performance and increase its data transmission capacity under dynamic environments. The paper presents both the basic concepts over multipath propagation in mobile satellite and terrestrial systems, and a research proposal in MIMO techniques for DS-CDMA systems. This research is presented to European Union for RadioGIS-UIS and MCG-UPV groups,

supported by the Alban Program - High Level Scholarships for Latin America-. The research will be development at Communications Department of Polytechnic University of Valencia -UPV- like author's Doctoral work.²²

KEY WORDS

Antenna arrays, bandwidth, capacity, channel, coherent bandwidth, Doppler effect, DS-CDMA, fading, impulse response, MIMO channel, mobile systems, multipath, propagation, satellites, space-time processing, statistics.

RESUMEN

Una técnica avanzada para el control del desvanecimiento de señales de

radio, problema asociado a efectos de propagación multitrayectoria, y la mitigación de la interferencia co-canal en sistemas móviles, son los Sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO-Multiple Inputs Multiple Outputs¹ basados en arreglos de antenas y procesado de señales espacio-temporales, los cuales buscan mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos aumentando la capacidad de transmisión de datos bajo entornos dinámicos. En este artículo se presentan los conceptos básicos sobre propagación multitrayectoria en sistemas móviles satelitales y terrestres, y la propuesta de investigación en técnicas MIMO para sistemas DS-CDMA planteada por los Grupos RadioGIS-UIS y MCG-

UPV ante la Comunidad Europea por medio del Programa Alban de Becas de Alto Nivel para América Latina. Esta investigación se llevará a cabo en el Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia -UPV- como trabajo de Doctorado por parte del autor.²²

PALABRAS CLAVES

Ancho de banda, ancho de banda coherente, arreglo de antenas, canal, capacidad, desvanecimiento, DS-CDMA, efecto Doppler, estadística, MIMO, multitrayectoria, procesado espacio-tiempo, propagación, respuesta al impulso, satélites, sistema móvil.

Clasificación : C

I. INTRODUCCIÓN

Antes de abordar lo relacionado con la propuesta de investigación en técnicas MIMO, se describirán las características de propagación de un canal inalámbrico para sistemas móviles basados en satélites y radio bases en tierra bajo consideraciones de desvanecimiento a pequeña escala, efectos multitrayectoria o *multi-path* y sistemas multiusuario. La razón de esta metodología en el desarrollo del contenido obedece más a un objetivo didáctico, pues el tema no ha sido estudiado ampliamente en Colombia.

Siguiendo este objetivo, el describir los sistemas inalámbricos, sus ambientes de propagación multitrayectoria, los fenómenos asociados, y algunas técnicas utilizadas, permitirá al lector entender de una forma más rápida las técnicas MIMO planteadas para el control del desvanecimiento a pequeña escala, o más explícitamente, para el control de la rápida fluctuación en amplitud de una señal de radio sobre un corto periodo o una distancia corta en relación con la longitud de onda de la señal, en busca de incrementar la capacidad de los sistemas de comunicación móvil.

Con estas consideraciones de *pequeña escala* y procesado espacio-temporal en MIMO, los efectos de *gran escala* (asociados a la difracción de la señal, causada por obstrucciones en el trayecto de propagación) pueden ser ignorados y los demás ser controlados para mejorar el desempeño de los sistemas de comunicaciones móviles basados en satélites (en órbitas GEO: *Geostationary Orbit*, LEO: *Low Earth Orbit*, MEO: *Medium Ear-*

th Orbit, o HEO: *Highly Elliptical Orbit*,^{37, 76} en plataformas de gran altitud (HAP: *High-Altitude Platform*,^{71, 75} en sistemas de radio bases en tierra (sistemas TDMA: *Time Division Multiple Access*, GSM: *Global System for Mobile Communication*, CDMA: *Code Division Multiple Access*^{1, 35, 51} y WCDMA: *Wideband Code Division Multiple Access*,³⁴ y en sistemas para interiores o *Indoor* (en túneles,³⁶ oficinas, estaciones, etc.).⁴⁸

Hasta la fecha se han empleado diferentes técnicas de control para los fenómenos asociados a la propagación multitrayectoria y la interferencia multiusuario, como esquemas de acceso múltiple robustos, modulaciones digitales apropiadas, esquemas de equalización y codificación,^{48, 51} y arreglos de antenas.^{1, 51} Todas estas técnicas presentan diseños específicos para cada sistema inalámbrico debido a que las variaciones en amplitud y fase en la señal resultante de la sumatoria destructiva o constructiva de las múltiples versiones de la señal original dependen de la intensidad de las señales recibidas, del tiempo de propagación de las versiones multitrayectoria y del ancho de banda de la señal, lo que está directamente relacionado con el entorno de propagación y el sistema de comunicación utilizado. En esta discriminación de sistemas, entornos y aplicaciones, se ha planteado la propuesta *Procesado Espacio-Temporal para Canales de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) en Sistemas DS-CDMA De Cuarta Generación En Entornos Urbanos Con Terreno Irregular*,²² en busca de obtener ventajas

adicionales en relación con otras alternativas analizadas, pues se podrá controlar simultáneamente el efecto multitrayectoria y la interferencia co-canal.

En esta línea de investigación viene trabajando desde hace tres años el grupo de investigación en Radiocomunicaciones y Sistemas de Información Geográfica-GIS, RadioGIS, asociado a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones-E³T de la Universidad Industrial de Santander, realizando labores en la apropiación de conocimiento y generación de nuevas alternativas en el área de propagación de ondas electromagnéticas para la planificación, optimización y gestión de sistemas de comunicaciones inalámbricos en entornos andinos. En el marco de su plan de trabajo y consolidación, y gracias al apoyo de los grupos I2T (Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones) de la Universidad ICESI y MCG (*Mobile Communication Group*) de la Universidad Politécnica de Valencia-UPV, RadioGIS ha planteado una propuesta de investigación²² que permitirá al grupo adentrarse en nuevas alternativas con perspectivas de aplicación regional y global para sistemas móviles satelitales y terrestres.

II. PROPAGACIÓN MULTITRAYECTORIA Y DESVANECIMIENTO A PEQUEÑA ESCALA

Para analizar los procesos y técnicas utilizados en los equipamientos de comunicación inalámbrica que buscan la correcta recepción y transmisión de la información en entornos dinámicos, es relevante comprender los diferentes fenómenos asociados a

la propagación de las ondas electromagnéticas sobre las cuales se transmite la información. En este sentido, el fenómeno de multitrayectoria en el canal, ocasionado por múltiples reflexiones, difracciones y dispersión de la señal transmitida y que llegan al receptor, crea efectos de desvanecimiento a pequeña escala, de los cuales los tres más importantes son:

- Rápidos cambios en la intensidad de la señal sobre una corta distancia de viaje o en intervalos.⁸
- Modulación de frecuencia aleatoria debido a cambios Doppler⁴⁸ en diferentes señales multitrayectoria.
- Dispersiones en el tiempo (ecos) causadas por retardos en la propagación multitrayectoria.⁵¹

El desvanecimiento a *pequeña escala*, o simplemente *desvanecimiento*, es un término para describir la rápida fluctuación de la amplitud de una señal de radio en un corto periodo o durante el viaje de ésta en una distancia corta en relación a su longitud de onda,⁸ tal como se aprecia en la Figura 1. Considerando el *desvanecimiento*, los efectos de pérdidas a gran escala (ver en la Figura 2 la línea con variación lenta respecto a la posición) pueden ser ignorados, como los ocasionados por sombreado o *Shadowing* y cuya relación física está dada por lo general por efectos de difracción debido a obstrucciones en el trayecto del transmisor al receptor.⁵¹

El desvanecimiento a pequeña escala es causado por la interferencia entre dos o más versiones de la señal transmitida cuando llegan al receptor con muy poco tiempo de diferencia. Estas señales son llamadas *Se-*

ñales de *Multitrayectoria* o multipath, y son combinadas en la antena receptora para obtener una señal resultante la cual puede variar de gran forma en amplitud (en un rango de 35 a 40dB en distancias aproximadas a media longitud de onda, tal como se aprecia en las Figuras 1 y 2) y fase, dependiendo de la distribución de intensidad, del tiempo relativo de propagación de las ondas y del ancho de banda de la señal transmitida (el cual varía de un sistema a otro).

Factores físicos en un canal inalámbrico terrestre y satelital

Algunos factores físicos en el canal de propagación influyen en el desvanecimiento a pequeña escala; los principales son:

1) Propagación Multitrayectoria:

La presencia de objetos reflectores y dispersores en el entorno crea un

cambio constante en el canal de propagación de la señal, lo que disipa energía en amplitud, fase y tiempo. Estos efectos producen múltiples versiones de la señal transmitida que llega a la antena receptora, desplazadas una respecto a la otra en tiempo y orientación espacial, tal como se aprecia en la Figura 3 para un sistema móvil terrestre tipo Indoor, en la Figura 4 para un sistema móvil terrestre Outdoor, y en la Figura 5 para un sistema satelital. De estos tipos de propagación multitrayectoria se destaca que los tiempos de viaje de las ondas son distintos y el modelado de cada uno de los canales se debe hacer con consideraciones estadísticas diferentes, lo que en últimas se traduce en el diseño de equipos de comunicaciones específicos para cada entorno y la aplicación de técnicas de mitigación de diferentes variantes.

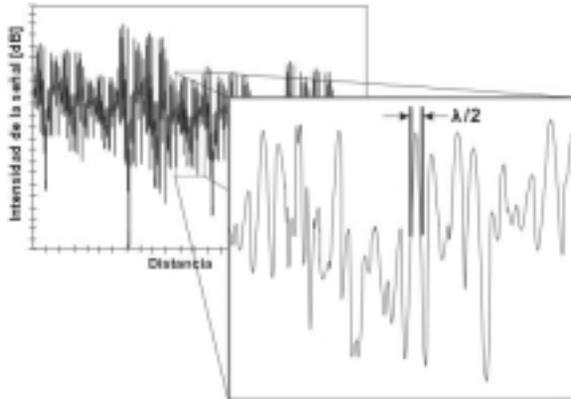


Figura 1. Señal bajo desvanecimiento a pequeña escala. Tomado de: García A., Alexis Paolo. Análisis de cobertura y de Densidad de Potencia Bajo un Entorno Andino. Universidad Industrial de Santander-E3T, Maestría en Ingenierías, Línea de Telecomunicaciones, Julio de 2004.

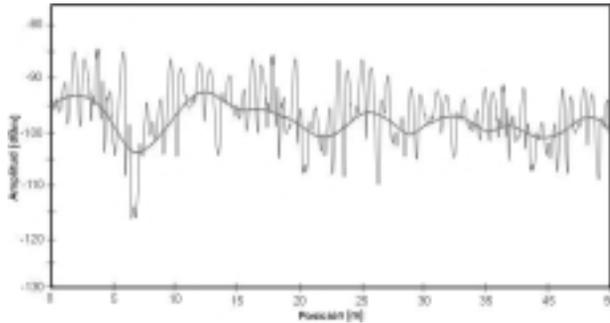


Figura 2. Señal bajo desvanecimiento a grande y pequeña escala. Tomado de: García A., Alexis Paolo, Análisis de cobertura y de Densidad de Potencia Bajo un Entorno Andino. Universidad Industrial de Santander-E3T, Maestría en Ingenierías, Línea de Telecomunicaciones, Julio de 2004.

2) Velocidad Relativa: El movimiento relativo entre el transmisor (satélite, radio base o punto de acceso) y el móvil produce una modulación en frecuencia aleatoria debido a diferentes efectos Doppler^{48, 51} en cada una de las componentes multitrayectoria (ver Figura 6). Si la función $\rho(t)$ describe la distancia entre el transmisor y el receptor respecto al tiempo, ésta dependerá del rango, velocidad y aceleración relativos. Desde el punto de vista de aplicación, las limitaciones en el procesado de señales en sistemas de comunicaciones móviles para el control de este fenómeno, se relacionan con la intensidad de la señal recibida, el ruido, y los cambios de nivel debido al paso de la señal por los bloques de RF, IF y Banda Base, donde en este último se espera el desplazamiento Doppler siga siendo perceptible para su detección y control.

3) Velocidad de Objetos Cercanos: Si los objetos del entorno se encuentran en movimiento, inducen un efecto Doppler variando el tiempo en las componentes multitrayectoria. Si los objetos cercanos se mueven a mayor

velocidad que el móvil, entonces este efecto domina el desvanecimiento a pequeña escala.⁴⁸

4) El Ancho de Banda de la Señal: Si el ancho de banda de la señal transmitida es más grande que el “ancho de banda” del canal multitrayectoria, la señal recibida puede ser distorsionada (debido a los tiempos diferentes de recepción de todas las componentes de frecuencia del espectro de la señal modulada y a que estos retrasos relativos son grandes comparados con la unidad básica de información transmitida sobre el canal; usualmente un símbolo o un bit), pero la intensidad no decaerá demasiado sobre un área local (el desvanecimiento a pequeña escala de la señal no será significativo sobre todo el espectro). Si la señal transmitida tiene un ancho de banda estrecho comparado con el del canal, la amplitud de la señal cambiará rápidamente, pero la señal no se distorsionará en el tiempo (todo el ancho de banda se verá afectado por los mismos tiempos de propagación y presentará una atenuación constante de todo el espectro). Un ejemplo muy claro donde

se aprovecha este fenómeno es el esquema de acceso múltiple CDMA (esquema de espectro expandido) utilizado en sistemas satelitales y terrestres,^{35, 37} donde se demuestra aún mas su potencialidad al aplicarlo en sistemas MIMO,^{9, 39, 40, 58, 60} utilizando técnicas DS-CDMA (CDMA de Secuen-

cia Directa: *Direct Sequence CDMA*), permitiendo controlar el fenómeno de Interferencia Intersímbolo (ISI: *Inter-symbol Interference*) y otros problemas asociados a la propagación multitrayectoria y a la interferencia co-canal.^{51, 76}

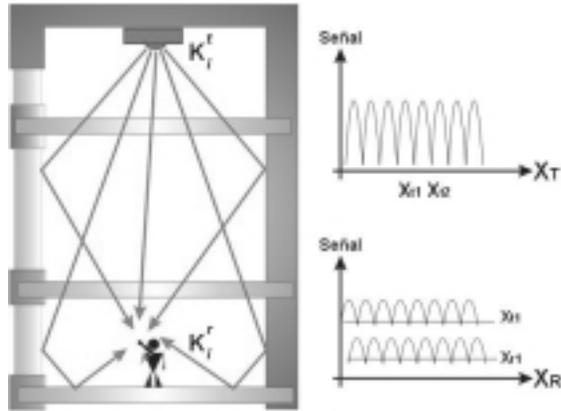


Figura 3. Modelo de efecto multitrayectoria en un entorno Indoor. Tomado de: García A., Alexis Paolo. Seminario de Comunicaciones Móviles. Diapositivas de clase. Universidad Industrial de Santander-E3T, Jul. 2004.

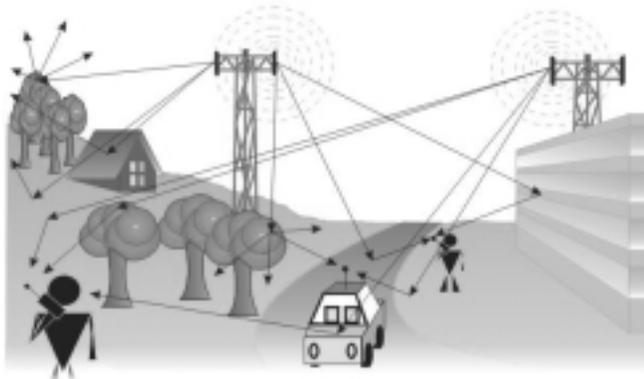


Figura 4. Modelo de efecto multitrayectoria en un entorno Outdoor. Tomado de: García A., Alexis Paolo. Seminario de Comunicaciones Móviles. Diapositivas de clase. Universidad Industrial de Santander-E3T, Jul. 2004

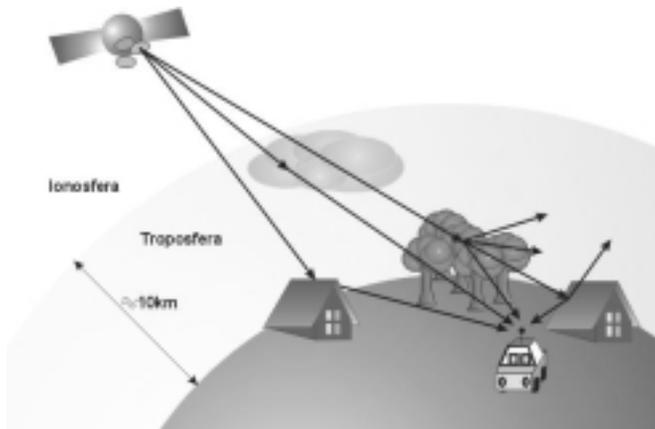


Figura 5. Entorno local de propagación en un sistema de comunicación móvil satelital. Tomado de: García Ariza, Alexis Paolo, “Comunicaciones Satelitales, Ciclo IV-Cohorte IV”, Texto Guía para el curso de Comunicaciones Satelitales de la Especialización en Telecomunicaciones de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, UIS. Publicación impresa, Junio de 2004, p.36.

Una forma más clara de comprender la relación entre el ancho de banda del canal y el ancho de banda de la señal (entendiéndose que una señal puede comportarse como de banda ancha o de banda angosta dependiendo de los retardos de propagación multitrayectoria del canal), es hacer una comparación de una señal de ancho de banda constante sometida a dos entornos diferentes de propagación que ocasionen retrasos multitrayectoria distintos. Como ejemplo, podría pensarse en una señal de ancho de banda de 1 MHz transmitida en un entorno *Indoor*, y esa misma señal transmitida en un entorno *Outdoor*, tal como se aprecia en las Figuras 3 y 4 respectivamente. Si se consideran sólo dos trayectos de propagación y para el primer caso un retardo de diferencia entre componentes de sólo $0.1 \mu\text{s}$ (como podría

encontrarse en un entorno *Indoor*), las dos trayectorias se cancelarían en frecuencias correspondientes a múltiplos de 10 MHz. De esta forma, la señal de 1 MHz experimentaría aproximadamente una atenuación constante y el canal podría considerarse de banda angosta. Pero si el retardo de diferencia se incrementa a $1 \mu\text{s}$ (como se encontraría en un entorno *Outdoor*), la amplitud del canal variaría significativamente a través del ancho de banda de la señal (cada 1 MHz) y éste sería un canal de banda ancha. La comparación entre estos dos casos se puede apreciar más claramente al analizar las funciones de transferencia del canal⁵¹ presentadas en la Figura 7.

Existe una característica adicional en un sistema de comunicación móvil satelital que afecta los factores físicos del canal inalámbrico, la velocidad del satélite. En un ambiente sa-

telital el fenómeno de desvanecimiento a pequeña escala se asocia al entorno local (sector cercano al receptor), como se aprecia en la Figura 5, y el cual es muy similar al caso de propagación presentado en un sistema móvil terrestre. La diferencia con este último radica en que tanto el receptor como el satélite pueden encontrarse en movimiento (i.e. sistemas

basados en órbitas LEO, MEO, HEO y sistemas HAP), lo que introduce un factor de complejidad debido a los diferentes ángulos de visibilidad entre el transmisor y el receptor,⁷⁵ y donde prima la velocidad del satélite, la cual puede oscilar en un rango aproximado de 8 a 4 km/s según la altura de su órbita,⁵⁸ tal como se aprecia en la Figura 8.

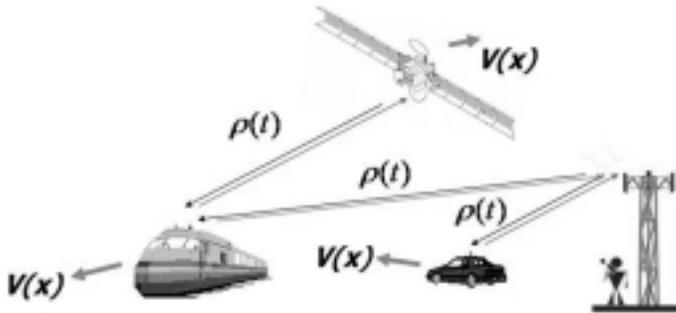


Figura 6. Ejemplos del efecto Doppler

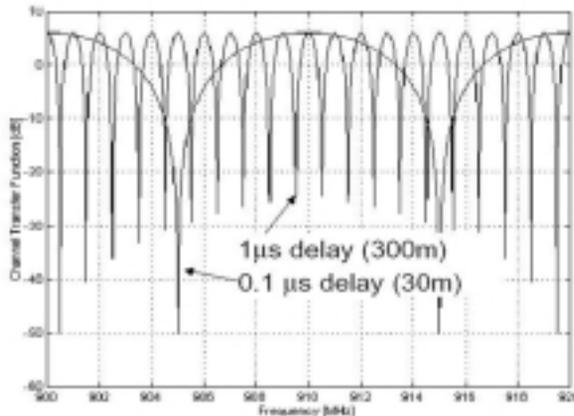


Figura 7. Función de Transferencia del canal con dos trayectorias de propagación: retrasos relativos de $1 \mu\text{s}$ y $0.1 \mu\text{s}$. Tomado de: Saunders, Simon R.. Antenas and propagation for wireless communication systems. West Sussex : John Wiley & Sons, 1999. p. 237.

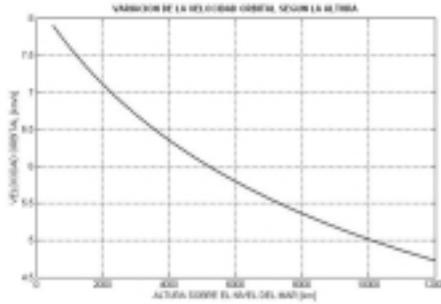


Figura 8. Variación de la velocidad orbital en sistemas satelitales de mediana y baja altitud. Tomado de: García Ariza, Alexis Paolo, “Comunicaciones Satelitales, Ciclo IV-Cohorte IV”, Texto Guía para el curso de Comunicaciones Satelitales de la Especialización en Telecomunicaciones de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, UIS. Publicación impresa, Junio de 2004, p.15.

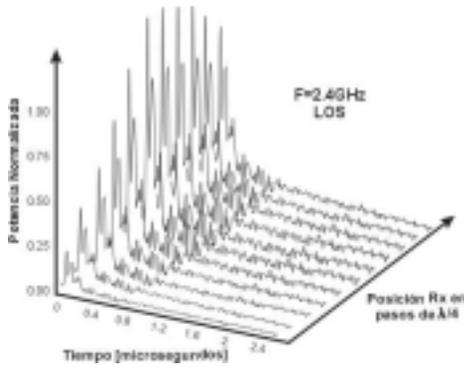


Figura 9. Respuesta al impulso de un canal multitrayectoria. Tomado de: García A., Alexis Paolo. Seminario de Comunicaciones Móviles. Diapositivas de clase. Universidad Industrial de Santander-E3T, Jul. 2004.

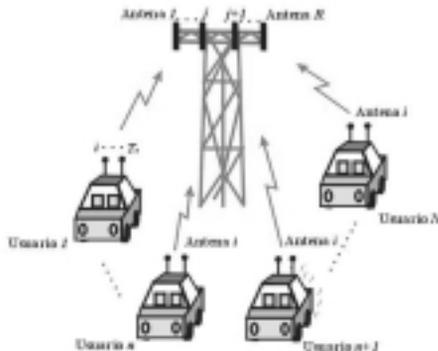


Figura 10. Sistema MIMO multiusuario en el cual todos los usuarios están equipados con arreglos de antenas para transmisión y recepción

III. RESPUESTA AL IMPULSO DE UN CANAL MULTITRAYECTORIA Y EL MODELO MIMO

La respuesta al impulso es una caracterización de un canal de banda ancha y contiene toda la información necesaria para simular o analizar cualquier tipo de radio transmisión a través del canal. Esto hace posible que un canal inalámbrico de comunicación pueda ser modelado como un filtro lineal con una respuesta al impulso variante en el tiempo, donde la variación del tiempo es debida al movimiento del receptor.^{8, 35, 48, 51} En la Figura 9 se puede apreciar la respuesta al impulso de un canal inalámbrico en una condición de línea de vista (LOS: *Line-Of-Sight*) para una frecuencia de 2.4 GHz, en intervalos para diferentes posiciones del receptor (resolución espacial de $\lambda/4$). Es de resaltar que esta respuesta es altamente dependiente del tipo de entorno de propagación (*Outdoor*, *Indoor*, en túneles, zonas boscosas, sistemas satelitales, plataformas de alta altitud-*HAP*, etc.).

Al considerar sistemas multiusuario CDMA, ya sean satelitales o terrestres, y la aplicación de técnicas MIMO en estos sistemas, hay algunas características comunes de configuración de los enlaces y de las consideraciones de respuesta al impulso de los canales. En canales MIMO, si se representa un sistema multiusuario con N usuarios comunicándose con un receptor común (estación base o satélite), todos los usuarios y el receptor deben estar equipados con un arreglo de antenas para la transmisión y recepción; tal como se aprecia en la Figura 10. Para este esquema, el número de antenas transmisoras correspondiente a un usuario n será

T_n , con $n=1, \dots, N$, y R indica el número de antenas receptoras en la radio base. Cada usuario transmite símbolos de información de duración τ . Por otro lado, el canal entre una antena transmisora i , de un usuario n , y una antena receptora j , de la radio base, es caracterizado por la respuesta al impulso causal $h_{ij}(t)^{(n)}$ de duración $T_{ij}^{(n)}$; asumiendo estable el canal (invariante en el tiempo) sobre la duración τ del símbolo. Así la señal transmitida $x_i(t)^{(n)}$ desde una antena i , en un usuario n , es convolucionada con la respuesta al impulso del respectivo canal (para cada uno de los usuarios y antenas del arreglo utilizado tanto en transmisión y recepción) dando como resultado la señal correspondiente en recepción $y_{ij}(t)^{(n)}$, obtenida de la señal enviada desde el usuario n en su antena transmisora i y recibida en la antena j de la radio base. La expresión que describe este proceso se presenta en la ecuación (1).

$$y_{ij}(t)^{(n)} = x_i(t)^{(n)} \otimes h_{ij}(t)^{(n)} \quad (1)$$

La onda recibida en la antena j es entonces una superposición de todas las señales recibidas desde todas las antenas transmisoras de todos los usuarios más el ruido aditivo Gaussiano (canal MIMO):

$$\begin{aligned} r_j(t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{T_n} y_{ij}(t)^{(n)} + n_j(t) = \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{T_n} x_i(t)^{(n)} \otimes h_{ij}(t)^{(n)} + n_j(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Si se utiliza la ecuación anterior para resolver el problema multitrayectoria MIMO, las matemáticas necesarias podrían llegar a ser demasiado complejas e incrementar su dificultad. El

uso de un *espacio* aproximado para representar las señales supera las dificultades asociadas con la ecuación (2) y permite trabajar con vectores de señal equivalentes y canales vector, utilizando además métodos algebraicos lineales más simples.^{1,76}

En los canales representados en la Figura 10 no se ha considerado que las respuestas al impulso, que se han aproximado como lineales e invariantes en el tiempo, sean dependientes de la posición de los usuarios en el caso de que estos estén en movimiento. En dicha suposición, la respuesta al impulso se expresará como $h_{ij}(d, t)^{(n)}$ y la señal recibida dependerá de la posición d del usuario. Por otro lado, si el usuario se mueve a una velocidad constante sobre un corto periodo o distancia se puede permitir que $x_i(t)^{(n)}$ represente la señal banda de paso transmitida, $y_{ij}(t)^{(n)}$ la señal recibida y $h_{ij}(t, \tau)^{(n)}$ la respuesta al impulso del canal de radio multitrayectoria variante en el tiempo.^{48, 51} La variable t representa las variaciones debido al movimiento, y τ los retardos multitrayectoria del canal para un valor constante de t . Si se asume que el canal es limitado en una banda de paso, algo muy común en la práctica, entonces $h_{ij}(t, \tau)^{(n)}$ puede ser descrito como una respuesta al impulso compleja de banda base con representaciones complejas de las señales transmitidas y recibidas (en la entrada y la salida del canal, respectivamente).

Actualmente, la solución a este problema del comportamiento dinámico en sistemas multiusuario MIMO hace parte de numerosas investiga-

ciones y es en esencia un fragmento de la propuesta de investigación planteada a la Comunidad Europea, abordada desde un punto de vista de procesamiento de señales espacio-temporales en sistemas multiusuario DS-CDMA,²² lo que implica, además de una convivencia del sistema bajo interferencia co-canal, un control simultáneo de los problemas asociados a los efectos dinámicos.

IV. PARÁMETROS DEL CANAL MULTITRAYECTORIA

Los parámetros del canal multitrayectoria se derivan principalmente del perfil de retardo de potencia (PDP: *Power Delay Profile*), que se expresa como la potencia relativa en el receptor y es una función respecto a un tiempo de retardo fijo de referencia. Dichos perfiles son encontrados por medidas de promedio instantáneas sobre un área local para determinar un perfil promedio a pequeña escala, es decir, son un promedio temporal o espacial de medidas consecutivas de respuestas al impulso recolectadas (como las presentadas en la Figura 9) y promediadas sobre un área local, y que dependen de la resolución temporal del pulso de prueba y del canal multitrayectoria en estudio, obteniéndose un resultado como el apreciado en la Figura 11 para un sistema celular a 850MHz. En la práctica, se realizan múltiples medidas de esta clase sobre áreas locales en busca de establecer un rango estadístico de los parámetros de un canal multitrayectoria, para luego ser utilizados sobre áreas a *gran escala* en el diseño de sistemas de comunicaciones móviles (terrestres y satelitales). Matemáticamente el PDP se define como la variación de la potencia media del canal con retardo,

$$P(\tau) = \frac{E \left[\left| h_{ij}(t, \tau)^{(n)} \right|^2 \right]}{2} \quad (3).$$

Usualmente la PDP es discreta en el tiempo, representando varios *taps* (o pulsos) individuales con potencias definidas (P_1, \dots, P_L), como en la Figura 11, y los cuales pueden tener distribuciones de probabilidad independientes.⁵¹

Los principales parámetros de canales multitrayectoria son:

A. Tiempo De Dispersión

1) Excess delay (retardo excedente): es el retardo de cualquier tap relativo al primer tap recibido.

2) Total excess delay (retardo excedente total): es la diferencia entre el primer y último tap. Es la cantidad en la cual la duración del símbolo es extendida por el canal.

3) Mean delay (retardo medio): es el “centro de gravedad” del perfil y es definido por

$$\tau_0 = \frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^L P_i \tau_i \quad (4),$$

y donde la potencia total (P_T) del canal es la suma de todas las potencias individuales de cada tap.

4) RMS delay spread (dispersión de retardo RMS): es el segundo momento, o dispersión, de los taps. Éste tiene en cuenta la potencia relativa de los taps como también sus retardos, haciéndolo el mejor indicador de desempeño del sistema. Se define por:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^L P_i \tau_i^2 - \tau_0^2} \quad (5).$$

Además, es independiente del retardo medio y de la longitud del trayecto de propagación, definido únicamente por los retardos relativos. Es un buen indicador (no el único, pues sobreestima el efecto de los taps con retardos grandes y potencias reducidas) del desempeño de la tasa de error del sistema para un tiempo de dispersión moderado (dentro de un símbolo de duración, tal como se estableció en la sección anterior). Si el τ_{RMS} es mucho menor que la duración del símbolo, no se presentará una ISI significativa, considerándose así que el canal es de banda angosta.

Otro parámetro del PDP encontrado en la literatura es el exceso máximo de retardo (*maximum excess delay o excess delay spread*) del perfil, y es definido como el tiempo durante el cual la energía de una multitrayectoria cae XdB por debajo del máximo recibido.⁴⁸ Tiempo medido desde el primer tap y que considera un nivel de umbral de potencia relativa preestablecido; que depende del piso de ruido multitrayectoria (diferente del ruido térmico asociado al equipo receptor) y del valor máximo medido de las componentes recibidas.

Por último, si se analiza la dispersión temporal para sistemas de amplia cobertura, como en macroceldas en sistemas móviles terrestres, se encontrará que su valor es bastante elevado, pero al considerar megaceldas en sistemas satelitales, debido al gran ángulo de elevación entre el usuario y el satélite hace que esta dispersión sea menor. En la Tabla 1 se pueden apreciar valores típicos de dispersión temporal τ_{RMS} para distintos entornos de propagación. De ésta se destaca que en entornos montañosos se pre-

venta uno de los peores casos y tal vez el más crítico, asunto relevante para la región andina donde las principales ciudades se han construido rodeadas de colinas y sobre terreno irregular. Esta característica dispersiva en el tiempo afecta directamente la *tasa de transmisión de datos*, y que en comparación con un entorno satelital o Indoor, deberá ser menor si no se utilizan técnicas especiales para reducir la ISI. Esto será aún más complejo de controlar dado el nuevo concepto de movilidad planteado por UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), donde

los terminales de usuario deberán estar equipados con tecnología que permita su adaptación al entorno de propagación donde éste se encuentre. En relación con los valores mostrados en la Tabla 1 (rangos establecidos por entorno), se puede agregar que la frecuencia de la portadora es otra variable relacionada con la dispersión temporal τ_{RMS} , y que a medida que ésta se incrementa los valores de dispersión se reducen, una ventaja en los sistemas móviles 3G y 4G donde sus bandas de operación se han establecido por arriba de 1 GHz.³²

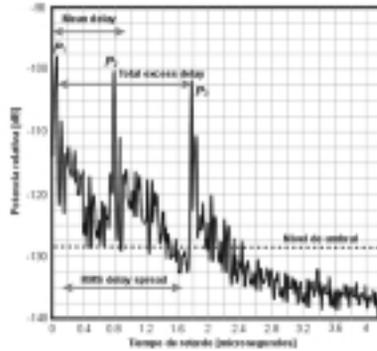


Figura 11. Perfil de retardo de potencia para un canal de un sistema celular a 850MHz en un entorno urbano. Tomado de: García A., Alexis Paolo. Seminario de Comunicaciones Móviles. Diapositivas de clase. Universidad Industrial de Santander-E3T, Jul. 2004.

Tabla 1. Valores típicos de dispersión temporal RMS desde diferentes entornos.

Entorno	Dispersión temporal RMS, τ_{RMS} [μ s]
Indoor	0.01-0.05
Móvil satelital	0.04-0.05
Área abierta	<0.2
Macrocelda suburbana	<1
Macrocelda urbana	1-3
Macrocelda en área <i>montañosa</i>	3-10

Tomado de: Saunders, Simon R.. Antennas and propagation for wireless communication systems. West Sussex: John Wiley & Sons, 1999. p. 243.

B. Ancho De Banda Coherente

Esta es la versión en frecuencia (caracterización del canal usando su respuesta en frecuencia) análoga a la caracterización del canal en el dominio del tiempo representada en la PDP. Es una medida del rango de frecuencias sobre el cual el canal puede ser considerado plano, es decir, donde todas las componentes espectrales pasan con aproximadamente igual ganancia y fase lineal; esto conlleva a una gran correlación de amplitud. Si la función de correlación de frecuencia está sobre 0.9, se puede expresar el ancho de banda coherente como:

$$B_c \approx \frac{1}{50\tau_{RMS}} \quad (6);$$

donde τ_{RMS} se obtiene de la ecuación (5). Si se suaviza y considera que la función de correlación sea de 0.5, entonces

$$B_c \approx \frac{1}{5\tau_{RMS}} \quad (7).$$

De las dos últimas ecuaciones hay que anotar que no existe una relación exacta entre el *ancho de banda coherente* y la *dispersión de retardo RMS*, y éstas son utilizadas como un estimativo de referencia. Debido a estos y otros inconvenientes, modelos específicos de canal multitraectoria de gran exactitud deben ser definidos para utilizarlos en el diseño y simulación de radio módems en sistemas inalámbricos satelitales y terrestres. En el caso que el ancho de banda del sistema sea mayor que el ancho de banda coherente se hace necesaria la aplicación de ecualizadores,⁵¹ u otras alternativas utilizando codificación,

arreglos de antenas y actualmente técnicas MIMO.¹ En este sentido, el ancho de banda coherente será un factor determinante en la investigación al momento de simular el algoritmo de procesamiento espacio-temporal para entornos urbanos con topografía irregular.²²

C. Doppler Spread y Tiempo Coherente

El Doppler Spread (B_D) es una medida del ensanchamiento del espectro de la señal causado por la tasa de tiempo de cambio en el canal de radio móvil, ya sea porque el receptor se acerca o se aleja del transmisor (aumentando o disminuyendo la frecuencia aparente recibida, respectivamente) en un área local; tal como se aprecia en la Figura 6. Es el rango de frecuencias donde el espectro Doppler recibido es esencialmente diferente de cero y depende de la velocidad relativa del usuario y del ángulo tendido entre la dirección del movimiento y la dirección de arribo de las ondas dispersas. El Doppler spread y el tiempo coherente son inversamente proporcionales⁴⁸ y se relacionan por

$$T_c \approx \frac{1}{f_m} \quad (8).$$

En la ecuación (8), f_m hace referencia al máximo desplazamiento Doppler experimentado; dado por $f_m = v/\lambda$, donde λ es la longitud de onda de la portadora y v la velocidad relativa del usuario. En consideraciones de diseño y simulación, si el ancho de banda de la señal de banda base es mucho más grande que B_D , los efectos del Doppler spread serán insignificantes en el receptor, lo que es una gran ven-

taja para los sistemas de espectro expandido como DS-CDMA. Por otro lado, al considerar el tiempo coherente representado en la ecuación (8) como una medida estadística de la duración temporal sobre la cual la respuesta al impulso del canal es esencialmente invariante, éste cuantificará la similitud de la respuesta del canal en diferentes tiempos, es decir, el tiempo de duración sobre el cual dos señales recibidas tienen alta correlación. Dado el caso, si el *recíproco del ancho de banda* de la señal de banda base es más grande que el *tiempo coherente*, el canal cambiará durante la transmisión de un mensaje de banda base, causando distorsión en el receptor.

El T_c al igual que el *ancho de banda coherente*, puede ser calculado para diferentes grados de correlación.⁴⁸ En sistemas digitales modernos se suele utilizar la media geométrica entre la ecuación (8) y la calculada para un grado de correlación de 0.5:

$$T_c = \sqrt{\frac{9}{16 \pi f_m^2}} = \frac{0.423}{f_m} \quad (9).$$

Haciendo uso de esta definición, si dos señales llegan al receptor con tiempos de separación más grandes que T_c , éstas serán afectadas de forma diferente por el canal por una cantidad casi el doble de restrictiva que la presentada por la ecuación (8). Por esta razón, a nivel de diseño y procesamiento de señales en comunicaciones móviles 3G y 4G, la velocidad del usuario (o la velocidad relativa usuario-satélite) y la frecuencia de la portadora, definen la cantidad de mues-

tras y los intervalos de muestreo espacial para obtener señales con alto nivel de correlación,⁷⁷ y de esta forma poder mitigar, en tiempo real, la distorsión de la señal; lo que está relacionado directamente con las diferentes tasas de transmisión de dichos sistemas en condiciones distintas de movilidad³² (i.e. a altas, medianas y bajas velocidades).

V. EFECTOS DE DESVANECIMIENTO DEBIDOS A DELAY SPREAD YA DOPPLER SPREAD

Se consideran dos grupos de clasificación correspondientes a desvanecimientos a pequeña escala basados en el fenómeno de *Delay Spread*, debido a multitrayectorias, y al fenómeno de *Doppler Spread*, debido a la velocidad relativa y a su efecto en presencia de múltiples trayectorias. Dentro de estos dos grupos están: el *Desvanecimiento Plano*, el *Desvanecimiento de Frecuencia Selectiva*, el *Fast Fading* y el *Slow Fading*. De ellos, los dos primeros corresponden al grupo relacionado con el *Delay Spread* y los dos últimos al del *Doppler Spread*. Es importante anotar que los parámetros de la señal (ancho de banda, periodo del símbolo, etc.) y del canal (así como el τ_{RMS} y el T_c) agrupan a las señales transmitidas bajo diferentes grupos y tipos de desvanecimiento.

A. Flat fading o Desvanecimiento Plano

En este caso la estructura del canal es tal que las características del espectro de la señal transmitida son preservadas en el receptor. Sin embargo, la potencia de la señal recibida cambia con el tiempo debido a fluctuaciones en la ganancia del canal causadas por efectos multipath.

B. Desvanecimiento de Frecuencia Selectiva

Aquí, si el canal posee una ganancia constante y una respuesta de fase lineal sobre un ancho de banda que es más pequeño que el ancho de banda de la señal transmitida, entonces creará desvanecimiento selectivo de frecuencia. Bajo estas condiciones la respuesta al impulso del canal tiene un *Delay Spread* multitrayectoria que es más grande que el recíproco del ancho de banda de la onda mensaje transmitida.

C. Fast Fading

Aquí la respuesta al impulso del canal cambia rápidamente con la duración del símbolo, es decir que el tiempo de coherencia del canal es más pequeño que el período del símbolo de la señal transmitida. Esto causa dispersión de frecuencia (desvanecimiento selectivo en el tiempo) debido al *Doppler Spread*, induciendo distorsión en la señal.

D. Slow fading

Con este esquema, la respuesta al impulso del canal cambia en una tasa mucho más baja que la de la señal de banda base transmitida. El canal se puede asumir como estático por uno o varios intervalos del recíproco del ancho de banda.

VI. ESTADÍSTICA APLICADA PARA MODELAR EL DESVANECIMIENTO DEL CANAL

Debido a las características randómicas de los fenómenos descritos, es necesaria la aplicación de técnicas estadísticas para su modelado. En canales móviles, la *función de densidad de probabilidad* (p.d.f: *probabi-*

lity density function) *Rayleigh* (o distribución *Rayleigh*) es la más usada ya que describe la naturaleza estática de la variación temporal de la envolvente recibida de una señal en desvanecimiento plano, o la envolvente de una componente individual de multitrayectoria. En la Figura 12 se aprecia una función de densidad de probabilidad de estas características, la cual se establece para casos donde no existe línea de vista entre el usuario móvil y el transmisor (NLOS: *Non-Line-Of-Sight*).

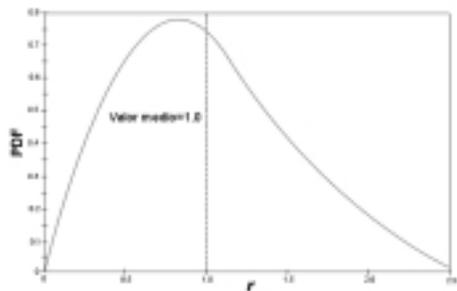


Figura 12. Función de Densidad de Probabilidad (PDF) tipo Rayleigh.

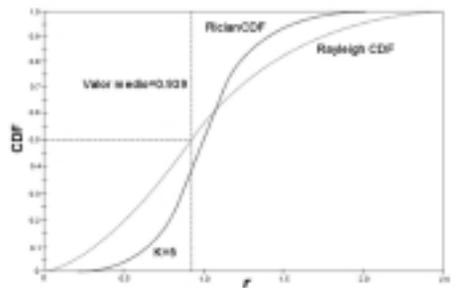


Figura 13. Comparación de la Función de Distribución Acumulativa (CDF) tipo Rayleigh y Rice.

Otra distribución utilizada en la *Rice*, y se usa para describir el desvanecimiento de la envolvente cuando hay una componente de señal

estacionaria dominante (rayo directo); como en el caso de una trayectoria por línea de vista o LOS. Aquí las componentes aleatorias de multitrayectoria que llegan en diferentes ángulos son superpuestas a una señal dominante. El efecto que se presenta en la salida del detector de envolvente en un sistema inalámbrico es la adición de una componente de *dc* a las multitrayectorias randómicas. Una comparación entre las *Funciones de Distribución Acumulativa Rayleigh y Rice* se presenta en la Figura 13.

Para el análisis de sistemas MIMO, el conocimiento de las distribuciones de probabilidad de las componentes multitrayectoria es de vital importancia al realizar simulaciones en condiciones específicas de señal y canal, al igual que las consideraciones estadísticas de todos los fenómenos relacionados. Por lo general, la respuesta al impulso del canal (o canales múltiples) puede ser experimentada como un filtro receptor de ancho de banda finito; el cual podría no dar buenos resultados sobre la respuesta temporal. Por ello, se pueden tomar procesos dispersivos con retardos similares y sumarlos dentro de una ventana discreta; dado que la resolución del sistema no estará habilitada para distinguir entre el caso discreto y el continuo.⁵¹ Con estas consideraciones, la amplitud de cada multitrayectoria variará como en el caso de un canal de banda angosta, con una tasa de desvanecimiento proporcional a la velocidad del usuario y a la frecuencia de la portadora, y podría aproximarse a una distribución Rayleigh o Rice utilizando *estadística de primer orden*.⁵¹

Desde un punto de vista más real y práctico, y que mejora el desempeño

de un sistema inalámbrico y la calidad de su señal, se puede abordar el problema haciendo uso de *estadísticas de segundo orden*,^{51, 67} y así describir el desvanecimiento del canal de una forma más aproximada. La estadística de segundo orden está relacionada directamente con los efectos dinámicos en un sistema multiusuario (i.e. debido al efecto Doppler). En estos casos, el problema se centra en la distribución estadística de las *tasas de cambio de las señales* y no en la propia señal, considerándose los estados previos de las señales; es decir un sistema con memoria y con desvanecimiento correlacionado.

Por otro lado, la forma del espectro Doppler, asociado al Doppler Spread, afecta directamente la estadística de desvanecimiento de segundo orden,⁵¹ haciéndose necesarios los modelos estadísticos que definen los ángulos de arribo de las múltiples trayectorias. En simulación, el *espectro Doppler clásico* (asociado a un modelo probabilístico uniforme de ángulos de arribo horizontal), es uno de los más utilizados para canales de radio móvil, pero no es adecuado en muchos casos donde el desplazamiento en cortas distancias está afectado por una gran dispersión en la propagación. Esta amplia dispersión de los ángulos de arribo altera la ganancia efectiva de la antena receptora de los usuarios móviles, de manera tal que es necesaria la inclusión de un valor de ángulo promedio en los cálculos típicos de mejor enlace; en busca de obtener una optimización en la planificación del sistema. Con modelos que incluyen ángulos de arribo dispersos en la dirección vertical se ha logrado reducir el promedio de la tasa de desvanecimiento.⁵¹

Debido a que el espectro Doppler es difícil de medir, se suelen usar otros parámetros que permiten una adquisición más sencilla. Estos son: la *tasa de cruce de nivel* (l.c.r.: *level-crossing rate*) y la *duración promedio de desvanecido* (a.f.d.: *average fade duration*);⁶⁸ los cuales se relacionan directamente con un espectro Doppler particular. Estos indican la ocurrencia de desvanecimientos, en el caso del l.c.r., y la duración de los mismos, en el caso del a.f.d., en relación con un nivel de referencia y una unidad de tiempo.⁵¹ En la práctica, durante la ocurrencia de un desvanecimiento por condiciones dinámicas Doppler (desvanecimientos profundos y de corta duración) los sistemas digitales presentan una tasa de error de bit mayor,⁷⁵ por lo que se suele usar el intercalado de bits o *interleaving*, que en resumen es un cambio en el orden de los bits transmitidos por el canal. Esto ayuda a distribuir los espacios de pérdida de información uniformemente en el tiempo, permitiendo a las técnicas de corrección de errores y detección por códigos operar de forma más eficiente. Por otro lado, considerando las características de los códigos utilizados y el uso de estadística de segundo orden en el canal, el *interleaving* puede ser optimizado para dar un mejor desempeño a los sistemas móviles satelitales y terrestres bajo efectos de Doppler Spread en entornos multitrayectoria.⁶⁷

En procesos randómicos en canales de banda angosta, la transformada inversa de Fourier de la densidad espectral de potencia viene a ser la *función de auto correlación*.^{77, 51} Con ella se puede ver el efecto del Doppler Spread en el dominio del tiempo. Esta función expresa la correlación entre

una señal en un tiempo dado y su valor en algún tiempo de retardo τ . Así, la función de autocorrelación normalizada para una señal compleja recibida con desvanecimiento $y_{ij}(t)^{(n)}$, desde un usuario determinado (según la Figura 10), se define por:

$$\rho(\tau) = \frac{E \left[y_{ij}(t)^{(n)} y_{ij}^*(t+\tau)^{(n)} \right]}{E \left[|y_{ij}(t)^{(n)}|^2 \right]} \quad (10).$$

Para el caso de un *espectro Doppler clásico* con desvanecimiento Rayleigh el resultado es⁵¹

$$\rho(\tau) = J_0(2\pi f_m \tau) \quad (11)$$

donde J_0 es la función de Bessel de primera clase y orden cero. Bajo estas consideraciones se puede definir el tiempo coherente dado en la ecuación (8) si la función de autocorrelación normalizada permanece cercana a la unidad durante el tiempo analizado.

En canales prácticos de banda ancha, la *correlación entre componentes* de la función de transferencia del canal, con una separación en frecuencia Δf , y una separación en el tiempo Δt , está definida por

$$\rho(\Delta f, \Delta t) = \frac{E \left[T(f, t) T^*(f + \Delta f, t + \Delta t) \right]}{\sqrt{E \left[|T(f, t)|^2 \right] E \left[|T(f + \Delta f, t + \Delta t)|^2 \right]}} \quad (12),$$

donde $T(f, t)$ es la función de transferencia variante en el tiempo para un canal de banda ancha (una función no conocida por anticipado), y se define por la transformada de Fourier de la respuesta al impulso del canal

respecto a una variable de retardo τ , tal como se precisó para la ecuación (3), de forma que

$$T(f, t) = F \left[h_{ij}(t, \tau)^{(n)} \right] = T \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(t, \tau)^{(n)} e^{j2\pi f \tau} d\tau \quad (13).$$

En el análisis estadístico de canales multitrayectoria de banda ancha, las anteriores consideraciones, y otras alternativas para el procesado de señales en condiciones randómicas como las funciones Bello,⁷⁸ siguen siendo una de las actividades de exploración de especial interés en el diseño de los sistemas móviles que hacen uso de arreglos de antenas,¹ y serán fundamentales al momento de poner a prueba los algoritmos diseñados durante la investigación.²²

VII. MODELOS ESTADÍSTICOS PARA CANALES MULTITRAYECTORIA

Los modelos estadísticos dan una representación explícita de la estadística del canal en términos de las distribuciones paramétricas que son una mezcla de componentes Rice, Rayleigh y Log-normal.⁵¹ Estos modelos utilizan teoría estadística para derivar una forma analítica razonable de la distribución de la señal de banda estrecha que se desvanece, para después por medio de medidas encontrar los valores apropiados de los parámetros en la distribución.

A menudo es necesario *simular* o *emular* los canales móviles para el desarrollo de transceivers de prueba. Cualquier simulación debe ser consistente con el conocimiento de la estadística de primer y segundo orden del canal móvil. Una aproximación al realizar este trabajo se muestra en la Figura 14. Aquí, un generador de

ruido blanco Gaussiano complejo, con potencia unitaria, se usa para representar las componentes en fase y cuadratura de la señal. Éstas son pasadas a través de un filtro, el cual es cuidadosamente diseñado para producir a su salida una aproximación del espectro Doppler clásico. La forma exacta del filtro no es crítica, ya que se utilizarían la *a.f.d* y *l.c.r* correctas para coincidir la varianza del espectro clásico con el deseado. Un fasor de amplitud constante \sqrt{k} , donde k es el factor Rice deseado, se agrega para representar la parte coherente dominante del canal, y usualmente con un desplazamiento de frecuencia f_d diferente de cero, representando así el desplazamiento Doppler asociado con el trayecto LOS. El resultado final de este modelo de canal puede ser usado para multiplicarse con la señal de cualquier transmisor, ya sea en una simulación por computador o creando una implementación hardware del simulador en tiempo real para realizar emulaciones del ambiente móvil en condiciones de laboratorio con un equipo de radio móvil real.⁷³

Para modelar canales móviles satelitales, la señal que se desvanece en banda estrecha se puede descomponer en dos partes, una parte coherente, generalmente asociada con la trayectoria directa entre el satélite y el móvil, y una parte difusa que se presenta debido a una gran cantidad de componentes multicamino.⁷⁵ La magnitud de la parte difusa se asume por lo general como una distribución de Rayleigh o una Rayleigh-Log-normal, y la coherente como Rice o Log-normal.

El modelo más simple es la distribución de Rice que asume que ambas com-

ponentes de la señal tienen como constante un nivel malo de energía. Se ha generalizado este modelo para explicar las condiciones que cambian rápidamente, asociadas a la atenuación y al sombreado en las dos componentes en un ambiente móvil. Si los parámetros de estos modelos para las diferentes

aplicaciones se eligen apropiadamente, pueden proporcionar un buen ajuste a las distribuciones. Los modelos de esta clase son: el de Loo,⁸¹ el cual es sólo aplicable para condiciones de área rural, el modelo de Hwang,⁸⁰ que puede incluir los modelos de Rice, de Loo y de Corazza,⁷⁹ como casos especiales.

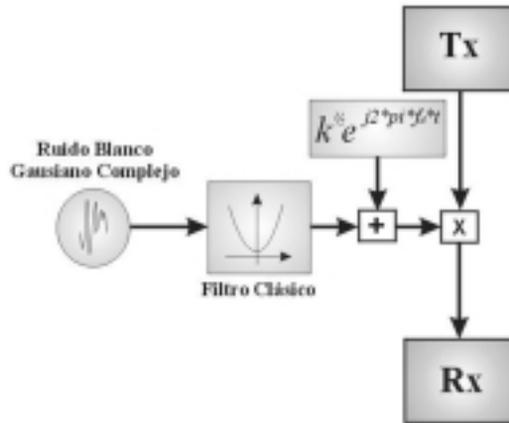


Figura 14. Esquema de simulación de un canal bajo desvanecimiento Rice

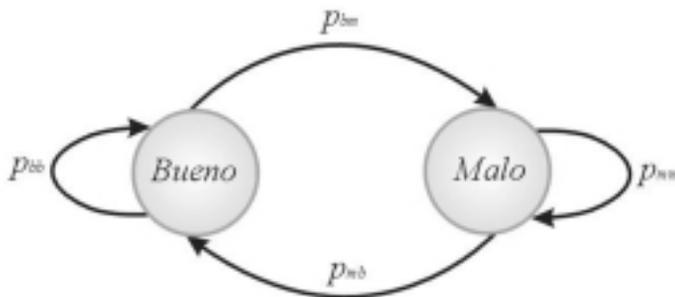


Figura 15. Modelo de Markov del estado del canal.

En relación con los servicios móviles satelitales (*MSS: Mobile Satellite Service*), los cuales se dividen en marítimos, aeronáuticos y terrestres (*LMS: Land Mobile Satellite Service*), el modelo de Loo⁸¹ es aplicable para

casos terrestres en presencia de árboles a la orilla de las carreteras, y asume que la señal está compuesta por una componente LOS, con distribución log-normal (afectada por la atenuación ocasionada por los árbo-

les), más una componente multitrajectoria con distribución Rayleigh. Las expresiones para la *l.c.r* y *a.f.d* se pueden encontrar en la formulación del modelo,⁸¹ donde se demuestra su dependencia con la correlación entre las dos componentes (coherente y difusa), y que cuando es pequeña se obtiene un valor grande de *l.c.r*.

El modelo de Corazza,⁷⁹ también aplicado para sistemas LMS, puede verse como un desarrollo de la aproximación de Loo, donde las dos componentes (directa y multitrajectoria) son afectadas por un sombreado de distribución log-normal. De esta forma, escogiendo los *parámetros* correctos de las distribuciones se pueden modelar un amplio rango de ambientes de propagación (en relación con la movilidad y el entorno), y sí se realizan mediciones en campo se pueden extraer las formulaciones empíricas necesarias para el cálculo de estos *parámetros*.⁷³ De estas formulaciones, se ha encontrado una dependencia directa con el ángulo de elevación entre el usuario y el satélite.

Un modelo de amplia aplicación en sistemas LMS, para entornos urbanos y suburbanos, es el modelo de Lutz,^{83, 75} donde la estadística de LOS y NLOS se modela por medio de dos estados distintos. Esto lo hace especialmente apropiado para estos casos de entorno donde existe una gran diferencia entre la estadística en presencia de sombreado y en los casos en que no existe. Los *parámetros* asociados con cada estado y las probabilidades de transición entre cada uno se determinan de forma empírica. Este modelo puede ser generalizado para otros estados y permitir representaciones de transición suaves en-

tre las condiciones LOS y NLOS o caracterizar una propagación de múltiples satélites.^{64, 82} Como ejemplo podría pensarse en un modelo aproximado de tres estados, con las condiciones de NLOS debido a edificios, sombreado por árboles y LOS. La condición LOS podría representarse como un estado “bueno” y la condición de NLOS como un estado “malo”, con una distribución Rice en “bueno” y una Rayleigh en “malo” y con *parámetros* variables en “malo” que permiten modelar la variación de los efectos del sombreado en una situación NLOS. Las transiciones entre estados pueden representarse en este caso por una cadena de Markov de primer orden,⁸² donde la transición de un estado al otro depende sólo del estado actual, en lugar de datos históricos distantes. La representación de los tres estados y de las probabilidades de transición entre ellos se muestra en la Figura 15.

El modelado de canales de banda ancha en satélites no se ha analizado hasta el momento, en relación con que el *tiempo de dispersión* que experimentan es menor en comparación con la mayoría de los sistemas terrestres; tal como se exponía en la Tabla 1. Esto permite que el canal se comporte como de banda angosta para los sistemas de satélites de primera generación, pero no lo será en los sistemas multimedia de banda ancha actual y en los del futuro,^{74, 76} lo que será relevante en el diseño de sistemas MIMO basados en satélites de mediana y baja altitud que hacen uso de esquemas de acceso múltiple CDMA.⁷⁶

En sistemas satelitales, al igual que en sistemas móviles terrestres, se

han planteado modelos *estadísticos-físicos*^{69, 70, 85} que representan una mejor aproximación. Estos determinan las distribuciones de desvanecimiento directamente de las distribuciones de los parámetros físicos usando teoría electromagnética simple.

Como complemento, se pueden mencionar varios trabajos relacionados con el desempeño de los sistemas LMS y el uso de modelos estadísticos de canal. Siguiendo las postulaciones de Corazza, Kang⁶⁵ realiza un análisis de BER para una modulación BPSK, determinando los parámetros del canal de forma empírica y midiendo el desempeño del sistema en diferentes entornos. Xie⁶⁶ plantea un modelo general de canal usando teorías de dispersión de la propagación, el cual presenta mejores resultados que modelos anteriores usando datos experimentales. Fontan⁷² presenta los principios de diseño e implementación de un modelo de banda ancha para varias bandas de frecuencia y aplicable para servicios de comunicaciones, difusión, navegación y otros, que hacen uso de satélites LEO y no geoestacionarios. Briso⁷³ presenta un modelo diseñado con base en medidas obtenidas de la constelación GPS (*Global Positioning System*) y el cual es utilizado en un sistema de emulación que permite cambiar los parámetros del canal para analizar el desempeño del sistema en entornos urbanos, rurales, semiurbanos y por carretera con diferentes condiciones de ángulos de elevación. Abdi⁶⁷ presenta un modelo que hace uso de estadísticas de primer y segundo orden, el cual permite ser aplicado a canales de banda ancha y banda angosta usando una distribución de Nakagami para modelar la componente LOS,

en sistemas con diferentes modulaciones (con o sin diversidad), con una carga computacional más baja que las implementaciones con el modelo Loo y con similares resultados de desempeño. Patzold⁶⁸ presenta un modelo para canales no selectivos en frecuencia y con espectro Doppler asimétrico, utilizando un proceso de optimización numérica para calcular los parámetros del canal a partir de la *p.d.f.*, la *l.c.r* y *a.d.f.* Dovis⁷¹ presenta un modelo de canal para los futuros sistemas HAP (sistemas basados en aeronaves o globos estáticos que se colocarán entre 17 y 30 km de altura para proveer servicios personales y de banda ancha a un menor costo de operación y mantenimiento) lo que implica el análisis de un nuevo entorno de propagación. Finalmente, Restrepo⁶⁴ hace un análisis de desempeño y de calidad del servicio para sistemas con canales con diversidad, y aplica una aproximación a la cadena Markov para obtener el modelo tráfico con handover garantizado en sistemas móviles satelitales que utilizan esquemas de reuso de celdas fijas con múltiples satélites.

En sistemas terrestres, el primer modelo presentado por Ossana⁴⁸ se basó en la interferencia de ondas incidentes y reflejadas de los lados planos de edificios ubicados aleatoriamente. Aunque este modelo predice el espectro de potencia de desvanecimiento plano, que fue acordado con medidas en áreas suburbanas, asume la existencia de una trayectoria directa entre el transmisor y el receptor, y es limitado para un rango de ángulos de reflexión. El modelo es algo inflexible e inapropiado para áreas urbanas donde la trayectoria directa es casi siempre bloqueada por edificios u

otros obstáculos (caso contrario a los sistemas satelitales).

Por otro lado, Clarke desarrolló un modelo donde las características estáticas de los campos electromagnéticos de la señal recibida en el móvil son deducidas de la dispersión.⁴⁸ Asume un transmisor fijo con la antena polarizada verticalmente, y el campo incidente sobre la antena del móvil lo componen y ondas planas azimutales con fases de portadora arbitrarias, ángulos azimutales arbitrarios de llegada y de igual promedio en amplitud; lo último se asume basado en el hecho de ausencia de trayectoria de línea de vista, y en que las componentes dispersas que llegan al receptor experimentan atenuaciones similares sobre distancias a pequeña escala.

Clarke y Gans propusieron uno de los modelos más usados en hardware y software.⁴⁸ Este modelo usa el concepto de modulación en fase y cuadratura de las trayectorias para producir una señal simulada con características espectrales y temporales muy próximas a los datos medidos.

En sistemas Indoor, Saleh y Valenzuela⁴⁸ para el desarrollo de su modelo realizaron mediciones entre dos antenas omnidireccionales polarizadas verticalmente, localizadas en el mismo piso de un edificio mediano. Usaron pulsos de radar a 1.5 GHz de 10 ns de duración para promediar las mediciones de la respuesta al pulso mientras se barría la frecuencia del pulso transmitido.

Rappaport y Seidel⁴⁸ desarrollaron un modelo empírico-estadístico basado en la respuesta al impulso discreto de un canal, e implementaron el SIR-CIM (*Simulation of Indoor Radio*

Channel Impulse-response Models) que genera muestras realistas de la respuesta al impulso de un canal *Indoor* a pequeña escala. Posteriormente se desarrolló SMRCIM (*Simulation of Mobile Radio Channel Impulse-response Models*), un programa similar que genera respuestas al impulso en un canal celular y microcelular urbano a pequeña escala.

Recientemente, en sistemas Indoor se ha dado importancia al modelado de canales considerando el efecto de los peatones y del cuerpo del usuario. Castro⁸⁴ hace un análisis del efecto del cuerpo sobre la característica del canal para dos casos diferentes de entornos Indoor, donde demostró una gran dependencia de las medidas de área local en correspondencia al sombreado causado por el cuerpo (efectos de 5,4 a 3.8 dB) y su directa relación con la componente LOS, considerando además la *l.c.r* y la *a.f.d*; todo esto, haciendo uso de medidas a 5.2 GHz y simulaciones con una herramienta de predicción 3D para el trazado de rayos. Por otro lado, Rudd⁸⁵ propone un modelo de canal de banda ancha Indoor siguiendo una aproximación estadístico-física utilizada en modelamiento acústico, y que brinda ventajas adicionales frente a otras alternativas que requieren un elevado conocimiento de las características físicas de los edificios, que deben incorporarse dentro de las herramientas de planificación, y que por lo general consumen mayor tiempo de cómputo.

En el modelado de canales MIMO para entornos Outdoor, se han realizado recientes aportes que serán relevantes en el desarrollo de la investigación sobre estos sistemas,⁶² y el tener en cuenta algunas consideracio-

nes sobre topografía irregular ayudará a cumplir con los objetivos propuestos.²² En este sentido, Unar⁸⁶ presenta la caracterización de un modelo de canal de banda ancha para un área suburbana (común en ciudades latinoamericanas) por medio de la realización de medidas a 2.38 GHz.

VIII. "MIMO CHANNELS" EN SISTEMAS DS-CDMA: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Después de haber iniciado un proceso de investigación en el área de radio-propagación en sistemas celulares sobre terreno irregular y consideraciones sobre la exposición a campos electromagnéticos,^{23, 24, 25, 26, 27} desarrollando acuerdos de cooperación con la Universidad Politécnica de Valencia y el COST273²³ (*Commission of the European Communities and COST Telecommunications, COST273: "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks"* - Cooperación Europea en el Campo de la Investigación Científica y Tecnológica-EURO-COST), se espera, con la propuesta planteada ante la Comunidad Europea²² dar continuidad a esta línea de investigación, orientándose al aprovechamiento de la propagación multitrayecto por parte de los sistemas de procesamiento de señal en canales inalámbricos de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO), para los sistemas de comunicación de banda ancha del futuro que hacen uso de arreglos de antenas y que se usarán sobre terreno irregular.

Como se ha tratado a lo largo del paper, los entornos presentados en sistemas de comunicación terrestre y satelitales, ya sean *Indoor* u *Outdoor*, en áreas urbanas homogéneas, rurales, o urbanas no homogéneas afectadas por colinas, presentan en general

el efecto de generación de múltiples trayectorias en un canal común de comunicación (MIMO Channel), donde debido a diferentes mecanismos de propagación (reflexión, difracción y dispersión principalmente) se transmiten y reciben varias señales en una misma comunicación en diferentes direcciones y con tiempos distintos de llegada;^{8,14,51} tal como se aprecia en la Figura 16. El efecto de múltiples trayectorias, se presenta en grados diferentes en cada uno de estos entornos, siendo particularmente predominante a nivel temporal en casos de terreno irregular.²⁹

Muchas técnicas se han desarrollado para el control del desvanecimiento por múltiples trayectorias y cancelación de la interferencia co-canal haciendo uso de arreglos de antenas,^{1, 4, 9, 10, 12, 20, 29, 30, 31, 39, 40, 58, 60} y arreglos virtuales¹⁷ (asociados al concepto de cooperatividad de los usuarios móviles), pero el *control conjunto* de estos dos efectos se hace bastante complicado en casos donde la señal deseada y la interferencia de múltiples usuarios son transmitidas sobre diferentes entornos generadores de multipath.

MIMO Channels es actualmente un importante tema de estudio debido a sus potencialidades en el manejo de grandes cantidades de información para los servicios multimedia del futuro.^{9, 11, 19, 28, 50, 52} Dentro de las políticas de investigación europeas ha sido¹⁵ y es de interés para el COST como lo demuestran algunas de las investigaciones realizadas^{17, 18, 33, 36, 47, 52, 61} en el camino y establecimiento de los lineamientos para el desarrollo final de los sistemas móviles multimedia de comunicación de banda ancha.

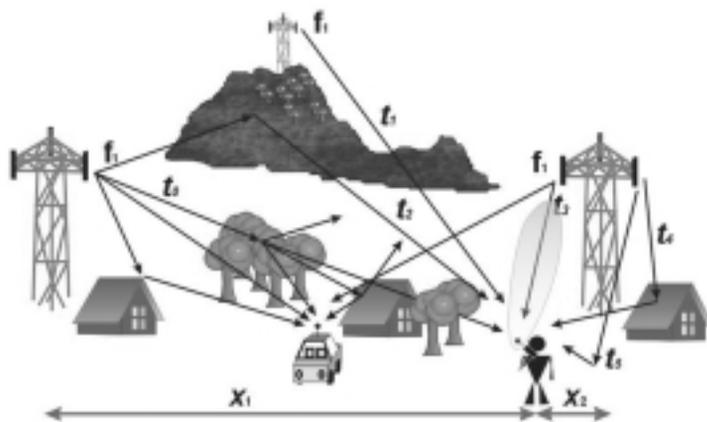


Figura 16. Entorno MIMO Andino.

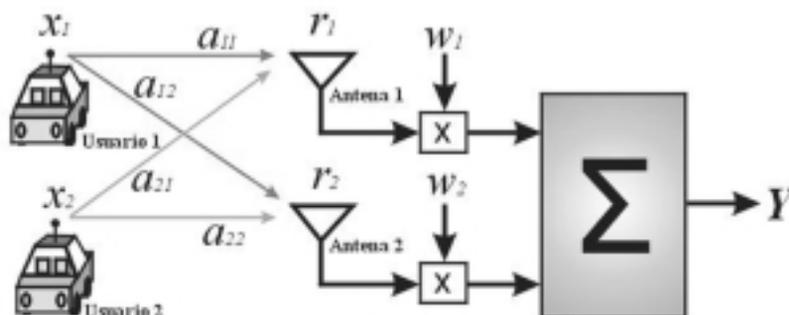


Figura 17. Sistema de conformación de haz para el control de interferencia.

En el contexto MIMO, la propagación multicamino, en lugar de tomarse como un problema, presenta grandes ventajas al utilizarse en un arreglo de antenas,⁶¹ y en especial en WCDMA para 3G donde la interferencia de acceso múltiple debido a la dispersión y multitrayectoria presenta desventajas significativas. Explotando la decorrelación de señales transmitidas en un nivel elevado de dispersión se puede llegar a

incrementar la capacidad de los sistemas,⁹ ya sea en el canal de subida (uplink) o en el canal de bajada (downlink). Además, el control de los efectos de la interferencia, en el desempeño de sistemas basados en arreglos de antenas es particularmente atractivo, más aún aplicando técnicas de *beamforming* o *conformación de haz*,^{9, 12, 30, 39, 40} que permiten el aumento de la capacidad del canal de comunicación.

Estas técnicas utilizan arreglos fasoriales de antenas para la conformación de haces directivos adaptativos que mitigan la interferencia de señales provenientes de móviles no deseados,^{1, 51} tal como se aprecia en la Figura 17, donde cada uno de los usuarios actúa como interferente del otro. Si el sistema adaptativo de recepción es capaz de calcular los valores a_j , que modelan la característica de los canales, entonces se podrán calcular los pesos w_j adecuados para que el sistema atenúe la señal interferente x_r , y así la salida Y se acerque lo máximo posible a la señal deseada x_r . En esta técnica el cálculo de los pesos w_j está directamente relacionado con el mejoramiento de la Relación Señal-Interferencia-Ruido (SINR: *Signal to Interference and Noise Ratio*).

En el auge y demanda de altas tasas de transmisión para los actuales sistemas 3G y el futuro 4G^{2, 28} la implementación de tecnología MIMO puede presentar una ganancia significativa en la capacidad de Shannon de un canal.³³ La capacidad de sistemas MIMO con 10 antenas puede alcanzar tanto en transmisión como en recepción aproximadamente 25bits/s/Hz para 10dB de SNR (Relación Señal a Ruido-SNR: *Signal to Noise Ratio*) en comparación con los 3bits/s/Hz para sistemas SISO (Sistemas de Entrada Simple y Salida Simple).¹⁷

Mediciones,^{33, 36, 54} equipos de prueba^{9, 41} y simuladores,¹³ para el estudio de sistemas MIMO han sido desarrollados e implementados y se encuentran en etapas de consolidación. Ya se ha avanzado desde hace varios años en el modelado de canales multitrayectoria^{18, 55, 62} y en la mitigación de sus efectos en los sistemas de comunica-

ción⁵⁶ en diferentes consideraciones, hasta el punto de lograr un buen desempeño en su estimación utilizando algoritmos computacionales y comprobando su utilidad mediante simulaciones y mediciones haciendo uso de arreglos de antenas.⁴⁷

El concepto MIMO se ha aplicado en el desarrollo de los sistemas de comunicación de tercera generación^{34, 46} donde el *beamforming* mejora el desempeño de los canales de subida y bajada, en comparación con las ventajas de los esquemas de diversidad utilizados independientemente en cada enlace. En proyectos de gran envergadura se han analizado sus beneficios en los modos FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*) de UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*).¹⁹ En este sentido, el entorno, la *carga de señalización en el sistema* y la tecnología disponible definen las técnicas de *beamforming* más efectivas a ser aplicadas. En casos particulares, como en los sistemas basados en WCDMA, la aplicación de arreglos de antenas también juega un papel importante en la mejora del desempeño del canal de subida.³²

La investigación y explotación de los canales MIMO había sido propuesta como de amplio interés hace ya algunos años.^{29, 51} Hasta el momento se han realizado estudios desde diferentes esquemas de acceso, modulación y entornos de propagación, como en el caso de entornos urbanos,^{42, 54} en túneles,³⁶ o sistemas basados en satélites.⁷⁶ En el caso de túneles, utilizando diferentes técnicas,^{3, 20, 31} se logró comprobar la influencia del cambio de la sección transversal de los túneles en la capacidad del canal

cuando se tiene un arreglo de antenas sobre un tren en movimiento.

En técnicas de espectro expandido, hay características relevantes en el procesado y utilización de canales MIMO en DS-CDMA^{9, 39, 40, 59, 60} que pueden ser explotadas. Estos sistemas permiten la eliminación de la necesidad de *estimación de parámetros del canal*, de los largos *periodos de entrenamiento*, del conocimiento previo de la *geometría del arreglo de antenas* y de la información del *trayecto de propagación*.⁹ Características particulares se han destacado tanto en uplink como en downlink.^{53, 61}

Es importante resaltar que el procesado digital de señales extiende el *beamforming* a entornos donde el usuario y la localización de la interferencia *no son conocidas con anterioridad*, tal como ocurre en sistemas móviles, y el uso de procesado espacio-temporal (*space-time processing*) explota la transmisión paralela de canales creada por la dispersión en la propagación. Se han planteado diferentes técnicas de procesado que mitigan alguno de los fenómenos (*interferencia co-canal* y *desvanecimiento*) de forma independiente o conjunta.^{4, 5, 6, 9, 10, 20, 29, 30, 31, 59, 60} Técnicas recientemente aplicadas muestran gran desempeño en el canal de baja-*banda* considerando las capacidades de procesado habilitadas en los equipos móviles y siguiendo procedimientos similares a los utilizados en los canales de subida,¹² lo que conlleva a la creación de sistemas de alta capacidad *duplex*. Por otro lado, es especialmente conveniente en esta área de investigación la utilización de técnicas de procesado basadas en

wavelets para sistemas DS-CDMA que trabajan en condiciones *Outdoor*.⁴⁰

En resumen, el trabajo planteado a la Comunidad Europea²² se orienta a la puesta en práctica de los métodos modernos de simulación y medición para el estudio de algoritmos de procesado conjunto de señales tomadas de un arreglo de antenas (como el presentado en la Figura 10) teniendo en cuenta consideraciones espacio-temporales (como las explicadas a lo largo del paper), para establecer así su desempeño en la mitigación de la interferencia co-canal y del fenómeno multicamino en canales MIMO en entornos urbanos afectados por colinas (como es el caso de las ciudades de la región Andina). Todo esto desde un esquema DS-CDMA de banda ancha, considerando: diferentes técnicas de procesado empleadas hasta el momento, número de entradas al sistema, la eficiencia espectral y BER (tasa de error de bit) obtenida, niveles de SNR, SINR y E_b/N_0 (relación de la energía del bit a la densidad espectral de potencia del ruido), y promoviendo la generación de nuevas técnicas para dicho fin.

IX. CONCLUSIONES

El estudio de los efectos a pequeña escala en sistemas inalámbricos terrestres y satelitales ha alcanzado un grado de madurez bastante elevado y la bibliografía disponible es precisa y abundante al respecto. El desarrollo de modelos apropiados para estos sistemas y canales inalámbricos en diferentes entornos, como túneles, edificios, zonas boscosas y terreno irregular, en banda ancha y banda

angosta, permitirán la mejora de las actuales interfaces aire, incrementando su capacidad y la calidad del servicio ofrecido a los usuarios. La aplicación de los conceptos de desvanecimiento a pequeña escala junto con el desarrollo de sistemas basados en arreglos de antenas, como el caso de sistemas MIMO, y la aplicación de técnicas de conformación de haz para el control de la interferencia co-canal, presentan una de las principales perspectivas de desarrollo futuro de sistemas inalámbricos de alta capacidad.

Aquí se ha verificado que el perfeccionamiento de una solución en sistema MIMO está atada a las características particulares de cada sistema y del entorno de propagación. En dicha línea, el procesado espacio-temporal cobra importancia dadas las particularidades dinámicas de los entornos y la movilidad de los usuarios que generan canales MIMO. En condiciones como esta, también se hace necesaria la aplicación de estadísticas de primer y segundo orden, y en caso particular, la inclusión de parámetros de un canal andino de banda ancha, al momento de simular el canal MIMO, con el fin de determinar el desempeño del algoritmo de procesado espacio-temporal.²² Además, se pudo constatar que el tiempo coherente presentado en sistemas afectado por colinas y terreno irregular es uno de los mayores en sistemas terrestres, lo que también representa un punto neurálgico en el diseño de los sistemas MIMO en un esquema UMTS, pues el tiempo coherente para megaceldas satelitales y sistemas Indoor es bajo. Se encontró como ventaja de las solucio-

nes desarrolladas para sistemas 3G y 4G la frecuencia de operación, pues dadas sus elevadas posiciones dentro del espectro radioeléctrico, se tiende a minimizar el tiempo coherente. Otra ventaja de estos sistemas de banda ancha, es la creciente y casi unificada tendencia a su desarrollo sobre tecnologías de espectro expandido como CDMA, lo que garantiza un mejor comportamiento sobre canales multitrayectoria en consideraciones de *tiempos de dispersión* y *tiempos coherentes*, además de las ventajas específicas de DS-CDMA en cuanto a la reducción en la estimación de parámetros del canal y de la geometría de los arreglos de antenas en sistemas MIMO.

Según lo anterior, se ha planteado ante la Comunidad Europea una alternativa atractiva, concreta y bien sustentada para el análisis, desarrollo y verificación de un algoritmo de procesado de señales espacio-temporales en canales MIMO, que cumplirá con la función de reducción del efecto multitrayectoria e interferencia co-canal de forma conjunta en sistemas de comunicación de cuarta generación basados en DS-CDMA, que se desempeñaran en condiciones urbanas no homogéneas y terreno irregular; como es el caso de las principales ciudades de la región Andina. Además, se verificó que no se han realizado estudios en tratamiento de señales en canales MIMO afectados por entornos urbanos en presencia de colinas, y donde se aportará un avance significativo al generar I&D en la problemática, divisoando además, perspectivas de aplicación real en equipos móviles que funcionen en estas condiciones.

X. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Vaughan, Rodney and BACH Andersen, Jorgen. Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications. The Institution of Electrical Engineers-IEE, Electromagnetic Waves Series 50, UK, 2003. p. 629-678.
- [2]. Adachi, F.. Challenges For Broadband Mobile Technology. En : Twelfth International conference on antennas and propagation (ICAP 2003), University of Exeter, (2003 : Exeter-UK); P. 1-4.
- [3]. Alamouti, S. M.. A simple transmit diversity technique for wireless communications. En : IEEE J. on Selected Areas in Com., Vol. 16, No.8, (oct. 1998); p 1451-1458.
- [4]. Anand, K., Mathew, G. and Reddy, V. U.. Blind separation of multipath co-channel BPSK signals arriving in at an antenna array. En : IEEE Signal Processing Lett., Vol. 2, pp. 176-178, 1995.
- [5]. Balaban, P. and SALZ, J.. Optimum diversity combining and equalization in digital data transmission with application to cellular mobile radio—Part I: Theoretical considerations. En : IEEE Trans. Commun., Vol. 40, pp. 885-894, 1992.
- [6]. Balaban, P. and SALZ, J.. Optimum diversity combining and equalization in digital data transmission with application to cellular mobile radio— Part II: Numerical results. En : IEEE Trans. Commun., Vol. 40, pp. 895-907, 1992.
- [7]. Barrett, M. and Arnott, R.. Adaptive antennas for mobile communications. En : Electron. Commun. Eng. J., Vol. 6, pp. 203-214, 1994.
- [8]. Bertoni, Henry L. Radio propagation for modern wireless systems. New Jersey : Prentice Hall PTR, 2000. p. 107-215.
- [9]. Blostein, S. D. and Leib, H.. Multiple Antenna Systems: Their Role and Impact in Future Wireless Access. En : IEEE Communications Magazine. (jul. 2003); p. 94-101.
- [10]. Burr, A. G.. Capacity of MIMO systems in the presence of interference. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and COST Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 9 p. TD-(03)031.
- [11]. Chizhik, D. et al. Keyholes, Correlations, and Capacities of Multielement Transmit and Receive Antennas. En : IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 1, (abr. 2002); p. 361-368.
- [12]. Choi, R. L-U. and Murch R. D.. New Transmit Schemes and Simplified Receivers for MIMO Wireless Communication Systems. IEEE Transactions on Wire-

- less Communications, Vol. 2, No. 6, (nov. 2003); p. 1217-1230.
- [13]. Conrat, J.M. and Pajusco, P. A Versatile Propagation Channel Simulator for MIMO Link Level Simulation. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Paris). 10 p. TD-(03)120.
- [14]. Cost 231 Subgroup on Propagation Models. Urban propagation models for macro-cell, small-cell and micro-cell. En : Cost273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications (1990). TD(90)119.
- [15]. Cost 231 final report. Digital Mobil Radio: COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generations Systems. En : Commission of the European Communities and Cost Telecommunications (1999 : Brussels).
- [16]. Derryberry, R. T. et al. Transmit Diversity in 3G CDMA Systems. En : IEEE Commun. Mag., Vol. 40, (abr. 2002); p. 68-75.
- [17]. Dohler, M. and Aghvami, H.. A step towards MIMO: Virtual Antenna Arrays. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 10 p. TD-(03)039.
- [18]. Eggers, P. C.F.. Dual directional channel formalisms and descriptions relevant for Tx-Rx diversity and MIMO. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 19 p. TD-(03)044.
- [19]. Fonollosa, J. R.. The IST Metra Project. IEEE Communications Magazine, (jul. 2002); p. 78-86.
- [20]. Foschini, G. J., Layered Space-time Architecture for Wireless Communication. En : Bell Labs Tech. J. Vol. 1, (Autumn 1996); p. 41-59.
- [21]. Foschini, G.J., and GANS, M.J.. On Limits of Wireless communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas. En : Wireless Personal Communications, Vol. 6, No.3 (mar. 1998), p.311-315.
- [22]. Garcia, Paolo, Rubio A., Lorenzo and Ortega B., Homero. Space-Time Processing for MIMO Channels in Fourth Generation DS-CDMA Systems Over Urban Environments With Irregular Terrain, Universidad Industrial de Santander – Universidad Politécnica de Valencia, Programa AlBan, 2004.
- [23]. García, A. P., Ortega, H., Navarro, A. and Cardona, N.. Effect of Terrain on Electromagnetic Propagation in Urban Environments on the Andean Region. En

- : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Paris). 11 p. TD-(03)065.
- [24]. García, A. P., Ortega, H., Navarro, A. and Rodríguez, H.. Effect of Terrain on Electromagnetic Propagation in Urban Environments on the Andean Region, Using the Cost 231- Walfisch-Ikegami Model and GIS Planning Tools. En : Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003), University of Exeter, (2003 : Exeter-UK). 6 p. ISBN 0 85296 752 7, ISSN 0537-9989.
- [25]. García Ariza, Alexis Paolo; Ortega Boada, Homero; Gallo Salcedo, Fideligna y Prieto G., Martha Isabel. Análisis de Irradiación Electromagnética en las Inmediaciones de una Radio Base Sectorizada Bajo Condiciones Andinas. Primer Congreso de Ingenierías de Sistemas y Electrónica, Universitaria de Investigación y Desarrollo -UDI, Bucaramanga, Colombia, 27-30 de Octubre 2004, TE2022.
- [26]. García A., A. Paolo y Bautista P., Ramiro. Factores que afectan la planificación de sistemas móviles en los entornos actuales y herramientas GIS como alternativa de un futuro inalámbrico. En : Seminario Convergencia: El Nuevo Escenario De Las Telecomunicaciones (2002 : Bucaramanga). Memorias Seminario Convergencia: El Nuevo Escenario de las Telecomunicaciones. 13 p. ISBN 958-33-3292-5.
- [27]. García, A. P., Ortega, H., Navarro, A. y Rodríguez, H.. Efectos del Terreno en la propagación Electromagnética en Entornos Urbanos Sobre la Región Andina, Usando el Modelo Cost 231-Walfisch-Ikegami y Herramientas de Planificación Basadas en GIS. En : Revista de la Facultad de Ingeniería "Sistemas y Telemática", Universidad ICE-SI. Vol. 1, No.1 (Ene. 2003); p. 13-33. ISSN 1692-5238.
- [28]. Giuliano, R., Mazzenga, F. and Vatalaro, F.. Smart Cell Sectorization for Third Generation CDMA Systems. En : Wireless Communications and Mobile Computing Journal, Vol.2, No.3, (may. 2002); p. 253-267.
- [29]. Godara, Lal C.. Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations. En : Proceedings of the IEEE. Vol. 85, No. 7 (jul. 1997); p. 1031-1060.
- [30]. Godara, Lal C.. Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations. En : Proceedings of the IEEE. Vol. 85, No. 8 (ago. 1997); p. 1195-1245.
- [31]. Golden, G. D. et al. Detection Algorithm and Initial Laboratory Results using the V-BLAST Space-time Communi-

- cation Architecture. En : Elec. Letters, Vol. 35, No. 1, (ene. 1999); p. 14-15.
- [32]. Holma, Harri and Toskala, Antti. WCDMA for UMTS : radio access for third generation mobile communications. West Sussex : John Wiley & Sons, 2000. pp.1-40, 243-279.
- [33]. Hunukumbure, M. and Beach, Mark.. Outdoor MIMO Measurements and Analysis with Different Antenna Arrays. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 8 p. TD-(03)007.
- [34]. Laiho, Jaana, Wacker, Achim and Novosad, Tomas. Radio Network Planning and Optimization for UMTS. John Wiley & Sons, Ltd., 2002. p. 279-328.
- [35]. Lee, William C. Y. Mobile Communications Engineering. U.S : McGraw-Hill Book Company, 1998.
- [36]. Lienard, M. and Degauque, P.. Performances of MIMO Systems in Tunnels of Various Cross Sections. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 10 p. TD-(03)030.
- [37]. Maral, G. and Bousquet M., *Satellite Communications Systems*, Jhon Wiley & Sons, 1999. p. 1-76, 141-199.
- [38]. Martone, M.. Fast Adaptive Super-Exponential Multistage Beamforming for Cellular Base-Station Transceivers with Antenna Arrays. En : IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 4, (jul. 1999); p. 1017-1028.
- [39]. Martone, M.. Blind Adaptive Detection of DS/CDMA Signals on Time-Varying Multipath Channels with Antenna Arrays Using High-Order Statistics. En : IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 9, (sep. 2000); p. 1590-1600.
- [40]. Martone, M.. Wavelet-Based Separating Kernels for Array Processing of Cellular DS/CDMA Signals in Fast Fading. IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 6, (jun. 2000); p. 979-995.
- [41]. Martone, M.. Multipoint Multichannel Distribution Service at 155 Mb/sec in 4.6 MHz: An Experimental Prototype Based on Wavefield Modeling. En : submitted to *IEEE Trans. Commun.*, available online at www.wjcommunications.com/pdf/techpubs/Mmds2.pdf, See also M. Martone, Multi-antenna Digital Radio Systems, Artech House, 2002.
- [42]. Maurer, J., Waldschmidt, C., Kayser, T. and Wiesbeck, W.. Influence of Time Dependence of the Urban MIMO Channel on FDD Communication Systems.

- En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Paris). 9 p. TD-(03)093.
- [43]. Nagatsuka, M., Ishii, N., Kohno, R. and Imai, H. Adaptive array antenna based on spatial spectral estimation using maximum entropy method. En : IEE-CE Trans. Commun., Vol. E77-B, pp. 624–633, 1994.
- [44]. Naguib, A. F. and Paulraj, A.. Performance of CDMA cellular networks with base-station antenna arrays. En : Proc. IEEE Int. Zurich Seminar Communications, Zurich, Switzerland, 1994, pp. 87–100.
- [45]. Naguib, A. F., Paulraj, A. and Kailath, T.. Capacity improvement with base-station antenna arrays in cellular CDMA. En : IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 43, pp. 691–698, 1994.
- [46]. Pedersen, K. I., Mogensen, P. E. And Moreno, J. R.. Application and Performance of Downlink Beamforming Techniques in UMTS. En : IEEE Communications Magazine, (oct. 2003); p. 134-143.
- [47]. Pesavento, M., Mecklenbräuer, C. F., and Böhme, J.F. Tree-structured multi-dimensional Rare for MIMO channel estimation. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 9 p. TD-(03)020.
- [48]. Rappaport, Theodore S.. Wireless Communications: Principles and Practice. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996. p. 139-192, 197-294, 299-359, 395-436.
- [49]. Salz, J. and Winters, J. H.. Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio. En : IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 43, pp. 1049–1057, 1994.
- [50]. Sampath, H., et al. A Fourth-generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results. En : IEEE Communications Magazine. Vol. 40, No. 9, (sep. 2002); pp. 143–149.
- [51]. Saunders, Simon R.. Antennas and propagation for wireless communication systems. West Sussex : John Wiley & Sons, 1999. pp. 202-402.
- [52]. Sibille, A.. MIMO diversity for ultra wide band communications. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 16 p. TD-(03)071.
- [53]. Simeone, O. and Spagnolini, U.. Lower bound on the channel estimation MSE for fast-varying block-fading Rayleigh MIMO channels. En : 7th Management

- Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Paris). 8 p. TD-(03)084.
- [54]. Skentos, N., Kanatas, A. G., Pantos, G., and Constantinou, P.. Capacity results of MIMO measurements at 5.2GHz in urban environment. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Barcelona). 10 p. TD-(03)056.
- [55]. Sklar, B.. Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization. En : IEEE Communications Magazine, (jul. 1997); p. 90-100.
- [56]. Sklar, B.. Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II: Mitigation. En : IEEE Communications Magazine, (jul. 1997); p. 102-109.
- [57]. Telatar, E., Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. En : Euro. Trans. Telecommun., Vol. 10, (nov.-dic. 1999); p. 585-595.
- [58]. Vela, Rodolfo N., *Comunicaciones por Satélite*, Thomson, 2003. pp. 1-47.
- [59]. Wang, R. and Blostein S. D.. A Spatial-Temporal Decorrelating Receiver for CDMA Systems with Base-Station Antenna Arrays. En : IEEE Trans. Commun., Vol. 49, No. 2, (feb. 2001); p. 329-340.
- [60]. Wang, X. and Poor, H. V.. Space-Time Multiuser Detection in Multipath CDMA Channels. En : IEEE Trans. Sig. Proc., Vol. 47, No. 9, (sep. 1999); p. 2356-2374.
- [61]. Weber, T. and Maniatis, I.. Channel Knowledge: A Crucial Prerequisite for MIMO Transmission?. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Paris). 10 p. TD-(03)083.
- [62]. Weichselberger, W. and Özcelik H.. A Novel Stochastic MIMO channel Model and its Physical Interpretation. En : 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003 : Paris). 11 p. TD-(03)083.
- [63]. Yim, C., Kohno, R. and IMAI, H.. Adaptive array antenna based on estimation of arrival angles using DFT on spatial domain. En : Electron. Commun. Japan, Vol. 76, pp. 96-108, 1993.
- [64]. Restrepo, Joaquín; Maral, Gérard; Jaramillo, Santiago; Botero, Marcela. Estrategias para mejorar la calidad del servicio (QoS) en sistemas satelitales Non-GEO(MSS) con células fijas en el satélite (SFC). En : Grupo

de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones, Gidat, Universidad Pontificia Bolivariana (U.P.B).

- [65]. KANG, Byeong-Gwon, Performance Evaluation of a Mobile Stratospheric Communication System on Measured Rician Log-Normal Fading Channel Models
- [66]. XIE, Yongjun, and Fang, Yuguang. A General Statistical Channel Model for Mobile Satellite Systems. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 3, May 2000.
- [67]. Abdi, Ali; LAU, Wing C.; Alouini, Mohamed-Slim and Kaveh, Mostafa. A New Simple Model for Land Mobile Satellite Channels: First- and Second-Order Statistics. *IEEE Transactions On Wireless Communications*, Vol. 2, No. 3, May 2003.
- [68]. Patzold, Matthias; Killat, Ulrich; LI, Yingchun and Laue, Frank. Modeling, Analysis, and Simulation of Nonfrequency-Selective Mobile Radio Channels with Asymmetrical Doppler Power Spectral Density Shapes. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol. 46, No. 2, May 1997.
- [69]. Barts, R. Michael and Stutzman, Warren L.. Modeling and Simulation of Mobile Satellite Propagation. *IEEE Transactions On Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 4, April 1992.
- [70]. Saunders, S.r.; Tzaras, C.; Oestges, C.; Vanhoenacker, D., Physical-Statistical Modelling of the Land Mobile Satellite Channel. Centre for Communication Systems Research, University of Surrey, UK.
- [71]. Dovis, Fabio; Fantini, Roberto; Mondin, Marina and SAVI, Patrizia, Small-Scale Fading for High-Altitude Platform (HAP) Propagation Channels. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, Vol. 20, No. 3, April 2002.
- [72]. Fontan, F.p.; Castro, M.a.v.; Buonomo, S. J.; Pamp, Kunisch; Zollinger, J. E. Wide-band statistical model for the LMS channel. University of Vigo, Spain.
- [73]. Briso, César; Alonso, José I.. Statistical and Empirical Models for LMSC Fading Based on GPS Measurements. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- [74]. Attia, Tarek; Sweeney, Peter and Sweeting, Martin. Satellite Diversity Gain Over The LEOS Channel, Based CDMA Systems. University of Surrey, UK.
- [75]. Vázquez-castro, M. F.; Pérez-fontán and Arbesser-rastburg., B., Channel Modeling for Satellite and HAPS System Design. *Wireless Communication and Mobiles Computing*, Vol. 2, No. 3., John Wiley & Sons, Ltd, UK, May 2002. p. 285-300.
- [76]. Popescu, D.C. and Rose, C., Interference Avoidance and Multiuser MIMO Systems. *International Journal of Satellite*

- Communications and Networking, Vol. 21 No. 1, John Wiley & Sons, Ltd, UK, Jan.-Feb. 2003. p. 143-161.
- [77]. Oppenheim, Alan V.; Schafer, Ronald W. y Buck, John R. Tratamiento de señales en tiempo discreto. Segunda edición., Prentice Hall, 2000. caps. 5, 8 y 10.
- [78]. Bello, P. A., Characterization of randomly time-variant linear channels, *IEEE Trans.*, CS-11 (4), 360-393, 1963.
- [79]. Corazza, G. E., and Vatalaro, F., A statistical-model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 43 (3), 738-42, 1994.
- [80]. Hwang, Seung-Hoo; KIM, Ki-Jun; AHN, Jae-young; and WHANG, Keum-Chan, A channel model for nongeostationary orbiting satellite system, In Proc. IEEE International Vehicular Technology Conference, Phoenix AZ, 5-7 May 1997.
- [81]. LOO, C., A statistical model for land mobile satellite link, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 34 (3), 122-27, 1985.
- [82]. Lutz, E., A Markov model for correlated land mobile satellite channels, *Int. J. Satellite Communications*, 14, 333-9, 1996.
- [83]. Lutz, E.; Cygan, D.; Dippold, M.; Dolainsky, F.; and Papke, W., The land mobile satellite communication channel-recording, statistics and channel model, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 40 (2), 375-5, 1991.
- [84]. Castro, K I Ziri; Scanlon, W G; Feustle, R; and, EVANS, N E, Channel modelling and propagation measurements for a bodyworn 5.2 GHz terminal moving in the indoor environment, Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003), University of Exeter, 2003.
- [85]. Rudd; R.f.; Saunders, S.r., Statistical modelling of the indoor radio channel – an acoustic analogy, Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003), University of Exeter, 2003.
- [86]. Unar, M H; Glover, I A; Heaton, J; Williams, C; Cannon, P S, Wide-band mobile radio channel characterisation in UHF band for residential suburban areas, Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003), University of Exeter, 2003.

CURRICULUM

Alexis Paolo García Ariza: nació en Bucaramanga-Colombia. Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Candidato a Master en Ingeniería Electrónica de la misma Universidad. Becario Alban del Doctorado en Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia-UPV, España. Hace parte del Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones RadioGIS-UIS, Bucara-

manga-Colombia. Realiza investigaciones en el ámbito de canales MIMO y modelos de propagación aplicables a la región Andina utilizando Sistemas de Información Geográfica-GIS, en cooperación con el Ministerio de Comunicaciones de Colombia, la Universidad ICESI y la UPV. Se ha desempeñado como docente de las cátedras de Comunicaciones Sateli-

tales, Comunicaciones Móviles y Antenas. Sus áreas de interés incluyen Sistemas de Tercera y Cuarta Generación, GIS aplicado a las telecomunicaciones, modelos de propagación, redes de datos móviles y procesado de señales en sistemas MIMO para 4G. (E-mail: paolo_1@ieee.org, alexis_paolo@yahoo.es). ☼