

**UNIVERSIDAD ACCIÓN PRO-EDUCACIÓN Y CULTURA
(UNAPEC)**



**Decanato de Ingeniería e Informática
Escuela de Ingeniería**

**ESTUDIO A LA ATENUACIÓN DE LA SEÑAL TRANSMITIDA POR
LAS CELDAS CELULARES EN LA BANDA DE 1,900 MHZ
CAUSADA POR EL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN MÁS USADO
EN LAS EDIFICACIONES DE LA CIUDAD DE SANTO DOMINGO**

**Trabajo de Grado para Optar por el Título de:
Ingeniero Electrónico en Comunicaciones**

Sustentantes:

Br. Guillermo Pontier Morillo 2006-0498

Br. Joel Morla Vargas 2006-0504

Br. Danny Mercado Leonor 2005-0649

Asesor:

Ing. Giordano Sosa

“Los conceptos expuestos en esta investigación son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es)”

Santo Domingo, República Dominicana
Noviembre, 2011

DEDICATORIAS

A MIS PADRES: Guillermo Pontier Mota y Lidia Morillo Cuesta, que me brindaron su apoyo a lo largo de mi vida y de este proyecto

A MIS AMIGOS Y AMIGAS: Por sus apoyos en los momentos difíciles

A LOS ESTUDIANTES DE LA UNIVERSIDAD APEC: Para ustedes, a fin de motivar y exhortar estos estudios en nuestro país, para que en un futuro tengamos un mejor conocimiento de los fenómenos que nos afectan, el futuro inicia en ustedes, nosotros, apenas empezamos esta larga carrera.

A NUESTROS PROFESORES: Este logro es también parte de ustedes y sus enseñanzas, sin ellas no hubiese sido posible.

Guillermo Pontier

A MIS PADRES: Domingo Morla M. y Dilenia M. Vargas V. Por ser aquellas personas quienes me enseñaron la importancia del estudio y la superación profesional.

A MI ESPOSA: Nubia Elizabeth Rivera, ya que ha sido mi musa desde aquel minuto que llego a mi vida. También por ser una mujer muy paciente y a la cual le quite mucho de nuestro tiempo durante toda esta carrera.

A MIS HERMANOS: Johendi, John Mifre, Johanna, Joelvi y Eridania por ser parte de la inspiración y motivación que me han llevado a estar donde hoy me encuentro, ya que siempre he querido ser un ejemplo a seguir para ellos.

A MIS PRIMOS: Por ser aquellas personas que siempre estuvieron presente y constantemente se preocuparon por mi carrera.

A MIS TIOS: Por ser aquellas persona que siempre se preocuparon por el desempeño y dedicación de mis estudio.

A MIS ABUELOS: Ya que fueron aquellas personas que siempre me aconsejaron para que tomes buenas decisiones la vida.

A MIS AMIGOS: Iván, Deruin, Junior y Elizabeth, por siempre estar presente en mis actividades, también a Abrahan, Gissel, Andy Y Pablo. Especial a mis compañeros de tesis Guillermo y Danny porque sin su apoyo la realización de esta no se hubiera logrado, también a dos persona que siempre me prestaron su atención y disponibilidad cada vez que visite la biblioteca Francisco y Nelson los bibliotecarios.

Joel Morla

Dedico este trabajo de grado a **MIS PADRES**, quienes han estado con migo en todo momento, dándome su apoyo incondicional, soportándome en los momentos difíciles y comprendiéndome cuando nadie más lo hace, todo lo que soy y seré es por ustedes. Es tan grande la deuda y el agradecimiento que por ustedes siento, que creo que ni en mil vidas podría pagar lo mucho que les debo, mi corazón esta con ustedes: Mami, Papi.

Danny Mercado

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Que me motivaron a estudiar y esforzarme para lograr mis metas, y me brindan apoyo y consejo incondicional

A mis amigos de la universidad: A todos ustedes que de una manera u otra influyeren en el desarrollo de esta investigación, con ideas y haciendo críticas constructivas. Gracias especiales a **Walter Pichardo**, quien a lo largo del pasado cuatrimestre nos ayudo bastante en el desarrollo previo del proyecto, y me acompaño en materias que me faltaban a pesar de que las pudo tomar luego.

A mis compañeros de tesis: Joel Morla y Danny Mercado, quienes a lo largo de esta aventura, brindaron su apoyo, colaboración tiempo y hasta sus hogares, aportando ideas y métodos efectivos que nos llevaron a una conclusión exitosa.

A nuestros profesores: Gracias por ser parte de esta larga experiencia a lo largo de estos años Navarro, Gorkis, Mesa, Pérez Méndez, etc., en especial a **Porfirio Sánchez**, quien siempre estuvo dispuesto a dar su opinión sincera y profesional cuando la necesitábamos, y nos aporó innumerables ideas y soluciones en nuestro desarrollo, y nos mostro que problemas complejos usualmente se disipan con soluciones simples. Por esto y por dejarnos las puertas abiertas a cualquier duda en el laboratorio, pasillo o donde fuera que se encontrase, y darnos nuevos puntos de vista tanto en el ámbito profesional como filosofía de la vida, GRACIAS.

A nuestro asesor: Ing. Giordano sosa, por su apoyo a lo largo de todo el desarrollo de la investigación, y motivarnos a realizar estudios de este tipo, aportando parte de la idea inicial donde todo comenzó. Gracias, personalmente por introducirnos en este mundo de las telecomunicaciones, por su valioso tiempo, opinión sincera y dedicación. GRACIAS TOTALES.

A todos los demás involucrados.... **GRACIAS**

Guillermo Pontier

A DIOS:

Por ser parte de mi vida y estar a mi lado siempre que lo necesite, también por a verme servido de guía durante todo este proceso de estudio.

A MIS PADRES:

El Señor Domingo Morla Muñoz y la Señora Dilenia M. Vargas Vargas por haber puesto todos sus empeños y confianzas en mí en cada una de las decisiones que tome para hoy llegar a donde estoy.

A NUESTROS PROFESORES:

Porque sin ellos no lo hubiera logrado, ya que sus enseñanzas y orientaciones sobre cada una de las asignaturas que impartieron me brindaron lo mejor de sí mismo para que así me pudiera desarrollar en lo profesional como en lo personal, especialmente a Porfirio Sánchez, por ser una persona que siempre estuvo 24/7 aportando sus conocimientos a cada una de las actividades relacionada a nuestra carrera.

A NUESTRO ASESOR, ING. GIORDANO SOSA:

Por ser aquella persona la cual nos orientó y brindo todo su apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A LA UNIVERSIDAD APEC:

Por brindar un entorno acto y capacitado el cual me sirvió de herramienta para obtener mi grado académico.

Joel Morla

A **Dios** todo poderoso, por darme la Salud, la inteligencia y las fuerzas para seguir adelante, a pesar de los inconvenientes que a lo largo de toda mi carrera han aparecido.

A mis **padres**, por darme todo lo que he necesitado: de niño me alimentaron, me protegieron y corrigieron, de joven me educaron y ahora me dan su consejo. Paso a paso los he tenido cerca para mí, y por esto le agradezco.

A mis **hermanos y sobrinos**, por apoyarme siempre que lo necesite, gracias a ustedes he moldeado mi carácter al que es hoy en día.

A nuestro asesor **Giordano Sosa**, por guiarnos a través de este proyecto de grado.

A mis **Familiares y amigos**, mi logro es el de ustedes, mi victoria es la suya.

A mis **profesores de carrera**, por su paciencia y comprensión. Su legado está seguro.

A mis compañeros de tesis **Pontier** y **Morla**, por compartir esta importante experiencia con migo, brindar su conocimiento, disposición, paciencia y amistad, muchachos lo hicimos.

Danny Mercado

INDICE DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
INTRODUCCIÓN.....	1
METODOLOGÍA.....	3
CAPÍTULO I: PROPAGACIÓN MÓVIL.....	5
1.1 Características básicas de las ondas electromagnéticas.....	7
1.2 Propagación de las ondas electromagnéticas.....	8
1.2.1 Modos de propagación.....	8
1.2.1.1 Propagación en presencia de línea de vista	8
1.2.1.2 Propagación en ausencia de línea de vista.....	9
1.2.2 Efectos y mecanismos de propagación.....	10
1.2.2.1 Atenuación.....	11
1.2.2.2 Absorción.....	12
1.2.2.3 Reflexión.....	13
1.2.2.4 Refracción.....	14
1.2.2.5 Difracción.....	16
1.2.2.6 Dispersión.....	17
1.2.3 Efectos de entornos complejos.....	18
1.2.3.1 Ruido.....	18
1.2.3.2 Interferencia.....	19
1.2.3.3 Propagación por múltiple camino.....	20
1.2.4 Relación señal ruido.....	22
1.3 Modelos de propagación de las ondas electromagnéticas.	23

1.3.1	Tipos de modelos	23
1.3.2	Modelo de propagación de espacio libre	25
1.3.3	Modelos de propagación empíricos prácticos	25
1.3.4	Modelos de propagación en exteriores	26
1.3.4.1	Modelo COST 231- Hata (Extensión PCS).....	26
1.3.5	Modelos de propagación de penetración de edificios	27
1.3.5.1	Modelo COST 231 de penetración de edificios.....	29
1.3.5.2	Modelo de identificación de rayo dominante.....	33
1.3.5.3	Modelo para celdas pequeñas de Gahleitner (NLOS).....	34
1.3.5.4	Modelo para micro celdas de Gahleitner (LOS).....	35
CAPÍTULO II - PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS		36
2.1	Materiales seleccionados	38
2.1.1	Efectos de los climas cálidos	39
2.2	Descripción del proceso de muestreo y adquisición de datos	41
2.2.1	Instrumento de medida	41
2.2.2	Cantidad y longitud de muestreo	45
2.2.3	Equipo transmisor	49
2.3	Determinación de atenuación por penetración	51
2.4	Descripción y selección de los espacios muestrales	53
CAPÍTULO III: PERDIDAS POR PENETRACIÓN A 1,900 MHZ		58
3.1	Antecedentes de medidas de penetración de señal	60
3.2	Presentación y análisis de resultados	62

3.3	Comparación de los resultados obtenidos	64
3.3.1	Block de mampostería	64
3.3.2	Concreto	65
3.3.3	Ganancia por altura	66
3.4	Aplicación de los resultados en modelos de propagación	67
3.5	Comparación de los niveles estimados con los muestreados	77
3.5.1	Condición de línea de vista (LOS)	77
3.5.2	Condición sin línea de vista (NLOS)	78
3.6	Impacto sobre la telefonía móvil	79
CAPÍTULO IV: CONCLUSIÓN		81
4.1	Conclusiones generales	82
4.2	Recomendaciones	84
4.3	Implicación para investigaciones futuras	85
GLOSARIO		86
REFERENCIAS		91
ANEXOS		96
A.	Conceptos básicos de la red celular	97
B.	Atenuaciones de diversos materiales medidos por NISTIR 6055 ..	100
C.	Detalle de muestras tomadas en la investigación	101
ANTEPROYECTO		105

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se basa en un medio de comunicación cuyas bases teóricas fueron establecidas hace más de un siglo: las ondas electromagnéticas. Su precursor, James Clerk Maxwell, estableció que los campos eléctricos y los campos magnéticos eran manifestaciones de un mismo fenómeno, el campo electromagnético. Sus investigaciones resultaron ser unos de los aportes más significativos para la ingeniería, las ecuaciones de Maxwell, las cuales abrieron las puertas a lo que hoy se conoce como las comunicaciones inalámbricas.

La telefonía móvil en República Dominicana presento al 30 de junio del 2011 una tele densidad de 91.9% para un total de 8, 620,897 líneas móviles, por lo que, debido a la proliferación de teléfonos celulares, y su común uso en interiores, no se puede considerar que los sistemas inalámbricos operen únicamente en entornos abiertos (al aire libre). Los ambientes cerrados, donde intervienen diversos obstáculos, forman actualmente un elemento importante a considerar al momento de ofrecer servicios de comunicaciones inalámbricas. Las compañías prestadoras de estos servicios necesitan, a la hora de diseñar el sistema de redes móviles para brindar cobertura a una zona geográfica, datos específicos de la región donde se desea prestar servicio, como la densidad poblacional y la manera en que están estructuradas las edificaciones que pertenecen a la región, ya que el medio de transmisión usado será el aire, el cual servirá de enlace entre el teléfono móvil y la estación base de la prestadora de servicio, logrando así establecer una comunicación inalámbrica.

Los factores que intervienen en las comunicaciones son de suma importancia puesto que de esto dependerá la calidad de la información transmitida. Las atenuaciones causadas por los materiales de construcción es un fenómeno poco estudiado en la Republica Dominicana, esto tiene grandes implicaciones ya que muchas de las llamadas móviles se realizan dentro de edificaciones (casas, apartamentos, universidades, oficinas de trabajo, etc.). Por lo cual surge la necesidad de estudiar y analizar las pérdidas ocasionadas por las paredes cuando la señal penetra desde un trasmisor externo, hasta un receptor obstruido por esta. El presente estudio tiene como objetivo aportar al conocimiento de estas informaciones regionales.

A lo largo de las próximas páginas en la presente investigación se plantean en el capítulo I los efectos y mecanismos de propagación que intervienen en las comunicaciones móviles como punto de partida teórico. Seguido, se expondrá en detalle en el capítulo II la metodología con que fueron colectadas, analizadas y procesadas las muestras con las cuales se determinaron las pérdidas ocasionadas por el material de construcción. Luego en el capítulo III se analizaran los resultados obtenidos en comparación con los expuestos por otros autores, los cuales fueron aplicados en modelos de propagación, con el objetivo de comprobar la validez de los datos presentados, así como las diferencias y los puntos de convergencia entre ambos. Finalmente en el capítulo IV se comentaran y presentaran las conclusiones a las cuales condujo la investigación, así como las recomendaciones y sugerencias de lugar, exhortando la expansión de estos estudios a otros niveles a fin de lograr una mejor comprensión del comportamiento de las ondas radioeléctricas en el entorno al cual pertenecemos.

METODOLOGÍA

El tipo de investigación usado en el presente proyecto consistió en la descripción de los diversos aspectos y componentes del fenómeno estudiado para luego correlacionar dos variables (Samiperi *et al*, 1991, p. 61-65), las cuales son la intensidad de la onda electromagnética y el tipo de material que atraviesa, a fin de determinar el nivel de pérdida en el primero a causa del segundo.

El método usado fue no experimental, lo cual significa que el fenómeno se observó tal y como se manifiesta en su contexto natural para luego ser sometido a estudio. En otras palabras, la situación a medir no es provocada intencionalmente dentro de un ambiente controlado, sino que el fenómeno ya ha ocurrido y no se tiene control sobre las variables independientes, como las distancias de separación, entre otras (Sampieri *et al*, 1991, p. 160-163). Por lo que en esta investigación se muestrearon los niveles de señal en entornos naturales con elementos no modificables (como inmuebles), que contienen el material objeto del estudio.

En el diseño de la investigación se recolectaron datos en un margen de tiempo y espacio, con el propósito de describir las variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. La metodología operativa usada en el desarrollo de este estudio consto de etapas que definieron el proceso seguido, que permitieron desarrollar de forma intensiva cada uno de los elementos que la componen, por lo que el desarrollo del proyecto fue cubierto en 4 etapas principales:

- **Primera etapa:** Revisión de la literatura, determinando el estado de arte sobre el tema en estudio.
- **Segunda etapa:** Análisis operacional, muestreo y registro de datos.
- **Tercera etapa:** Comparación y análisis de los resultados seguido de su aplicación en modelos de propagación.
- **Cuarta etapa:** Conclusiones y recomendaciones del proyecto elaborado.

En la consulta bibliográfica se analizaron recomendaciones de expertos y metodologías que redujeron el margen de error en el proceso de muestreo, obteniendo así una mayor fidelidad en los datos presentados. El tipo de muestreo realizado fue inter-seccional y semi-aleatorio, es decir que se tomaron durante varias secciones y en distintos puntos, en diferentes horarios. Seguido los datos tomados fueron promediados estadísticamente y se calcularon sus respectivas desviaciones típicas o estándar.

Las variables reportadas se obtuvieron mediante el contraste de los datos registrados luego de realizar una diferenciación matemática de promedios de puntos estratégicos, determinando el grado de atenuación provocado por el material atravesado. Los datos adquiridos fueron comparados con otros publicados por diversos autores. Finalmente, estos datos se aplicaron en modelos de propagación, simulando un entorno que posteriormente fue muestreado, a fines de comparar la señal estimada con cada constante, con los datos obtenidos en la realidad.

CAPÍTULO I
PROPAGACIÓN MÓVIL

Las comunicaciones móviles implican que los equipos receptores tengan libertad de desplazamiento en las zonas geográficas de servicio, por lo que sería impráctica la existencia de una línea física de conexión entre el transmisor y el receptor móvil, en consecuencia se usa la atmosfera terrestre como medio de transmisión. Por tanto para lograr una comunicación inalámbrica efectiva las ondas electromagnéticas son usadas como medio de transporte de información entre el transmisor y el receptor (Cardama *et al*, 2002, p.41).

A diferencia de la comunicación alambrada donde los terminales receptores son fijos y predecibles, los entornos de comunicación inalámbrica involucran diversas limitaciones en el desempeño del sistema, ya que los canales de radio son extremadamente aleatorios y requieren de análisis complejos. En consecuencia el terminal móvil del sistema es impactado por una superposición de fenómenos diversos que afectan la señal recibida.

Puesto que para fines del desarrollo de la investigación se tomaron medidas de campo respecto al nivel de señal recibido en distintos puntos, utilizando como instrumento de muestreo equipos convencionales de comunicación móvil (los cuales se verán analizados en el capítulo II), es importante conocer en qué medida influyen los efectos y mecanismos de propagación al nivel de señal en el terminal móvil, y a la comunicación a lo largo del trayecto de transmisión. Algunos de los fenómenos más relevantes, entre otros conceptos significantes en radiocomunicación, son presentados en este capítulo a continuación.

1.1 Características básicas de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas viajan a diversas velocidades de acuerdo al medio por el cual se propaguen, a esta velocidad se le conoce como velocidad de la onda (Tomasi, 2003, p.311) y es igual a la velocidad de la luz ($c = 299,793,000$ m/s) en el vacío. La onda es producida mediante oscilaciones periódicas y repetitivas en unidad de tiempo como se muestra en la figura 1.1, característica denominada como frecuencia (f).

Una de las características más importante de las ondas electromagnéticas es la longitud de la onda, ya que de esta dependerá la incidencia y comportamiento de otros fenómenos que se analizaran más adelante. La longitud de onda (λ) que es la distancia que existe entre cada pico de oscilación o ciclo se determina mediante:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(1.1)

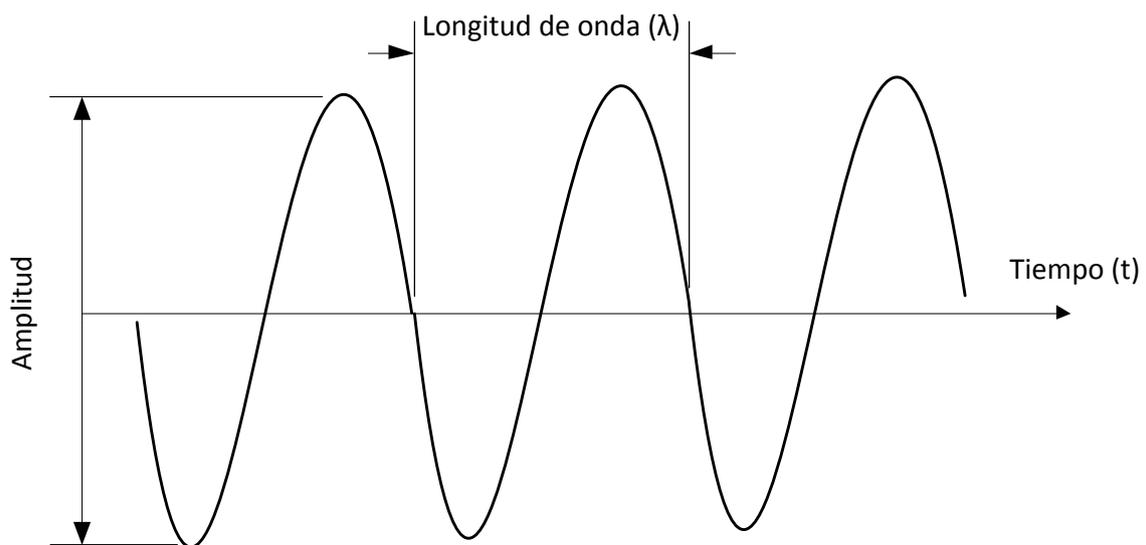


Figura 1.1 – Propagación de la onda plana uniforme

1.2 Propagación de las ondas electromagnéticas

Para que las ondas electromagnéticas se desprendan desde su fuente hacia el receptor estas deben ser radiadas por una antena, elemento diseñado específicamente para emitir o recibir radiación electromagnética (Cardama *et al*, 2002, p. 15). Estas ondas son producto de las ecuaciones descritas por Maxwell, que establece que un campo magnético (**H**) variable produce un campo eléctrico (**E**) y viceversa. Se conoce como propagación al movimiento de una onda a través de un medio o del espacio libre (ed. Laplante, 2000, p. 545). Dicho medio puede ser cualquier material o espacio dieléctrico como el aire, la pared, la madera, etc.

Conocer los fenómenos y factores que se involucran en la trayectoria de propagación de la onda electromagnética es esencial para que un sistema de comunicaciones inalámbrica funcione adecuadamente, permitiendo el diseño y la planificación efectiva del mismo, por esta razón se analizan a continuación dichos mecanismos.

1.2.1 Modos de propagación

1.2.1.1 Propagación en presencia de línea de vista

En este modo de propagación (Conocido como **LOS**, por sus siglas en inglés: *Line Of Sight*) la onda viaja directamente desde el transmisor hasta el receptor sin la intervención de obstáculos. La dirección de propagación de un frente de onda en un punto dado está relacionado por el producto cruz del campo eléctrico (**E**) y el campo magnético (**H**) en ese punto (Seybold, 2005, p. 3). Este producto es llamado *vector de Poynting* ($\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$), el cual al ser dividido por la impedancia característica del medio resulta en la dirección de propagación. Su respectiva densidad de potencia (**S**) para una determinada distancia (**d**) y una potencia definida (**P**) se expresa como:

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (1.2)$$

En un entorno terrestre la distancia máxima de línea de vista está limitada por el horizonte radial y la altura de las antenas, debido a la curvatura de la tierra como se ilustra en la figura 1.2, y está dada por:

$$d_{Km} = 3.57\sqrt{h_m} \quad (1.3)$$

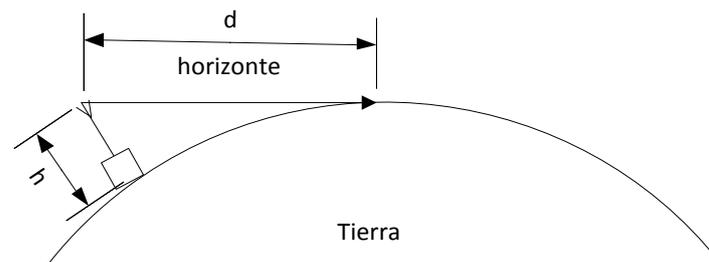


Figura 1.2 – Horizonte de línea de vista (LOS)

1.2.1.2 Propagación en ausencia de línea de vista

Existen varios mecanismos de propagación de la onda electromagnética que permiten alcanzar un punto de recepción cuando no existe línea de vista hacia el transmisor (condición conocida como **NLOS**, por sus siglas en inglés *Non Line Of Sight*). En tal condición los modos de propagación dominantes son: la reflexión, la difracción, la refracción y la dispersión. Estos mecanismos varían considerablemente con la frecuencia de operación utilizada. Para las comunicaciones móviles este modo de propagación es más frecuente debido a que estas se desarrollan en entornos complejos.

Existen otros mecanismos que permiten alcanzar distancias superiores al horizonte de línea de vista, como la onda de superficie (cuando esta se propaga sobre el suelo terrestre) y la propagación ionósfera (es decir a través de las reflexiones en dichas capas). Estos mecanismos relegan su importancia en rangos de frecuencia no utilizados en las telecomunicaciones móviles, por tanto sus efectos no son considerados en la presente investigación (Seybold, 2005, p. 5).

1.2.2 Efectos y mecanismos de propagación

Se entiende por mecanismo de propagación a los procesos físicos que intervienen en la expansión de las ondas electromagnéticas, principalmente: la atenuación, la reflexión, la difracción, la refracción y la dispersión.

En el caso ideal, es decir, el que se produce en un medio sin pérdidas (cuya región posee propiedades isotrópicas y homogéneas), se conoce como propagación en el espacio libre. En tal escenario las ondas no encuentran obstáculos con los cuales interactuar, por lo cual es válido asumir que se propagan en línea recta entre ambos elementos de comunicación, estos rayos son denominados ondas directas. Dicha aproximación es aplicada al espacio fuera de la atmósfera terrestre, o en condiciones especiales donde las pérdidas causadas por otros fenómenos son despreciables debido a la distancia o la configuración de la comunicación.

En un escenario real, al establecerse cualquier tipo de radiocomunicación en la atmósfera terrestre surgen fenómenos que modifican las condiciones ideales de propagación en el vacío, producidos por perturbaciones al entrar en contacto con un medio dieléctrico como la tierra (Cardama *et al*, 2002, p. 43). Estos fenómenos específicos son: la reflexión y la difracción. Cada fenómeno adquiere importancias diversas de acuerdo a la frecuencia en la cual se propague, el tipo de terreno y la ubicación de las antenas, pero antes, es preciso describir los fenómenos que afectan la onda independientemente de su modo de propagación.

1.2.2.1 Atenuación

A medida que una onda se propaga sobre un medio alejándose de su fuente de emisión, el campo electromagnético irradiado se dispersa causando que la onda se separe cada vez más entre sí. Esto equivale a una pérdida de la densidad de potencia con la distancia que se conoce como atenuación de la onda. La atenuación debido a la dispersión esférica de la onda se conoce como atenuación espacial y la atenuación debido a la propagación sobre medios dieléctricos con pérdidas (como las paredes u otros obstáculos) se conoce también como absorción (Tomasi, 2003, p. 351). La atenuación (γ_a) se expresa en función del logaritmo común de la relación entre densidades de potencia (P) en dos puntos y su unidad de medida es expresada en decibelios (dB), que matemáticamente se expresa como:

$$\gamma_a = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (1.4)$$

Como se mencionó en la sección 1.1, en el espacio libre la onda electromagnética se transmite en el vacío a la velocidad de la luz. En este medio no existen elementos absorbentes que produzcan pérdidas a la onda electromagnética, ni que permitan la reflexión o difracción de la misma, adicionalmente existe línea de vista entre la antena transmisora y receptora, por lo cual su densidad de potencia se degrada por la ley del cuadrado de la distancia debido a la atenuación por dispersión a través del espacio (Parsons, 2000, p. 16). De modo que la relación entre la potencia transmitida (P_T) y la recibida (P_R) por una antena a una distancia dada (d) en relación a una frecuencia específica (f) se determina mediante:

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (1.5)$$

Estimar la atenuación total en un entorno específico es una de las principales dificultades a la que se enfrenta todo planificador de sistemas radiales, puesto que con estos datos se determina la potencia necesaria para mantener las características funcionales claves en óptimas condiciones en el área de servicio. Algunos de los métodos comúnmente utilizados son estudiados en la sección 1.3.

1.2.2.2 Absorción

Al propagarse una onda en un entorno terrestre esta se transmite por medios no vacíos. La atmosfera está compuesta por sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Algunos de estos elementos absorben en sus moléculas una porción de la onda electromagnética que incide en su superficie y en consecuencia dicha energía es perdida, causando atenuación en la intensidad de las componentes eléctricas de la onda y una reducción de su densidad de potencia al atravesarlos (Tomasi, 2003, p. 352). La absorción está relacionada con la frecuencia y la distancia que recorre la onda sobre el medio absorbente. En un ambiente homogéneo, el coeficiente de absorción es constante, en cambio en un medio no homogéneo, el coeficiente de absorción varía de acuerdo al lugar y propiedades del medio u obstáculo.

Para las comunicaciones móviles es importante la absorción debido a las particiones físicas de las edificaciones ya que estas forman obstáculos entre la línea de vista del transmisor y el receptor del usuario final, que utiliza los servicios móviles cada vez más a menudo en el interior de tales estructuras (Hata, 1999, p. 765). A la atenuación que sufre la onda electromagnética mientras se propaga a través de estos obstáculos, se le conoce como pérdida de penetración (Sizun, 2005, p. 198) y su determinación es de especial importancia para modelar entornos de propagación tanto como cuando el transmisor se encuentra en el interior de la estructura, como cuando este se encuentra fuera de esta.

1.2.2.3 Reflexión

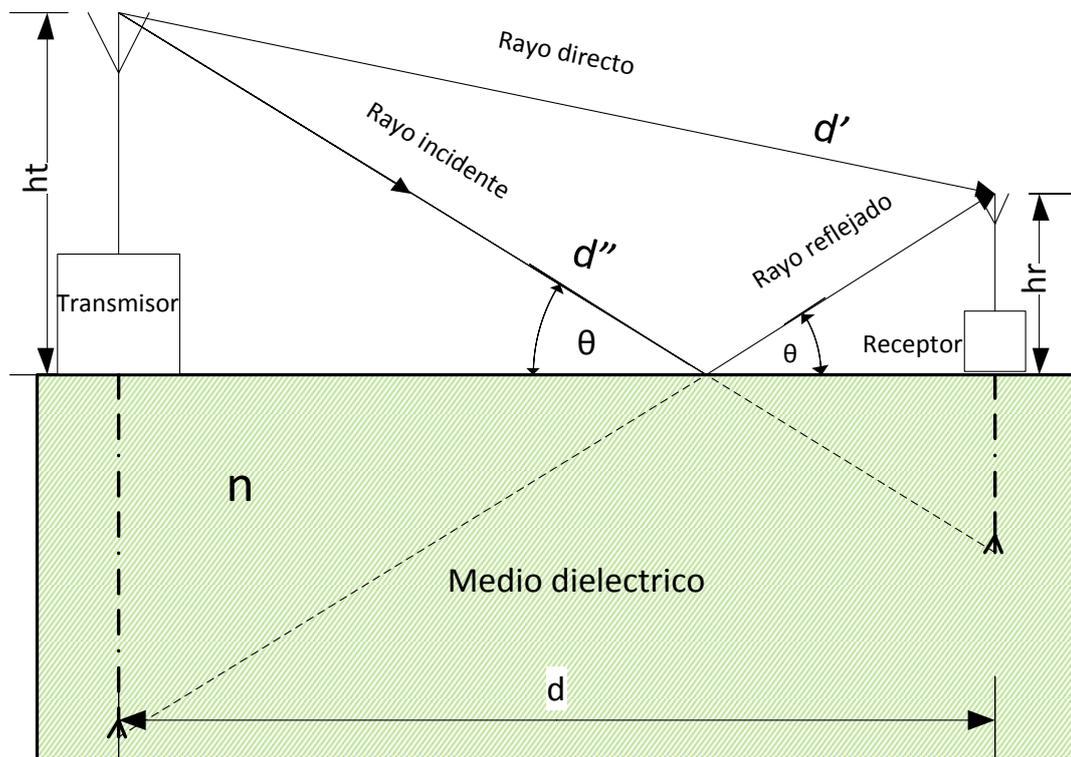


Figura 1.3 – Reflexión sobre un medio plano

El fenómeno de la reflexión se produce al incidir una onda electromagnética sobre una frontera entre dos medios distintos (tierra, agua, metales, paredes, capas ionosferas, etc.). La intensidad de la onda reflejada estará relacionada con el coeficiente de reflexión (Γ) del medio, que dependerá de la frecuencia, la composición dieléctrica del terreno, el tipo de suelo, la humedad, la polarización y ángulo de incidencia de la onda, entre otros factores que afectaran la conductividad del medio (Cardama *et al*, 2002, p. 44-47).

En una superficie dieléctrica una parte de la onda es reflejada como se observa en la figura 1.3 y otra parte es absorbida y transmitida (o refractada) por el medio (efecto que se verá más adelante). Por otro lado, en una superficie conductora perfecta la onda no es transmitida, y la energía es reflejada en su totalidad (Rappaport, 2002, p. 78-89).

Comúnmente un escenario de dos rayos como el mostrado en la figura 1.3 es utilizado como principio de análisis para modelos de propagación basados en óptica geométrica, tomando en consideración ambos caminos (directo y reflejado) entre el transmisor y el receptor. La energía total recibida es el resultado compuesto del rayo directo en línea de vista y el rayo reflejado, lo cual resultara en interferencia constructiva o destructiva según la fase en que se encuentre la onda, como se verá en secciones subsiguientes. Basado en este análisis, la potencia recibida en el extremo receptor es igual a

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (1.6)$$

La reflexión también sucede en superficies irregulares produciéndose otros efectos como la dispersión efecto que se observara en secciones próximas (Tomasi, 2003, p. 353-356).

1.2.2.4 Refracción

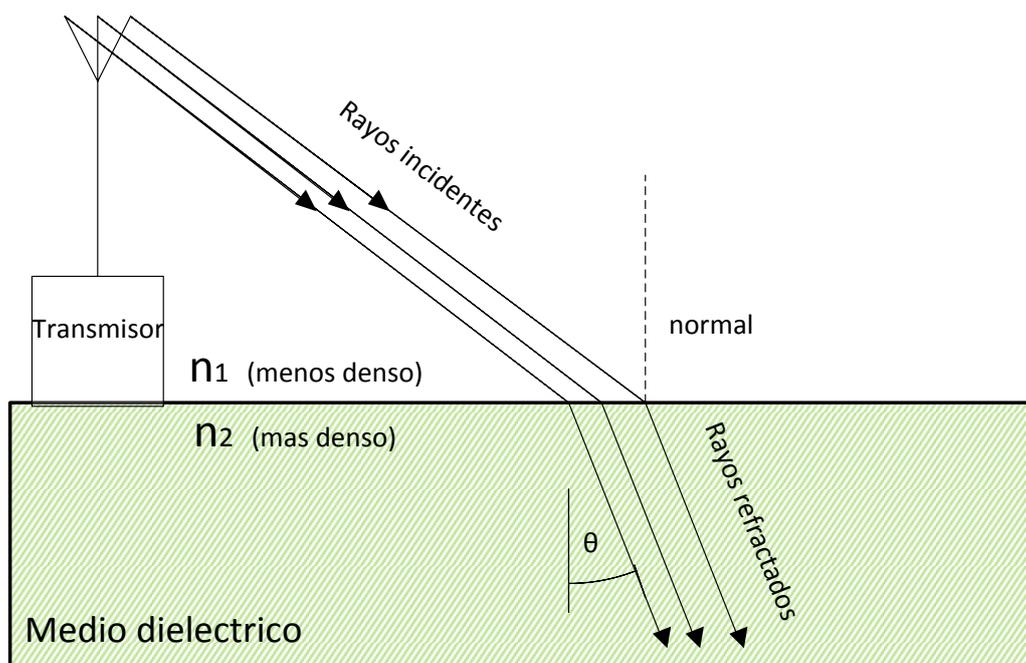


Figura 1.4 – Refracción en un dieléctrico

La refracción electromagnética es el cambio de dirección de un rayo al penetrar de un medio a otro con distinta velocidad de propagación, como se muestra en la figura 1.4. Esta velocidad es inversamente proporcional a la densidad del medio penetrado. La curvatura de desviación está relacionada angularmente con la normal perpendicular al punto atravesado (Tomasi, 2003, p. 353). Este ángulo depende del índice de refracción del medio (n), la velocidad de la luz en el espacio libre (c) y la velocidad de la luz en determinado material (v) y se expresa:

$$n = \frac{c}{v} \tag{1.7}$$

En un dieléctrico ideal, la onda refractada o transmitida no sufre pérdidas. Para ciertos ángulos de incidencia la onda es transmitida en su totalidad, este límite se conoce como ángulo de Brewster y tiene un coeficiente de reflexión cero (es decir que, no ocurre reflexión alguna) (Rappaport, 2002, p. 84). Las variaciones en el índice de refracción hacen que los rayos no sigan trayectorias rectas, propagándose de forma curvilínea a lo largo del medio.

La refracción es responsable de que exista comunicación en el interior de zonas obstruidas como las edificaciones. Estas ondas sufren pérdidas por penetración como se menciona en la sección 1.2.2.2, las cuales son objeto del presente estudio. Por tanto para obtener muestras con un mayor grado de confiabilidad, es preferible medir en zonas donde el ángulo de incidencia sea aproximadamente 0 grados respecto a la normal como se analizara con más detalle en el capítulo II.

1.2.2.5 Difracción

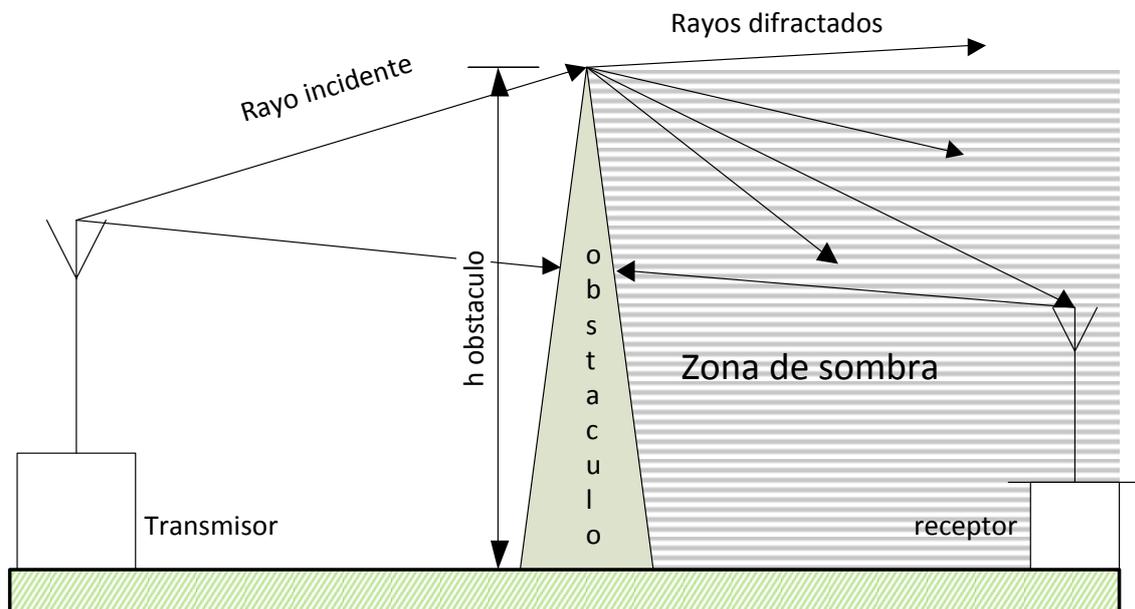


Figura 1.5 – Difracción de una onda

La difracción es la redistribución de la energía de una onda al pasar cerca de la orilla de un objeto opaco (Tomasi, 2003, p. 357). En estos puntos, las ondas refractadas se pueden considerar como fuentes de energía secundaria, permitiendo la propagación detrás de zonas de sombra o de difracción, donde no existe línea de vista entre transmisor y receptor como se observa en la figura 1.5. Este fenómeno es también conocido como principio de Huygens (Rappaport, 2002, p. 90-100).

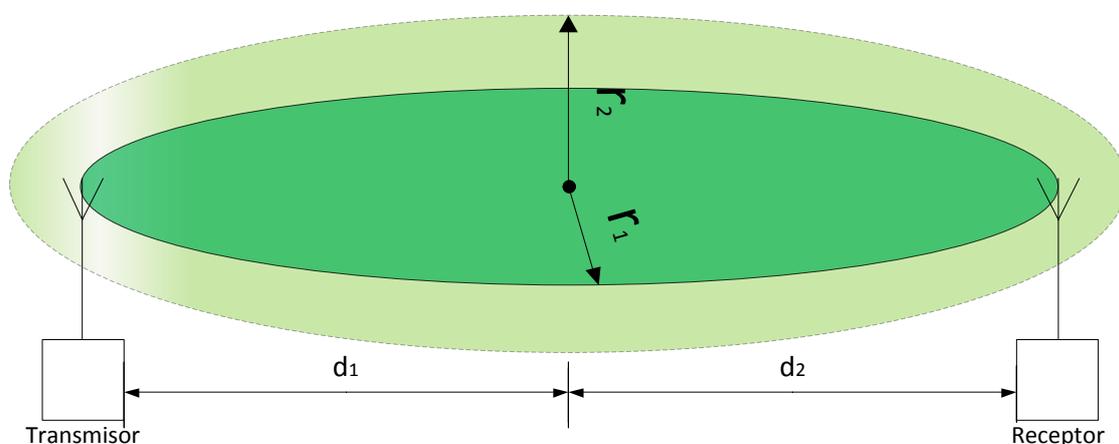


Figura 1.6 – Concepto de zona de Fresnel

El fenómeno se manifiesta cuando el obstáculo corta las zonas de Fresnel de la onda electromagnética, que se define como un indicador del volumen de espacio ocupado por la onda a lo largo de un trayecto de línea de vista entre transmisor y receptor a una distancia de separación (d) (ed. Laplante, 2000, p. 282), como se observa en la figura 1.6. El radio de la n -ésima (r_n) zona de Fresnel en relación a una longitud (λ) de onda se determina como:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1.8)$$

1.2.2.6 Dispersión

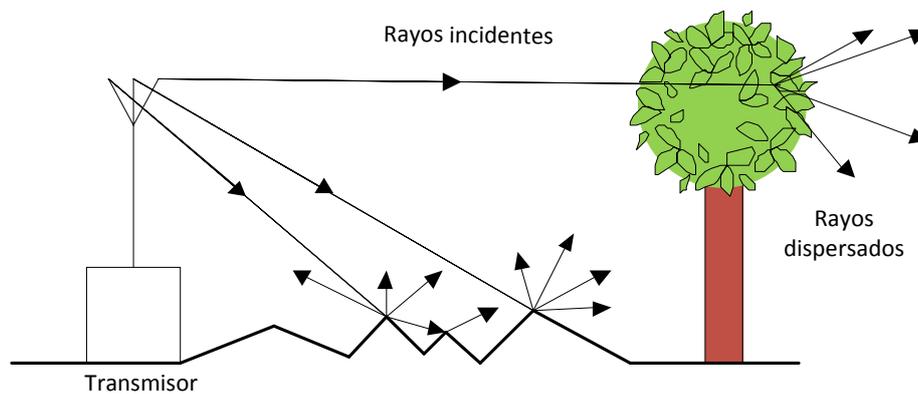


Figura 1.7 – Dispersión

Cuando una onda de radio afecta una superficie áspera (como postes de lámparas u hojas de árboles) esta es dispersada y propagada en todas las direcciones, como se muestra en la figura 1.7, proveyendo así energía adicional en el receptor. En estas superficies es definido, para un determinado ángulo de incidencia (θ_i), una altura crítica (h_c) de las protuberancias robustas dada por

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad (1.9)$$

Una superficie es considerada lisa (es decir que el fenómeno será irrelevante) si la altura de sus protuberancia desde su mínimo hasta su máximo es menor que h_c , y áspera para alturas mayores (Rappaport, 2002, p. 100-101).

La dispersión contribuye en las variaciones de la señal recibida debido a desvanecimientos rápidos, o de pequeña escala, fenómeno que será explicado más adelante, produciendo oscilaciones significantes en el nivel de señal instantáneo medido en el receptor.

1.2.3 Efectos de entornos complejos

En muchos escenarios de entornos complejos no existe línea de vista directa entre el transmisor y el receptor, por tanto la señal recibida es la superposición de varios fenómenos mencionados anteriormente (reflexiones, refracciones, dispersiones, etc.), los cuales, según la fase de la onda al momento de recepción en la antena, aporta energía debido a interferencia constructiva o, degradara la señal con interferencia destructiva. En dichos casos la señal puede variar considerablemente con solo desplazarse magnitudes equivalentes a la longitud de la onda (15.7 cm para 1,900 MHz) (Cardama *et al*, 2002, p. 70). A este fenómeno se le conoce como desvanecimiento a pequeña escala.

1.2.3.1 Ruido

Se conoce como ruido a toda señal indeseable en un sistema de comunicación. El ruido es de naturaleza aleatoria y puede clasificarse como ruido natural y ruido artificial. Entre los ruidos naturales tenemos el producido internamente en los circuitos electrónicos del sistema (ruido térmico), y el ruido producido por perturbaciones atmosféricas como las radiaciones cósmicas en el universo (ruido galáctico y cósmico) y el sol (ruido solar), ambos conocidos como ruido de fuentes externas al sistema.

El ruido artificial es aquel debido a ondas irradiadas por elementos creados por el hombre como maquinas eléctricas (motores o generadores electromecánicos), motores de combustión que utilizan bujías, líneas de alta tensión, maquinas industriales, etc. Este tipo de ruido puede ser reducido tanto en la fuente que lo produce, como en el receptor mediante el uso de filtros adecuados. El ruido artificial se conoce como zumbido cuando es originado por líneas eléctricas que transportan corriente alterna de alta tensión, y como ruido impulsivo cuando es el resultado de amplitudes aleatorias generadas por diversos medios, de difícil análisis matemático. Este es reducido mediante limitadores que discriminan la señal a partir de cierto nivel, clasificándolo como ruido de fondo.

Otro tipo de ruido artificial de principal interés en las radiocomunicaciones es el producido por otros sistemas de comunicación inalámbrica, A este tipo de ruido se le conoce como interferencia (Cardama *et al*, 2002, p. 255-262), fenómeno que se estudiara en el siguiente subtema.

1.2.3.2 Interferencia

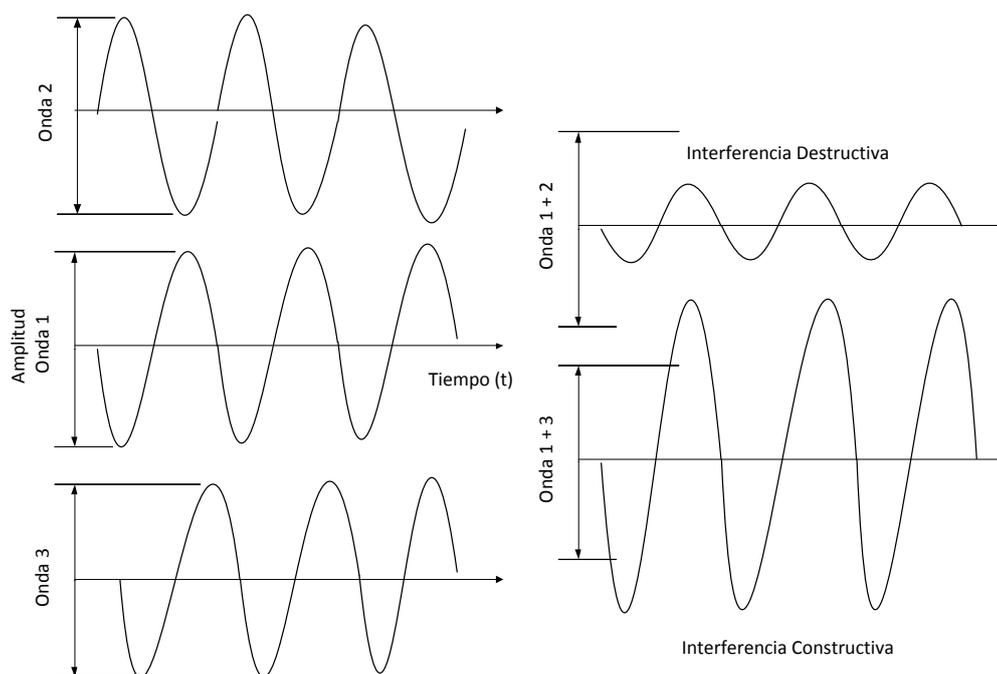


Figura 1.8 – Interferencia de ondas

La interferencia es la alteración del funcionamiento de un sistema como resultado de la combinación de dos o más ondas electromagnéticas en un mismo espacio y tiempo, como se ilustra en la figura 1.8. Dicha combinación es el resultado de ondas reflejadas, refractadas, difractadas y dispersadas que se superponen en el receptor. La interferencia puede ser constructiva o destructiva según la fase de las ondas recibidas a una misma frecuencia (Tomasi, 2003, p. 357).

En sistemas de radio que aprovechan el concepto de distribución celular, como la telefonía móvil, uno de los factores limitantes más importantes en el desarrollo del sistema es la interferencia, puesto que limita el aumento de la capacidad de usuarios cubiertos por el sistema en un determinado entorno debido a la degradación de la calidad de servicio que produce en los puntos interferidos.

Algunas fuentes de interferencia pueden ser dispositivos móviles en la misma red de servicio, estaciones base operando a la misma frecuencia y otros transmisores de distintos servicios no filtrados adecuadamente. En telefonía móvil se distinguen dos tipos básicos de interferencia: co-canal, producida por señales aledañas a la misma frecuencia y de canal adyacente, producida por frecuencias cercanas a la de recepción (Rappaport, 2002, p. 36).

1.2.3.3 Propagación por múltiple camino

La presencia de objetos que reflejan, refractan o dispersan la onda, crean un ambiente en constante variación que alteran la amplitud, ángulo, fase y tiempo de la energía entregada al receptor, a causa de múltiples versiones de la misma onda originada en el transmisor (ver figura 1.9). En condiciones de línea de vista obstruida, el receptor capta estas ondas las cuales se suman vectorialmente en su antena. Esto provoca como resultado interferencias aleatorias en el dispositivo móvil y en consecuencia se manifiestan los efectos mencionados en la sección anterior.

Aun si existe línea de vista, las reflexiones múltiples se producen debido a reflexiones en la tierra y en las estructuras que rodean el receptor. Si el receptor se encuentra fijo, cabe la posibilidad de experimentar estos desvanecimientos debido a movimiento de los objetos cercanos en la zona (vehículos, personas, etc.). La reflexión múltiple camino es la razón principal de los desvanecimientos rápidos, que resulta en oscilaciones significativas en el nivel de señal recibido en distancias pequeñas de separación (esto se puede observar en las muestras tomadas presentadas en el anexo C). En consecuencia se alargan los tiempos requeridos para establecer una comunicación exitosa entre la estación base y la estación móvil (Rappaport, 2002, p. 140).

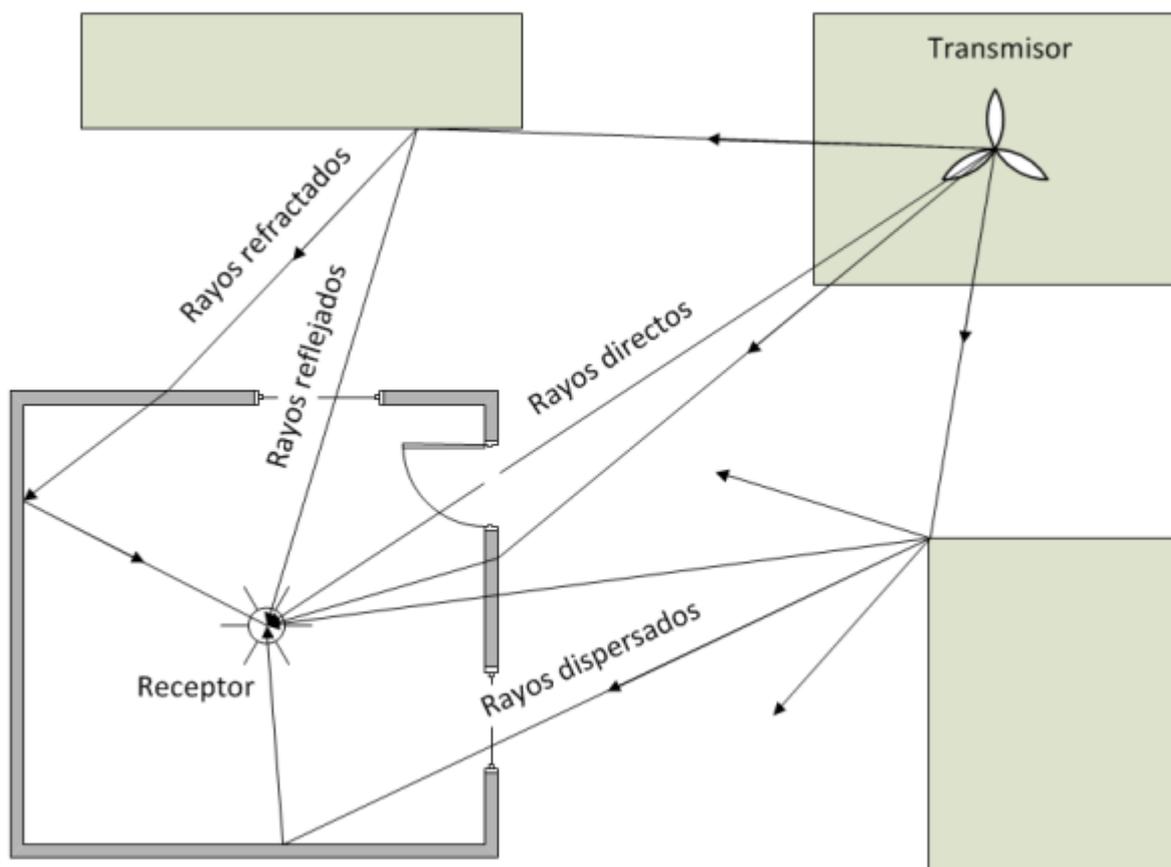


Figura 1.9 – Propagación por múltiples caminos

1.2.4 Relación señal ruido

La relación señal-ruido (SNR) es un indicador fundamental que proporciona una medida de la calidad de la señal en un punto del sistema radial. En estos puntos se desea que la señal portadora de información sea tan elevada respecto al ruido como sea necesario, para su comprensión de parte del receptor (Cardama *et al*, 2002, p. 262). Es definida como la relación entre la potencia de la señal deseada (S) y la potencia del ruido (N) y se expresa:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{N}\right) \quad (1.10)$$

Cuando el ruido es producido por interferencia esta se conoce como relación señal-interferencia (Rappaport, 2002, p. 38), y para un número determinado de señales a una misma frecuencia (i_o) la expresión resultante es la siguiente:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^{i_o} I_i}\right) \quad (1.11)$$

Para la telefonía móvil este factor es de vital importancia, ya que es uno de los puntos de partida para la planificación de redes inalámbricas. Para zonas urbanas densas como las ciudades, esta relación limitara la distancia mínima posible entre dos transmisores a una misma frecuencia. Para esto es necesario estimar adecuadamente las pérdidas en el trayecto de comunicación mediante modelos de propagación, permitiendo el análisis de la potencia de transmisión necesaria, como se analizara en la siguiente sección.

1.3 Modelos de propagación de las ondas electromagnéticas

Los modelos de propagación tienen como objetivo determinar la probabilidad de que un sistema de comunicación dependiente de las ondas electromagnéticas tenga un rendimiento adecuado (Seybold, 2005, p. 10). Con estos se busca caracterizar en qué medida la energía transportada entre una antena transmisora y otra receptora es afectada por el medio de propagación (Cardama *et al*, 2002, p. 438).

Modelar la propagación es importante por dos razones: primero, para asegurar que los usuarios en el área de cobertura deseada se les brinde una señal de alta calidad y segundo, para determinar cómo cada transmisor añada niveles de interferencia en las áreas circundantes (Olexa, 2008, p. 285). Si el modelo usado en la planificación de una red de servicio es muy rígido, se puede incurrir en costos de implementación excesivos, en cambio sí es demasiado flexible, se puede obtener un rendimiento insatisfactorio, por lo cual la fidelidad del modelo debe ajustarse a la aplicación requerida y al terreno de implementación.

1.3.1 Tipos de modelos

Los modelos de propagación se pueden clasificar en dos tipos: determinísticos (o físicos) y estadísticos (o empíricos). Por lo general, los primeros utilizan análisis de la intensidad de campo eléctrico como punto de partida para realizar predicciones de cobertura y los segundos en un estudio de la potencia basándose en análisis estadísticos de mediciones de campo (Vega *et al*, 2007, p. 449).

Los modelos determinísticos toman como base las leyes fundamentales de la física combinadas con una aproximación matemática adecuada de fenómenos terrestres como los explicados en secciones anteriores. Estos modelos conllevan relaciones matemáticas complejas y requieren de la resolución de las ecuaciones de Maxwell mediante técnicas como análisis geométrico óptico, entre otros. Estos modelos requieren de grandes tiempos de cómputo que resultan imprácticos para propósitos de aplicación a nivel de ingeniería. Los modelos determinísticos son usados muchas veces como referencia para evaluar aproximaciones introducidas por otros modelos de propagación más simples (Sizun, 2005, p. 177).

Cuantificar los efectos de cada fenómeno no siempre es factible en entornos complejos de comunicación, puesto que resulta imposible analizar la influencia de cada mecanismo de propagación o en su contraparte, se requeriría de un alto poder de cómputo. Por esta razón los modelos estadísticos se basan en el análisis de un gran número de resultados de medidas experimentales relativas a diferentes parámetros como son: frecuencia, distancia, altura de las antenas y otros factores que dependen de la aplicación que son englobados en factores de atenuación en función de cada variable. Otras variaciones como el ancho de banda y el tipo de modulación, han sido encontrados poco significativos en los niveles de atenuación (Vega *et al*, 2007, p. 439). La ventaja de estos modelos es su facilidad para ser aplicados rápidamente sin la necesidad de información geográfica extremadamente precisa y por su robustez, ya que son desarrollados a partir de mediciones de campo. No obstante algunos de estos modelos no son aplicables a todos los ambientes, debido a que los entornos de medida en que se desarrollaron no son compatibles en otros contextos (Sizun, 2005, p. 178-179).

1.3.2 Modelo de propagación de espacio libre

El modelo de propagación de espacio libre es usado para predecir la señal recibida cuando existe línea de vista clara y sin obstrucciones entre el transmisor y el receptor. Dicho modelo se basa en que la potencia recibida decae como función de la separación entre ambas antenas. El modelo es usado frecuentemente como un punto de partida y de referencia para otras aproximaciones (Haslet, 2008, p. 1-2). Partiendo de la ecuación 1.5 y reduciendo algunos valores predefinidos a una sola constante (como la velocidad de la luz), la pérdida de espacio libre (L) en dB para una trayectoria en kilómetros (d) y una frecuencia en MHz (f) se expresa como:

$$L = 32.44 + 20 \log d + 20 \log f \quad (1.12)$$

Este modelo solo es válido para distancias que están en la región de campo lejano de la antena transmisora (Rappaport, 2002, p. 70-72), también conocida como región de Fraunhofer (d_f) que se define como aquella zona más allá de la distancia d_f , que se relaciona con la dimensión más larga de la apertura de la antena transmisora (D) y la longitud de onda (λ), lo cual se expresa como:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$
$$d_f \gg D \quad d_f \gg \lambda \quad (1.13)$$

1.3.3 Modelos de propagación empíricos prácticos

La mayoría de los modelos de propagación son derivados de una combinación de métodos físicos y empíricos. Este último ajusta mediciones representadas en curvas o expresiones analíticas que recrean los resultados. Sin embargo, estos modelos solo pueden ser aplicados ajustando datos adicionales medidos en el entorno de aplicación a la frecuencia requerida. Algunos modelos clásicos han emergido con el tiempo, los cuales son usados para predecir la

cobertura en distintas zonas para la planificación del sistema de comunicación. Con estos se puede estimar la relación señal-ruido a ciertas distancias, parámetro esencial en las comunicaciones móviles. Algunos modelos prácticos en radio comunicación móvil son presentados a continuación.

1.3.4 Modelos de propagación en exteriores

En comunicaciones móviles el entorno de transmisión es frecuentemente un terreno irregular, cuyo perfil debe ser tomado en cuenta para estimar las pérdidas de trayectoria. En este perfil se pueden encontrar zonas de alta densidad de edificaciones urbanas, presencia de árboles, entre otros obstáculos, para el cual las alturas de las antenas y otros factores son considerados. Existen distintos modelos capaces de predecir estas atenuaciones en terrenos irregulares, basándose en interpretaciones de medidas previas en un área de servicio típico. Para los fines de la presente investigación algunos de estos modelos son presentados a continuación, por su amplio uso en el diseño redes móviles.

1.3.4.1 Modelo COST 231- Hata (Extensión PCS)

El modelo COST 231 es una extensión al modelo Okumura-Hata, el cual se basa en resultados experimentales obtenidos de múltiples mediciones en la ciudad de Japón. Fue desarrollado por el Comité 231 del Programa Internacional de Cooperación Europea en el Campo de la Investigación Científica y Técnica (EURO-COST, por sus siglas en inglés). Este modelo está restringido para pequeñas celdas y macro celdas (Damosso *et al.*, 1993, p. 134-135) y es usado comúnmente como modelo de referencia en sistemas PCS se expresa como:

$$L_{urbano} = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log d + C_M \quad (1.14)$$

$$a(h_r) = \begin{cases} \text{Ciudades pequeñas y medianas} & (1.1 \log f_c - 0.7)h_r - (1.56 \log f_c - 0.8) \\ \text{Ciudades grandes} & \begin{cases} 8.29(\log 1.54h_r)^2 - 1.1 & \leftarrow \text{para } f_c \leq 300 \text{ MHz} \\ 3.2(\log 11.75h_r)^2 - 4.97 & \leftarrow \text{para } f_c > 300 \text{ MHz} \end{cases} \end{cases} \quad (1.15)$$

$$C_M = \begin{cases} 0 & \leftarrow \text{Ciudades medianas y áreas suburbanas} \\ 3 & \leftarrow \text{Centros metropolitanos} \end{cases} \quad (1.16)$$

f_c (frecuencia central): 1500 – 2000MHz

h_t (altura del transmisor): 30 – 200 m

h_r (altura del receptor): 1 – 10 m

d (distancia de separación): 1 – 20 km

1.3.5 Modelos de propagación de penetración de edificios

Los modelos de propagación de penetración en edificios, se caracterizan por considerar los factores que interfieren la comunicación entre una estación móvil dentro de un recinto y una estación base externa a la edificación. En general, estos modelos se aplican a entornos de pequeñas celdas y micro celdas.

Para estos entornos se toma como base que las ondas electromagnéticas transmitidas por una estación base primero se propagan en entornos externos hasta la pared externa del edificio, luego penetran dicho obstáculo sufriendo pérdidas por absorción y por último, se propaga en el interior hasta alcanzar el móvil. Los modelos de propagación de exteriores a interiores toman en consideración estas tres partes, y las pérdidas se pueden calcular como una suma de su totalidad (Miura et al, 2002, p. 2). Los valores de las pérdidas por penetración son influenciados por un número de diferentes parámetros físicos, cuyos efectos se entremezclan la mayoría del tiempo. Sizun (2005, p.198-200) establece que entre estos parámetros son distinguidos tradicionalmente:

- El ambiente cercano: una distinción entre la separación de las torres cercanas y las características del entorno.
- La profundidad de recepción dentro del recinto: que afecta la amplitud de la señal recibida ya que la señal tiende a disminuir al moverse el receptor a un área más profunda de la estructura.
- El ángulo de incidencia: el cual determina los coeficientes de reflexión y refracción en la superficie atravesada.
- La altura de recepción: que induce una disminución en la pérdida de penetración, como efecto de una ganancia en función de la altura de recepción en comparación con la altura del primer nivel. Este fenómeno se verá analizado con mayor detalle en el capítulo III.
- El material penetrado: el cual provoca una atenuación que depende de la naturaleza del mismo. Se determina mediante la comparación entre el campo electromagnético externo e interno en diferentes partes del recinto.
- La separación entre el transmisor y el receptor. En estas se distinguen la distancia desde el transmisor a la pared externa y la distancia desde el receptor a la parte interna de la misma pared.
- El número de paredes atravesadas y la frecuencia.

A continuación se presentan algunos de los modelos de penetración más usados.

1.3.5.1 Modelo COST 231 de penetración de edificios

En el reporte final COST *acción 231* (1993, p. 167), se presentan dos modelos simples para aquellos casos donde se desee conocer el comportamiento de la señal a lo interno de una estructura servida por un transmisor externo. Advierte a su vez que se debe tener precaución al medir el nivel promedio externo, tomando en cuenta las condiciones de línea de vista y los ángulos de incidencia, puesto que estas diferencias pueden alterar los datos en decenas de decibelios ya que una misma pared puede tener diferentes valores promedios dependiendo de las condiciones ambientales externas.

❖ Modelo para presencia de línea de vista (LOS)

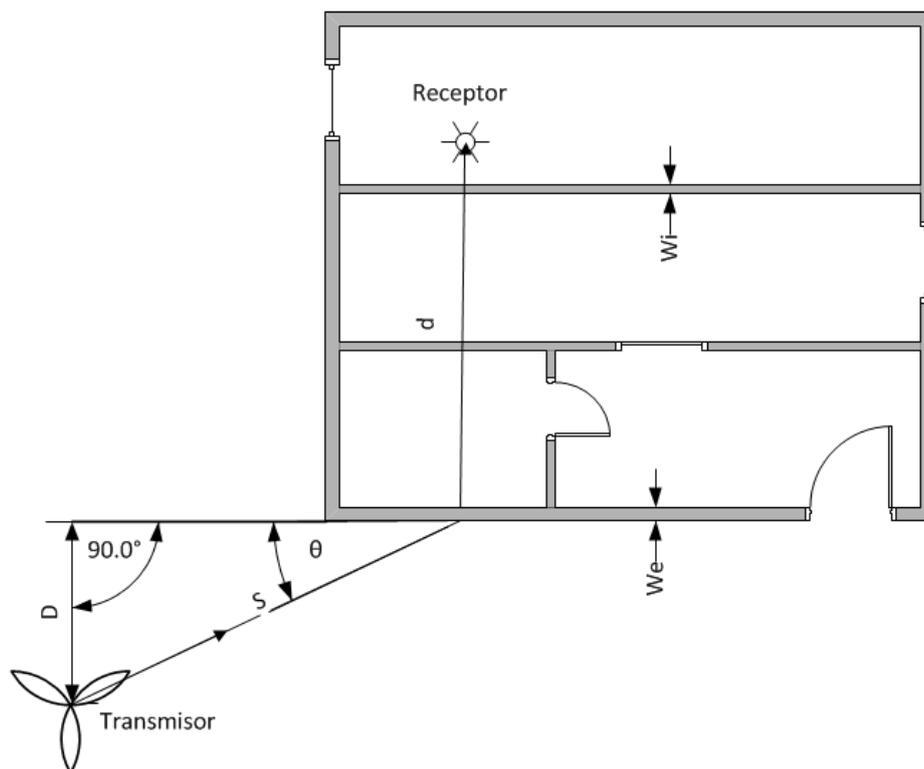


Figura 1.10 - Escenario general de penetración de señal

En la figura 1.10 se muestra un panorama general de aplicación del modelo para condiciones en donde existe línea de vista directa entre el transmisor y el receptor. La ecuación general que describe las pérdidas en el trayecto desde el transmisor al receptor (Damosso *et al.*, 1993, p. 169) es:

$$L(dB) = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(S + d) + W_e + WG_e \cdot \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2 + \max(\Gamma_1, \Gamma_2)$$

$$\Gamma_1 = W_i \cdot p \qquad \Gamma_2 = \alpha \cdot (d - 2) \cdot \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2$$

(1.17)

- f = frecuencia en GHz
- D y d = distancia perpendicular entre antenas en metros
- S = distancia entre antena externa y pared externa en metros
- $\theta = \text{Sin}(\theta) = \frac{D}{S}$
- W_e = atenuación en dB de la pared externa iluminada cuando $\theta = 90$
- WG_e = atenuación adicional en dB cuando $\theta = 0$
- W_i = atenuación de las paredes internas en dB
- p = número de paredes internas penetradas
- α = factor de atenuación en interiores

En este modelo se asume que el rayo de mayor influencia en el receptor proviene de la onda que atraviesa la pared más cercana al transmisor. Por otro lado considera las pérdidas del trayecto entre la antena y la pared externa iluminada son de espacio libre y no basado en estimaciones de atenuación determinadas por modelos más complejos. Las pérdidas por pared son difíciles de determinar en localizaciones donde existen ondas que se propagan en múltiples trayectos, por lo cual se prefiere calcular W_e capturando las muestras en lugares donde exista línea de vista directa entre ambos elementos de comunicación, adicionalmente este parámetro puede ser afectado por la relación entre el área compuesta de ventanas y el área total de la pared en cuestión. El factor $\max(\Gamma_1, \Gamma_2)$ dependerá de la condición interna de la estructura donde se encuentra el receptor. Esta función retorna el valor máximo entre dos valores, por lo que el modelo elige la pérdida de mayor influencia entre la atenuación producida por la distancia recorrida en el interior (Γ_2) y la provocada por la cantidad de paredes internas a lo largo del trayecto (Γ_1).

La aplicación del modelo es válida en entornos de pequeña celda y micro celda, aun cuando las pérdidas de trayectoria a la pared externa resulten mayores a las del espacio libre, y es útil para distancias efectivas inferiores a los 500 metros. Algunos valores recomendados por la comisión son:

COST 231 - para Línea de vista (LOS)			
Factor	Material	Atenuación (dB)	Detalle
We, Wi	Madera o Plástico	4	
	Concreto	7	Ventanas normales
		10	Ventanas metalizadas
		10 a 20	Sin ventanas
WGe		20	
α		0.6 (dB/m)	

Tabla 1.1 - Atenuaciones recomendadas por COST 231

❖ **Modelo para condiciones de ausencia de línea de vista (NLOS)**

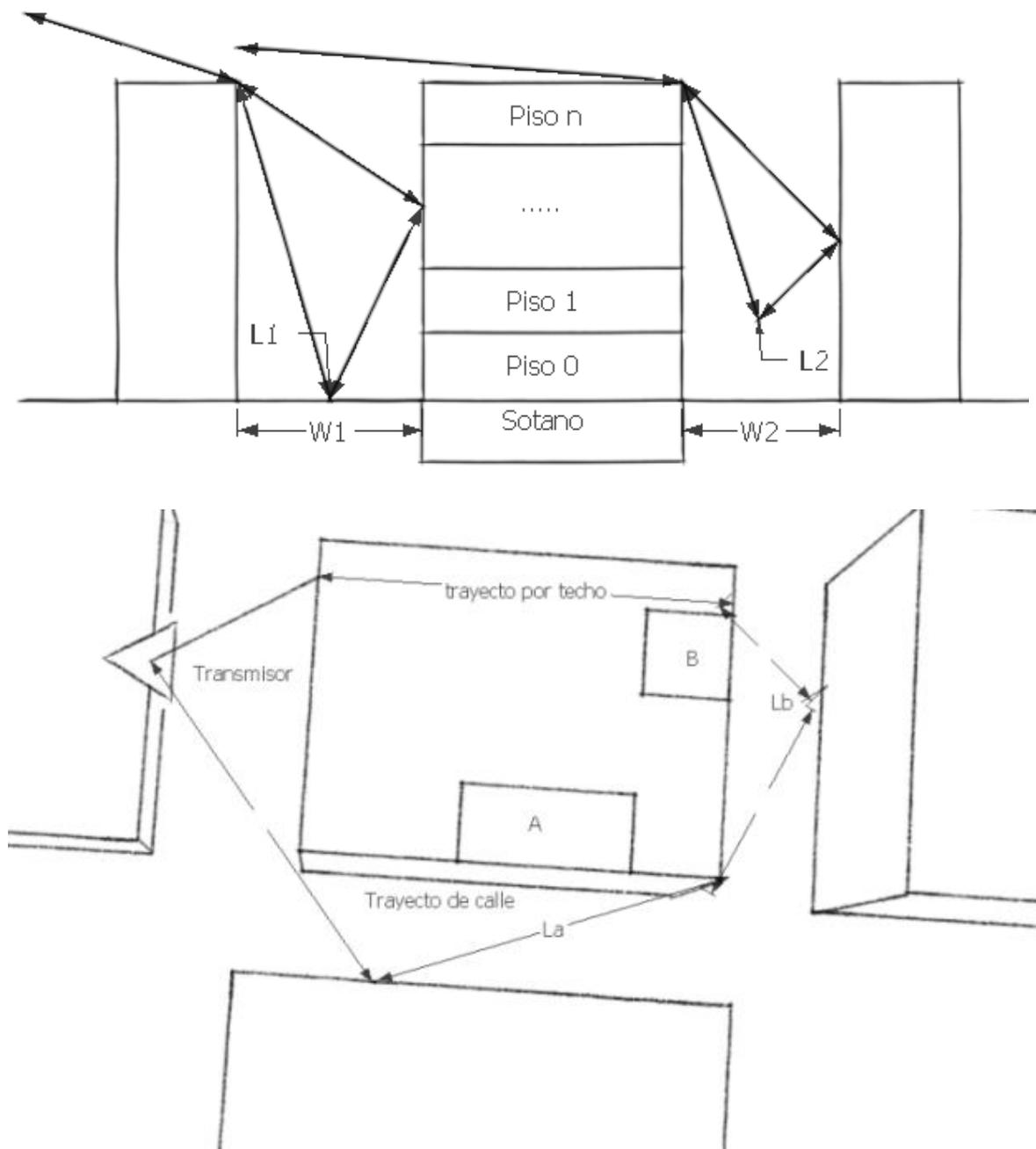


Figura 1.11 – Entornos en condición de línea de vista obstruida

Para condiciones donde no existe línea de vista entre transmisor y receptor (figura 1.11), las pérdidas de penetración están relacionadas a las pérdidas externas L_1 y L_2 o L_a y L_b (Damosso *et al.*, 1993, p.171). En este modelo la ganancia debido a la altura del piso es relevante cuando W_1 está entre 10 y 50 m, en dirección a la antena transmisora. Al aumentar esta separación, la ganancia por nivel disminuirá. La pérdida en la trayectoria está relacionada mediante:

$$L(dB) = L_{externas} + W_e + W_{ge} + \max(\Gamma_1, \Gamma_3) - G_{FH}$$

$$\Gamma_1 = W_i \cdot p \quad \Gamma_3 = \alpha \cdot d \quad G_{FH} = \begin{cases} n \cdot G_n \\ h \cdot G_h \end{cases} \quad (1.18)$$

W_e , Γ_{1-3} y d son similares a la definición en de condición de línea de vista

n = número del piso

G_{FH} = Ganancia del piso

G_n = ganancia del piso por altura en dB/piso

G_h = ganancia de la altura en dB/metros

h = altura en metros sobre el nivel externo de referencia

Las pérdidas exteriores están distribuidas sobre varios ángulos de inserción que se suman en un punto común, por lo que debido a la dependencia de la pérdida de penetración con el ángulo de inserción, la atenuación será mayor en comparación a la condición de línea de vista, por lo cual el parámetro W_{ge} es insertado con el fin de lograr reducir ambigüedades en el modelo. La comisión recomienda valores para los parámetros reportados en la tabla 1.2, para el resto de los parámetros, se aplica la tabla 1.1. La comisión distingue que para alturas de pisos entre los 4 a 5 metros es preferible el uso del parámetro G_n .

COST 231 - para línea de vista obstruida (NLOS)		
Factor	Atenuación (dB)	Detalle
W_{ge}	5 a 7	
G_n	1.5 a 2 (dB/piso)	Para alturas de piso entre 4 a 5 m
	4 a 7 (dB/piso)	
G_h	1.1 a 1.6 (dB/m)	

Tabla 1.2 – Valores recomendados para condición de línea de vista obstruida

1.3.5.2 Modelo de identificación de rayo dominante

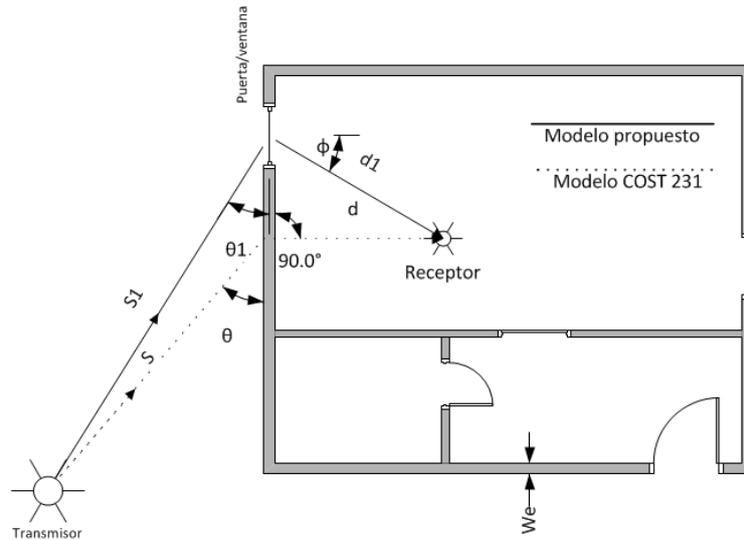


Figura 1.12 – Comparación de situaciones asumidas en ambos modelos

El modelo COST 231 asume que el rayo que recibe el móvil proveniente de un transmisor externo, atraviesa la pared perpendicular más cercana (línea punteada, figura 1.12). Dicha conclusión no siempre es correcta en ambientes donde predominan aperturas con menores niveles de pérdidas (ventanas, puertas de cristal, etc.). Basado en este análisis Miura *et al* (2002) desarrolló un modelo de rastreo del rayo representado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 L_p &= L_{out} + L_{pn} + L_{in} \\
 L_{pn,l} &= W_e + WG_e \cdot (1 - \cos\theta_1)^2 + f(\varphi_1) \\
 L_{in,1} &= \alpha \cdot d_1
 \end{aligned}
 \tag{1.19}$$

L_{out} = pérdida de propagación en exteriores

L_{pn} = pérdida de penetración de edificio

L_{in} = pérdida de propagación en interiores

W_e = pérdida de pared cuando el ángulo es $\theta = 90$

WG_e = dependencia angular en exteriores

$f(\varphi)$ = dependencia angular en interiores desde la apertura al receptor

α = coeficiente de atenuación para medios de propagación de interiores uniformes

El término introducido $f(\varphi)$ es una función trigonométrica que se determina realizando mediciones de campo a partir de las cuales se obtiene su comportamiento trigonométrico, ya sea en función del seno o del coseno del ángulo, con el fin de rastrear la onda incidente como se observa en la línea continua de la figura 1.12.

1.3.5.3 Modelo para celdas pequeñas de Gahleitner (NLOS)

$$P_E = 10 \cdot \log \left[\sum_{n=1}^N \left[P_{An} \cdot \left(\frac{1}{W_e} \right) \cdot \prod_{m=1}^M \left(\frac{1}{W_m} \right)^{k_{mn}} \right] \right] + h_s \cdot G_h \quad (1.20)$$

P_E = valor local medio (en dBm)

N = número de paredes externas relevantes para un piso determinado

P_{An} = nivel medio a lo largo de la pared exterior (en mW)

W_e = factor lineal de atenuación de pared externa

M = número de categorías de paredes internas

W_m = atenuación lineal de pared interna de categoría m

k_{mn} = número de paredes de categoría m , atravesadas por una línea dibujada desde la localización del receptor perpendicular la pared externa numero n

G_h = ganancia de altura en dB/m

h_s = altura del receptor sobre el nivel de calle

Generalmente una edificación es iluminada por un transmisor desde diferentes direcciones, con diversas intensidades de señal y a distintas alturas o localidades. La variación de la potencia exterior depende de la estructura urbana local. Gahleitner (1994, p. 99) asume que estas paredes reciben rayos de diversos ángulos, pero sin embargo sería difícil de obtener un modelo de rastreo de las ondas incidentes debido a que necesitarían potentes equipos de cómputo. Por tanto el modelo introducido por Gahleitner incluye el nivel de potencia promedio a lo largo de las paredes externas como base del análisis de propagación.

El modelo presentado puede ser aplicado especialmente cuando no existe línea de vista entre transmisor y receptor. Los factores de pérdidas de estas paredes incluyen mecanismos de propagación que se manifiestan en las puertas y ventanas. Los valores recomendados en su publicación son:

Gahleitner - para Línea de vista obstruida (NLOS)		
Factor	Atenuación (dB)	Detalle
W_e	17.6 dB	Concreto reforzado
W_i	6.7 dB	Junta blanda doble
Desviación estándar	5.8 dB	

Tabla 1.3 – Valores para modelo de obstrucción de Gahleitner

1.3.5.4 Modelo para micro celdas de Gahleitner (LOS)

$$P_E = P_A - \sum_{m=1}^M n_m \cdot w_m \quad (1.21)$$

P_E = nivel de señal medio en una habitación (dBm)

P_A = nivel medio de señal fuera de la pared del edificio (dBm)

n_m = número de paredes de categoría m entre el receptor y la calle

M = número de categorías de paredes

w_m = factor de atenuación de pared de categoría m (dB)

A partir de la ecuación 1.20, Gahleitner deriva un modelo simplificado para condiciones de línea de vista, concentrándose en situaciones donde incurren ángulos de incidencia rasantes y se asumen distancias cortas entre transmisor y receptor. Establece que la ganancia por piso equivale a 0dB/m debido a que el ángulo de incidencia es similar en todas las elevaciones del plano vertical (p. 122). Gahleitner reportó que las pérdidas de penetración aumentaban entre 10 a 20 dB cuando los ángulos de llegada de la onda estaban alrededor de los 80° a 89° grados. En algunos casos el nivel interno superara el nivel esperado por el modelo, sobre todo cuando las habitaciones se encuentren rodeadas de largos pasillos, los cuales producirán un efecto de guía de onda.

En este modelo, a diferencia de otros, el nivel de señal interno depende del promedio externo, englobado por el término P_A , por lo que su principal desventaja es la dependencia de la estimación correcta de las pérdidas del trayecto hasta el punto principal de incidencia.

CAPÍTULO II
PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En el capítulo I se explicaron los fenómenos que intervienen en la propagación de las ondas electromagnéticas en los sistemas de comunicaciones móviles. Estos han de ser tomados en cuenta a la hora de realizar un estudio que involucre medidas en entornos no controlados, debido al comportamiento complejo de la onda en estos ambientes.

Las pérdidas de propagación varían de un lugar a otro de acuerdo a las características de cada entorno. Para la presente investigación se determinó la pérdida o atenuación de la onda, causada por un material típico de construcción en países de climas tropicales como el nuestro, por lo cual es importante tener en cuenta los factores que intervinieron en la selección de dicho material, que será analizado más adelante.

En el siguiente capítulo se detallarán las técnicas y procedimientos empleados con el objetivo de obtener los datos necesarios que permitieron lograr resultados satisfactorios, esto con el fin de que el experimento sea tan metódico y repetible como sea posible, de acuerdo a recomendaciones citadas de expertos en la materia como se observará a lo largo de las siguientes páginas.

2.1 Materiales seleccionados

A la hora de realizar un estudio sobre las pérdidas por penetración de materiales, se toman en consideración la composición de aquellos obstáculos que la onda atraviesa para comunicarse con el dispositivo móvil. Para una edificación común se destacan elementos tales como paredes, puertas y ventanas. La principal atención es depositada en las paredes, compuestas de materiales que provocan mayores niveles de atenuación y que ocupan una gran parte del área total del obstáculo en relación a aperturas como puertas y ventanas. Según el material predominante en algunas zonas geográficas, los elementos considerados por diversos autores son en general: el concreto, el ladrillo, el block de mampostería, la madera, el plywood, la pared seca y el vidrio.

En muchos de los países donde se han realizados previamente este tipo de estudios, la composición de las paredes externas varían significativamente. Para Santo Domingo y el Distrito Nacional de la Republica Dominicana un 86.4% de las paredes de los hogares y viviendas se construyen con bloque de mampostería y cemento (ENHOGAR, 2007, p. 4), en contraste con los Estados Unidos, donde menos de un 5% de las paredes externas se construyen con bloque de mampostería, donde predomina en un 23% la utilización del ladrillo, entre otros (USA Department of Commerce, 2010, p.129). Por consiguiente, el material de interés del presente estudio es principalmente el block de mampostería y el concreto, ambos presentes en paredes típicas del área metropolitana como en universidades, hogares y apartamentos.

2.1.1 Efectos de los climas cálidos

Los estudios realizados por el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) toman en cuenta diversos materiales de construcción usados en Estados Unidos, por otro lado, el Programa Internacional de Cooperación Europea en el Campo de la Investigación Científica y Técnica (COST), provee documentación en relación a estudios realizados en la Unión Europea, donde recomienda valores genéricos para los casos del concreto o block indistintamente de su grosor. En la región tropical, algunas propiedades de estos elementos se ven afectadas con relación a su desempeño en climas cálidos. En esta región, los materiales de construcción deben enfrentar diversas condiciones climáticas. Las murallas deben proteger tanto del frío como del calor el interior de la vivienda, así como resistir y contrarrestar condiciones de humedad tropicales. Sin embargo, en los países pobres y en vía de desarrollo, algunos de los materiales que se construyen localmente son de baja calidad.

En áreas calientes y secas los muros suelen ser más gruesos, pesados y densos, de esta forma ganan y pierden calor lentamente, igualando las fluctuaciones de temperaturas internas de la estructura y protegiendo de mejor manera contra el calor intenso. Al comparar las propiedades de algunos blocks de fabricantes locales con los usados en el NISTIR, algunas de estas características son observadas en la tabla 2.1 y 2.2, En la tabla 2.1 se observan diferencias en el peso de las muestras, y por tanto en su densidad para un mismo volumen es mayor, mientras que en la tabla 2.2 se observan diferencias en el tamaño de los agregados.

Block de mampostería					
Fabricante	Alto (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Peso (lb)	Fuente
Tavares	20	20	40	42	http://www.tavares.com.do/blocks.html
Khoury	19	19	39	35.5	http://www.blockkhoury.com/productos.html
NISTIR 6055	19.4	19.2	39.5	33.6	NISTIR 6055,1997, p. 41

Tabla 2.1 – Comparación de blocks de mampostería

Concreto		
Característica	Cemex Dominicano	NISTIR 6055
Tamaño máximo de agregados (cm)	0.95-1.91	1.27-2.54
Peso volumétrico (Kg/m3)	2,200-2,400	2,295-2,424

Tabla 2.2 – Comparación de concreto

En los climas cálidos las altas temperaturas afectan las mezclas de concreto en su colado y curado, por lo que usualmente se realiza con materiales absorbentes que conserven su humedad, ya que su secado rápido conlleva a una degradación de la resistencia a las fracturas (Seeley, 2008, p. 245-253). A temperaturas mayores a los 30° C, se pierde resistencia química del fraguado de concreto en presencia de humedad, efecto que se reduce con relaciones bajas de agua/cemento (BRE OBN, 1971). Otros materiales, como la madera, experimentan cambios en sus dimensiones, producto de la humedad y los plásticos y las pinturas suelen ser menos durables en climas tropicales que en climas templados.

En zonas sísmicas como la República Dominicana, el BRE (Building Research Establishment) Overseas Building Notes recomienda el uso de bloques de concreto huecos, reforzado con varillas en cada intersección, y rellenos con concreto (BRE OBN 143, 1972).

Otra característica de las construcciones en climas cálidos es la relación de área de ventanas, donde estas componen una parte significativa de las paredes permitiendo mayor ventilación en su interior a fines de contrarrestar las condiciones climáticas de calor a las cuales se enfrentan las viviendas en las zonas tropicales.

2.2 Descripción del proceso de muestreo y adquisición de datos

Para la recolección de datos y muestras, fueron analizados y estudiados diversos métodos. Se tomó en consideración la utilización de equipos que permitieran un proceso confiable, metódico, económico y sobre todo reproducible. Estos equipos y métodos son analizados en los siguientes subtemas

2.2.1 Instrumento de medida

Como instrumento de medida se usó un móvil RIM BlackBerry 8520 (figura 2.1) activado en la red GSM de distintos proveedores, operando en la banda de frecuencia de los 1,900 MHz. Para obtener los datos a partir de dicho dispositivo, este fue configurado en modo de prueba de campo. Este modo accesible en algunos dispositivos móviles (ver figura 2.5) permite obtener datos como: la potencia de la señal recibida en la antena del terminal (medida en dBm), la identificación de la estación base transmisora, etc.



Figura 2.1 – Instrumento de medida

En las comunicaciones móviles, al establecerse una conexión bidireccional (conocida como modo dedicado) entre el equipo del usuario y la estación base (como una llamada de voz o el envío y recepción de datos), es activado un control de potencia continuo aplicado tanto en el enlace ascendente (emitido por el móvil) como el descendente (emitido por la estación base), garantizando niveles de

recepción y transmisión adecuados independientemente de la ubicación del equipo dentro de la red (Gorricho *et al*, 2002, p. 91-111). Por este motivo, las medidas fueron capturadas en modo desocupado, en cuyo estado el móvil no interactúa con la estación base y solo se mantiene midiendo los niveles de señal de los transmisores circundantes, manteniendo el control de potencia inactivo. De esta manera se evita que los niveles de señal muestreados sean alterados a causa de una comunicación establecida entre ambas partes.

Para capturar las muestras, el dispositivo de medida se colocó en un tubo de PVC soportado en una base de madera. La altura recomendada por algunos autores oscila entre uno a dos metros de altura, escogiendo estos en su mayoría un equivalente a la altura promedio de la cabeza (Durgin, 1998, p. 1485). Por consiguiente, se escogió una altura variable entre 1m a 1.72m de altura, aplicada según lo ameriten las condiciones del espacio muestreado. El dispositivo queda separado del objeto de medida a unos 17 cm. como se muestra en la figura 2.2.

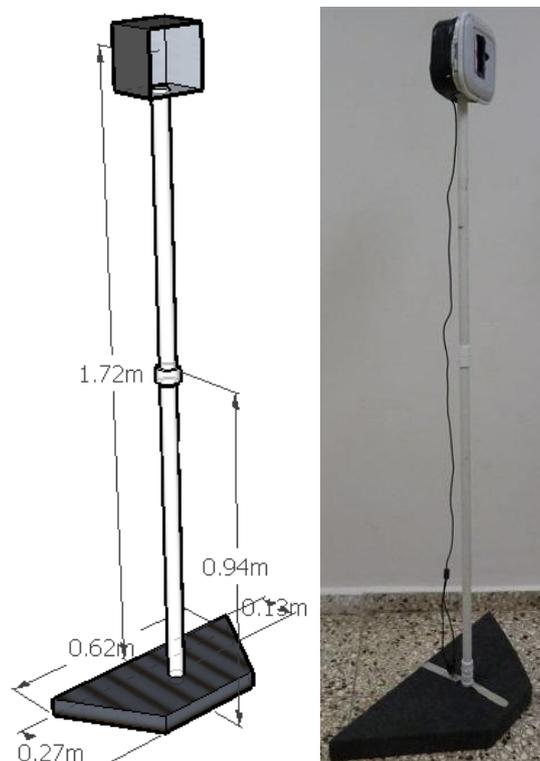


Figura 2.2 - Base de soporte de equipo de medición, izquierda: prototipo derecha: modelo final

En el capítulo I se describieron algunos efectos y mecanismos de propagación que se manifiestan en entornos complejos y que afectan las comunicaciones móviles. Por lo que para reducir la influencia de algunos de estos fenómenos, el instrumento fue colocado dentro de una pequeña capsula aislada con aluminio, dejando una apertura en dirección perpendicular al punto de medida, ya que las ondas electromagnéticas se reflejan en elementos pasivos, buenos conductores de la electricidad (Vega *et al*, 2007, p.384). Con esto se buscó reducir la interferencia producida por las reflexiones múltiples provocadas tanto en las paredes laterales como en las paredes traseras, en relación al punto de medida como se observó en la figura 1.9 y se analizó en las secciones 1.2.3.2 y 1.2.3.3. Para comprobar que el uso de este metal es efectivo a tales fines, fue sometido a prueba un mono polo dentro y fuera de la capsula aislante, estas medidas fueron tomadas en el laboratorio de antenas de la universidad, como se observa en la figura 2.3. El resultado del diagrama de radiación es mostrado en la figura 2.4, donde se observa como disminuye la absorción de radiación en la antena cuando esta es cubierta por la capsula debido a la reflexión de la onda incidente en las áreas forradas por el metal.



Figura 2.3 – Capsula reflectora y mono polo

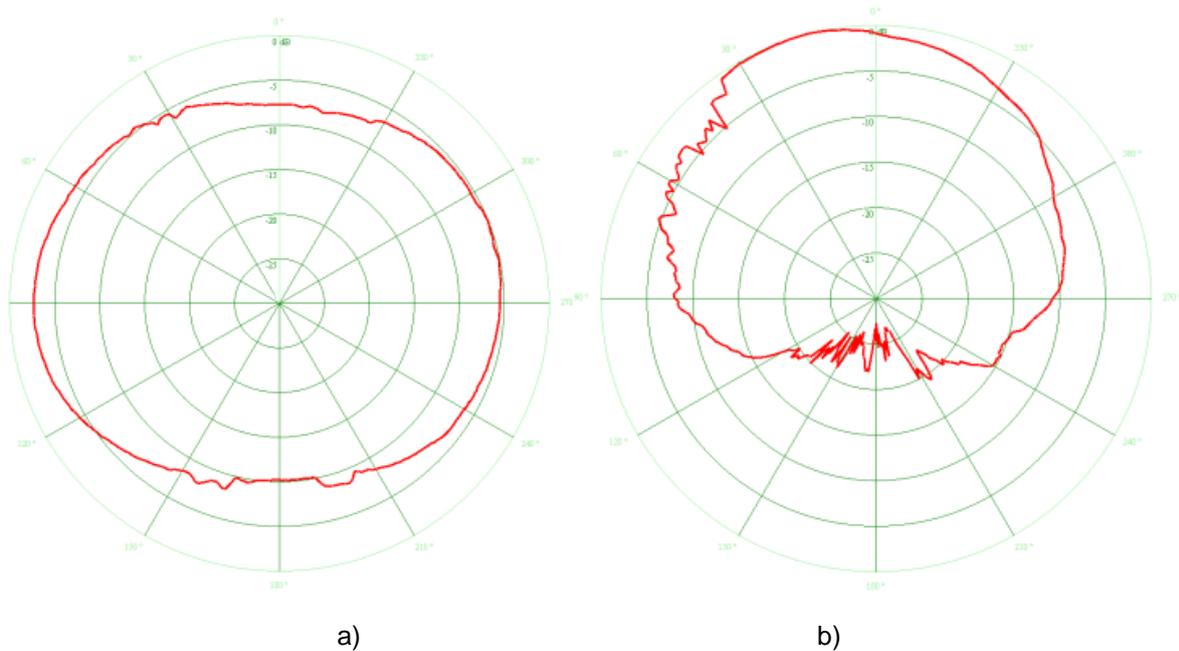


Figura 2.4 - Diagrama de radiación de mono polo: a) fuera de la capsula, b) dentro de la capsula

Para lograr que la colección visual de los datos no interfiera con las medidas reportadas debido a pérdidas por absorción del cuerpo humano en la cercanía del móvil, los datos fueron capturados en un ordenador mediante una cámara colocada frente a la pantalla del dispositivo móvil, la cual toma fotografías consecutivas utilizando un programa que permite un intervalo de tiempo definido entre cada imagen. La unidad móvil actualiza los datos muestreados en su pantalla cada un segundo, cuyo tiempo fue sincronizado con la unidad de captura, logrando así un periodo de muestreo controlado. Posteriormente estos datos fueron analizados y tabulados. En la siguiente imagen se muestra una captura típica bajo este sistema, en la cual se pueden observar: el RSSI (Received Signal Strength Indicator) o nivel de señal, el ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) o frecuencia de transmisión, con el cual se confirma la banda de la frecuencia de transmisión mediante softwares en línea, y el CellId o código de identificación de la celda incluyendo su respectivo sector.

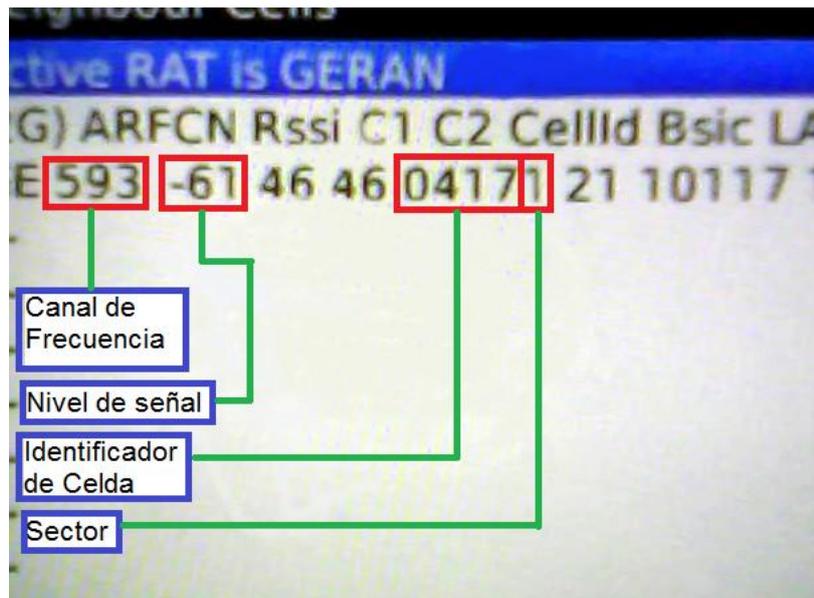


Figura 2.5 - Captura de pantalla en modo de prueba de campo del equipo de medida

2.2.2 Cantidad y longitud de muestreo

En un entorno de radiocomunicación convencional, se manifiestan diversos efectos mencionados a lo largo del capítulo I, como las reflexiones por múltiples caminos. Estos fenómenos se manifiestan en dimensiones espaciales comparables a la longitud de onda de la señal (Jakes, 1974). Para mitigar estos efectos, se procede a tomar una cantidad considerable de muestras en un mismo punto, a lo largo de un trayecto de varias longitudes de onda. En este aspecto, diversos autores recomiendan distintas dimensiones en cuanto a la distancia de recorrido del muestreo, así como también la cantidad de muestras necesarias para obtener un resultado estadísticamente significativo. Seidel (1992) recomienda una distancia de recorrido no menor a 20λ en forma longitudinal (p. 207-214), en cambio Rappaport (1989) sostiene que al desplazarse a lo largo de 6λ manteniendo un transmisor fijo, la unidad móvil obtiene resultados representativos (p. 40-48).

En su publicación, Turkmani (1991) considera que 22 muestras promediadas en un punto son suficientes para representar la potencia promedio de dicha localización (p. 578), en cambio Durgin (1998) realizó sus mediciones con un equipo más avanzado tomando 1024 muestras (p. 1485). Finalmente Gahleitner (1994), en su tesis doctoral, comprobó que entre 15 a 30 muestras son suficientes, por lo tanto se escogió un número de 25 muestras; adicionalmente sugiere que por razones de espacio, no siempre es posible medir a lo largo de 22λ , optando por las recomendaciones de Rappaport (6λ) (p. 30-35).

La distancia entre cada punto de muestra en el trayecto recorrido, es otro factor discutido por algunos autores. Gahleitner recomienda un espaciado de $\lambda/4$, en cambio Parsons (1992) estima suficiente un espaciado mayor a 0.38λ . Para 1,900 MHz se obtiene que la longitud de onda es de tan solo 15.79 cm, lo cual representa una distancia de recorrido de 0.94m para 6λ , y 3.42m para 22λ . En este aspecto, acatamos las observaciones de Rappaport y confirmadas por Gahleitner, optando por una distancia total de muestreo de 6λ , o aproximadamente 1m. Atendiendo algunas de las recomendaciones citadas, se realizó un proceso de muestreo de prueba, con el fin de establecer la distancia entre muestras y la cantidad de mediciones necesarias para resultados significativos. En los siguientes gráficos muestran los resultados obtenidos.

Resumen de prueba estadística				
Prueba No.	Número de puntos	Número de muestras por cada punto	Promedio (dBm)	Desviación (σ)
1	25	100	-59.57398916	-5.4133795
2	25	50	-59.56862745	-4.658601036
3	25	25	-59.56730769	-4.415275737
4	10	100	-59.357	-3.744271701
5	10	50	-59.77647059	-3.844348197
6	10	25	-60.21538462	-4.137566135

Tabla 2.3 - Resumen de pruebas de muestreo

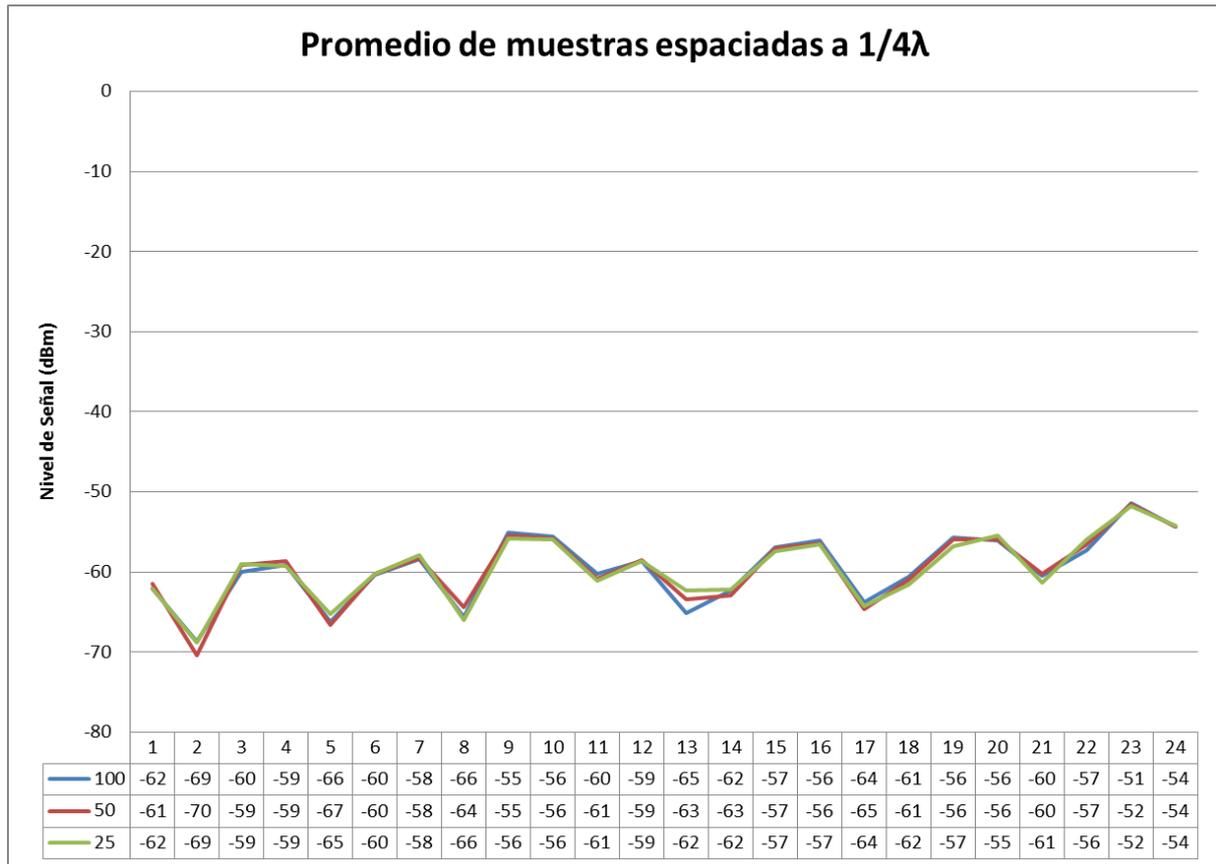


Grafico 2.1 – Muestras tomadas a $1/4 \lambda$ de separación

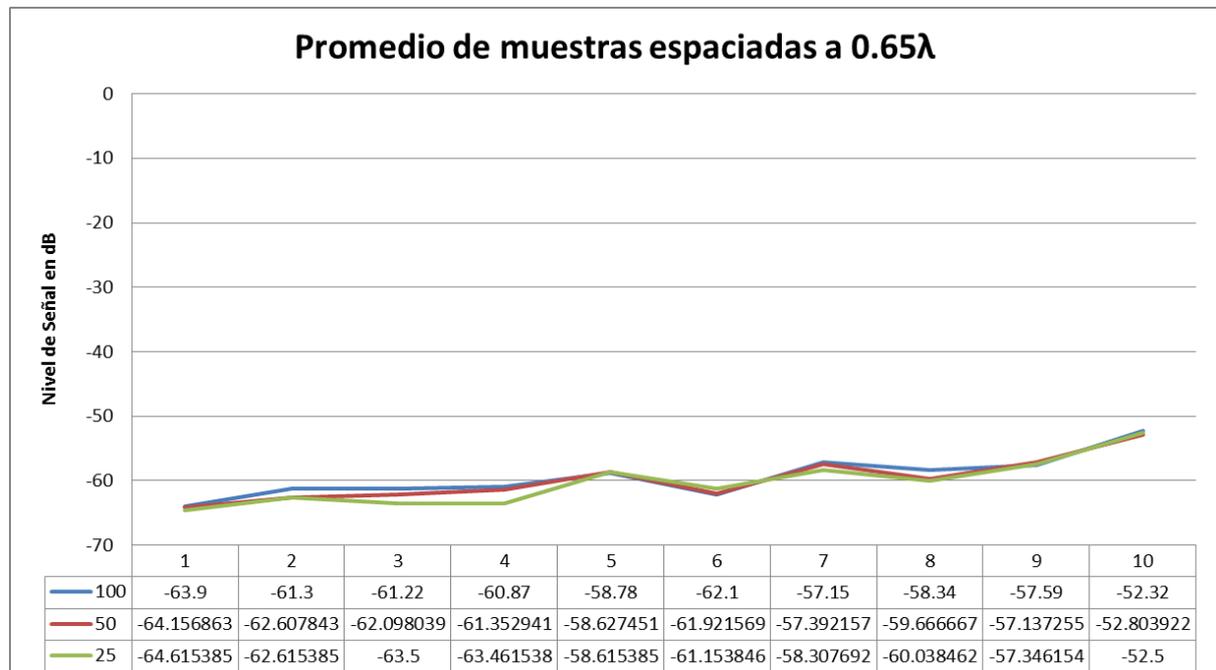


Grafico 2.2 – Muestras tomadas a 0.65λ de separación

Un resumen de las gráficas anteriores es mostrado en la tabla 2.3. La prueba 1 es la que presenta los resultados más representativos estadísticamente debido a su resolución. Se observa que la variación del promedio en la prueba 3 respecto a la prueba 1, es casi insignificante (0.0066 dB), contrario a las pruebas 4, 5 y 6, que presentan variaciones de 0.22 dB, 0.20 dB y 0.64 dB respectivamente. Por consiguiente, se concluye que con tan solo 25 muestras por punto, espaciadas a $\lambda/4$ (4 cm) a lo largo de un 1 metro es suficiente para representar el nivel de señal medio en un punto de muestreo.

Finalmente, el método de captura de datos descrito anteriormente, fue comparado con un muestreo de prueba realizado sobre un mismo punto geográfico utilizando un equipo profesional de medida de un proveedor de servicios de telefonía móvil. Los equipos se colocaron dentro de la capsula por separado y se procedió a la captura y comparación de los datos muestreados. Las capturas del equipo profesional (que consiste en un móvil reprogramado) fueron tomadas mediante un software especializado conectado a un ordenador que realiza una lectura de datos cada 0.5 segundo de la unidad móvil, almacenando estos para su posterior análisis en otros programas dedicados al estudio de la condición de la red de servicio en dicho punto. Bajo este proceso se tomaron 75 muestras. Seguido, el móvil utilizado en la investigación fue colocado en la capsula, procediendo a capturar los datos mediante el método descrito en la sección 2.2.1, que consiste en la captura visual de datos mediante secuencias fotográficas, bajo el cual se tomaron 25 muestras. Este proceso fue repetido tanto en condición de línea de vista directa entre la estación base y el móvil, como en ausencia de esta. El resultado de ambos puntos luego de realizar un promedio de datos se muestra en la tabla 2.4

Condición	Presencia de línea de vista		Ausencia de línea de vista	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
Utilizando el desarrollado en la presente investigación	-47.3661	0.4817	-52.52	0.50990195
Utilizando software profesional especializado	-46.92	0.86216781	-51.9131	1.1729
Diferencia	-0.4461		-0.6069	

Tabla 2.4 – Comparación de captura de datos en un mismo punto

Se observa que para condiciones de línea de vista, el promedio de los datos capturados con el método desarrollado en la investigación en contraste con los datos obtenidos con un software profesional varían tan solo 0.44 dB, mientras que para condiciones donde existe ausencia de línea de vista, la variación es de solo 0.6 dB. De lo anterior se concluye que el método presentado en la sección 2.2.1 es apto para tomar muestras estadísticamente representativas con un margen de error menor a los 0.6 dB.

2.2.3 Equipo transmisor

La unidad móvil recolecta medidas en relación a las estaciones bases circundantes cuyas potencias ejercen mayor influencia en el punto de recepción. La ubicación geográfica del transmisor es en un principio desconocida ya que en la misma área geográfica pueden existir varias estaciones de diferentes proveedores. En modo de prueba de campo, se puede determinar la localización de una estación base mediante un proceso de rastreo y triangulación. Inicialmente, se monitorea el código de identificación de la celda, sector y su nivel de señal, como se observó en la figura 2.5. Luego se procede a realizar un recorrido a lo largo de dos trayectorias ortogonales, determinando el extremo donde estas presentan menores niveles de perdida. En el proceso se observan las torres de las cuales se sospecha que establecen comunicación con el instrumento. A consecuencia, se procede a realizar

un recorrido circular tomando dichas estaciones como centro radial, como se muestra en la figura 2.6. Una estación típica posee al menos 3 sectores de transmisión, estos son presentados en la lista de celdas vecinas en la unidad móvil. Al proceder de esta forma (rodeando la torre), si el móvil se mantiene en comunicación con la misma estación y pasa a comunicarse con los demás sectores según se recorre su perímetro, queda confirmada la ubicación de la estación base de interés. En la figura 2.7 se muestra una de las estaciones base medidas, rastreadas por este procedimiento, marcado en la imagen.

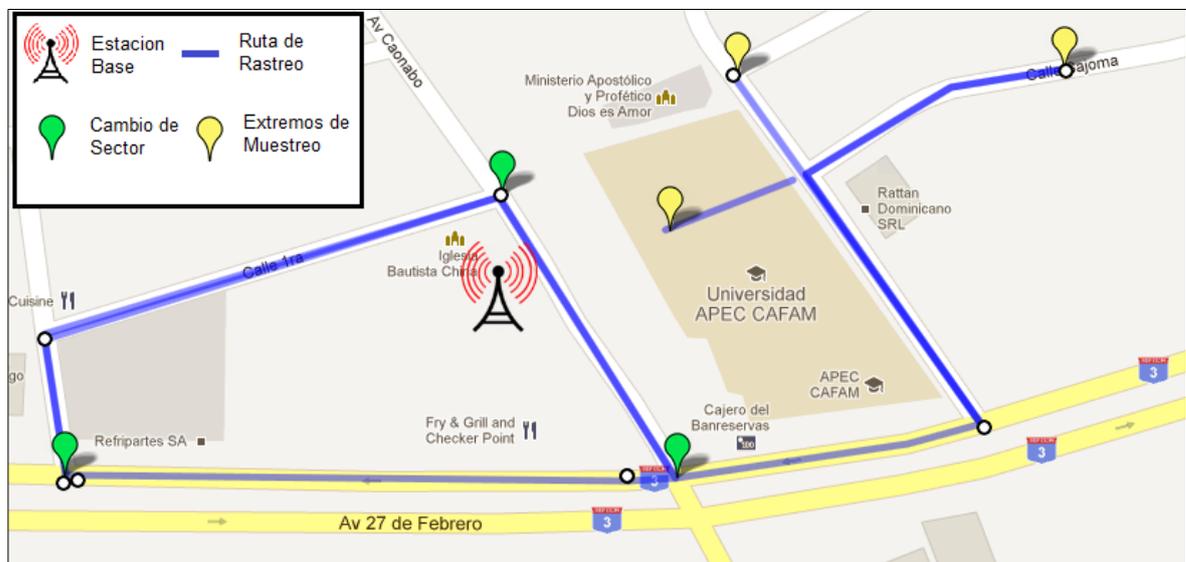


Figura 2.6 - Triangulación de celda 417



Figura 2.7 – Celda 417

2.3 Determinación de la atenuación por penetración

La atenuación por penetración de un material se define, para condiciones de línea de vista como:

- *Diferencia entre el nivel de señal promedio medido en el interior de la edificación y el promedio medido adyacente a dicho punto donde la obstrucción no está presente (Rice, 1958)*
- *Diferencia entre el nivel de señal promedio medido inmediatamente antes y después del obstáculo de interés (Gahleitner, 1994)*

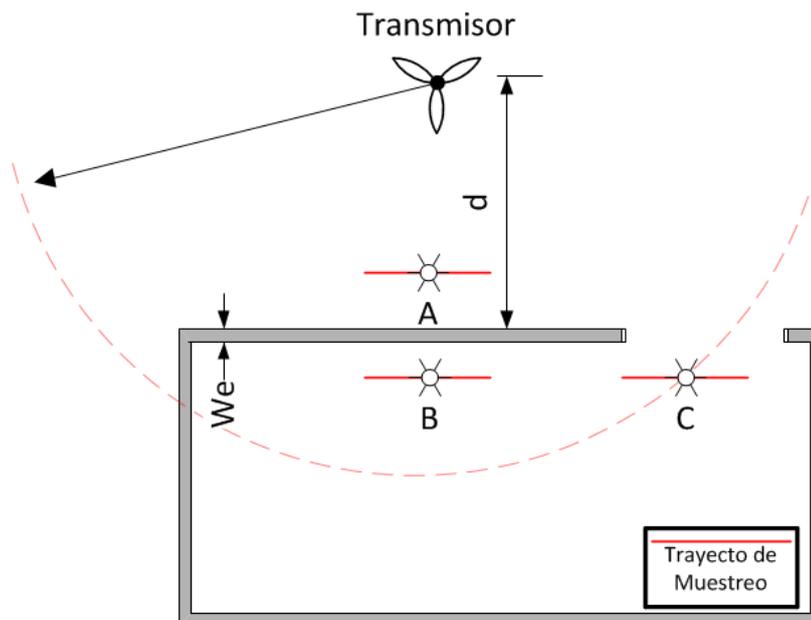


Figura 2.8 – Diferentes métodos de medida de la atenuación de una pared

En la figura 2.8 se observa un ejemplo de ambos métodos. Se observa que en el punto B se recibe una onda electromagnética procedente del transmisor, luego de atravesar un material dieléctrico. Para obtener la atenuación por penetración debido a este obstáculo, se procede a sustraer al nivel de señal promedio medido a lo largo del punto A o C, el nivel promedio a lo largo del punto B. Estas medidas se realizan usando el procedimiento detallado en la sección 2.2.2.

Obtener un promedio de acuerdo a los parámetros establecidos en la sección 2.2.2 no siempre es factible para determinar el nivel de atenuación usando el método definido por Rice (C – B), puesto que en muchas ocasiones las dimensiones de dichas aperturas son inferiores o cercanas a 6λ (aproximadamente un metro) o, en su contraparte, no permite la realización de un muestreo confiable debido a su ubicación. En consecuencia, se procedió a determinar la atenuación por material mediante la técnica descrita por Gahleitner (A – B).

La figura 2.9 muestra en resumen, la metodología usada para la determinación de la pérdida por penetración, así mismo, se observan las distancias relevantes en un proceso de muestreo típico de la presente investigación, como la longitud de recorrido y la distancia entre cada muestra. Algunos autores recomiendan abstraer de dicho factor una atenuación equivalente a las pérdidas de propagación de espacio libre proporcional a la distancia de separación entre los puntos de medida y la pared de interés (d_t), con el fin de obtener la pérdida absoluta de la obstrucción. No obstante, para distancias típicas de separación de 44 cm como las que se obtuvieron en la presente investigación, estas demostraron ser despreciables ya que la diferencia entre la pérdida de propagación para una variación de 44 cm en la distancia de separación entre dos puntos en diversos modelos (espacio libre, COST 231) es inferior a 0.05 dB, por lo cual no se tomó en consideración en los resultados presentados en los capítulos próximos.

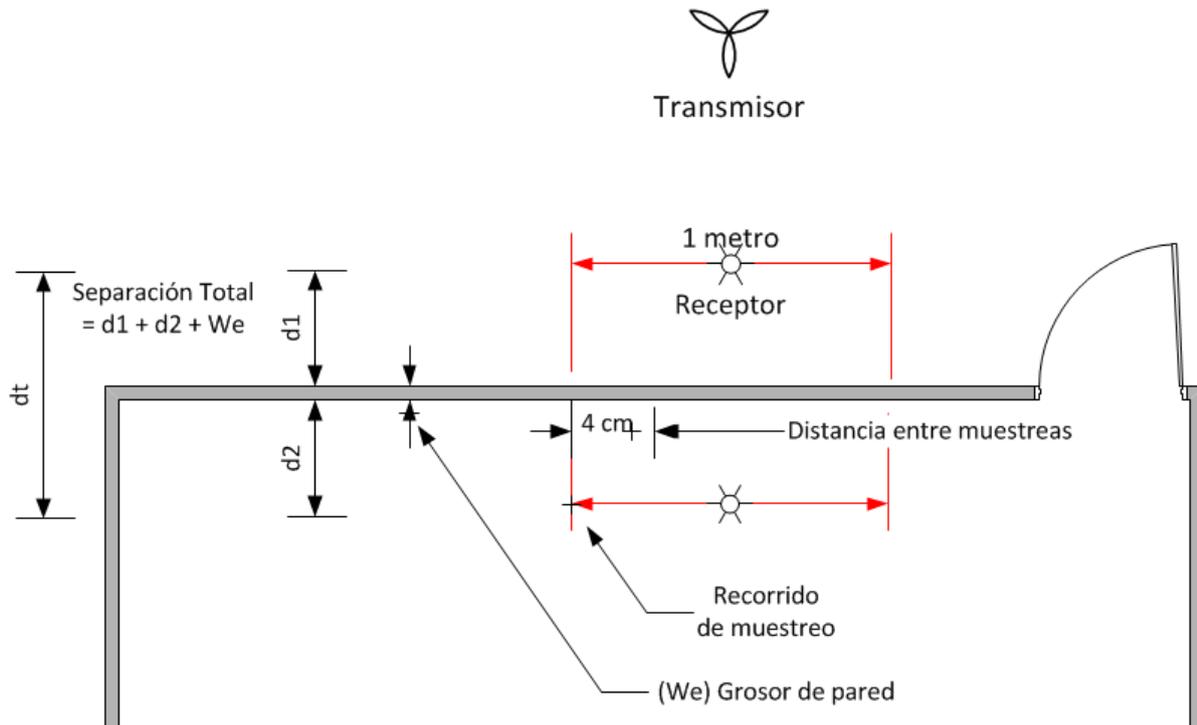


Figura 2.9 - Proceso de muestreo por pared

2.4 Descripción y selección de los espacios muestrales

Para la selección de los espacios muestrales, se tomaron en cuenta las siguientes condiciones:

- Existencia de línea de vista entre el transmisor y la pared externa del material de interés
- Paredes externas de block o concreto armado
- Facilidad de acceso
- Geometría y arquitectura regular

Por tales razones fue escogido como entorno de muestreo el campus II, Fernando Arturo de Meriño de la universidad APEC (CAFAM), debido a su facilidad de acceso, estructura regular, paredes de block y ubicación estratégica en relación a tres transmisores a la frecuencia de interés en la presente investigación (1,900 MHz) , los cuales iluminan con línea de vista directa varias de las paredes externas de las aulas muestreadas (ver figura 2.10). Estos entornos están compuestos por paredes de block recubiertos con concreto y una pequeña lámina de pintura. Los espacios compuestos de ventanas son relativamente pequeños para las aulas del edificio 4, en cambio que para los laboratorios del edificio 2, las paredes iluminadas no poseen ventanas puesto que estas aulas son climatizadas mediante aire acondicionado. Otras paredes poseen obstrucción parcial consistente de ventanas metalizadas con aperturas como se observó en el edificio 3. En tales puntos de muestreo estas se establecieron totalmente abiertas, de forma que la atenuación presente debido a estas ventanas en los puntos de muestreados sea lo menos influyente y constante posible. Dicha pérdida al estar presente en ambas partes de la ecuación, no afectan los resultados de la investigación para tales ubicaciones.

Otra jornada de muestreo fue realizada en el tercer piso del edificio del estudio de televisión de Súper Canal 33, cuya pared externa sostiene línea de vista con el transmisor 1 y 2. En este, se tomaron muestras a fines de determinar las pérdidas del concreto reforzado, como se observara en el capítulo III.

En los siguientes planos se observan en detalle el lugar y las dimensiones donde se realizaron los recorridos de muestreo en el campus de la universidad APEC. La figura 2.10 muestra una vista general de la ubicación de cada transmisor y puntos de muestreo, mientras que las figuras subsiguientes se observan en detalle las dimensiones de cada lugar donde fue posible tomar las dimensiones físicas.

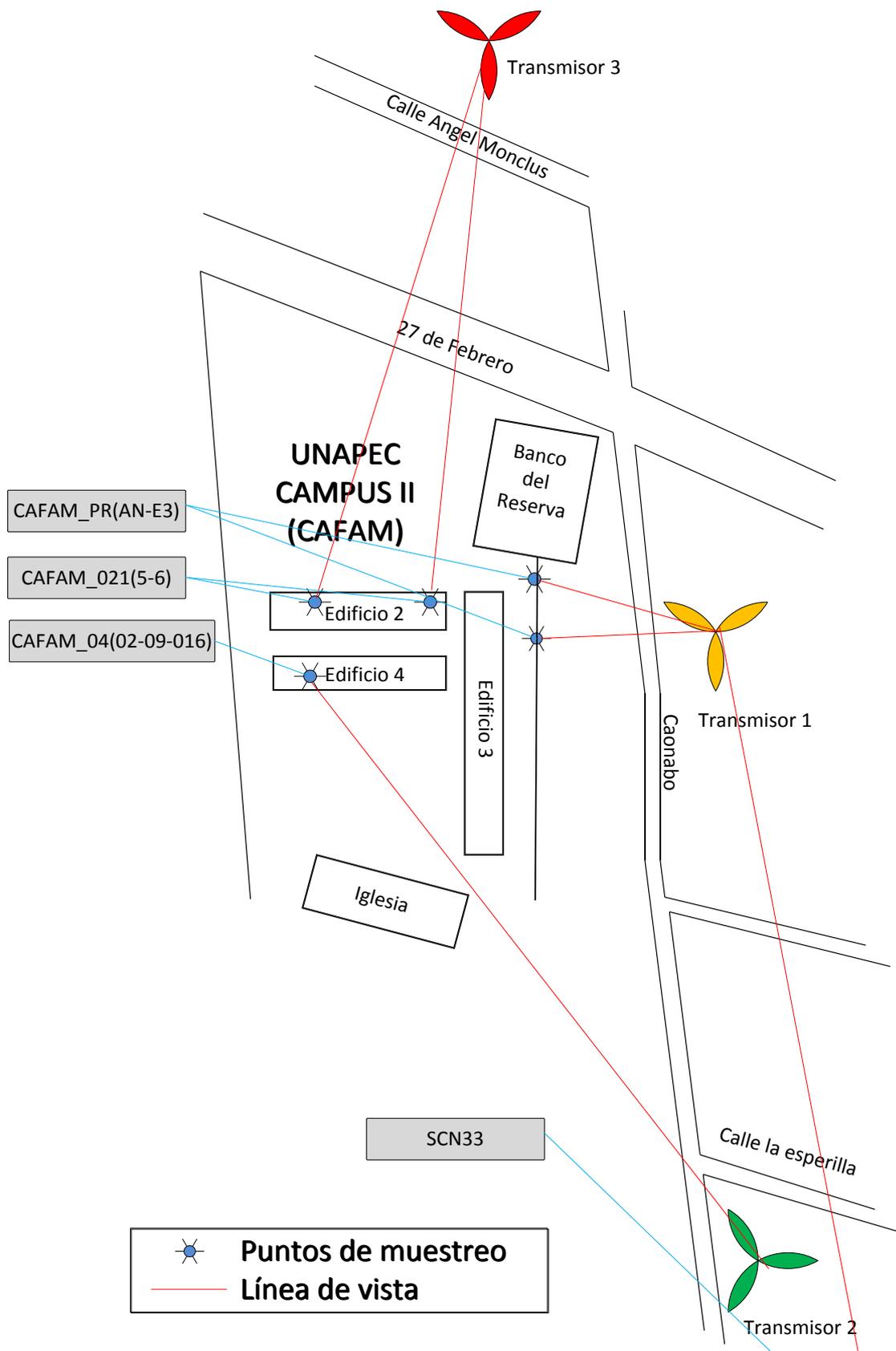


Figura 2.10 – Ubicación de transmisores y puntos de muestreo

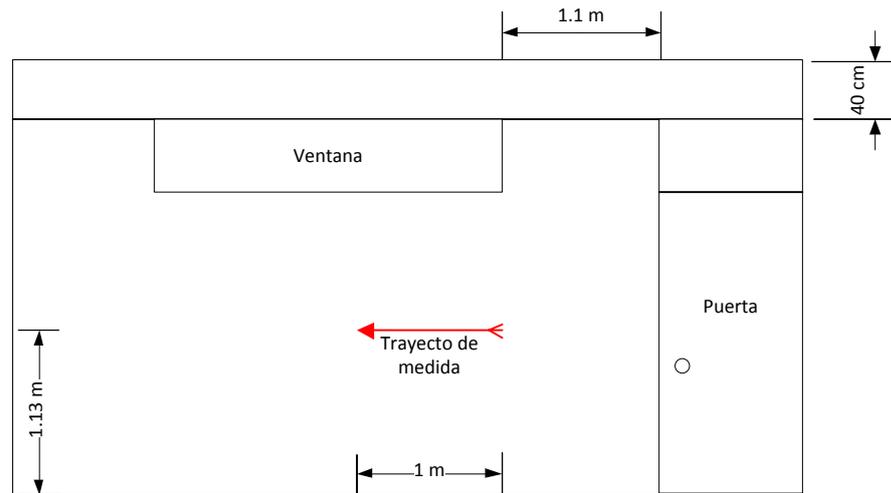


Figura 2.11 - Aulas 04(02-09-16) UNAPEC Campus II Edificio IV - Vista interna hacia la puerta

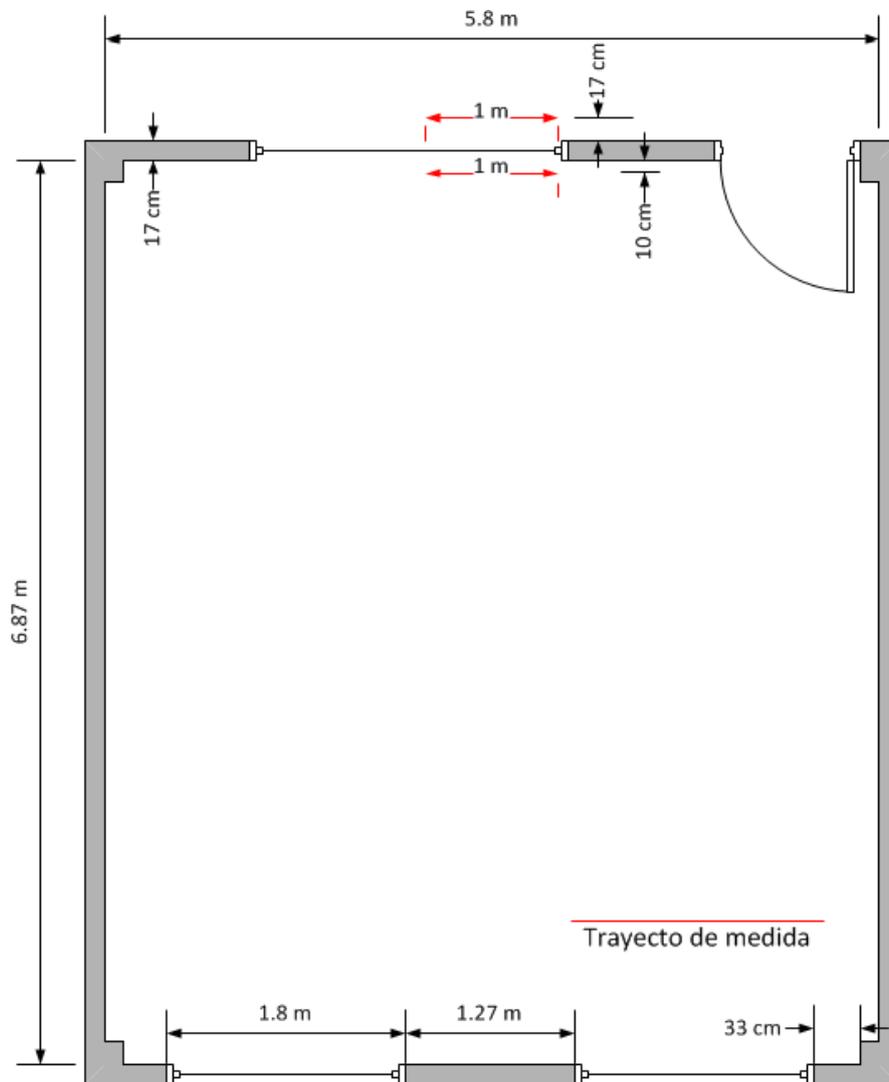


Figura 2.12 - Aulas 04(02-09-16) UNAPEC Campus II Edificio IV - Vista superior

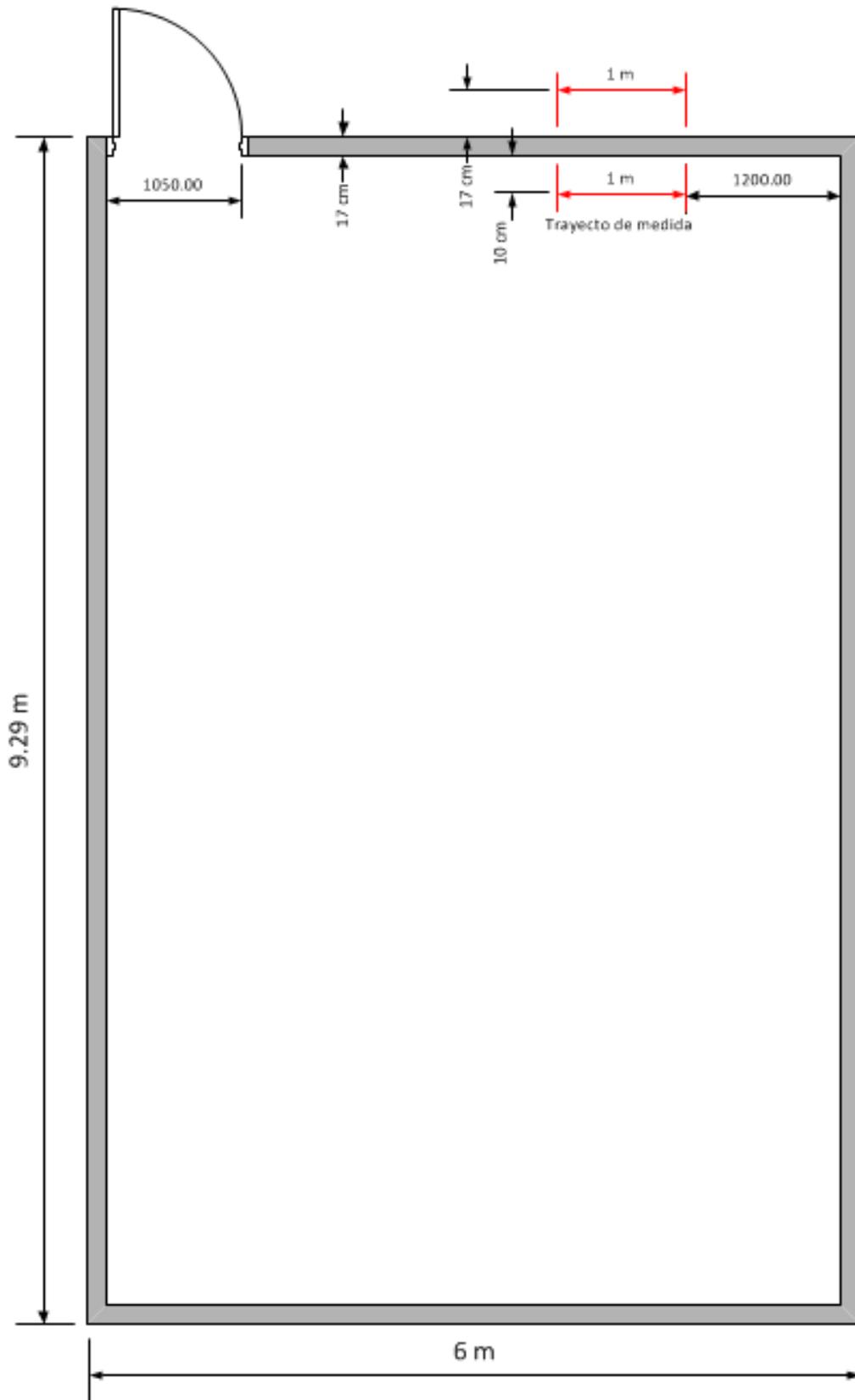


Figura 2.13 - Aulas 0215 - 0216 UNAPEC Campus II, Edificio II – Vista superior

CAPÍTULO III
PERDIDAS POR PENETRACIÓN A 1,900 MHZ

En la República Dominicana “*Las bandas 1,850-1,990 MHz están atribuidas al servicio móvil, para aplicaciones de sistemas celulares de telecomunicaciones digitales (PCS)*” (INDOTEL, 2002, p. 54). Este servicio presentó al 30 de junio del 2011 una tele densidad de 91.9% para un total de 8, 620,897 líneas móviles, lo cual en comparación con inicios del año 2009 (80.1%) presenta un crecimiento de 11.8% en tan solo 2 años (INDOTEL, 2011).

Los servicios móviles tienden, por naturaleza de la tecnología utilizada (ver anexo A), a un crecimiento en el número de las estaciones radiales necesarias para cubrir la creciente demanda del mercado en un mismo espacio geográfico, para lo cual será cada vez más necesario un conocimiento preciso del entorno en que se desarrollara a fines de garantizar la calidad del servicio. Dicho servicio se recibe hoy día, como se ha mencionado, con mayor frecuencia en el interior de edificaciones.

En el capítulo anterior se describió, basado en extensas consultas bibliográficas y en comprobaciones experimentales, el método utilizado en la presente investigación a fines de obtener datos estadísticos confiables, proceso detallado en la sección 2.2. Adicionalmente se exploraron diversos materiales de construcción, seleccionando finalmente el block de mampostería, por las razones que se establecieron en la sección 2.1.

Los resultados de la jornada de muestreo en los espacios selectos descritos en la sección 2.4, utilizando la técnica desarrollada en la sección 2.3, son analizados en las siguientes páginas. Posteriormente estos datos fueron introducidos en algunos modelos de propagación detallados en la sección 1.3.5 a fines evaluar la diferencia entre el nivel de señal estimado usando los datos obtenidos en la presente investigación, presentados en este capítulo, en contraste con los datos recomendados en las literaturas citadas.

3.1 Antecedentes de medidas de penetración de señal

Diversos estudios han sido realizados sobre a las pérdidas por penetración de material. Entre estos, el reporte del instituto nacional de estándares y tecnología de Estados Unidos de América (NIST por sus siglas en inglés) sobre la atenuación de señal electromagnética en materiales de construcción, se encuentra entre los más destacados. En este (NISTIR 6055) se reportan atenuaciones de una diversa gama de materiales típicos de uso en los Estados Unidos (madera, ladrillo, block, concreto, plywood, entre otros), en un barrido de frecuencia entre los 500 MHz a los 18 GHz (Stone *et al*, 1997). La metodología usada consistió en medir la diferencia del nivel de señal en un trayecto directo desde el transmisor al receptor (calibrado a la misma altura en un ambiente controlado) y el nivel de la señal opacada por el material de interés en medio del trayecto, como se observa en la figura 3.1

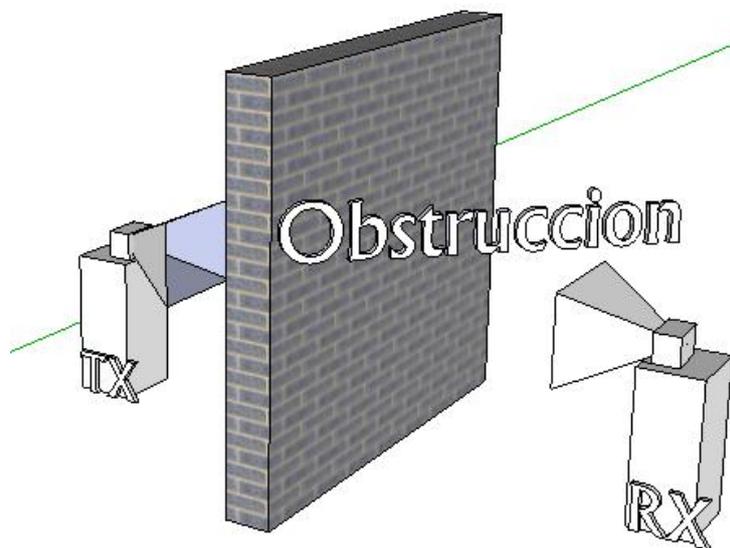


Figura 3.1 – Experimento del NISTIR 6055

Los resultados de estos experimentos para los materiales de interés a la frecuencia de 1,900 MHz se muestran en la tabla 3.1:

Atenuaciones reportadas por NISTIR 6055 a 1900 MHz				
Material	Atenuación (dB)	Desviación (dB)	Grosor (cm)	Comentario
Block de Mampostería	11	0.1	20.3	
	18	0.2	40.6	
	30	0.5	61	
Concreto	15.55	0.1375	10.2	Promedios de 8 muestras de paredes de concreto con diversas relaciones agua/cemento
	30.775	0.1875	20.3	
	37.875	0.375	30.5	
Concreto Reforzado	30.5	0.4	20.3	Con cuadrícula 14x14 cm de varillas de acero de 1.9 cm de diámetro
	35.5	0.5	20.3	Con cuadrícula 7x7 cm de varillas de acero de 1.9 cm de diámetro

Tabla 3.1 – Resultados de atenuaciones de interés medidas por el NISTIR 6055

En esta tabla se observan atenuaciones detalladas para distintos grosores del material, no obstante el citado estudio no toma en cuenta las pérdidas para el block de mampostería de 17 cm de espesor, el cual es usado frecuentemente en las paredes que recubren el exterior de los edificios en la ciudad de Santo Domingo, por lo que para fines de aportación y comparación, este material fue considerado en la presente investigación, como se analizara en las siguientes secciones.

Otros datos usados con regularidad son los recomendados por COST 231. En este, los resultados presentados fueron obtenidos a partir de mediciones de campo en Europa. A diferencia del NISTIR 6055, el reporte de la comisión engloba en sus datos las pérdidas del concreto sin entrar en detalles sobre su grosor. Dichas atenuaciones recomendadas son presentadas en la tabla 3.2

COST 231, 1,900 MHz		
Material	Atenuación (dB)	Comentario
Block o Concreto	7	Pared con ventanas
	10-20	Pared sin ventanas

Tabla 3.2 – Recomendaciones del COST 231

3.2 Presentación y análisis de resultados

Los datos presentados en la tabla 3.3 son el resultado de las medidas obtenidas en los espacios muestrales mencionados en la sección 2.4, luego de la jornada de captura de datos basado en el método establecido en la sección 2.3

Resumen de Muestras											
Codigo Muestra	Material	Grosor (cm)	Piso	Altura (m)	Distancia del Transmisor (m)	Medida frontal		Medida trasera		Atenuación	
						Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Valor	Desviación
CAFAM_0402	Block de Manposteria	17	1	1.13	128	-64.4752	4.4879	-76.989	5.1577	12.514	6.8384
CAFAM_0409		17	2	3.4	128	-58.9184	4.696	-68.422	5.3267	9.504	7.2209
CAFAM_0416		17	3	6.62	128	-55.4112	4.1778	-65.15	5.0223	9.7392	6.587
CAFAM_0215		17	3	8.3	327	-38.4208	2.7421	-47.774	6.2827	9.3536	6.7556
CAFAM_0216		17	3	8.3	327	-38.1516	2.2699	-47.331	4.9058	9.1796	5.6194
CAFAM_PRAN		17	1	1.13	73	-43.5316	3.1235	-57.565	3.5854	14.034	5.6896
CAFAM_PRE3		17	1	1.13	73	-42.9392	4.0074	-56.682	3.9267	13.742	3.6959
SCN33	Concreto Armado	23	3	8.3	420	-61.31	5.2465	-74.043	3.6179	12.733	7.4125
Altura promedio por piso (m)				2.745	Atenuación Promedio Block 17 cm (dB)					13.43	5.407967
					Ganancia por piso (dB/piso)					2.0029	
					Ganancia por altura (dB/m)					0.729653916	

Tabla 3.3 – Resumen de muestras y atenuaciones obtenidas

Se observa que a medida que la altura aumenta, las pérdidas por penetración experimentan una disminución considerable, aun cuando, tanto la metodología usada como la muestra medida no fueron alteradas en ninguno de los niveles. Este fenómeno se debe a que en los pisos más bajos del edificio, la acumulación de obstáculos (vehículos, postes, letreros, otras edificaciones) inducen una mayor atenuación y reducen el nivel de penetración de la señal debido a los efectos de refracción, reflexión, dispersión y absorción descritos en el capítulo I, en cambio, en los pisos más altos existe mayor línea de vista, causando un incremento en la señal incidente en la pared exterior del edificio (Rappaport, 2002, p. 132). Lo anterior se traduce en una disminución de los efectos adversos citados, que causan

interferencia destructiva producto de reflexiones por múltiples caminos. Este fenómeno coincide con los resultados expuestos por autores como Walker (1983), Toledo (1990), Turkmani (1991) y Gahleitner (1994), quienes denominaron este efecto como *ganancia por piso* y reportan en sus publicaciones incrementos entre 1.2 – 2.4 dB/piso. Debido al mencionado efecto, en ambientes no controlados, los investigadores coinciden en definir la pérdida por penetración de una pared de determinado material, como el resultado de la diferencia entre la potencia promedio en el exterior de la pared iluminado por el transmisor, y la potencia promedio en el interior a la altura del primer piso.

Partiendo de las conclusiones mencionadas, la atenuación obtenida en la presente investigación para el block de 17 cm recubierto con una pequeña lámina de concreto resultó en 13.43 dB. Al substrair de este dato el cociente del nivel promedio muestreado en pisos más altos sobre la altura promedio de cada piso, la ganancia por nivel queda determinada, resultando en 2 dB/piso, cuyo valor coincide en los rangos de ganancias comentados en el párrafo anterior. Similarmente, la ganancia debida a la altura en metros específica del móvil, se obtiene del cociente entre la ganancia en dB/piso y la altura promedio de cada nivel (2.75 m), dando como resultado una ganancia de 0.72 dB/m. Estos datos fueron determinados tomando en consideración las muestras tomadas en el edificio 4 del campus II de la Universidad APEC, ya que en estas fueron capturadas en un mismo punto a distintos niveles de altura manteniendo la distancia desde el transmisor fija.

3.3 Comparación de los resultados obtenidos

3.3.1 Block de mampostería

Atenuaciones para Block de mampostería a 1,900 MHz					
Nota: * Pared con ventanas ** Pared Sin ventanas	Autor de literatura				
	NISTIR 6055		COST 231		
	Atenuación (dB)	Grosor (cm)	Atenuación (dB)		Grosor (cm)
	11	20.3	7*	10 a 20**	NO especificado
Medido en investigación	13.43	17	13.43	13.43	17
Diferencia	2.43	3.3	6.43	3.43 a (-6.47)	-

Tabla 3.4 – comparación de atenuaciones para Block de mampostería

En la tabla 3.4 se observa un resumen de las atenuaciones reportadas por diversos autores, y las obtenidas en la presente investigación a fines de análisis y comparación para el block de mampostería.

Las literaturas y estudios consultados no abundan en detalles sobre la atenuación para este material, dando lugar a interpretaciones ambiguas. De estos, solo el NISTIR 6055 reporta pérdidas para bloques de mampostería a partir de los 23 cm de grosor, mientras que el COST 231, aborda las mismas pérdidas indistintamente del block o el concreto. Estos son mostrados a fines de contraste.

No obstante y a pesar de la diferencia en las dimensiones, al analizar ambos materiales comparados, la atenuación obtenida en la presente investigación y la recomendada por la literatura, se observa que para una diferencia de 3.3 cm de grosor, las pérdidas del material local superan en 2.43 dB a las del bloque extranjero, lo cual indica una clara diferencia en la relación atenuación/grosor que provocan los materiales locales respecto los demás. Adicionalmente, esto coincide con lo analizado en la sección 2.1, donde según los autores consultados, los materiales fabricados en climas cálidos poseen una mayor densidad a fines de proteger el interior de las edificaciones de las fluctuaciones térmicas y las condiciones de humedad.

3.3.2 Concreto

Atenuaciones para Concreto a 1,900 MHz							
Nota: * Pared con ventanas ** Pared Sin ventanas	Autor						
	NISTIR 6055		Gahleitner		COST 231		
	Atenuación (dB)	Grosor (cm)	Atenuación (dB)	Grosor (cm)	Atenuación (dB)		Grosor (cm)
	30	20.3	17.6	NO especificado	7*	10 a 20**	NO especificado
Medido en investigación	17.84	23	17.84	23	17.84	17.84	23
Diferencia	12.16	2.7	0.24	-	10.84	7.84 a (-2.16)	-

Tabla 3.5 – comparación de atenuaciones para Block de mampostería

En cuanto al concreto, COST 231 no especifica las dimensiones de los materiales que reportan, distinguiendo solamente la existencia o no de ventanas en las paredes, en cuyo caso, la atenuación recomendada oscila entre 10 a 20 dB, lo cual dificulta la aplicación y comparación de estos datos.

Se procedió a realizar un estudio inicial sobre el material citado, a pesar de que este como tal no es el material principal objeto de la investigación. Dicho resultado es mostrado en la tabla 3.3. Los datos obtenidos en la investigación presente, se tomaron a una altura de 8.3 metros sobre el suelo, obteniendo como resultado 12.33 dB, el cual, como se analizó previamente, es afectado por una ganancia debido a la altura de recepción, por lo que a este dato se le agrego una perdida adicional de 5.51 dB como factor de corrección sobre la altura, resultando finalmente en una atenuación de 17.84 dB para paredes de concreto de 23 cm.

Nuevamente, al comparar este resultado con los reportados por el NISTIR 6055, y a pesar de la diferencia en las dimensiones de 2.7 cm de grosor, se observa un margen de 12.16 dB de discrepancia, correspondiente a los materiales muestreados en el reporte mencionado.

Una sola muestra no es suficiente para obtener resultados concluyentes, contrario al caso analizado anteriormente. No obstante lo anterior sugiere que esta simple comparación, indica que estos materiales deben ser tomados en cuenta y evaluados a fondo en futuras investigaciones, a fin de ofrecer resultados más

concluyentes, ya que en estos se pueden encontrar otra diferencia significativa entre la atenuación recomendada en las literaturas, y las pérdidas reales en los materiales de nuestra realidad local.

3.3.3 Ganancia por altura

Comparación de ganancia por altura			
	Obtenida en la presente investigación	Recomendada por COST 231	Recomendada por Gahleitner
Ganancia por piso (dB/piso)	2	1.5 - 2	
Ganancia por altura (dB/m)	0.7296	1.1 - 1.6	1.1

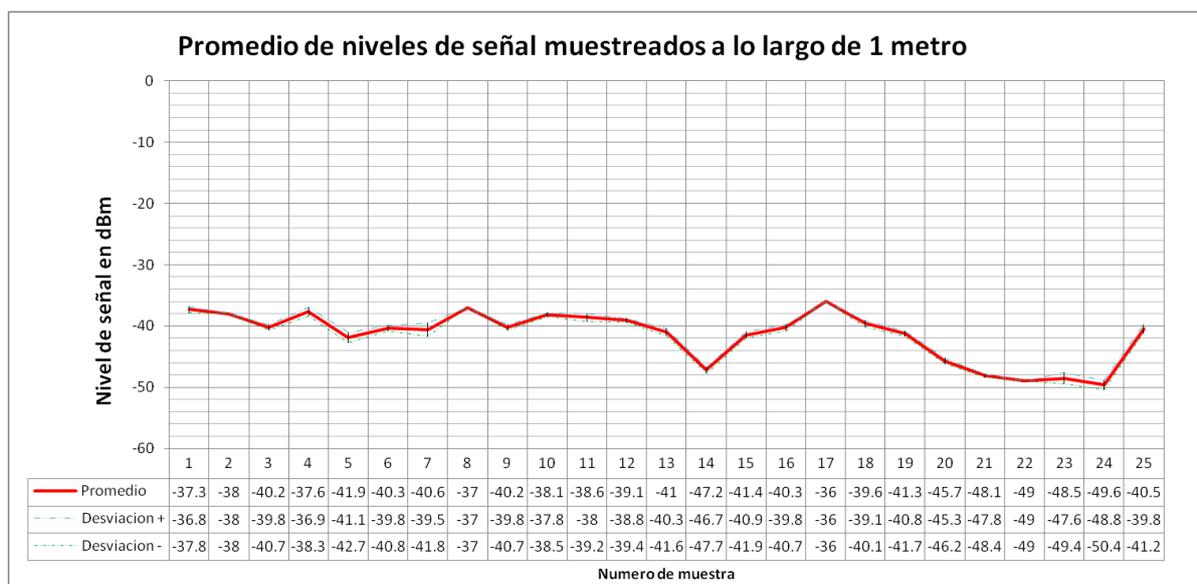
Tabla 3.5 – comparación de ganancia por altura/piso

Una comparación de las ganancias por altura reportados por otros autores y los obtenidos en la investigación, son mostrados en la tabla 3.5. En este ámbito, la ganancia por piso obtenida en la investigación presente, está dentro del límite superior recomendado por COST231, en cambio, la ganancia por altura en la presente investigación, muestra una ligera diferencia de 0.37 dB por debajo en relación a lo recomendado tanto por COST 231 como por Gahleitner.

Esta diferencia puede explicarse debido a que la variación de alturas promedio de cada piso en los espacios muestreados por cada autor extranjero no es reportada y por tanto su rango de aceptación para su aplicación es desconocido.

3.4 Aplicación de los resultados en modelos de propagación

A fines de comprobar la relevancia de los resultados obtenidos en comparación con los reportados o recomendados por los estudios citados, se realizó un recorrido de prueba en ambas condiciones de propagación (con línea de vista y sin línea de vista) en dos aulas del campus II de la Universidad APEC, manteniendo el dispositivo móvil fijo en el transmisor 3 (ver extracto de figura 2.10 más abajo), en la banda de 1,900 MHz. Durante la prueba, se mantuvo una altura fija sobre el suelo en ambas aulas. Para determinar la distancia entre puntos de muestras, se procedió de manera similar al experimento realizado en la sección 2.2.2, con una longitud de 4 cm entre cada punto a lo largo de un metro, esta vez alejando la unidad receptora longitudinalmente del transmisor. El resultado es mostrado en la gráfica 3.1



Gráfica 3.1 – Resultado de prueba de muestreo longitudinal a lo largo de 1 metro

Se observa que la linealidad de los datos se mantiene con la distancia, por lo que, luego de realizar un análisis del promedio total de los niveles muestreados en el recorrido versus el promedio de muestras escogidas en diferentes puntos espaciados a distancias iguales, se concluyó que una distancia longitudinal de 40 cm entre muestras mantiene resultados satisfactorios.



Figura 2.10 – Extracto indicando lugar de recorrido de muestreo y el receptor

Una vez establecida la variación en el método de muestreo para la prueba, se procedió a realizar un recorrido longitudinal atravesando ambas aulas, destacado por la línea roja en las siguientes figuras. Para el aula 0215 (figura 3.2), una condición de línea de vista (LOS) entre la pared externa y el transmisor se mantuvo, en cambio, para el aula 418, una condición de ausencia de línea de vista (NLOS) domina las ondas incidentes, donde existe una separación de 4.3 m entre los límites de ambas edificaciones (figura 3.3).

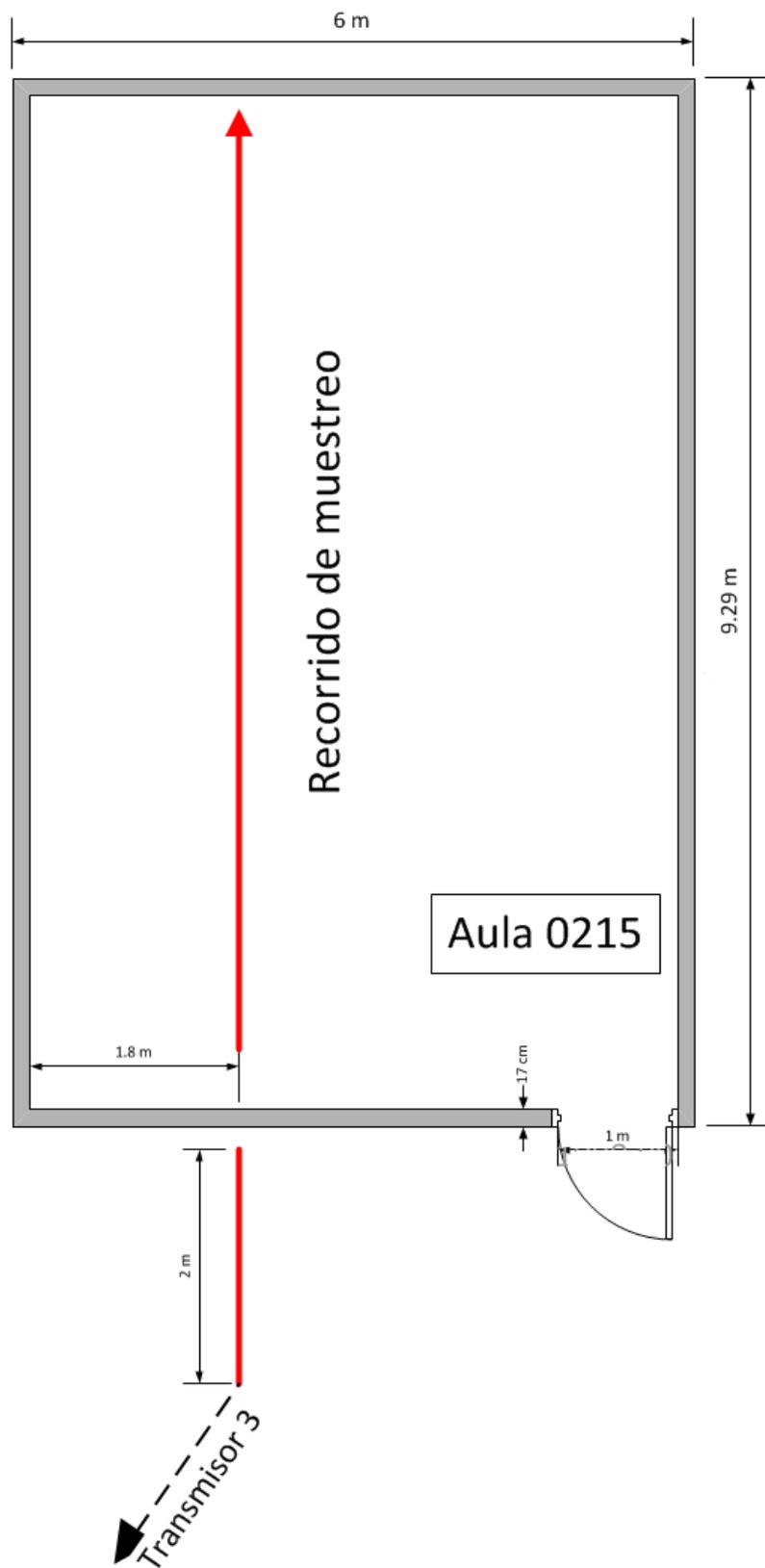


Figura 3.2 – Recorrido de prueba en aula 0215 para condición LOS

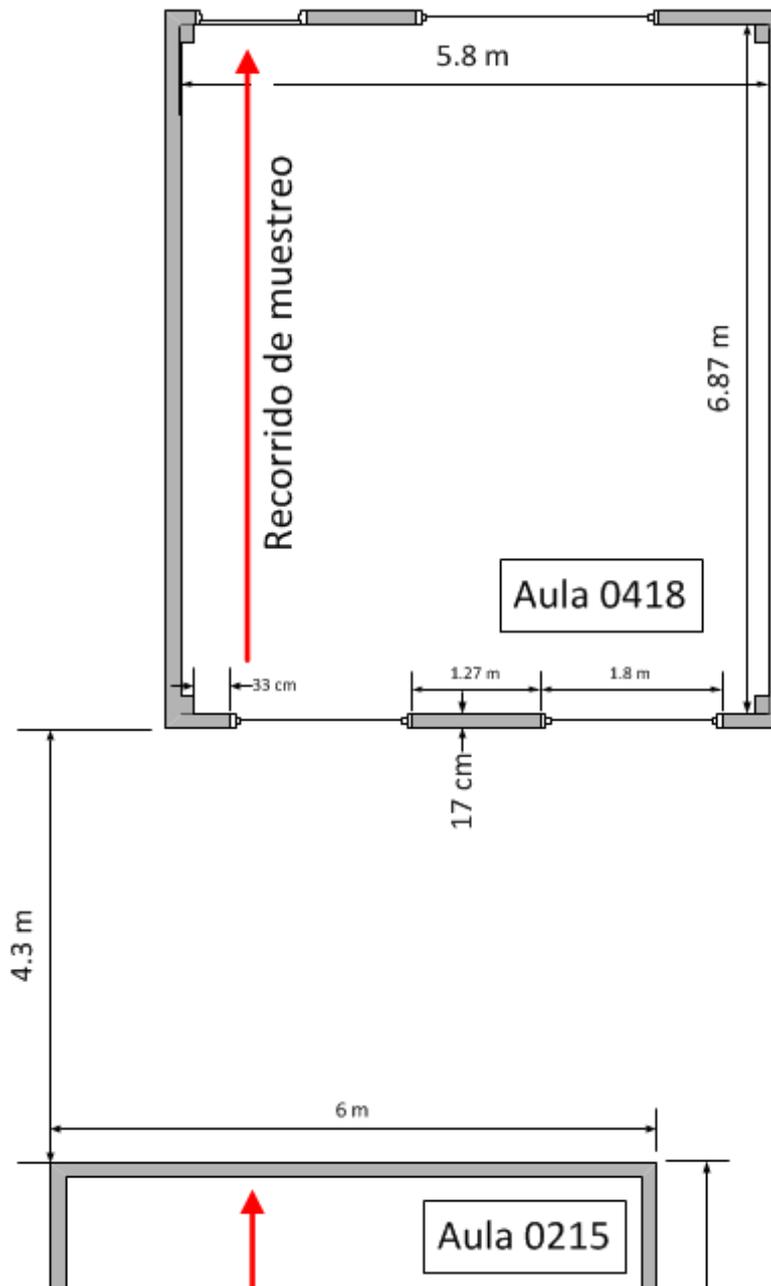


Figura 3.3 – Recorrido de prueba en aula 0418 para condición NLOS

Seguido, los datos medidos en la presente investigación y los recomendados en la literatura, expuestos en la sección 3.3 fueron introducidos en algunos de los modelos citados en la sección 1.3.5. Para el aula 0215, los modelos en condiciones de línea de vista fueron aplicados, para lo cual las ecuaciones 1.7 y 1.21 correspondientes a los modelos de COST 231 y Gahleitner respectivamente fueron implementados, las cuales recopilamos a continuación.

COST 231 - LOS

$$L(dB) = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(S + d) + W_e + W_{G_e} \cdot \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2 + \max(\Gamma_1, \Gamma_2)$$

$$\Gamma_1 = W_i \cdot p$$

$$\Gamma_2 = \alpha \cdot (d - 2) \cdot \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2$$
(1.17)

GAHLEITNER - LOS

$$P_E = P_A - \sum_{m=1}^M n_m \cdot w_m$$
(1.21)

Para el modelo de Gahleitner, el parámetro PA, se determina mediante el promedio del nivel de señal a lo largo de la pared exterior iluminada por el transmisor, por lo que se procedió a realizar un recorrido de prueba en las afueras del aula 0215, donde se mantuvo línea de vista con el transmisor 3. Esto dio como resultado un nivel medio de -38.94 dBm.

A consecuencia, se obtiene de manera inversa, atendiendo a las condiciones recomendadas por COST 231, la potencia de transmisión de la estación base, partiendo de la distancia de separación y la ecuación de las pérdidas de espacio libre en la ecuación 1.12

$$L = 32.44 + 20 \log d + 20 \log f$$
(1.12)

En esta ecuación, para una distancia de 322 metros y una frecuencia de 1,900 MHz, se obtiene una pérdida de trayectoria de 88.13 dB, para lo cual, al añadirlo al nivel medido (PA), se obtiene una potencia de transmisión de 49.18 dBm, del cual se obtendrá el nivel de señal esperado al substrair las perdías calculadas con ambos modelos presentados. Un resumen de los datos introducidos para los modelos aplicados a esta condición se observa en la tabla 3.6. El resultado de esas simulaciones, en contraste con los niveles muestreados dentro del aula 0215 es presentado en el grafico 3.2

Datos introducidos en modelos para condición de Línea de Vista		
Variable	Valor	
Modelo COST 231		
f (GHz)	1.9	
TX Power (dB)	49	
α (dB/m)	0.6	
Wi (dB)	0	
p	0	
S (m)	327	
d (m)	0.4 - 8	
Wge (dB)	20	
D (m)	322	
Modelo Gahleitner		
PA (dBm)	-38.94	
nm	1	
Atenuación por pared para Ambos modelos		
Variables	Valor recomendado en la literatura	Valor obtenido en la Investigación
Wm & We (dB)	10	13.43

Tabla 3.6 – Resumen de datos introducidos en modelos de propagación para condición LOS

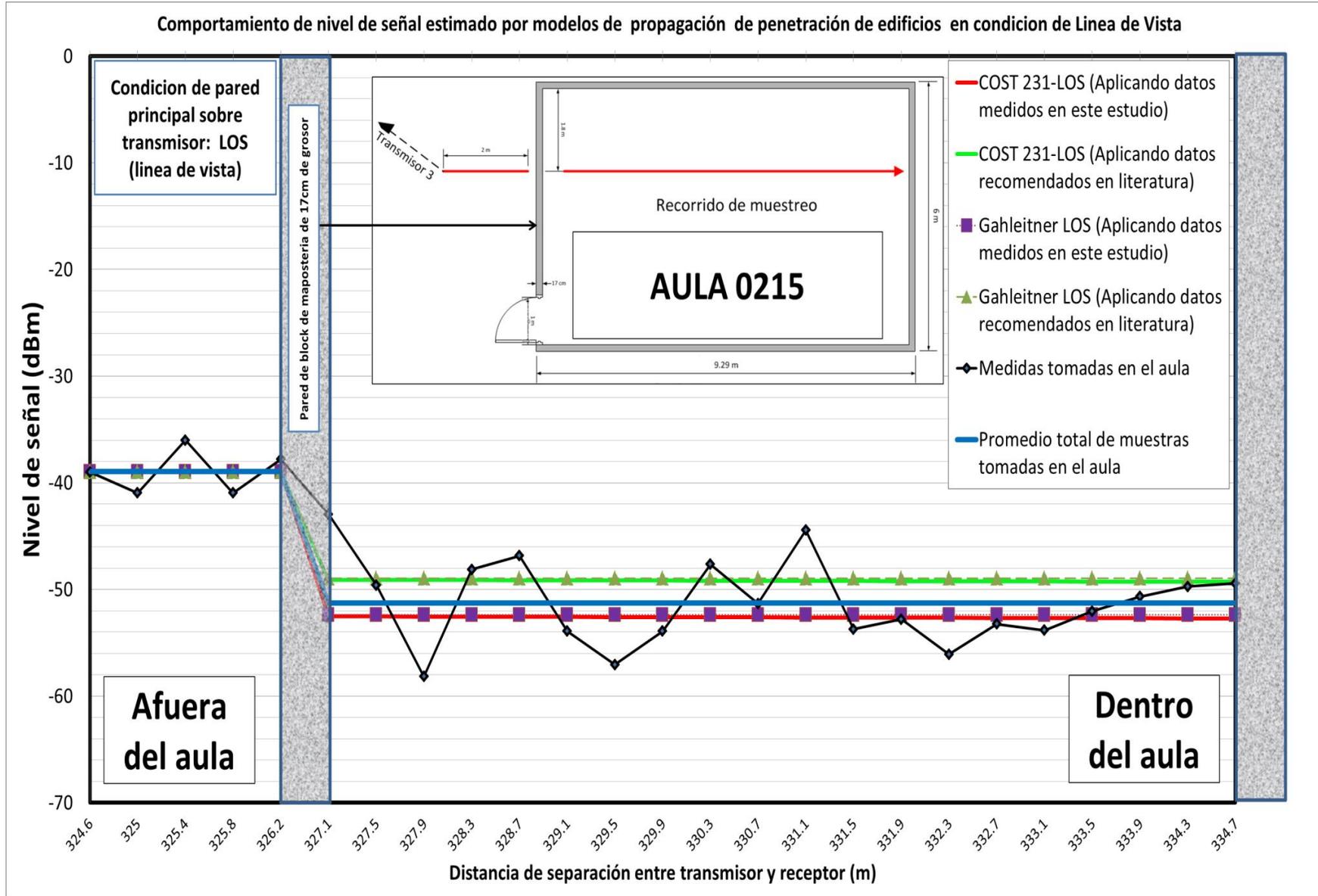


Gráfico 3.2 – Comparación de nivel estimado en modelos aplicando datos de la investigación vs. Datos recomendados en la literatura en condición de Línea de Vista (LOS)

Para el aula 0418, los modelos de propagación en para condiciones sin línea de vista fueron implementados, cuyas ecuaciones son recapituladas a continuación:

COST 231 – NLOS

$$\begin{aligned}
 L(\text{dB}) &= L_{\text{externas}} + W_e + W_{ge} + \max(\Gamma_1, \Gamma_3) - G_{FH} \\
 \Gamma_1 &= W_i \cdot p \\
 \Gamma_3 &= \alpha \cdot d \\
 G_{FH} &= n \cdot G_n
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

GAHLEITNER – NLOS

$$P_E = 10 \cdot \log \left[\sum_{n=1}^N \left[P_{An} \cdot \left(\frac{1}{W_e} \right) \cdot \prod_{m=1}^M \left(\frac{1}{W_m} \right)^{k_{mn}} \right] \right] + h_s \cdot G_h
 \tag{1.20}$$

Para estos, las pérdidas en el exterior (L_{externas}) fueron estimadas luego de muestrear el nivel de señal promedio en el espacio entre de ambas aulas, para lo cual se obtuvo, al proceder como se mencionó anteriormente, una atenuación de 88.6 dB. Ya que la altura promedio entre pisos es inferior a los 4 m, el parámetro dominante en G_{fh} es determinado por $n \cdot G_n$, según recomendaciones del COST 231. Por otro lado, para el modelo de Gahleitner, P_{an} se obtiene del nivel medio exterior a la pared en dirección al transmisor, este es expresado en mW, lo cual se obtiene, partiendo del nivel medio en dBm, de la ecuación:

$$P_{(mW)} = 10^{\frac{\text{dBm}}{10}}$$

Por tanto, para un nivel de señal de -65 dBm promediado, se obtiene un valor para P_{an} de 316 nW. Los datos introducidos en los modelos de propagación, en condiciones de ausencia de línea de visión, son mostrados en la tabla 3.7, seguido los niveles de señal calculados con estos modelos en comparación con las muestras tomadas, son mostradas en el grafico 3.3

Datos introducidos en modelos para condición SIN de Línea de Vista		
Variable	Valor	
Modelo COST 231		
f (GHz)	1.9	
TX Power (dB)	49	
α (dB/m)	0.6	
Wi (dB)	0	
p	0	
S (m)	340	
d (m)	0.3 - 6.7	
Wge (dB)	7	
Gn (dB/piso)	2	
L externas (dB)	88.6	
n	3	
Modelo Gahleitner		
Pan (mW)	3.16228E-07	
hs (m)	6.62	
N	6.62	
M	1	
Wm	0	
Kmn	0	
Valores ajustables		
Variabes	Valor recomendado en la literatura	Valor obtenido en la Investigación
Wm & We (dB)	7	13.43
Gh	1.1	0.7

Tabla 3.7 – Resumen de datos introducidos en modelos de propagación para condición NLOS

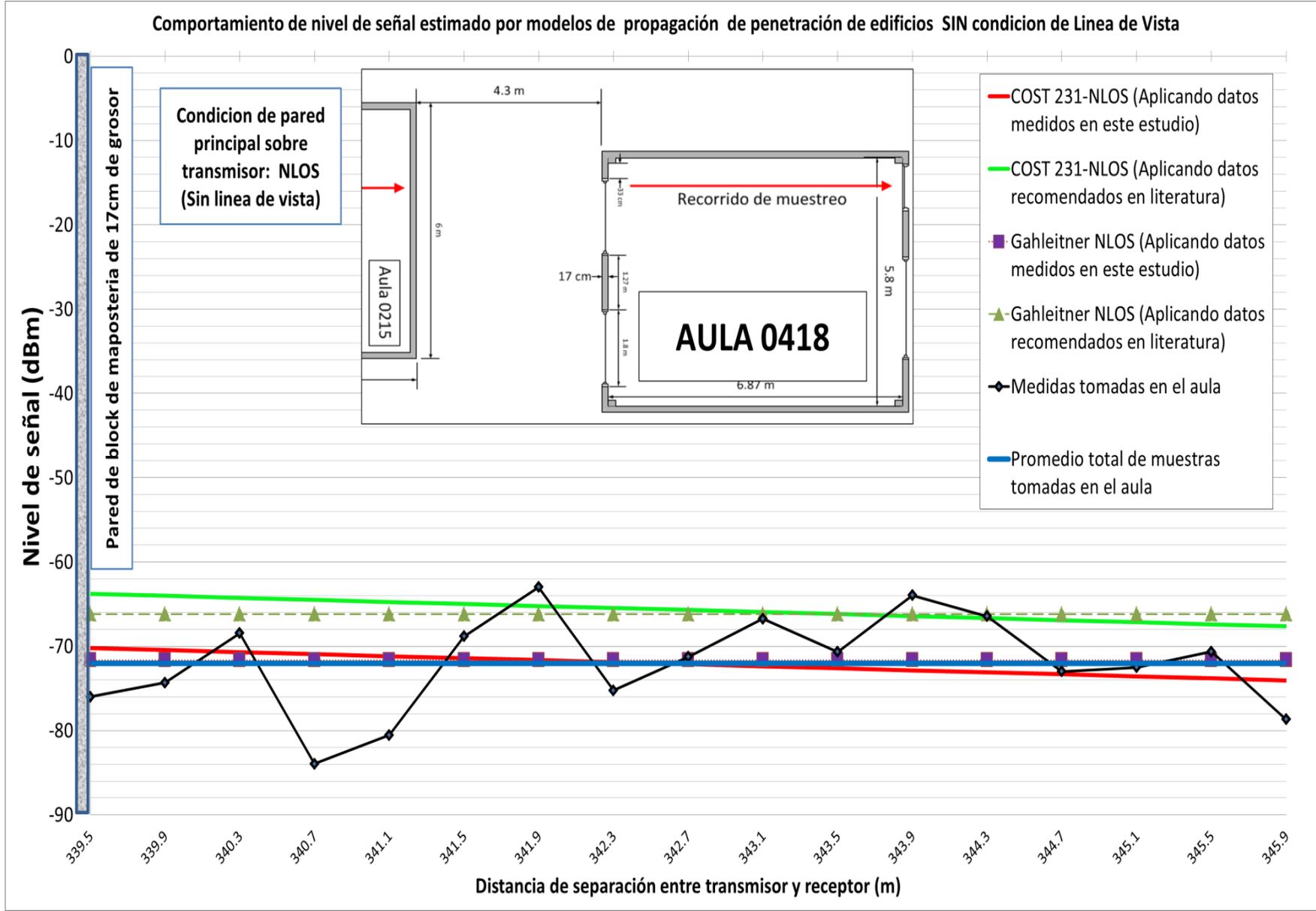


Grafico 3.3 – Comparación de nivel estimado en modelos aplicando datos de la investigación vs. Datos recomendados en la literatura en condición SIN Linea de Vista (NLOS)

3.5 Comparación de los niveles estimados con los muestreados

3.5.1 Condición de línea de vista (LOS)

Los niveles promedios estimados por cada modelo de propagación, luego de introducir los valores obtenidos en la investigación y los recomendados por la literatura, son mostrados a continuación, donde son comparados con el nivel medio de la señal muestreada dentro del aula.

Promedios Aula 0215 (Condición LOS)				
Modelos	COST - 231 (Usando valores obtenidos en la investigación)	COST - 231 (Usando valores recomendados en la literatura)	Gahleitner (Usando valores obtenidos en la investigación)	Gahleitner (Usando valores recomendados en la literatura)
	-52.6234245	-49.19349116	-52.37393333	-48.944
Promedio Medido en aula	-51.276			
Diferencia	-1.347424497	2.082508836	-1.097933333	2.332

Tabla 3.8 – Comparación de promedios de modelos vs. Nivel medido para condición LOS

En la tabla 3.8 se observa que para el modelo COST 231, al implementar los datos obtenidos en nuestra investigación, los resultados difieren tan solo 1.34 dB por debajo del promedio muestreado en el aula, en cambio al introducir los datos recomendados por la literatura consultada de COST 231, el resultado difiere 2.08 dB por encima del nivel promedio interior del aula. Para el modelo de Gahleitner, se observa una diferencia de 1.097 dB por debajo para los valores obtenidos en la investigación, en contraste con los 2.33 dB por encima para los valores recomendados por la literatura.

De lo anterior se concluye que el modelo de Gahleitner estima con un mayor grado de exactitud el nivel medio interno respecto a los demás modelos, cuando se introducen en este los datos medidos en la presente investigación. Adicionalmente, su aplicación resulta sencilla, puesto que depende del nivel de señal medido en el exterior y requiere un mínimo de datos sobre el entorno de servicio.

3.5.2 Condición sin línea de vista (NLOS)

Promedios Aula 0418 (Condición NLOS)				
Modelos	COST - 231 (Usando valores obtenidos en la investigación)	COST - 231 (Usando valores recomendados en la literatura)	Gahleitner (Usando valores obtenidos en la investigación)	Gahleitner (Usando valores recomendados en la literatura)
	-72.13458369	-65.70465036	-71.64673857	-66.1689804
Promedio Medido en Aula	-72.01882353			
Diferencia	-0.115760164	6.31417317	0.372084961	5.849843129

Tabla 3.9 – Comparación de promedios de modelos vs. Nivel medido para condición NLOS

En la tabla 3.9 que es para condiciones donde no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor, el modelo COST 231 estima un nivel de señal interno que se desvía -0.115 dB en relación al promedio real, cuando los datos medidos por esta investigación son implementados, en cambio, al introducir los datos recomendados por la literatura, los resultados se alejan en 6.31 dB por encima del nivel medio interno muestreado en el aula, lo que señala la importancia de la utilización de valores correctos para la aplicación a modelos de propagación principalmente en aquellos donde no existe línea de vista.

Para el modelo de Gahleitner, el nivel estimado se desvía en 0.37 dB del promedio al aplicar los datos obtenidos en esta investigación, mientras que se mantiene a 5.84 dB por encima al introducir los datos recomendados por la literatura, lo que nuevamente señala la diferencia que se produce cuando utilizamos valores adecuados para alimentar el modelo de propagación.

De lo anterior se concluye que el modelo de COST 231 aplicando los datos obtenidos por esta investigación presenta una mayor aproximación a las medidas realizadas en el campo, manteniendo adicionalmente, una curvatura descendente debido al factor de atenuación de interiores utilizado en la ecuación, lo cual refleja el nivel de pérdida que aumenta al adentrarse más el dispositivo en el edificio, resultando ser este modelo matemático el más adecuado.

3.6 Impacto sobre la telefonía móvil

Los datos presentados en la sección anterior muestran una diferencia en los niveles de señal estimados por los modelos de propagación en interiores que varían entre 2 a 6.3 dB de pérdida adicionales sobre el promedio medido dentro de las aulas cuando son introducidos en estos valores recomendados en la literatura citada, mientras que cuando los datos medidos en este estudio son introducidos, la diferencia entre lo estimado por los modelos y lo medido en las aulas es inferior a los 1.3 dB.

Las compañías prestadoras de servicios al realizar la planificación de la cobertura radial se valen de modelos de propagación computarizados, en los cuales son introducidos características del entorno que, para áreas urbanas, incluyen distintas clases de edificaciones. Esto implica que para un levantamiento de una red de comunicaciones móviles realizado por una compañía proveedora de servicios, los datos ingresados en los modelos de propagación carecerán de la fidelidad necesaria en entornos complejos como el nuestro, si estos son extraídos de literaturas extranjeras como COST 231 o NISTIR 6055.

Por esta razón si la pérdida estimada está fuera de lo presupuestado, implicaría una mayor interferencia y baja calidad de servicio tanto dentro como fuera de estas estructuras donde se desee brindar cobertura. En consecuencia, para un área de servicio densa urbanamente, donde un gran número de usuarios realicen llamadas dentro de edificaciones, la calidad del servicio será mucho menor a la esperada, debido al déficit en el nivel de señal recibido en el interior de estas. Como consecuencia se obtiene una baja relación de la señal sobre el ruido, dificultando total o parcialmente el establecimiento de una comunicación efectiva, causando caídas de llamadas y degradación en la calidad del servicio.

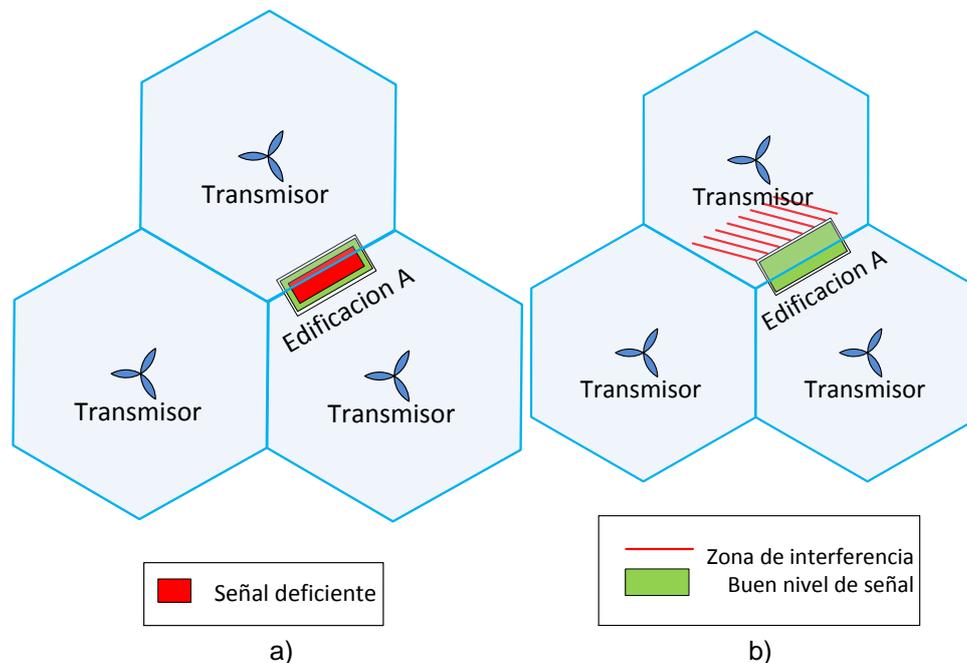


Figura 3.4 – Cobertura en edificaciones: a) atenuación subestimada b) atenuación sobre estimada

En la figura 3.4-a se representa el nivel de señal dentro de la edificación A para una propagación deficiente debido a la subestimación de las pérdidas generadas por las paredes que obstaculizan la visibilidad entre los equipos de comunicación, en cambio para la figura 3.4-b, se observa el incremento en los niveles de interferencias en las zonas de coberturas de los transmisores circundantes, si los niveles de atenuación generados por la estructuras son sobrevalorados. Por lo cual se destaca la importancia del conocimiento preciso del entorno de servicio. La solución de estas dificultades, posteriores a la implementación de los transmisores exteriores, trae como consecuencias una modificación de la red desarrollada o en su defecto la implementación de soluciones alternativas, como la colocación de antenas en el interior de los edificios, donde nuevamente será necesario el conocimiento de las pérdidas de penetración de la señal a fines de reducir la interferencia generada por el transmisor interno al sistema externo, traduciéndose en un incremento en los costos de implementación e instalación de la red.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIÓN

4.1 Conclusiones generales

Por medio de la presente investigación se determinó que al atravesar la onda electromagnética a través del material de construcción de edificaciones más usado en Santo Domingo (el block), las pérdidas provocadas en la señal son de **13.43 dB** para un block de 17 cm de grosor, en contraste con lo recomendado en la literatura que oscila entre **7 a 11 dB** dependiendo del estudio consultado, resultando en un margen de error de **2.43 a 6.43 dB** de la realidad extranjera sobre realidad local.

Al ser introducido el dato medido en el presente estudio en modelos de propagación que consideran la penetración de la onda en edificaciones, el nivel de señal estimado en el interior de un espacio cerrado se aproxima al nivel promedio real medido con un margen de error inferior a los **0.4 dB** de pérdidas para condiciones sin línea de vista, mientras que si los datos introducidos para la misma condición son los recomendados en literaturas como COST 231 o NISTIR 6055, el nivel de señal esperado difiere en **5.84 dB** por encima del promedio medido en el entorno objeto de análisis. Por lo cual se destaca la importancia de aplicar datos en modelos de propagación que reflejen la realidad local del ambiente al que se desee prestar servicio se comunicaciones inalámbricas. Por tanto el estudio presentado hace su aporte al conocimiento sobre el efecto atenuador que provocan los materiales de construcción mencionados previamente que son característicos de esta región.

El estudio refleja algunas diferencias establecidas a lo largo de la sección 2.1, referente a las características de los elementos de construcción en los climas cálidos. Adicionalmente se observó que existe una carencia de datos sobre la temática tratada en las literaturas consultadas, o en su defecto la información

escasea de precisión sobre las características de los materiales para los cuales es válida su aplicación, dificultando así su comparación e implementación, induciendo al planificador de sistemas a interpretaciones ambiguas y a errores de cálculos, lo cual se traduce en aumentos de costos de implementación del sistema por causa de acciones correctivas.

Los datos publicados en el capítulo III pretenden garantizar una estimación adecuada de la potencia necesaria (es decir la que permita cumplir los parámetros de diseño) para brindar servicios de comunicaciones inalámbricas en el interior de estructuras sin la necesidad de instalar transmisores adicionales. Estos datos son válidos para sistemas radioeléctricos ofrecidos en la banda de los **1,900 MHz**, la cual hoy día está reservado a la telefonía móvil.

En otro ámbito, se comprobó que muchos de los modelos de propagación que consideran las pérdidas de penetración, estiman con efectividad las pérdidas de energía en los enlaces inalámbricos, siempre y cuando los datos introducidos se correspondan con la realidad del entorno. No obstante, para la investigación presente el modelo COST 231 para línea de vista obstruida (NLOS) utilizando los datos obtenidos sobre la atenuación del material, resulto ser el más adecuado. Por lo que se recomienda su aplicación sobre otros modelos y su implementación en general si se desea brindar servicios dentro de edificaciones, donde generalmente, no existirá línea de vista entre esta y el transmisor del proveedor.

Adicionalmente se destaca la importancia del desarrollo de métodos prácticos y validos a fines de obtener datos precisos de entornos de propagación con el mínimo margen de error posible, como se detalló a lo largo del capítulo II, el cual permitió medir con exactitud la variable que fue objeto del estudio presentado.

4.2 Recomendaciones

El comportamiento de las ondas electromagnéticas depende totalmente del entorno en el cual se propague, por lo que es necesaria la realización de estudios detallados sobre la zona en la que se desea prestar servicio de comunicación inalámbrica, puesto que cada ambiente posee características peculiares que los distinguen de los demás. En consecuencia, se recomienda analizar en detalle el entorno de propagación, lo cual implica jornadas de muestreos en distintos lugares a fines de realizar las calibraciones de lugar en los modelos de propagación usados para estimar la cobertura radial de un transmisor.

La presente investigación recomienda el uso de los siguientes factores de atenuación para blocks de mampostería de **17 cm** de grosor, en los modelos de propagación de penetración de edificios COST 231 y de Gahleitner, independientemente del área compuesta o no por ventanas de la pared que constituye el obstáculo principal, ya que la influencia de estas aperturas no fueron consideradas, exhortando a su análisis en investigaciones futuras.

Atenuación recomendaciones para Block de mampostería a 1,900 MHz			
Factor según modelo	Atenuación recomendada	Grosor	Descripción
We (COST 231) - Wm (Gahleitner)	13.43 dB	17 cm	Atenuación por pared
Gh (Gahleitner)	0.7 dB/m		Ganancia por altura en metros

Tabla 4.1 – Valores recomendados en el presente estudio para block en Santo Domingo

Los datos presentados aportan un ejemplo del nivel de discrepancia entre datos ofrecidos por otros institutos de países extranjeros. Aun cuando las metodologías usadas en estos sean minuciosas, las propiedades de las muestras utilizadas en tales estudios no siempre se corresponden con las características de los materiales en otras regiones que por ende, si no es considerado, puede inducir a errores que se traducen en un incremento en los costos de implementación de los sistemas por efecto de las acciones correctivas.

4.3 Implicación para investigaciones futuras

Con el fin de lograr una mejor comprensión del comportamiento de las ondas de radio en las zonas metropolitanas de la República Dominicana y el Caribe, se exhorta a la expansión de investigaciones de la misma naturaleza que la presentada actualmente, a tal de cubrir otros materiales de construcción de interés, a lo largo de distintas frecuencias del espectro radioeléctrico. Estos datos tomarán importancia a través del tiempo ya que servicios tales como la telefonía móvil, que se encuentran en expansión día a día, requerirán datos específicos de las regiones de servicio, puesto que el incremento de la cantidad de unidades móviles activas refleja un aumento proporcional en el número necesario de estaciones base para cubrir la demandada de usuarios. Esta tendencia se puede observar hoy día en distintas escalas sociales, debido a la alta comercialización de los servicios inalámbricos, por sus ventajas sobre otros sistemas que requieren conexiones físicas.

En otro ámbito, las informaciones presentadas a lo largo del presente estudio, abren las puertas a otras investigaciones. Las bases metodológicas establecidas sirven de guía para otros estudios de la misma naturaleza. La efectividad del método de muestreo desarrollado en el capítulo II fue comprobado experimentalmente luego de una extensa revisión, análisis y depuración de recomendaciones hechas por expertos de la materia en distintas publicaciones. Posteriormente, la eficiencia del método fue corroborada gracias al uso de equipos de medida profesionales pertenecientes a compañías prestadoras de servicios de comunicaciones móviles, obteniendo un margen de error inferior a los 0.6 dB.

GLOSARIO

Ángulo de incidencia: Es el ángulo medido con respecto a la perpendicular de una superficie o límite (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 30).

Antena: Parte de un sistema transmisor o receptor que se encarga de radiar o recibir ondas electromagnéticas (Aznar *et al*, 2002, p. 15).

Campo eléctrico: Espacio que rodea una carga eléctrica en el que circula la energía eléctrica (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 234).

Campo magnético: El espacio alrededor de un polo magnético o cuerpo magnetizado en la que circula la energía magnética (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 426).

Celda: Área atendida por una estación base (ed. Laplante, 2000, p.101).

Cobertura: Zona en la que una estación de radiodifusión o comunicación puede proveer servicio confiablemente (ed. Gibilisco, 2001, p. 152).

Comunicación alambrada: Sistemas que se basan en la transmisión de información a través de un medio físico conductor que transporta energía eléctrica (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 553).

Comunicación inalámbrica: Aquellos sistemas que hacen uso del espacio libre como medio de transporte de la señal, como la radio, la televisión o la red de comunicación celular. (ed. Gibilisco, 2001, p. 106).

Decibel (dB): Unidad de medida que describe la relación entre dos cantidades en términos de un logaritmo en base 10 (ed. Laplante, 2000, p.177).

Dieléctrico: Es un material no conductor de electricidad (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 234).

Enlace ascendente: Enlace de comunicación desde el móvil a la estación base central (ed. Laplante, 2000, p.718).

Enlace descendente: Señal enviada desde una estación base a la estación móvil (ed. Gibilisco, 2001, p. 212).

Estación base: Transceptor fijo en un sistema de comunicación móvil (ed. Laplante, 2000, p.57).

Estación móvil: Parte de un sistema de comunicaciones por radio, que no está permanentemente situado en una zona geográfica (ed. Laplante, 2000, p.422).

Frecuencia: Número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. (ed. Laplante, 2000, p.279).

Ganancia: La relación entre la amplitud de una variable de a la salida de un dispositivo sobre su entrada.

Interferencia: Perturbación externa eléctrica o electromagnética que provoca una respuesta no deseada o la degradación de la señal (ed. Laplante, 2000, p.357).

Interferencia entre celdas: Perturbación causada por los transmisores en un sistema de comunicación celular a otro sistema de celdas adyacentes (ed. Laplante, 2000, p.356).

Impedancia: Oposición total que ofrece un circuito, dispositivo o medio de transporte, al flujo de energía sobre sus terminales (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 356).

Línea de visión (LOS): Línea recta más corta posible que se puede existir entre un emisor y un receptor inalámbricos (ed. Laplante, 2000, p.392).

Macro celda: Estación base cuyo radio típico de cobertura se encuentra entre 1 a 30 Km (Damosso, 1993, p. 116).

Micro celda: Estación base cuyo radio típico de cobertura se encuentra entre 500m a 1 Km (Damosso, 1993, p. 116).

Nivel de señal: Valor de una señal en un determinado lugar y tiempo (ed. Laplante, 2000, p.623).

Ondas electromagnéticas: Perturbaciones producidas por oscilaciones de las cargas eléctrica, las cuales transportan energía de un punto a otro en el espacio por medio de los campos electromagnéticos (Resnick *et al*, p.866).

Pico celda: Estación base cuyo radio típico de cobertura se encuentra por debajo de los 500m (Damosso, 1993, p. 116).

Polarización: Es la orientación del vector de campo eléctrico en la que son irradiadas las ondas electromagnéticas por la antena (Tomasi, 2003, p. 348)

Potencia radiada: Potencia total que se transmite por una antena al espacio en forma de ondas electromagnéticas (Vega *et al*, 2007, p. 60).

Potencia radiada efectiva (ERP): Potencia total radiada por una antena en una dirección específica, que incluye la potencia de salida del transmisor, la pérdida en la línea de transmisión, y la ganancia de potencia de la antena radiante (ed. Laplante, 2000, p.224).

Propagación: Movimiento de las ondas electromagnéticas a través de un medio (ed. Laplante, 2000, p.299).

Radiación electromagnética: Propagación de los campos electromagnéticos a través del espacio (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 242).

Radiocomunicación: Forma de comunicación que se realiza a través de ondas hertzianas, comprendidas entre los 10k HZ a 300M HZ (The Illustrated Dictionary of Electronics, 2001, p. 577).

Receptor: Equipo utilizado para captar la señal de Radio Frecuencia irradiada por una fuente emisora (ed. Laplante, 2000, p.701).

Relación señal-ruido (SNR): Cociente de la potencia de la señal entre la potencia de ruido en un punto dado de un sistema (Vega *et al*, 2007, p. 262).

Ruido: Alteración no deseada, originada por el medio de transmisión o del sistema electrónico del propio receptor, que se superpone a la señal original transmitida al momento en que llega al receptor (ed. Laplante, 2000, p.467).

Señal: Cantidad de energía, como corriente o voltaje, que pueden ser utilizada para transmitir la información de un punto a otro (ed. Laplante, 2000, p. 622).

Transceptor: Dispositivo el cual realiza las funciones de transmisor y receptor simultáneamente (ed. Laplante, 2000, p.695).

Transmisor: Equipo utilizado para generar una señal portadora de RF, modular la señal e irradiarla hacia el espacio (ed. Laplante, 2000, p.700).

REFERENCIAS

Libros:

- Cardama Aznar, Á. Jofre Roca, L., Rius Casals, J. M., Romeu Robert, J. & Blanch Boris, S. (2002). *Antenas* (2ª ed.), (p. 15-438). España: Ediciones UPC.
- Chandra, P., Dobkin, D. M., Bensky, A., Olexa, R., Lide, D. A. & Dowla, F. (2008). Propagation modeling and measuring. En *Wireless networking* (p. 285-311) (Colección Newnes: know it all). Estados Unidos: Elsevier.
- Gorricho, M., Gorricho, J. L. (2002). El sistema GSM (p. 91-111). En *Comunicaciones móviles*. España: Ediciones UPC.
- Haslett, C. (2007). *Essentials of radio wave propagation* (p. 1-2). Inglaterra: Cambridge University Press.
- Jakes, W. C. (1974). *Microwave mobile communication*. Estados Unidos: Wiley.
- Parsons, J. D. (2000). *The mobile radio propagation channel* (2a ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Pérez Vega, C., Zamanillo, S. & López, C. (2007). *Sistemas de telecomunicación* (1ª ed.) (p. 384-449). España: PUBliCan - Ediciones de la universidad de Cantabria.
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications principles and practice* (2ª ed.) (p. 36-140). Estados Unidos: Prentice Hall.
- Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. S. (2002). Física (vol. 2) (4ª ed.) (p. 866). Mexico: Cesca
- Seeley, I. H. (2008). La construcción en climas cálidos. En *Tecnología de la construcción* (p. 245-253). México: Limusa.
- Seybold, J. S. (2005). *Introduction to RF Propagation*, (p. 3-10). Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

- Sizun, H. (2004). Mobile radio links. En *Radio wave propagation for telecommunication applications* (p. 177-200). Francia: Springer.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (4ª ed.), (p. 311-357). México: Pearson Educación.

Material de consulta:

- Feick, R., Grote, W. & Hristov, H. (2000). Criterios y procedimientos para mediciones de propagación electromagnética en ambientes confinados. En *IX congreso internacional de telecomunicaciones Senacitel 2000*. Chile.
- Ed. Gibilisco, S. (2001). *The illustrated dictionary of electronics* (8ª ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Instituto Dominicano de las Telecomunicaciones (INDOTEL) (2002). Plan nacional de atribución de frecuencias –PNAF- (p. 54).
- Indicadores de telefonía e internet de la Republica Dominicana (2011, Julio), [en línea]. Santo Domingo, R.D: Instituto Dominicano de las Telecomunicaciones (INDOTEL). Extraído el 24 de julio de 2011 desde: http://www.indotel.gob.do/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,110/Itemid,757/.
- Ed. Laplante, P. A. (2000). *Electrical engineering dictionary* (1ª ed.). Estados Unidos: CRC Press LLC.
- Rutenbeck, Jeff & Rutenbeck, Blaine. (2006). *Tech terms: what every telecommunications and digital media person should know* (3a ed.). Estados Unidos: Elsevier. (p. 154).
- Sampieri, R. H., Collado, C. F. & Lucio, P. B. (1991). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.

Publicaciones:

- Building Research Establishment (1971). Problems of concrete production in arid climates. En *Overseas Building Notes 139*. Reino Unido.
- Building Research Establishment (1972). Building in earthquake areas. En *Overseas Building Notes 143*. Reino Unido.
- Durgin, G., Rappaport, T. S. & Xu, H. (1998). Measurements and models for radio path loss and penetration loss in and around homes and trees at 5.85 GHz. En *IEEE transactions on communications*, 46 (11), 1484-1495.
- Gahleitner, R. (1994). *Radio wave propagation in and into urban buildings* (p. 30-99). PhD-Thesis, Technical University Vienna, Austria.
- Hata, M. (1999). Fourth generation mobile communication systems beyond IMT-2000. En *IEEE Proc APCC/OECC*. 765-767.
- Miura, Y., Oda, Y. & Taga, T. (2002). Outdoor-to-indoor propagation modelling with the identification of path passing through wall openings. En *IEEE Xplore*, 1, 130-134.
- Rice, L. P. (1958). Radio Transmission into buildings at 35 and 150 mc. En *The bell system technical journal*, 197-210.
- Toledo, A. F., Lewis D. C. & Turkmani, A. M. D (1990). Radio propagation into buildings at 1.8 GHz.
- Turkmani, A. M. D. & de Toledo, A. F. (1991). Radio transmission at 1800 MHz into, and within, multistory buildings; En *IEE Proceedings-1*, 138 (6), 577-584.
- Walker, E. H. (1983). Penetration of radio signals into buildings in the cellular radio environment. En *The bell system technical journal* 62 (9), 2,719-2,734.

Reportes:

- Damosso, E. (1993). Propagation prediction models (p 134-171). En **COST Action 231: Evolution of land mobile radio (including personal communication)**, *Final report*. Italia.
- Stone, W.C., Ed. (1997). Electromagnetic signal attenuation in construction materials. En *NIST Construction Automation Program Report No. 3*, **NISTIR 6055**, (p. 64-181). Estados Unidos. National Institute of Standards and Technology.

Datos estadísticos y en línea:

- Oficina Nacional de Estadística (2011). Encuesta ENHOGAR, 2007 (p.34).
capturado en:
<http://www.one.gob.do/index.php?module=articles&func=view&catid=201>
- U.S. Department of Commerce (2010). 2010 Characteristics of new housing (p. 129). Capturado en <http://www.census.gov/const/www/charindex.html#multiunit>

ANEXOS

A. Conceptos básicos de la red celular:

La reutilización de frecuencia

Los sistemas de comunicaciones móviles requieren la posibilidad de desplazarse libremente a lo largo de una zona geográfica. El método utilizado para dicha finalidad es la transmisión de la información a través de ondas de radio sobre el aire libre, por medio de un canal de frecuencia reservado en el espectro radial.

Debido a que el espectro electromagnético es finito, es necesario para incrementar la capacidad de usuarios, la reutilización de los recursos, en este caso la frecuencia que cada compañía de comunicaciones tiene asignada. Para hacer esto posible se utiliza el principio de funcionamiento de los sistemas celulares.

El concepto celular aparece como propuesta de arquitectura de sistema en los laboratorios Bell a final de los años cuarenta. Esta idea introduce una nueva filosofía de operación para las comunicaciones móviles. En lugar de utilizar una sola fuente emisora con elevadas potencias que se esparce en todas las direcciones en puntos geográficos dominantes, el modelo nuevo impone un gran número de pequeños transmisores, cada uno dispuesto para servir sólo una fracción del área geográfica original (Gorricho, 2002, p 18). En la figura A.1 se observa el concepto de reutilización de frecuencia mediante la subdivisión en pequeños Hexágonos, los cuales representan una celda, donde cada letra representa una banda de frecuencia.

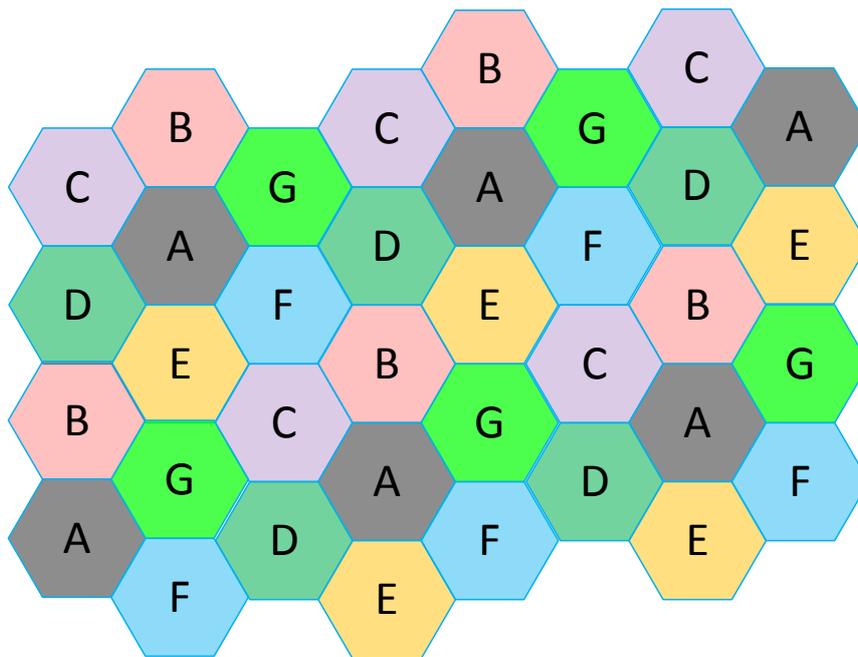


Figura A.1 – Concepto de reutilización de frecuencia

El uso de un mismo conjunto de frecuencias es un factor limitante en el concepto celular, puesto que la suma de un mismo canal radial en determinado punto causa interferencia a la señal, degradando la calidad de la conexión o, en el peor de los casos, imposibilitándola. Por tal motivo, la interferencia limita la distancia mínima entre dos o más transmisores que posean el mismo recurso.

Mediante el sistema celular es posible la reutilización de la misma frecuencia en varias áreas no continuas, a una distancia suficiente corta para que no se produzca interferencia entre dos estaciones que operen en el mismo canal. Así, los sistemas celulares plantean una hipotética capacidad ilimitada. No obstante, cada estación posee una cantidad limitada de recursos para establecer una comunicación bidireccional entre esta y el equipo móvil del usuario. Por lo que, cuanto mayor es la demanda de tráfico, mayor será el número de recursos necesarios para cubrir la demanda y por tanto más reducidas en tamaño deben ser las celdas a fines ampliar la reutilización de los recursos, con tal de cubrir simultáneamente el mayor número de comunicaciones posibles sin interrupción (Gorricho, 2002, p 18).

Puesto que la interferencia es uno de los factores más limitantes en la implementación y desarrollo de una red celular, algunas técnicas son utilizadas a fines reducirla a niveles insignificantes. Uno de los métodos más conocidos e implementados es la sectorización, la cual se basa en la división radial de la celda.

La importancia del concepto celular es que el nivel de interferencia al que se somete una comunicación no está relacionada con la distancia absoluta entre celdas, sino con el cociente entre la distancia entre celdas co-canal (celdas que utilizan el mismo conjunto de frecuencias) y el radio de la celda (Gorricho, p 18). En lugar de implementar una celda omnidireccional (que irradian en 360°), se divide la zona en varias celdas direccionales (que irradian en un ángulo menor a 360° , usualmente 120° o menos), reduciendo de esta forma la interferencia total en una zona de servicio del sistema, y un mayor factor de reutilización de recursos, por tanto, por tanto permite el aumento de la capacidad de conexiones simultaneas en determinada zona. Un ejemplo del concepto de sectorización es ilustrado en la figura A.2, donde cada número representa una determinada frecuencia

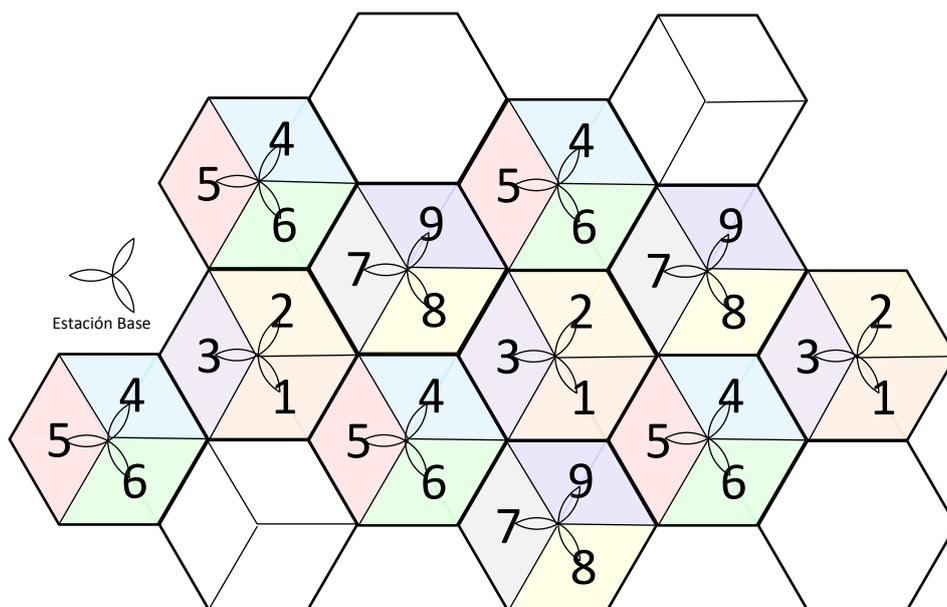


Figura A.2 – Concepto de sectorización

B. Atenuaciones de diversos materiales medidos por NISTIR

6055

Atenuaciones reportadas por el NISTIR 6055 a 1,900 MHz			
Material	Atenuación (dB)	Desviación (dB)	Dimensiones (mm) (grosor)
Ladrillo	5.54	0.54	89
	7.5	0.45	178
	10.1	0.1	267
Ladrillo y concreto plano	17.6	0.1	90-102
	33	0.2	90-203
Ladrillo y Block Masonry	10.1	0.3	90-194
Concreto Plano, mezcla 1, 22% cemento	14.7	0.1	102
densidad 2.31 g/cc, 12.7mm crushes, 57mm slump low	28.2	0.2	203
relacion agua cemento = 0.4	35.5	0.1	305
Concreto Plano, mezcla 2, 25% cemento	16.8	0.2	102
densidad 2.31 g/cc, 12.7mm crushes, 165 mm slump high	31	0.1	203
relacion agua cemento = 0.39	42.5	0.2	305
Concreto Plano, mezcla 3, 14% cemento	13.8	0.2	102
densidad 2.31 g/cc, 12.7mm crushes, 64 mm slump low	30.5	0.5	203
relacion agua cemento = 0.48	39	0.5	305
Concreto Plano, mezcla 4, 17% cemento	17	0.1	102
densidad 2.31 g/cc, 12.7mm crushes, 222 mm slump high	32	0.1	203
relacion agua cemento = 0.42	39.5	0.5	305
Concreto Plano, mezcla 5, 17% cemento	15.1	0.2	102
densidad 2.42 g/cc, 25.4 mm crushes, 76 mm slump low	28.7	0.2	203
relacion agua cemento = 0.6	35.5	0.5	305
Concreto Plano, mezcla 6, 19% cemento	17.5	0.1	102
densidad 2.39 g/cc, 25.4 mm crushes, 172 mm slump high	34	0.2	203
relacion agua cemento = 0.54	38	0.5	305
Concreto Plano, mezcla 7, 12% cemento	12.5	0.1	102
densidad 2.38 g/cc, 25.4 mm crushes, 83 mm slump high	28	0.1	203
relacion agua cemento = 0.87	35.7	0.3	305
Concreto Plano, mezcla 8, 14% cemento, densidad 2.38 g/cc, 25.4 mm crushes, 165 mm slump high, relacion agua cemento = 0.36	17	0.1	102
	33.8	0.1	203
	37.3	0.4	305
Concreto Reforzado, Rebars, R agua cemento = 0.36, 14% cemento, densidad 2.38 g/cc, 25.4 mm crushes, 165 mm slump	30.5	0.4	203 mm thick, 140x140 (19) mm grid
	35.5	0.5	203 mm thick, 70x70 (19) mm grid
	11	0.1	203
Block Masonry, densidad 1.84 g/cc, 1.04 g/cc (por los huecos)	18	0.2	406
	30	0.5	610
Drywall, densidad 0.87 g/cc (6mm), 0.66 (13-16mm)	0.59	0.46	6
	0.61	0.46	13
	0.61	0.45	16
Vidrio, densidad 2.49 g/cc	1.38	0.18	6
	3.21	0.1	13
	3.85	0.1	19
Madera seca, densidad 0.409-0.425	3.4	0.05	38
	4.78	0.1	76
	6.6	0.05	114
	8.38	0.09	152
Madera Humeda, densidad 0.428-0.432	2	0.1	38
	6.18	0.05	76
	8	0.05	114
	10.1	0.05	152
Plywood seco, densidad 0.565-0.465	0.59	0.025	6
	1	0.026	13
	1.25	0.1	19
	1.95	0.1	32
Plywood mojado, densidad 0.563-0.450	2.7	0.1	6
	2.85	0.1	13
	2.87	0.1	19
	3.3	0.15	32
Regilla de hierro, 19mm diametro,	0.6	0.01	140x140
	10	0.1	70x70

Figura B.1 - Atenuaciones reportadas por NISTIR 6055 a 1,900 MHz

C. Detalle de muestras tomadas en la investigación

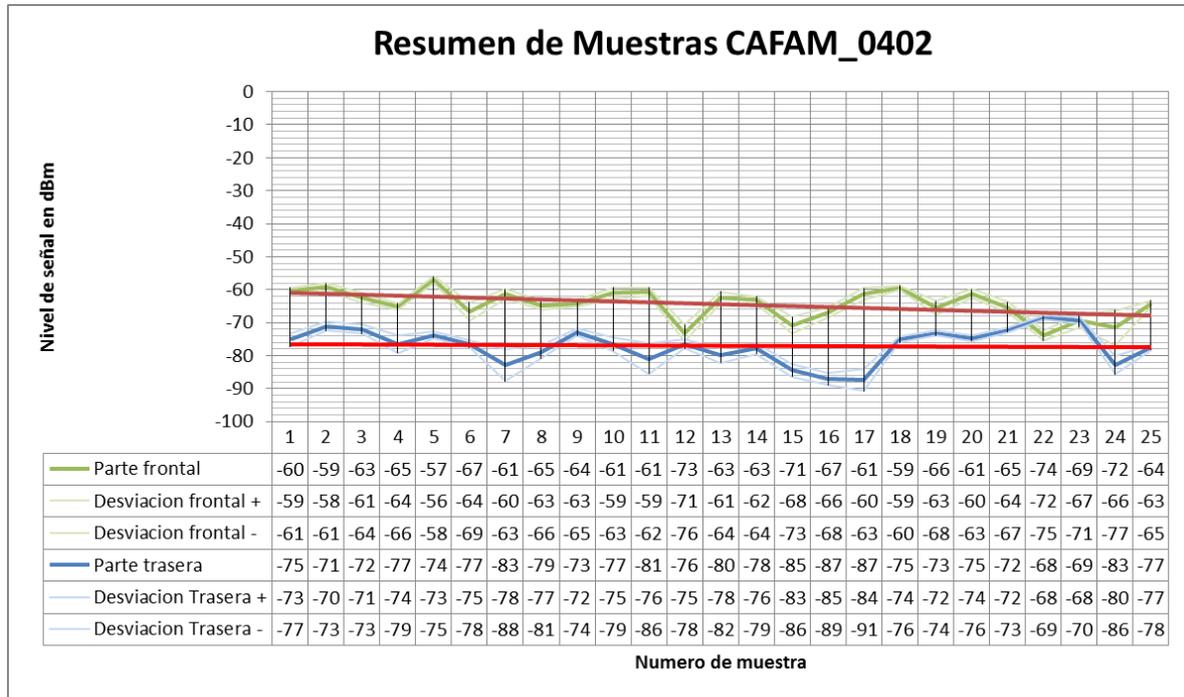


Grafico C.1 - Detalle de muestra CAFAM 0402

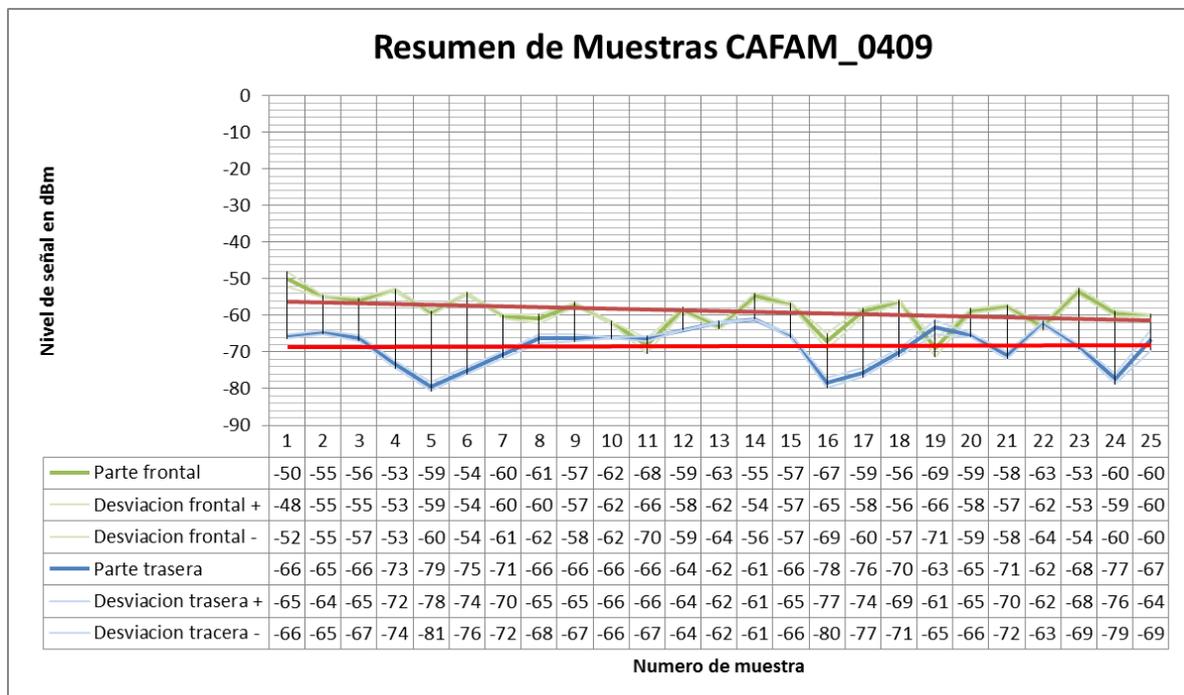


Grafico C.2 - Detalle de muestra CAFAM 0409

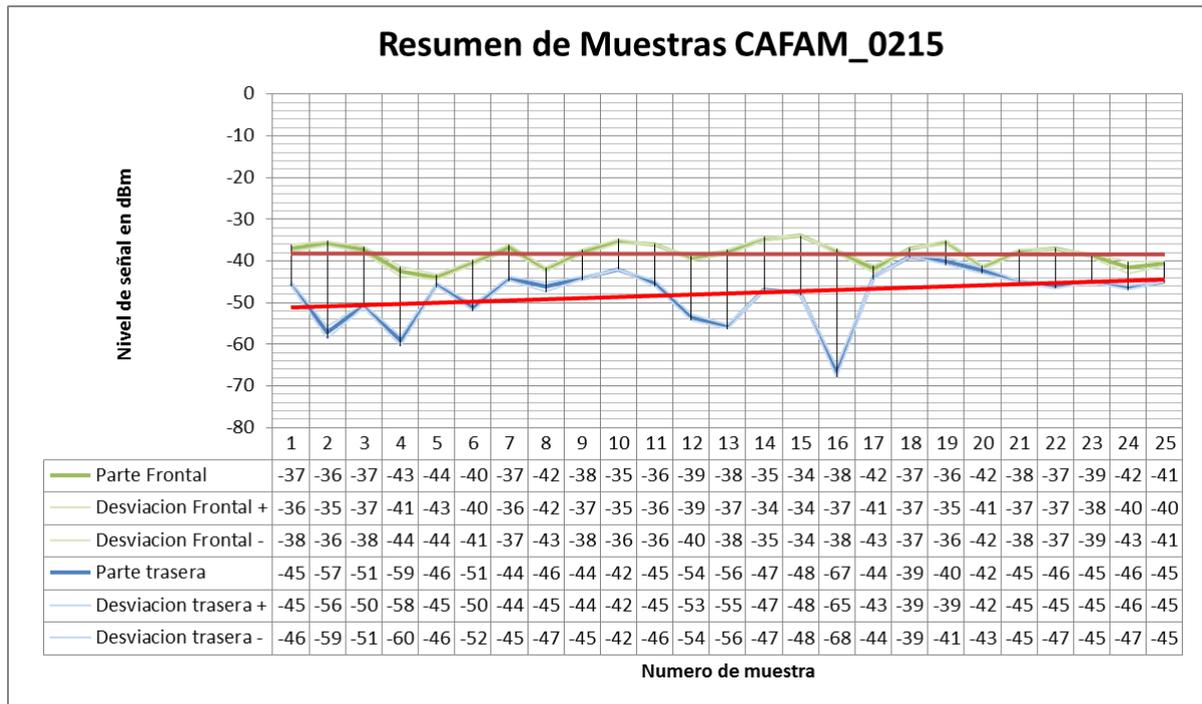


Grafico C.3 - Detalle de muestra CAFAM 0215

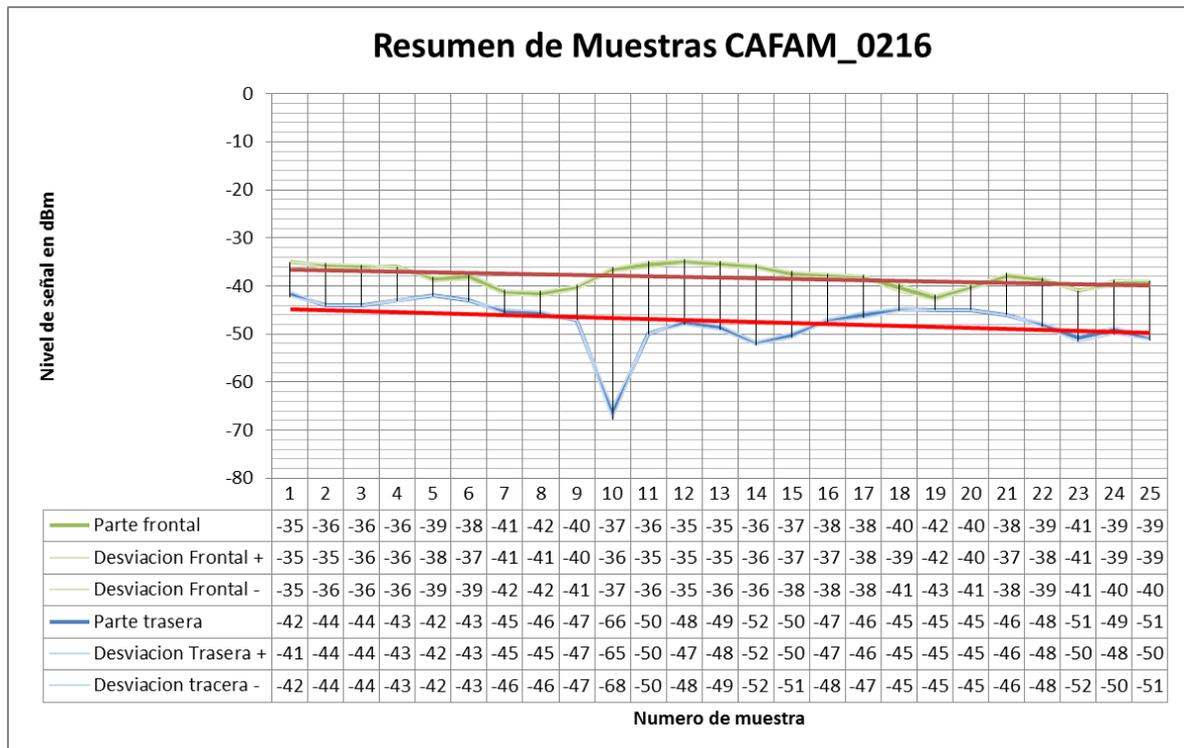


Grafico C.4 - Detalle de muestra CAFAM 0216

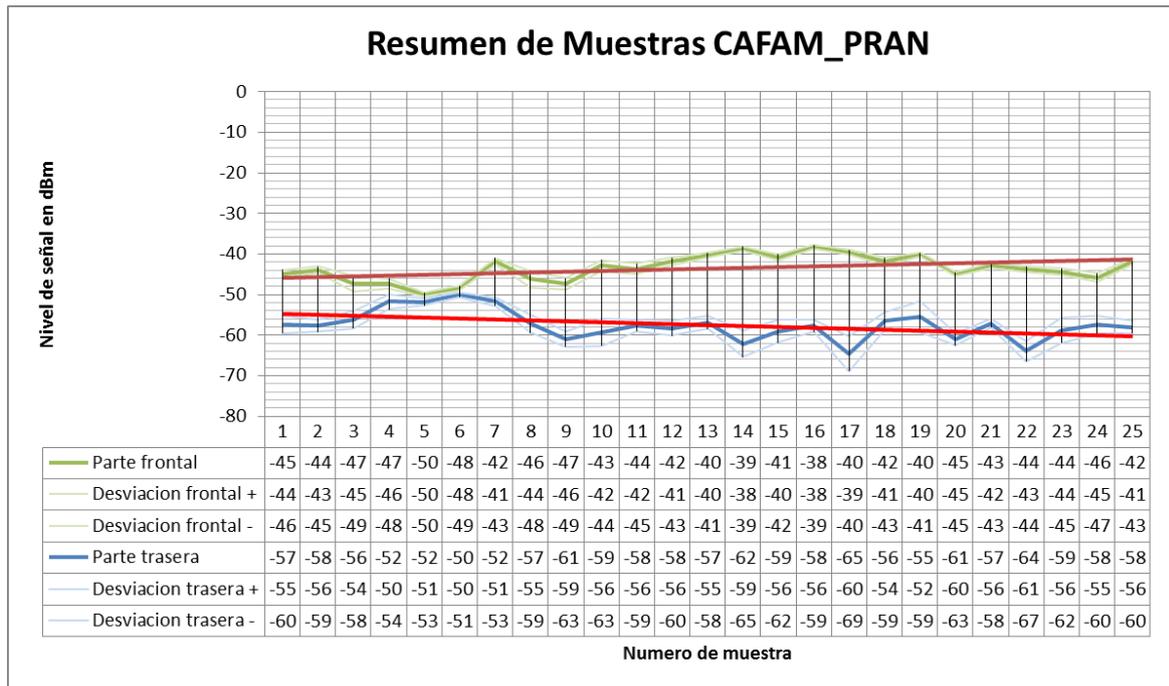


Grafico C.5 - Detalle de muestra CAFAM PRAN

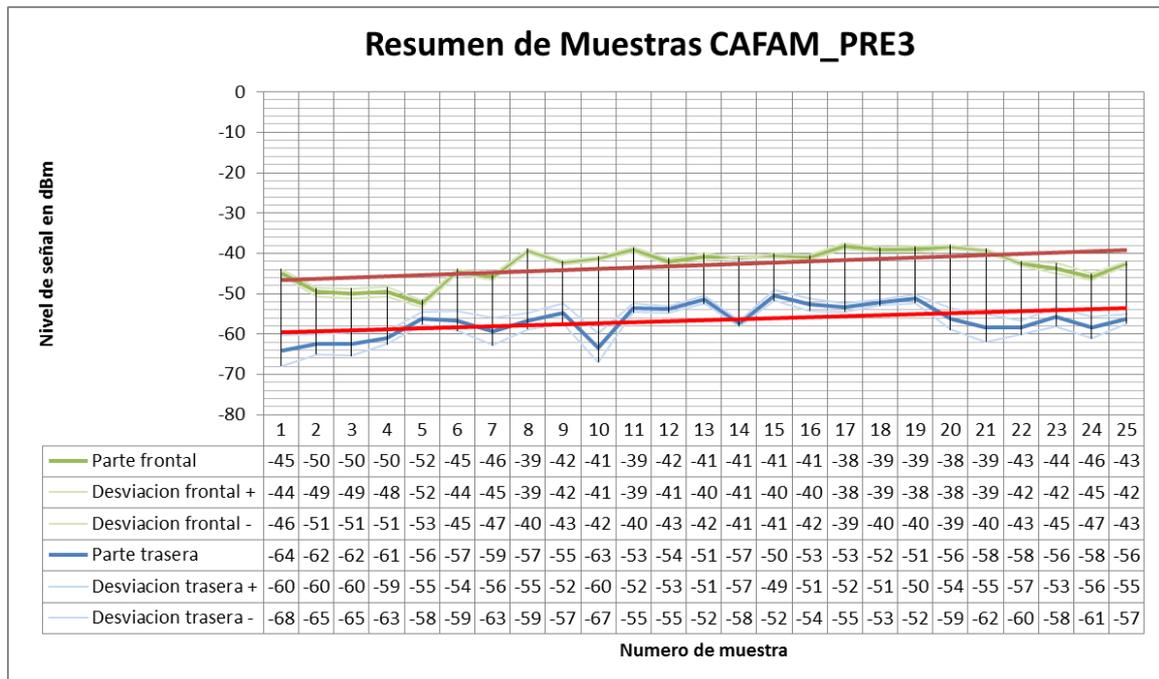


Grafico C.6 - Detalle de muestra CAFAM PRE3

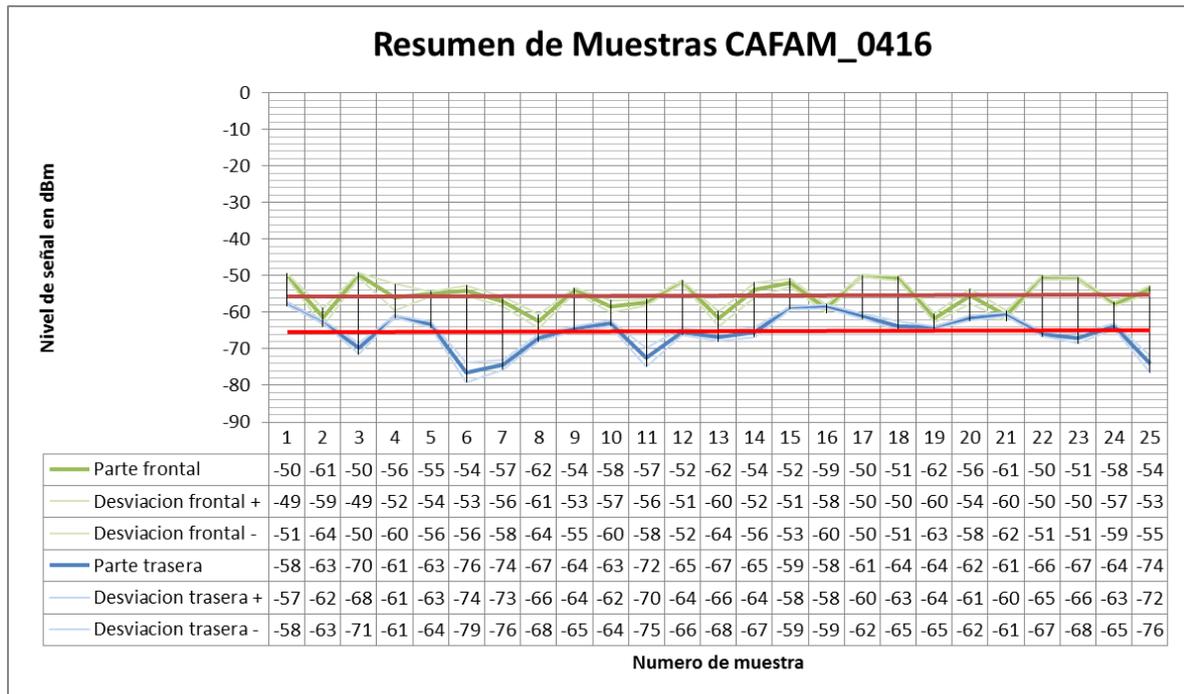


Grafico C.7 - Detalle de muestra CAFAM 0416

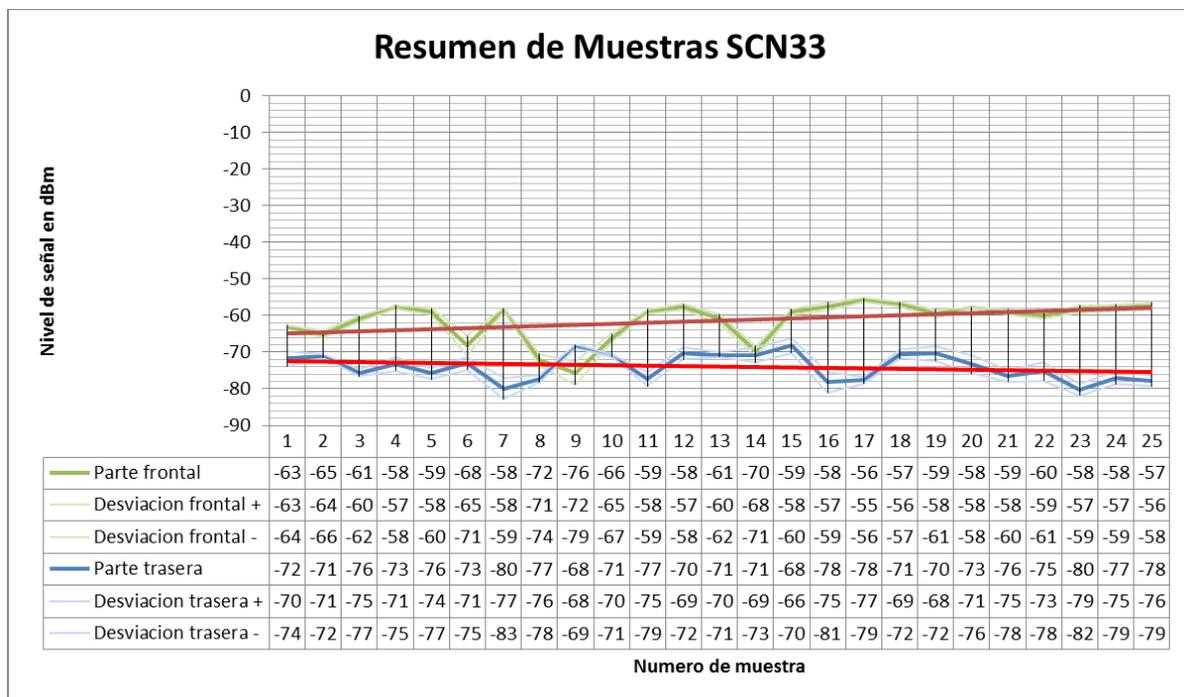


Grafico C.8 - Detalle de muestra SCN33

ANTEPROYECTO

Universidad Acción Pro-Educación y Cultura (UNAPEC)



DECANATO DE INGENIERÍA E INFORMÁTICA

Escuela de Ingeniería

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

“ESTUDIO DE LA ATENUACIÓN DE LA SEÑAL TRANSMITIDA POR LAS CELDAS CELULARES EN LA BANDA DE 1,900 MHZ CAUSADA POR LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MÁS USADOS EN LAS EDIFICACIONES DE LA CIUDAD DE SANTO DOMINGO”

- Br. Joel Morla 2006-0504
- Br. Guillermo Pontier 2006-0498
- Br. Danny Mercado 2005-0649

Santo Domingo, D. N.
Julio 2011

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

1.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA QUE TRATARA EL TRABAJO DE GRADO:	1
1.1 Definición conceptual del problema con citas y referencias bibliográficas	1
1.2 Descomposición de los elementos conceptuales que definen el problema. (Aspectos relevantes que lo constituyen)	2
1.3 Delimitación en el tiempo y el espacio con explicación de razones que lo justifican	4
1.4 Cuestionamientos que se plantea los solicitantes ante el problema a desarrollar	5
1.4.1 Grandes preguntas relativas al concepto que determinarán los Objetivos Generales de Trabajo de Grado	5
1.4.2 Sub-preguntas operativas relacionadas con los elementos del concepto que determinarán los Objetivos Específicos, Secundarios, u Operativos del Trabajo de Grado	5
2.0 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO:	5
2.1 Importancia del tema dentro del entorno real en el cual se realizará el estudio	5
2.2 Datos cuantitativos numerales, con sus fuentes de información, que justifican el estudio del tema y sus elementos	6
3.0 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO:	6
3.1 General	6
3.2 Específicos, Secundarios u Operativos	7
4.0 METODOLOGÍA OPERATIVA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO	7
5.0 TÉCNICAS A UTILIZAR EN EL DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO	8
6.0 ESQUEMA DEL CONTENIDO CON EL POSIBLE ÍNDICE TEMÁTICO DEL TRABAJO	8
7.0 FUENTES DE DOCUMENTACIÓN:	9
7.1 Para el presente Proyecto	9
7.2 Para el Trabajo de Grado (Bibliografía Inicial)	10
8.0 ANEXO:	12
8.1 Análisis de cantidad de celdas para proveer cobertura a según pérdidas de trayectoria	12

1.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las compañías prestadoras de servicios de telefonía celular, a la hora de diseñar sus sistemas para brindar cobertura a una zona geográfica, necesitan datos específicos de la región donde se desea prestar servicio. El medio de transmisión usado para dicho fin, contrario a la telefonía fija, es el aire, que servirá de enlace entre el teléfono móvil y la estación base de la prestadora de servicio, logrando así establecer una comunicación inalámbrica.

Las ondas electromagnéticas propagadas a través de un medio de transmisión, sufren de atenuaciones por varios efectos como: la propiedad del medio, la distancia recorrida, la frecuencia utilizada, los materiales que penetra, entre otros. Por dicho motivo, es de gran interés para el diseñador conocer que tanta energía debe ser provista por el sistema para garantizar la calidad de servicio y un nivel de señal adecuado que permita la comunicación entre el equipo de la compañía y el equipo móvil de los usuarios.

La atenuación causada por materiales es un fenómeno poco estudiado en nuestro país, y esto tiene grandes implicaciones puesto que muchas de las llamadas móviles se realizan dentro de edificaciones. Actualmente la información sobre las pérdidas provocadas por los materiales de construcción es escasa, conduciendo a la consulta de literatura extranjera. Los elementos utilizados en los estudios publicados en dichos textos poseen características adversas a los elementos de construcción regionales, como diferentes materias primas y técnicas de fabricación. De lo anterior escrito, se plantea el problema:

¿Qué grado de atenuación provocan los materiales más usados en la construcción de edificios a las señales usadas en la telefonía celular en la ciudad de Santo Domingo?

1.1 Definición conceptual del problema con citas y referencias bibliográficas

Debido a la proliferación de teléfonos inalámbricos como los celulares, y su común uso en interiores, ya no se puede considerar que todo sistema inalámbrico opere únicamente en entornos abiertos al aire libre, los ambientes cerrados, donde intervienen diversos obstáculos, forman actualmente parte del área de servicio (Kobayashi & Patrik, 1992, p. 8; Walker, 1983, p. 2,719). Pérez Vega (2007) advierte que “la estimación adecuada de la atenuación en los sistemas radioeléctricos de comunicaciones es de primordial importancia e incide de manera directa en su costo. Una sobreestimación de la atenuación, repercute en un aumento de la potencia radiada que conlleva mayor potencia en el transmisor o mayor ganancia de la antena y, eventualmente, puede representar un riesgo potencial de interferencia sobre otros sistemas. Por el contrario, la subestimación de la atenuación da lugar a una reducción a veces considerable del área de cobertura” (p. 439).

La intensidad de señal recibida dentro de un edificio debido a un transmisor externo es afectada por características típicas del recinto, como el tipo de edificación, el diseño y el material de construcción (Rappaport, 2002, p. 131-132). En aquellos sistemas donde la trayectoria de propagación es suficientemente corta, la atenuación debida a la construcción

es un factor clave del diseño puesto que las señales sufren pérdidas por penetración a través de distintos materiales (Kobayashi *et al*, 1992, p. 8; Walker, 1983, p. 2,720). Debido a esto, es imprescindible conocer el área de cobertura proporcionada por cada celda, su importancia radica en dos razones: para asegurarse de que los usuarios en el área de cobertura son servidos con una señal de alta calidad y, saber cómo cada transmisor se suma a los niveles de interferencia en las áreas circundantes (Olexa, R., 2008, p. 285).

Desde el punto de vista de ingeniería, es de primordial importancia el uso de modelos confiables para el diseño del sistema (Vega *et al*, 1997, p. 1167). Para implementar un sistema de radio móvil, el reporte final *COST action 231* advierte que los modelos de propagación de ondas son necesarios para determinar características como la planificación de la cobertura y los niveles de interferencia para una determinada relación señal-interferencia (Damosso, 1993, p. 115). Un planteamiento común en muchas herramientas de planificación existentes para predecir el nivel de señal en el interior del recinto es estimar la atenuación en el trayecto fuera de la proximidad de los edificios y luego añadir una constante de pérdida con el fin de estimar la atenuación total en diversos puntos del interior del mismo. Por lo general, los valores de medición de la pérdida se utilizan como entrada a un modelo que considera la propagación de los rayos a través de una o varios puntos de la construcción.

Actualmente, es difícil determinar modelos exactos para penetración ya que solo un limitado número de experimentos han sido publicados, y estos son muchas veces difíciles de comparar (Rappaport, 2002, p. 132). Siendo esta consideración aplicable a República Dominicana y a nuestra ciudad donde existe mayor densidad poblacional, en su mayoría suscrita a una prestadora de servicios móviles, queda planteado el problema:

Debido a la limitada publicación sobre la atenuación de la señal recibida en un recinto producto de penetrar los material de construcción de edificaciones, y su importancia para la estimación adecuada del presupuesto de potencia total de los sistemas radioeléctricos para lograr un área de cobertura deseada con una señal de alta calidad, existe la necesidad de un estudio cualitativo y cuantitativo de la atenuación a consecuencia de los materiales de construcción, y su aplicación en modelos de propagación confiables que consideren estos datos y represente mejor nuestra realidad local.

1.2 Descomposición de los elementos conceptuales que definen el problema. (Aspectos relevantes que lo constituyen)

Para normalizar conceptos, presentamos la definición de los elementos relevantes a la problemática:

Edificio: Construcción fija, hecha con materiales resistentes (Diccionario RAE, 2001, extraído el 14 de julio de 2011 desde <http://buscon.rae.es/draeI/>).

Material: Elemento que entra como ingrediente en algunos compuestos (Diccionario RAE, 2001, extraído el 14 de julio de 2011 desde <http://buscon.rae.es/draeI/>).

Señal: Cantidad eléctrica, como una corriente o voltaje, que pueden ser utilizados para transmitir la información para la comunicación, control, etc. (ed. Laplante, 2000, p.622).

Nivel de señal: Valor de una señal en un determinado lugar y tiempo (ed. Laplante, 2000, p.623).

Propagación: Movimiento de las ondas electromagnéticas a través de un medio o espacio libre (ed. Laplante, 2000, p.545).

Pérdidas de propagación: Pérdida de trayectoria de una perturbación electromagnética entre las antenas de transmisión y recepción (ed. Gibilisco, 2001, p. 558).

Trayectoria de propagación: Ruta por la que una onda de radio se propaga desde la antena de transmisión a la antena receptora (ed. Laplante, 2000, p.545).

Línea de visión (LOS): Línea recta más corta posible que se puede prever entre un emisor y un receptor (ed. Laplante, 2000, p.392).

Desvanecimiento: Repetidos aumentos y disminuciones de la amplitud de la señal de radio de comunicación en el punto de recepción (ed. Gibilisco, 2001, p. 275).

Atenuación: Disminución exponencial en la amplitud de una señal eléctrica viajando a lo largo de una ruta debido al medio de soporte (ed. Laplante, 2000, p.44).

Decibel (dB): Unidad de medida que describe la relación entre dos cantidades en términos de un logaritmo en base 10 (ed. Laplante, 2000, p.177).

Ruido: Alteración no deseada, originada por el medio de transmisión o del sistema electrónico del propio receptor, que se superpone a la señal original transmitida al momento en que llega al receptor (ed. Laplante, 2000, p.467).

Relación señal-ruido (SNR): Cociente de la potencia de la señal entre la potencia de ruido en un punto dado de un sistema (Vega *et al*, 2007, p. 262).

Interferencia: Cualquier perturbación externa eléctrica o electromagnética que provoca una respuesta no deseada o la degradación de la señal deseada (ed. Laplante, 2000, p.357).

Modelos de propagación: Tienen por finalidad caracterizar en qué medida afecta el medio de propagación a la energía electromagnética transportada por él entre una antena transmisora y otra receptora (Vega *et al*, 2007, p. 438).

Presupuesto de enlace: Calculo que estima qué tipo de pérdidas se deben esperar de una señal con un determinado canal de comunicación o ruta (Rutenbeck *et al*, 2006, p. 154).

Antena: Parte de un sistema transmisor o receptor diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (Aznar *et al*, 2002, p. 15).

Transmisor: Equipos utilizados para generar una señal portadora de RF, modular la señal e irradiarla hacia el espacio (ed. Laplante, 2000, p.700).

Transceptor: Dispositivo que puede servir como transmisor y receptor (ed. Laplante, 2000, p.695).

Potencia radiada: Aquella que transmite una antena al espacio en forma de ondas electromagnéticas (Vega *et al*, 2007, p. 60).

Potencia radiada efectiva (ERP): Potencia efectiva de una antena en una dirección específica, incluyendo la energía de salida del transmisor, la pérdida de la línea de transmisión, y la ganancia de potencia de la antena (ed. Laplante, 2000, p.224).

Cobertura: Zona en la que una estación de radiodifusión o comunicación puede proveer servicio confiablemente (ed. Gibilisco, 2001, p. 152).

Celda: Área atendida por una estación base (ed. Laplante, 2000, p.101).

Interferencia entre células: Interferencia causada por los transmisores en un sistema celular de comunicaciones en un receptor de interés, donde los transmisores interfiriendo se encuentran en otras células adyacentes (ed. Laplante, 2000, p.356).

Comunicación celular: Una radio, teléfono, televisión o la red de comunicación que hace uso de numerosos repetidores fijos. Los suscriptores usan los transceptores móviles que están siempre dentro de los límites de al menos un repetidor (ed. Gibilisco, 2001, p. 106).

Estación base: Transceptor fijo en un sistema de comunicación móvil (ed. Laplante, 2000, p.57).

Estación móvil: Parte de un sistema de comunicaciones por radio, que no está permanentemente situado en una zona geográfica determinada (ed. Laplante, 2000, p.422).

Frecuencia: Tasa de repetición de una señal periódica utilizada para representar o procesar una señal de comunicación (ed. Laplante, 2000, p.279).

Enlace descendente: Señal enviada desde una estación base activa a la estación móvil, por lo general en una frecuencia diferente a la ascendente (ed. Gibilisco, 2001, p. 212).

Enlace ascendente: Enlace de comunicación desde el móvil a la estación base central (ed. Laplante, 2000, p.718).

Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM): Conjunto de especificaciones que describen los sistemas de la radio celular móviles digitales del sistema Paneuropeo (ed. Laplante, 2000, p.304).

1.3 Delimitación en el tiempo y el espacio con explicación de razones que lo justifiquen

A causa del auge de la competencia en el negocio de las telecomunicaciones, el estudio se hace necesario en estos tiempos para poder brindar una calidad de servicio competente a los usuarios. El tiempo de desarrollo de la investigación estará pautado para el cuatrimestre correspondiente al periodo septiembre - diciembre del año 2011, concluyendo con la entrega del trabajo de grado con sus debidas conclusiones y recomendaciones que responderán a los objetivos de la investigación.

Se escogerán diversos entornos donde se tomaran muestras suficientes con tal de determinar el nivel de atenuación referente a un material en cuestión y una mayor fidelidad de los datos. Los lugares selectos formaran parte de la ciudad de Santo Domingo, zona donde existe una mayor densidad poblacional y de usuarios de telefonía móvil, y gran diversidad de estructuras que poseen elementos de interés para el estudio (CONAPOFA, 2010). Entre estas ubicaciones se encuentran el Campus Fernando Arturo de Meriño de la Universidad APEC y el condominio Ortega y Gassette en el ensanche la fe, entre otros posibles candidatos.

1.4 Cuestionamientos que se plantean los solicitantes ante el problema a desarrollar

1.4.1 Grandes preguntas relativas al concepto que determinarán el Objetivo General de Trabajo de Grado

- ¿Cuál es el grado de atenuación provocado al penetrar las señales de telefonía celular en la red GSM por los materiales más usados en la construcción de edificios en la ciudad de Santo Domingo?

1.4.2 Sub-preguntas operativas relacionadas con los elementos del concepto que determinarán los Objetivos Específicos, Secundarios u Operativos del Trabajo de Grado

- ¿Qué materiales de construcción son relevantes en la investigación?
- ¿Cuál es la diferencia entre los materiales extranjeros y locales seleccionados?
- ¿Cuál será la discrepancia entre los resultados adquiridos y los de otros autores?
- ¿Cómo impacta esta discrepancia de datos en el plan de cobertura y calidad de señal?
- ¿Cuántos modelos de propagación existentes consideran estos datos?
- ¿Cuál de los modelos es el más adecuado?
- ¿Cuál es la diferencia entre los niveles esperados de señal en algunos puntos a partir de un modelo de propagación usando los datos obtenidos en la investigación y los datos muestreados?

2.0 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

2.1 Importancia del tema dentro del entorno real en el cual se realizará el estudio

La presente investigación tiene implicaciones prácticas en la telefonía celular. Los resultados que se presentaran son útiles para la estimación de cobertura de una celda, y con esto la determinación del presupuesto de enlace, es decir, la potencia necesaria para cumplir los parámetros de diseño. Esto es importante puesto que como producto del crecimiento y penetración de la telefonía móvil en el mercado, muchas llamadas se realizan dentro de inmuebles, como centros comerciales, campos universitarios, edificios empresariales, etc.

La potencia total a ser utilizada en un sistema radioeléctrico incide directamente en su costo, haciendo su estimación adecuada importante; si se sobreestima puede presentar riesgo de interferencia en el sistema, en cambio si se subestima, puede reducir la cobertura deseada y la calidad del servicio. En una red celular, los niveles de interferencia entre celdas limitan las distancias entre estaciones base, lo cual influye en la capacidad del sistema para soportar una determinada demanda de usuarios (Rappaport, 2002, p. 37).

Estas informaciones convienen a los diseñadores de las redes móviles, puesto que en aquellas celdas donde la cobertura es suficientemente corta, la atenuación al penetrar la señal materiales de construcción es un factor importante. También faculta el desarrollo de otros modelos y teorías que requieran la información concluyente del proyecto, así como sugerir estudios similares para distintos entornos, materiales, o frecuencias distintas.

Se pretende eliminar la incertidumbre que causa consultar la literatura extranjera utilizando los datos del estudio a realizar en nuestra región y, se empieza a cerrar la brecha que la falta de esta información representa, por los pocos antecedentes con que cuenta. Se utilizara la frecuencia de 1,900 MHz, ya que a esta operan una cantidad importante de móviles pertenecientes a la red de mayor cobertura nacional, la GSM. Esta frecuencia pertenece al enlace descendente que proviene de las estaciones base y presenta mayores pérdidas de enlace que el ascendente (Cardama *et al.*, 2002, p. 41; Rappaport, 2002, p. 505).

Los datos ofrecidos serán tanto de interés para las empresas telefónicas, como para cualquier compañía que desee prestar servicios de radiocomunicación a la frecuencia estudiada, en el interior de algún inmueble que interactúe con un transmisor externo.

2.2 Datos cuantitativos numerales, con sus fuentes de información, que justifican el estudio del tema y sus elementos

Según las cifras del INDOTEL, al 3 de marzo del año en curso, la Republica Dominicana cuenta con 8, 773,699 líneas móviles. Dicha totalidad representa una tele-densidad¹ de 93.5%. Esto, en comparación con el 75% a finales del 2008, demuestra el

¹ Tele densidad: número de suscriptores del servicio por cada 100 habitantes. Oficina Nacional de Estadística.

grado de crecimiento y penetración que la telefonía móvil ha logrado en el mercado en tan solo tres años y su importancia en las telecomunicaciones (INDOTEL, 2011).

Si se asume un sistema móvil que opere a 1,900 MHz, con una altura de las antenas de estaciones base de 45 metros, y la altura de los móviles a 2 metros, en un área metropolitana, teniendo como limitante una pérdida de enlace máxima de 139.5 dB, usando el modelo COST 231 (Rappaport, 2002, p. 120) obtenemos un área de cobertura de 3.8 Km² por celda; si se reducen las pérdidas arbitrariamente en el modelo en 6 dB, se obtiene un área de 7.93 km², y si, por el contrario se añaden 6 dB, su área se reduciría a tan solo 1.62 Km². Si se deseara ofrecer cobertura a un área de servicio de 226.52 Km², se necesitarían respectivamente 60, 29 y 140 celdas para brindar cobertura (ver Anexo). Tan solo estos 6 dB de diferencia significan para el dimensionamiento del sistema un ahorro de 31 celdas, o bien una carencia de 80. Todo se verá reflejado directamente en los costos asociados por cada estación base, antenas, etc.

Por otro lado, para realizar una corrección de algunas celdas del sistema instalado, mediante un aumento de la potencia, igualmente será necesario estimar adecuadamente las pérdidas para lograr un ajuste eficiente. Esto reflejara un gasto adicional por las modificaciones de lugar y la variación en la tarifa eléctrica debido a los cambios de energía demandada por el sistema.

3.0 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

3.1 General

- Determinar el grado de atenuación al penetrar las señales de telefónica celular en la banda de 1,900 MHz por los materiales más usados en la construcción de edificios en la ciudad de Santo Domingo.

3.2 Específicos, Secundarios u Operativos

- Seleccionar los materiales de construcción relevantes en la investigación.
- Analizar la diferencia entre los materiales extranjeros y locales.
- Comparar los resultados adquiridos con los presentados por otros autores.
- Determinar el impacto de las discrepancias de los datos en el plan de cobertura y calidad de señal.
- Analizar los modelos de propagación existentes que consideren esta información.
- Recomendar el modelo más adecuado.
- Comparar la diferencia entre los niveles esperados de señal en algunos puntos a partir de un modelo de propagación usando los datos obtenidos en la investigación y los datos muestreados.

4.0 METODOLOGÍA OPERATIVA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO

El tipo de investigación será correlacionar con elementos descriptivos. Correlacionar, ya que se busca medir el grado de relación que existe entre dos o más variables en un contexto particular, conociendo el comportamiento de otras variables relacionadas, y descriptivo, para medir los diversos aspectos y componentes del fenómeno a investigar (Samiperi *et al*, 1991, p. 61-65). En este contexto se estudiara la correlación entre la atenuación de la señal y el tipo de material que la obstruya.

El método a usar será no experimental, puesto que el fenómeno se observara como se manifiesta en su contexto natural, para después ser analizado. En la investigación no experimental, la situación a medir no es provocada intencionalmente, sino que ya ha ocurrido el fenómeno y no se tiene control sobre las variables independientes (Sampieri *et al*, 1991, p. 160-163). En esta investigación se muestrearán los niveles de señal en entornos reales con elementos no modificables como edificios, que contienen materiales objetos de medición.

El diseño de investigación será transversal puesto que se recolectaran datos en un margen de tiempo y espacio, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. La metodología operativa que se seguirá durante el desarrollo de la investigación constará de etapas que definen todo el proceso de investigación, para desarrollar de forma intensiva cada uno de los elementos que la componen. El desarrollo del proyecto será cubierto de 4 etapas principales:

- *Primera etapa:* Revisión de la literatura, determinando el estado de arte sobre el tema en investigación.
- *Segunda etapa:* Análisis operacional, muestreo y registro de datos y medidas.
- *Tercera etapa:* Comparación, análisis de resultados y aplicación en modelo de propagación.
- *Cuarta etapa:* Conclusión y recomendaciones del proyecto elaborado.

5.0 TÉCNICAS A UTILIZAR EN EL DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Las técnicas metodológicas a utilizar en el desarrollo del trabajo de grado, serán:

- Consulta bibliográfica
- Muestreo y registro de datos
- Estadística y procesamiento de la información
- Aplicación y comparación de resultados

En la consulta bibliográfica se analizarán recomendaciones de expertos y metodologías que reduzcan el margen de error en el proceso de muestreo, obteniendo así una mayor fidelidad de datos representativos. El muestreo será inter-seccional y semi-

aleatorio, es decir se tomaran durante varias secciones, en distintos puntos, a diferentes horarios. Los datos tomados en los puntos de muestreo serán promediados estadísticamente y se calcularan sus respectivas desviaciones típicas o estándar, teniendo en cuenta una cantidad de muestras de no menos de 50 mediciones, y un máximo de 100 (Vega, 1997, p. 2).

La variable a medir se obtendrá con el método de presencia-ausencia del material, determinando así los cambios provocados por la variable. Contrastando los datos registrados con esta técnica se determinara el grado de atenuación provocado por el material mediante diferenciación matemática. Las mediciones adquiridas serán comparadas con otras publicadas por diversos autores. Finalmente, los datos obtenidos y los publicados por otros autores se aplicaran en un modelo de propagación, modelando un entorno, y comparando los resultados predichos por este, en contraste con los resultados muestreados. Estos métodos pueden estar sujetos a modificaciones según recomendaciones de los textos y expertos consultados.

El instrumento de medición será un móvil activado en la red 2G con el sistema EDGE, que opera a la frecuencia de 1,900 MHz. Para obtener los datos a partir de dicho dispositivo, este será configurado en modo de prueba de campo (WPSANTENNAS, 2011), que nos permitirá obtener datos de la señal recibida en su antena proveniente de las estaciones bases circundantes (Wikipedia, 2011).

6.0 ESQUEMA DEL CONTENIDO CON EL POSIBLE ÍNDICE TEMÁTICO DEL TRABAJO

ÍNDICE TEMÁTICO

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

CAPÍTULO I: PROPAGACIÓN MÓVIL

- **Propagación de las Ondas Electromagnéticas**
 - Propiedades básicas de las ondas electromagnéticas
 - Propagación en el espacio libre y en el entorno terrestre
 - Modos de propagación
 - Efectos y mecanismos de propagación
 - Densidad de flujo de potencia e intensidad de campo
- **Modelos de propagación móviles**
 - Tipos de modelos
 - Modelo de propagación en el espacio libre
 - Diseño práctico de presupuesto de enlace usando modelos de pérdidas de trayectoria
 - Modelos de propagación en exteriores.
 - Modelos de penetración de edificios
 - Modelos de propagación de interiores

CAPITULO II: PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

- Materiales seleccionados

- Descripción de los espacios muestrales
- Descripción del proceso de muestreo
- Colección y procesamiento de datos
- Resumen de datos muestreados

CAPÍTULO III: PERDIDAS POR PENETRACIÓN A 1,900 MHZ

- Antecedentes de medidas de penetración de señal
- Presentación y análisis de resultados: pérdidas por material
- Comparación de medidas
- Aplicación de los resultados en modelos de propagación
- Comparación de los niveles predichos con los muestreados
- Impacto sobre la telefonía móvil

CAPITULO IV: CONCLUSIÓN

- Conclusiones generales
- Recomendaciones
- Implicación para investigaciones futuras

REFERENCIAS

GLOSARIO

ANEXOS

7.0 FUENTE DE DOCUMENTACIÓN

7.1 Para el presente Proyecto

- [1].Cardama Aznar, Á., Jofre Roca, L., Rius Casals, J. M., Romeu Robert, J. & Blanch Boris, S. (2002). Consideraciones generales sobre antenas. En *Antenas* (2ª ed.). España: Ediciones UPC.
- [2].*Cellular phone field test modes* (2011, Mayo). [en línea]. Extraído el 24 de julio de 2011 desde <http://www.wpsantennas.com/pdf/testmode/FieldTestModes.pdf>.
- [3].Chandra, P., Dobkin, D. M., Bensky, A., Olexa, R., Lide, D. A. & Dowla, F. (2008). Propagation modeling and measuring. En *Wireless networking* (pp. 285-311) (Colección Newnes: know it all). Estados Unidos: Elsevier.
- [4].Consejo Nacional de Población y Familia (CONAPOFA) (2010, Julio). [En línea]. Extraído el 24 de julio de 2011 desde <http://www.conapofa.gov.do/estimaciones.asp>.
- [5].Damosso, E. (1993). Propagation prediction models. En *COST Action 231: Evolution of land mobile radio (including personal communication), Final report*. Italia.
- [6].*Diccionario de la real academia española* (2001), (22ª ed.), [base de datos]. España. Extraído el 14 de julio de 2011 desde <http://buscon.rae.es/draeI/>.
- [7].*Field test mode* (2011, Julio). [en línea]. Extraído el 24 de julio de 2011 desde http://en.wikipedia.org/wiki/Field_test_mode.
- [8].Ed. Gibilisco, S. (2001). *The illustrated dictionary of electronics* (8ª ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.

- [9]. *Indicadores de telefonía e internet de la Republica Dominicana* (2011, Julio), [en línea]. Santo Domingo, R.D: Instituto Dominicano de las Telecomunicaciones (INDOTEL). Extraído el 24 de julio de 2011 desde http://www.indotel.gob.do/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,110/Itemid,757/.
- [10]. Kobayashi, H. K. & Patrick, G. (1992). *Preliminary building attenuation model*. En NTIA Technical Memorandum 92-155. Estados Unidos: U.S. Department of commerce.
- [11]. Ed. Laplante, P. A. (2000). *Electrical engineering dictionary* (1^a ed.). Estados Unidos: CRC Press LLC.
- [12]. Pérez Vega, C., García, G. J. L. & López Higuera, J. M. (1997). A simple and efficient model for indoor path-loss prediction. En *Meas. Sci. technol.* 8. 1166-1173.
- [13]. Pérez Vega, C., Zamanillo, S. & López, C. (2007). *Sistemas de telecomunicación* (1^a ed.). España: PubliCan - Ediciones de la universidad de Cantabria.
- [14]. Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications principles and practice* (2^a ed.). Estados Unidos: Prentice Hall.
- [15]. Rutenbeck, Jeff & Rutenbeck, Blaine. (2006). *Tech terms: what every telecommunications and digital media person should know* (3a ed.). Estados Unidos: Elsevier. (p. 154).
- [16]. Sampieri, R. H., Collado, C. F. & Lucio, P. B. (1991). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- [17]. Walker, E. H. (1983). Penetration of radio signals into buildings in the cellular radio environment. En *The bell system technical journal* 62 (9), 2,719-2,734.

7.2 Para el Trabajo de Grado (Bibliografía Inicial)

- [1]. Allen, K. C., DeMinco, N., Hoffman, J. R., Lo, Y. & Papazian, P. B. (1994). Building penetration loss measurements at 900 MHz, 11.4 GHz, and 28.8 GHz. En *NTIA report 94-306*.
- [2]. Blaunstein, N. & Christodoulou, C. (2007). *Radio propagation and adaptive antennas for wireless communication links: terrestrial, atmospheric and ionospheric*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- [3]. Durgin, G., Rappaport, T. S. & Xu, H. (1998). Measurements and models for radio path loss and penetration loss in and around homes and trees at 5.85 GHz. En *IEEE transactions on communications*, 46 (11), 1484-1495.

- [4].Feick, R., Grote, W. & Hristov, H. (2000). Criterios y procedimientos para mediciones de propagación electromagnética en ambientes confinados. En *IX congreso internacional de telecomunicaciones Senacitel 2000*. Chile.
- [5].Gahleitner, R. (1994). *Radio wave propagation in and into urban buildings*. PhD-Thesis, Technical University Vienna, Austria.
- [6].Haslett, C. (2007). *Essentials of radio wave propagation*. Inglaterra: Cambridge University Press.
- [7].Holis, J., & Pechac, P. (2008). Penetration loss measurement and modeling for HAP mobile systems in urban environment. En *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. Abril, 2008.
- [8].Hoppe, R., Wölfle, G., & Landstofer, F. M., (1999). Measurement of Building Penetration Loss and Propagation Models for Radio Transmission into Buildings. En *50th Vehicular Technology Conference (VTC)*. Sept. 1999, pp. 2298 – 2302.
- [9].Miura, Y., Oda, Y. & Taga, T. (2002). Outdoor-to-indoor propagation modelling with the identification of path passing through wall openings. En *IEEE Xplore*, 1, 130-134.
- [10].LaSorte, N. J., Burette, Y., & Refai, H. H. (2010). Experimental characterization of Electromagnetic propagation of a hospital from 55-1950MHz. En *Proceedings of the Asia EMC Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 12-16 de Abril, China.
- [11].Parsons, J. D. (2000). *The mobile radio propagation channel* (2a ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- [12].Sizun, H. (2004). *Radio wave propagation for telecommunication applications*. Francia: Springer.
- [13].Turkmani, A. M. D. & de Toledo, A. F. (1992). Propagation into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz; En *Vehicular technology conference*, 2, 633-636.
- [14].Turkmani, A. M. D. & de Toledo, A. F. (1993). Characterisation of radio transmissions into and within buildings; En *Antennas and propagation*, 1, 136-141.
- [15].Turkmani, A. M. D. & de Toledo, A. F. (1993b). Modelling of radio transmissions into and within multistorey buildings at 900, 1800, and 2300 MHz; En *Communications, speech and vision, IEE Proceedings I*, 140 (6), 462-470.
- [16].Turkmani, A. M. D., de Toledo, A. F. & Parsons, J. D. (1998) Estimating coverage of radio transmission into and within buildings at 900, 1800, and 2300 MHz; En *Personal Communications, IEEE*, 5 (2), 40-47.

8.0 ANEXO:

8.1 Análisis de cantidad de celdas para proveer cobertura a según pérdidas de trayectoria.

Área de servicio:

San Cristóbal: 226.52 Km²

Datos estación base (BTS):

Frecuencia (F): 1,900 MHz

Potencia de transmisión (Ptx): 40 dBm

Potencia de recepción (sensibilidad) (Prx): -110dB

Ganancia de la Antena. (ANT G. rx): 17dB

Altura (Hbts): 45 m

Datos estación móvil (MS):

Potencia de transmisión (Ptx): 30dBm

Potencia de recepción (sensibilidad) (Prx): -85 dB

Ganancia de la Antena. (ANT G. rx): 0.5 dB

Altura (Hms): 2 m

Perdidas máximas permitidas de enlace de bajada

Ptx(bts) - Prx(ms) - Cl - Ll - Cl + ANT. G. tx + ANT. G. rx

; 40dbm - (-85dB) - (3dB) + 17dB + 0.5dB

; 125db - 3dB + 17.5dB

= 139.5dB

Radio de la celda usando el modelo Cost231

Perdidas máximas permitidas de trayectoria

= 46.3 + 33.9 log F - 13.82 log Hbts - Ahr + (44.9 - 6.55 log Hbts)*(log D) + C

|Ahr = 3.2 (log 11.75* hr(ms))² - 4.97dB|

|Ahr = 1.05dB|

; 46.3+33.9 log (1900 Mhz)-13.82 log (35 m)-1.05db + (44.9-6.55 log 35 m)*(log D)+C

; 157.45 - 21.34 + 34.786*(log D) + 3 - 1.05

; 139.5 = 138.45 + 34.786*(log D)

; 1.44/34.786 = (log D)

; 0.041395 = log D

r = 10^{0.0411396}

r = 1.1Km

Área de la celda = (π*r²)

= 3.80 Km²

Numero de celdas para proveer cobertura para un área específica

$$\begin{aligned} & \text{Sección de área (San Cristóbal) / Área de la celda} \\ & = 226.52 \text{ Km}^2 / 3.80 \text{ Km}^2 \end{aligned}$$

$$= \underline{60 \text{ Celdas}}$$

Calculo para un aumento adicional de las perdidas en 6 dB

Perdidas máximas permitidas de trayectoria

$$\begin{aligned} & 46.3 + 33.9 \log F - 13.82 \log \text{Hbts} - \text{Ahr} + (44.9 - 6.55 \log \text{Hbts}) * (\log D) + C + \underline{6} \\ & \quad | \text{Ahr} = 3.2 (\log 11.75 * \text{hr}(\text{ms}))^2 - 4.97 \text{dB} | \\ & \quad | \text{Ahr} = 1.05 \text{dB} | \\ & ; 46.3 + 33.9 \log (1900 \text{ Mhz}) - 13.82 \log (35 \text{ mts}) - 1.05 \text{db} + (44.9 - 6.55 \log 35 \text{ mts}) * (\log D) + C + \underline{6} \\ & ; 157.45 - 21.34 + 34.786 * (\log D) + 3 - 1.05 + \underline{6} \\ & ; 139.5 = 144.5 + 34.786 * (\log D) \\ & ; -5 / 34.786 = (\log D) \\ & ; -0.1437 = \log D \\ & r = 10^{-0.1437} \\ & r = 718 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Área de la celda} = (\pi * r^2)$$

$$= 1.62 \text{ Km}^2$$

Numero de celdas para proveer cobertura para un área específica

$$= 226.52 \text{ Km}^2 / 1.62 \text{ Km}^2$$

$$= \underline{140 \text{ Celdas}}$$

Calculo para una reducción de las perdidas en 6 dB

Perdidas máximas permitidas de trayectoria

$$\begin{aligned} & 46.3 + 33.9 \log F - 13.82 \log \text{Hbts} - \text{Ahr} + (44.9 - 6.55 \log \text{Hbts}) * (\log D) + C - \underline{6} \\ & \quad | \text{Ahr} = 3.2 (\log 11.75 * \text{hr}(\text{ms}))^2 - 4.97 \text{dB} | \\ & \quad | \text{Ahr} = 1.05 \text{dB} | \\ & ; 46.3 + 33.9 \log (1900 \text{ MHz}) - 13.82 \log (35 \text{ m}) - 1.05 \text{db} + (44.9 - 6.55 \log 35 \text{ m}) * (\log D) \\ & \quad + C + \underline{6} \\ & ; 157.45 - 21.34 + 34.786 * (\log D) + 3 - 1.05 - \underline{6} \\ & ; 139.5 = 132.5 + 34.786 * (\log D) \\ & ; 7 / 34.786 = (\log D) \\ & ; 0.2012 = \log D \\ & r = 10^{0.2012} \\ & r = 1.58 \text{ Km} \end{aligned}$$

$$\text{Área de la celda} = (\pi * r^2)$$

$$= 7.93 \text{ Km}^2$$

Numero de celdas para proveer cobertura para un área específica

$$= 226.52 \text{ Km}^2 / 1.62 \text{ Km}^2$$

$$= \underline{\underline{29 \text{ Celdas}}}$$