

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS WIFI

Alumno	<i>Trigo Rueda, Iñigo</i>
Director	<i>Guerra Pereda, David</i>
Departamento	<i>Telecomunicaciones</i>
Curso académico	<i>2018/2019</i>

Bilbao, 8 de marzo de 2019

Índice

Índice	2
1. Abstract	4
2. Lista de tablas/ilustraciones/acrónimos	5
Lista de tablas.....	5
Lista de ilustraciones	7
Lista de Acrónimos	9
3. Introducción	10
4. Contexto.....	11
4.1. Introducción a los sistemas WiFi.....	13
4.2. Ubicación de los sistemas WiFi en el espectro radioeléctrico	14
5. Alcance/Objetivos	15
6. Beneficios del trabajo realizado.....	16
6.1. Beneficios técnicos.....	16
6.2. Beneficios económicos.....	16
6.3. Beneficios sociales.....	17
7. Estado del arte	18
7.1. Marco legal y aspectos generales sobre la medida de la exposición WiFi.....	18
7.2. Estándares de medida de la exposición WiFi	18
7.3. Antecedentes: Metodologías de medida definidas por otros autores	19
7.4. Metodología de medida considerada para la realización del TFM	20
8. Descripción del trabajo	23
8.1. Adaptación de la metodología y realización del programa de medidas	23
8.2. Pruebas de laboratorio.....	25
8.3. Planificación y realización de campaña de medidas	28
8.4. Procesado de datos	31
8.5. Análisis de resultados y conclusiones	35
9. Descripción de tareas.....	49
9.1. Equipo de trabajo.....	49
9.2. Definición de Paquetes de Trabajo y Tareas	49
9.3. Diagrama de Gantt	51
10. Presupuesto ejecutado	53
11. Análisis Previo de Riesgos	55
11.1. Matriz Probabilidad-Impacto	56

12.	Conclusiones.....	58
13.	Referencias.....	60
	Anexo I. Normativa aplicable	62
	Orden IET/787/2013.....	62
	Orden CTE/23/2002	62
	Real Decreto 1066/2001	62
	Real Decreto 299/2016	63
	Anexo II. Aspectos relativos al sistema de medidas.....	64
	Anexo III. Ampliación de resultados.....	66
	Variabilidad espacial.....	66
	Variación temporal.....	75
	Estudio del comportamiento de la señal	85

1. Abstract

Este documento representa el Trabajo de Fin de Máster llevado a cabo sobre el análisis de la evolución de la exposición electromagnética en sistemas WiFi, así como, la caracterización de la universidad, en donde alumnos y trabajadores se ven expuestos a estas radiaciones en su día a día. Hoy en día, la preocupación social sobre la radiación electromagnética y sus efectos sobre la salud ha aumentado considerablemente, por ello, la necesidad de una metodología adecuada para medir la radiación en sistemas WiFi, ya que por ahora no hay ninguna metodología definida que contemple la banda de 5 GHz. Para verificarlo, se tomará medidas en la universidad y se compararán los resultados entre las diferentes bandas y con otras metodologías utilizadas anteriormente con el fin de sacar conclusiones y mostrar resultados para reafirmar que se trata de una metodología que, en un futuro, sea utilizada para estudiar la radiación en los sistemas WiFi. Al tomar medidas en la universidad, se cumple el segundo objetivo de este trabajo, se caracterizará ambas bandas y se verá que cumple con los límites de exposición con el objetivo de comprobar la seguridad de sus trabajadores y estudiantes.

Dokumentu honek, WiFi sistemen esposizio elektromagnetikoa neurtzeko metodologia egokiaren ikasketa den Master Amaierako Lana aurkezten du, baita unibertsitateko karakterizazioa, non langile eta ikasleak erradiazio hauek egunero jasaten dituzten. Gaur egun, erradiazio elektromagnetikoarenganako gizartearen kezka eta osasunean dituen efektuak nabarmenki handitu dira; horregatik, WiFi sistemen erradiazioa neurtzeko metodologia egokien beharra dago, orain arte ez baitago hau egiteko metodologia konkreturik 5 GHz-ko frekuentzian. Ziurtatzeko, unibertsitatean neurriak hartuko dira eta beste metodologia batekin alderatuko dira ondorioak ateratzeko eta etorkizunean WiFi sistemen erradiazioa neurtzeko metodologia bat izango dela erakusteko. Unibertsitatean neurriak hartzerakoan lanaren bigarren helburua lortzen da, emaitzak karakterizatu eta erradiazioaren muga betetzen dela ikusiko da, langile eta ikasleen segurtasuna bermatuz.

This document represents the Master End Work carried out on the analysis of the evolution of electromagnetic exposure in WiFi systems, as well as the characterization of the university, where students and workers are exposed to radiation daily. Nowadays, social concern about electromagnetic radiation and its effects on health has increased considerably, therefore, the need for an appropriate methodology for measuring radiation in WiFi systems, as for now there is no methodology defined for this purpose in the 5 GHz band. To verify this, measures will be taken at the University and the results will be compared between the different bands and with other methodologies used before in order to draw conclusions and show results to reaffirm that it is an appropriate methodology which maybe will be used to study radiation in the WiFi systems. Taking measurements in the University, the second objective of this work is fulfilled. The university and the 2,4 and 5 GHz bands are characterized, and it will be seen that the limits of exposure obey the law with the objective of check the security of their workers and students.

2. Lista de tablas/ilustraciones/acrónimos

Lista de tablas

Tabla 1. Niveles máximos de referencia para diversas frecuencias.....	12
Tabla 2. Configuración del analizador para la metodología para sistemas WiFi en la banda de 2,4 GHz	22
Tabla 3. Configuración del analizador para la metodología para sistemas WiFi en la banda de 5 GHz	25
Tabla 4. Diferencia de estadísticos entre medir con la antena vertical y la antena horizontal..	26
Tabla 5. Diferencia de estadísticos entre medir con un “Sweep Time” de 5 ms y 20 ms	27
Tabla 6. Lugares de medida variabilidad temporal	28
Tabla 7. Lugares de medida para estudiar la variabilidad espacial.....	29
Tabla 8. Estadísticos calculados para el estudio de la variabilidad espacial	32
Tabla 9. Resultados variabilidad espacial en la banda de 2,4 GHz.....	35
Tabla 10. Resultados variabilidad espacial en la banda de 5 GHz.....	35
Tabla 11. Comparación de nivel de señal en clases entre ambas bandas	38
Tabla 12. Valores de similitud de las distribuciones estadísticas respecto de la señal medida en una posición de un aula al azar	41
Tabla 13. Diferencias de los estadísticos durante el día y la noche en TSR en 2,4 GHz.....	42
Tabla 14. Diferencias de los estadísticos durante el día y la noche en TSR en 5 GHz.....	43
Tabla 15. Diferencias entre las bandas de 2,4 y 5 GHz en una hora al azar (de 10:00 a 11:00) .	46
Tabla 16. Valores de similitud de las distribuciones estadísticas respecto de la señal medida en cada caso.....	48
Tabla 17. Miembros del equipo de trabajo y cargo	49
Tabla 18. Costes unitarios recursos humanos.....	53
Tabla 19. Costes unitarios amortizaciones.....	53
Tabla 20. Costes en el apartado de gastos.....	53
Tabla 21. Costes desglosados recursos humanos	54
Tabla 22. Costes desglosados amortizaciones	54
Tabla 23. Costes desglosados y coste final del trabajo	54
Tabla 24. Matriz probabilidad-impacto.....	56
Tabla 25. Niveles máximos de referencia para diversas frecuencias.....	63
Tabla 26. Estadísticos del aula P1G1 por posición en la banda de 2,4 GHz	66
Tabla 27. Estadísticos generales del aula P1G1 en la banda de 2,4 GHz	67
Tabla 28. Estadísticos del aula P1G1 por posición en la banda de 5 GHz	67
Tabla 29. Estadísticos generales del aula P1G1 en la banda de 5 GHz	68
Tabla 30. Estadísticos del aula P3B1 por posición en la banda de 2,4 GHz	68
Tabla 31. Estadísticos generales del aula P3B1 en la banda de 2,4 GHz.....	68
Tabla 32. Estadísticos del aula P3B1 por posición en la banda de 5 GHz	69
Tabla 33. Estadísticos generales del aula P3B1 en la banda de 5 GHz.....	69
Tabla 34. Estadísticos del aula P3C3 por posición en la banda de 2,4 GHz	69
Tabla 35. Estadísticos generales del aula P3C3 en la banda de 2,4 GHz.....	70
Tabla 36. Estadísticos del aula P3C3 por posición en la banda de 5 GHz	70
Tabla 37. Estadísticos generales del aula P3C3 en la banda de 5 GHz.....	71
Tabla 38. Estadísticos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P1G1.....	71

Tabla 39. Estadísticos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3B1	72
Tabla 40. Estadísticos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3C3	72
Tabla 41. Estadísticos de la metodología adaptada y el exposímetro en P1G1.....	73
Tabla 42. Estadísticos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3B1	74
Tabla 43. Estadísticos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3C3	74
Tabla 44. Tabla de percentiles y máximos durante el lunes en TSR en la banda de 2,4 GHz	76
Tabla 45. Tabla de percentiles y máximos durante el martes en TSR en la banda de 2,4 GHz...	76
Tabla 46. Tabla de percentiles y máximos durante el miércoles en TSR en la banda de 2,4 GHz	76
Tabla 47. Tabla de percentiles y máximos durante el jueves en TSR en la banda de 2,4 GHz....	77
Tabla 48. Tabla de percentiles y máximos durante el viernes en TSR en la banda de 2,4 GHz ..	77
Tabla 49. Tabla de percentiles y máximos durante el sábado en TSR en la banda de 2,4 GHz ...	78
Tabla 50. Tabla de percentiles y máximos durante el domingo en TSR en la banda de 2,4 GHz	78
Tabla 51. Tabla de percentiles y máximos durante el lunes en TSR en la banda de 5 GHz	79
Tabla 52. Tabla de percentiles y máximos durante el martes en TSR en la banda de 5 GHz	79
Tabla 53. Tabla de percentiles y máximos durante el miércoles en TSR en la banda de 5 GHz .	80
Tabla 54. Tabla de percentiles y máximos durante el jueves en TSR en la banda de 5 GHz.....	80
Tabla 55. Tabla de percentiles y máximos durante el viernes en TSR en la banda de 5 GHz	81
Tabla 56. Tabla de percentiles y máximos durante el sábado en TSR en la banda de 5 GHz	81
Tabla 57. Tabla de percentiles y máximos durante el domingo en TSR en la banda de 5 GHz...	82
Tabla 58. Tabla de percentiles y máximos durante el día de cada día de la semana en la banda de 2,4 GHz	82
Tabla 59. Tabla de percentiles y máximos durante el día de cada día de la semana en la banda de 5 GHz	83
Tabla 60. Tabla de diferencias de percentiles y máximos durante el día de cada día de la semana entre ambas bandas.....	83
Tabla 61. Tabla de percentiles y máximos durante la noche de cada día de la semana en la banda de 2,4 GHz	83
Tabla 62. Tabla de percentiles y máximos durante la noche de cada día de la semana en la banda de 5 GHz	83
Tabla 63. Tabla de diferencias de percentiles y máximos durante la noche de cada día de la semana entre ambas bandas	84
Tabla 64. Valores de similitud de las distribuciones estadísticas respecto de la señal medida .	86

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Pasos a seguir para la certificación de estaciones radioeléctricas.....	13
Ilustración 2. Comparación de soluciones: Antena Vertical y Antena Horizontal.	26
Ilustración 3. Comparación de soluciones: “Sweep Time” de 5 ms y “Sweep Time” de 20 ms..	27
Ilustración 4. Ubicación de los lugares de medida para el estudio de variabilidad temporal	29
Ilustración 5. Ubicación de los lugares de medida para estudiar la variabilidad espacial (piso 3)	30
Ilustración 6. Ubicación de los lugares de medida para estudiar variabilidad espacial (piso 1).	30
Ilustración 7. Ejemplo gráfica variabilidad espacial	33
Ilustración 8. Ejemplo gráfico variabilidad espacial por clases	33
Ilustración 9. Ejemplo gráfica variabilidad temporal	34
Ilustración 10. Resultados variabilidad espacial en la banda de 2,4 GHz	35
Ilustración 11. Resultados variabilidad espacial en la banda de 5 GHz	36
Ilustración 12. Comparación de bandas en la clase P1G1.....	37
Ilustración 13. Comparación de bandas en la clase P3C3	37
Ilustración 14. Comparación de bandas en la clase P3B1	38
Ilustración 15. Comparación de percentiles y máximos medidos en 2,4 GHz en 2016 y 2019 ..	39
Ilustración 16. Comparación de metodologías con el exposímetro y el analizador	40
Ilustración 17. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida	41
Ilustración 18. Diferencias gráficas entre el día y la noche en TSR en 2,4 GHz.....	42
Ilustración 19. Diferencias gráficas durante el día y la noche en TSR en la banda de 5 GHz.....	43
Ilustración 20. Comparación del percentil 50 entre las bandas de 2,4 y 5 GHz.....	44
Ilustración 21. Comparación del percentil 90 entre las bandas de 2,4 y 5 GHz.....	44
Ilustración 22. Comparación del percentil 99 entre las bandas de 2,4 y 5 GHz.....	45
Ilustración 23. Comparación del valor máximo entre las bandas de 2,4 y 5 GHz	45
Ilustración 24. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida durante la noche.....	47
Ilustración 25. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida durante el día	48
Ilustración 26. Diagrama de Gantt de la planificación del trabajo.....	52
Ilustración 27. Sistema de medidas elegido.....	64
Ilustración 28. Montaje completo del sistema de medidas completo.....	65
Ilustración 29. Exposímetro EME SPY.....	65
Ilustración 30. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P1G1 en la banda de 2,4 GHz	67
Ilustración 31. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P1G1 en la banda de 5 GHz..	67
Ilustración 32. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3B1 en la banda de 2,4 GHz	68
Ilustración 33. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3B1 en la banda de 5 GHz ..	69
Ilustración 34. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3C3 en la banda de 2,4 GHz	70
Ilustración 35. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3C3 en la banda de 5 GHz ..	71
Ilustración 36. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P1G1	72
Ilustración 37. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3B1	72
Ilustración 38. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3C3	73

Ilustración 39. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología adaptada y el exposímetro en P1G1	74
Ilustración 40. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3B1	74
Ilustración 41. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3C3	75
Ilustración 42. Gráfico variación temporal durante el lunes en TSR en la banda de 2,4 GHz.....	75
Ilustración 43. Gráfico variación temporal durante el martes en TSR en la banda de 2,4 GHz..	76
Ilustración 44. Gráfico variación temporal durante el miércoles en TSR en la banda de 2,4 GHz	76
Ilustración 45. Gráfico variación temporal durante el jueves en TSR en la banda de 2,4 GHz...	77
Ilustración 46. Gráfico variación temporal durante el viernes en TSR en la banda de 2,4 GHz..	77
Ilustración 47. Gráfico variación temporal durante el sábado en TSR en la banda de 2,4 GHz..	78
Ilustración 48. Gráfico variación temporal durante el domingo en TSR en la banda de 2,4 GHz	78
Ilustración 49. Gráfico variación temporal durante el lunes en TSR en la banda de 5 GHz.....	79
Ilustración 50. Gráfico variación temporal durante el martes en TSR en la banda de 5 GHz.....	79
Ilustración 51. Gráfico variación temporal durante el miércoles en TSR en la banda de 5 GHz.	80
Ilustración 52. Gráfico variación temporal durante el jueves en TSR en la banda de 5 GHz.....	80
Ilustración 53. Gráfico variación temporal durante el viernes en TSR en la banda de 5 GHz.....	81
Ilustración 54. Gráfico variación temporal durante el sábado en TSR en la banda de 5 GHz.....	81
Ilustración 55. Gráfico variación temporal durante el domingo en TSR en la banda de 5 GHz..	82
Ilustración 56. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida en 5 GHz en el aula P3B1.....	85
Ilustración 57. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida en 2,4 GHz en el laboratorio de TSR.....	85

Lista de Acrónimos

CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplexing
ICM	Industria, Ciencia y Medicina
ICNIRP	International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection
IP	Internet Protocol
MCyT	Ministerio de Ciencia y Tecnología
MHz	Megahercios
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
RBW	Resolution Bandwidth (Ancho de Banda de Resolución)
RMS	Root Mean Square
SWT	Sweep Time (Tiempo de Barrido)
TDD	Time Division Duplexing
TFM	Trabajo de Fin de Máster
TSR	Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
VBW	Video Bandwidth (Ancho de banda de vídeo)
UPV/EHU	Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

3. Introducción

Este documento trata los detalles relativos a un estudio realizado para la verificación de una metodología de medida adecuada para la caracterización de la exposición a campos electromagnéticos debidos a sistemas WiFi, así como para la determinación de la variabilidad de este tipo de radiación en diferentes entornos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

A día de hoy, la evolución tecnológica supone un incremento considerable de la cantidad de dispositivos inalámbricos que generan ondas electromagnéticas, previéndose incluso que esta crezca aún más en el futuro.

Por otro lado, tanto la preocupación como el desconocimiento acerca de las radiaciones electromagnéticas a las que nos vemos expuestos, han generado en la sociedad una gran especulación sobre el tema. Por este motivo, la mayoría de las entidades públicas han terminado legislando, en casi todos los países de la Comisión Europea, el uso y despliegue de las tecnologías de radiocomunicación. Además, diversos organismos, entre los que destaca la Comisión Internacional sobre Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), han establecido ciertos límites de radiación electromagnética con objeto de que no se sobrepasen [1]. No obstante, estos límites no se han adoptado en todos los países. De hecho, incluso en diferentes lugares del mismo país pueden proponerse límites distintos. Teniendo en cuenta esto, resulta necesario un conocimiento previo tanto de los niveles de radiación electromagnética existentes en general, como de las emisiones generadas específicamente por las diversas tecnologías empleadas, cuyo último fin es verificar que se respetan los límites de exposición correspondientes. Por ello, y teniendo en cuenta que actualmente no existe un procedimiento estandarizado para medir y caracterizar las radiaciones provenientes de los distintos sistemas de radiocomunicación, es imprescindible realizar un estudio exhaustivo de la metodología de medida a emplear, con objeto de reflejar lo más fielmente posible la realidad de la situación existente en lo que a este tema se refiere.

En el caso de los sistemas WiFi, además del desconocimiento general comentado previamente, se detecta también una alarmante falta de información y bibliografía sobre la exposición electromagnética. Todo ello justifica por tanto el estudio que se ha llevado a cabo sobre la metodología a emplear, así como la caracterización de la exposición realizada a partir del uso de la misma en la propia Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Para ello, en primer lugar, se estudió y se revisó el equipamiento, los parámetros de configuración y la metodología de adquisición de las muestras necesarias para la realización de este trabajo. A continuación, se llevó a cabo un sondeo de diferentes ubicaciones de la Escuela, con objeto de identificar lugares en los que la exposición podía ser mayor. Finalmente, se realizó una campaña de medida a fin de obtener datos de exposición WiFi con distintos dispositivos de medida, tanto para poder determinar la idoneidad de la metodología en estudio, como para caracterizar la variabilidad de la exposición, debida a sistemas WiFi, propia del entorno considerado.

4. Contexto

Dado que uno de los objetivos de este trabajo es el estudio de la medida de exposición electromagnética debida a sistemas WiFi, se describen en este apartado los detalles más relevantes de este tipo de tecnología en lo que a exposición electromagnética se refiere.

Para ello, se incluye un breve resumen de la normativa vigente en España sobre límites de exposición y metodologías de medida. Seguidamente, se explican las características principales de los sistemas WiFi, para finalmente, comentar ciertos aspectos de la situación y el espacio radioeléctrico asignado a las redes de comunicaciones que soportan este tipo de servicios.

En primer lugar, hay que decir que las normativas referentes a la exposición electromagnética son un conjunto de leyes que regulan las emisiones radioeléctricas y que están basadas en las decisiones tomadas por diferentes organismos, como pueden ser la UE (Unión Europea), la FCC (Federal Communications Commission) o la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

Estas normativas requieren el cumplimiento de ciertas exigencias o el uso de diferentes recomendaciones sobre exposición electromagnética. A continuación, se hace referencia a aquellas que tienen que ver con la reglamentación radioeléctrica y el uso del espectro.

En España, el marco legal del dominio público radioeléctrico queda definido en el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) desarrollado por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Éste se encarga de asignar a los diferentes servicios de telecomunicaciones las frecuencias de las bandas que van desde 9 kHz a 105 GHz. El CNAF también especifica la metodología relativa al uso del espectro [2].

Por otro lado, en el Real Decreto 1066/2001 queda establecido el reglamento relativo a las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, las restricciones de emisiones electromagnéticas y las medidas de protección sanitarias frente a las mismas [3]. Además, en él se exige a los titulares de determinadas licencias individuales elaborar un estudio detallado por un técnico competente que indique los niveles de exposición en áreas cercanas a estaciones radioeléctricas en las que puedan permanecer habitualmente personas. De hecho, se deben cumplir los niveles indicados en dicho decreto, denominados niveles de referencia, los cuales se pueden ver a continuación en la Tabla 1.

Intervalos de frecuencia	Intensidad campo E [V/m]	Intensidad campo H [A/m]	Campo B [μ T]	Densidad de potencia S [W/m ²]
0 - 1 Hz	-	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	-
1 - 8 Hz	10000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 - 25 Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$	-
0,0025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	-
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,0092	2
400 - 2000 MHz	$1,375 \cdot f^{1/2}$	$0,0037 \cdot f^{1/2}$	$0,0046 \cdot f^{1/2}$	$f / 200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,2	10

Tabla 1. Niveles máximos de referencia para diversas frecuencias

Tal y como se puede observar en la tabla anterior, el nivel de referencia de campo eléctrico asociado a las frecuencias de los sistemas WiFi es 61 V/m, ya que como explicaremos a continuación este tipo de servicios se sitúan tanto en la banda ICM (Industrial, Científica y Médica) de 2,4 GHz, como en la banda de 5 GHz.

Hay que decir que todos los niveles de referencia han sido definidos en concordancia con los efectos de la exposición electromagnética sobre la salud del ser humano, que se han podido demostrar científicamente, esto es, los efectos de aumento de la temperatura. Es por ello que los niveles de referencia permiten evaluar de manera práctica la exposición, así como determinar la probabilidad de que se sobrepasen las restricciones básicas (valores impuestos por la ley para no ser sobrepasados con objeto de evitar males mayores), evitando así la difícil tarea de medir tales restricciones.

A parte de esto, es necesario tener en cuenta la Orden CTE/23/2002 del Ministerio de Ciencia y Tecnología que establece las condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones de estaciones radioeléctricas, regulando los contenidos y los formatos de los mismos y exigiendo que sean realizados por técnicos competentes en el ámbito de las telecomunicaciones y visados por el correspondiente colegio profesional [4].

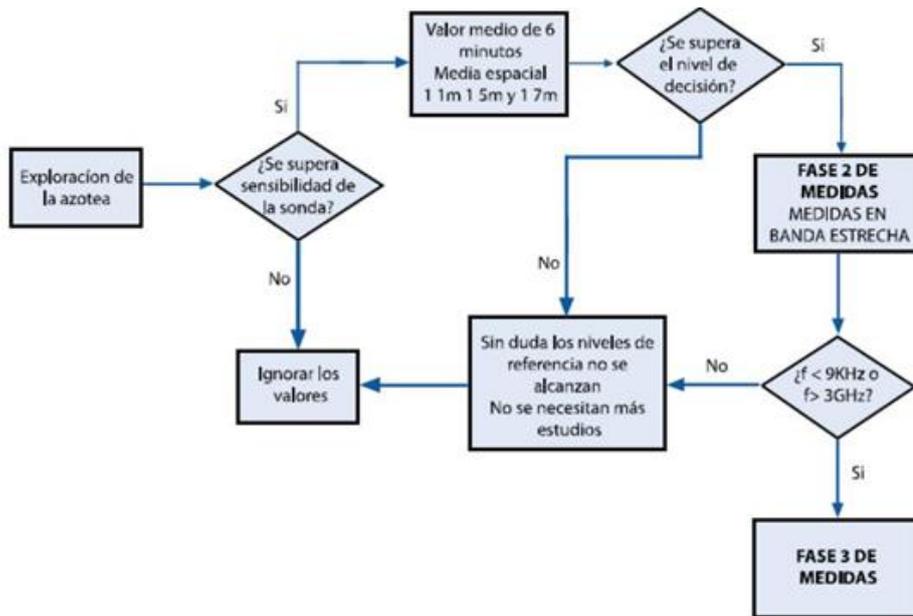


Ilustración 1. Pasos a seguir para la certificación de estaciones radioeléctricas

A su vez, por otro lado, en este trabajo deberá de tener en cuenta la actual normativa de exposición en entornos ocupacionales que viene reflejada en el Real Decreto 299/2016 de 22 de Julio [5] en el que vienen indicado las disposiciones mínimas de salud y de seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos de campos electromagnéticos. Por lo tanto, se debe de garantizar que se cumple con la protección de los trabajadores y alumnado contra los riesgos para su salud y su seguridad derivados o que puedan derivarse de la exposición electromagnética dentro de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

4.1. Introducción a los sistemas WiFi

La tecnología WiFi queda recogida en un estándar original, regido por el grupo IEEE 802.11, publicado en el año 1999 y reafirmado en el 2003 [6]. En él se define el concepto de red inalámbrica de área local, utilizada para la transmisión de datos entre dos puntos distintos.

La transmisión de datos en redes que utilizaban la primera tecnología inalámbrica, 802.11b, era de 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz. Más adelante, aparecieron nuevos estándares con mayores tasas de transmisión como son el 802.11a, el 802.11g, y más recientemente, el 802.11n.

Estas tecnologías operan en las bandas de libre utilización. Concretamente, los estándares 802.11 b/g lo hacen en la banda de 2.4 GHz, mientras que los estándares 802.11 a/n lo hacen en 5 GHz. Es por ello que tienen limitaciones reglamentarias en cuanto a potencia de emisión. De esta manera, no causarán interferencias en los equipos que funcionen en dichas frecuencias y, por tanto, no será necesaria una protección adicional de los mismos [7].

El elemento fundamental de la arquitectura de las redes 802.11 es la celda, la cual se puede definir como el área geográfica en la cual una serie de dispositivos se interconectan por un medio aéreo entre sí. En general, la celda estará compuesta por varias estaciones y un único punto de acceso. Las estaciones son adaptadores que permiten tanto la conversión de información, generalmente encapsulada bajo el protocolo Ethernet existente en los terminales

o equipos clientes, como el envío y recepción de dicha información dentro de la celda. El punto de acceso es el elemento que tiene la capacidad de gestionar todo el tráfico de las estaciones y que puede comunicarse con otras celdas o redes.

Haciendo uso de esta tecnología se han desarrollado aplicaciones muy diversas, implementadas en ámbitos que van desde los entornos particulares hasta las grandes redes cuya intención es cubrir ciudades. Se trata por tanto de un tipo de sistemas que ha encontrado un ambiente globalizado, liberalizado y competitivo y que ha provocado desde su implantación un incremento exponencial de la cantidad de puntos de acceso, con el objetivo final de aumentar el número de redes y usuarios.

4.2. Ubicación de los sistemas WiFi en el espectro radioeléctrico

Como ya sabemos, el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado, para el cual existe una demanda creciente derivada del auge de las nuevas tecnologías que solicitan espacio en el mismo para poder proporcionar sus servicios. Además, junto con esta demanda creciente hay que considerar el hecho de que las características del espectro varían en función de la frecuencia, lo cual hace que su asignación sea aún más complicada.

Como se ha dicho anteriormente, el encargado de la asignación de espectro radioeléctrico en España es el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Dicha asignación se realiza haciendo uso del CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias), en el cual se establece que las frecuencias a utilizar por sistemas inalámbricos de banda ancha son las comprendidas entre 2400 MHz y 2483.5 MHz, banda en la cual se definen ciertas especificaciones, entre las cuales destaca que la PIRE (Potencia Isotrópica Radiante Equivalente) total será inferior a 100 mW, tal y como se recoge en la nota UN-85. En dicha nota se describen también otras características que deben cumplir los equipos de acuerdo con la norma de referencia ETSI EN 300 328 [8], así como la indicación de que no es necesaria una licencia para su utilización por ser considerados de uso común.

En el CNAF también se atribuye a los sistemas WiFi parte de la banda de 5 GHz (5170 – 5835 MHz), teniendo en cuenta factores como el aumento de la PIRE máxima o el empleo de técnicas de control de potencia. Este documento se centrará en ambas bandas, dado que son los intervalos de frecuencias actuales de trabajo de los sistemas WiFi.

5. Alcance/Objetivos

Los sistemas WiFi siguen un crecimiento exponencial y se estima que en el futuro dicha tendencia continúe de este modo, por lo que es necesario darles importancia a las radiaciones producidas por este tipo de infraestructuras. De hecho, como ya se ha comentado anteriormente, la preocupación sobre la implantación de sistemas WiFi va en aumento, y por tanto es necesario dedicar tiempo a la mejora de esta situación.

La motivación para la realización de este Trabajo de Fin de Máster surge tanto por la falta de estudios de exposición electromagnética asociada a sistemas WiFi, como por el interés de saber si se cumple la normativa a este respecto en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, determinando los límites de exposición WiFi a los que estamos expuestos día a día.

De acuerdo con esto, se establece como objetivo principal del trabajo el análisis y verificación de una metodología de medida que permita obtener muestras de la señal WiFi para la realización de estudios fiables sobre la radiación real debida a este tipo de servicios, así como para la caracterización de diferentes entornos en función de la actividad electromagnética existente en los mismos. Esta aportación lleva implícita una caracterización espacial y temporal de las señales de interés, dando lugar a la definición de otro de los objetivos principales de este trabajo: el estudio de la variabilidad de las emisiones electromagnéticas debida a los sistemas WiFi a los que estamos expuestos.

Por tanto, los retos a superar en este trabajo han sido los siguientes:

- La realización de una campaña de medidas a partir de la cual se pueda determinar la variabilidad espacial y temporal de este tipo de radiaciones y en la que además se tenga en cuenta las características específicas de las señales WiFi, de entre las cuales destaca especialmente el hecho de que su transmisión sea a ráfagas.
- Una comparación de resultados exhaustiva que permita asegurar que la metodología de medida utilizada resulta adecuada para la realización de estudios fiables de la exposición WiFi.
- Un análisis detallado de los niveles medidos a fin de comprobar que se cumple con las leyes vigentes en materia de exposición, pudiéndose así certificar la seguridad de los sistemas WiFi existentes en la Escuela de Ingeniería de Bilbao.
- Un estudio del comportamiento de las señales WiFi en ambas bandas de medida para clasificarlas estadísticamente.

El conocimiento de los retos que se acaban de describir fue un estímulo para la realización de este trabajo, el cual ha permitido comprobar la fiabilidad de una metodología de medida definida a partir del trabajo previo de diferentes miembros del Grupo de Investigación TSR que, además, resulta muy útil para la realización de futuros estudios de exposición electromagnética debida a señales WiFi. Por otro lado, el uso de esta metodología ha permitido a su vez la caracterización de la exposición WiFi en el entorno laboral de los trabajadores y estudiantes de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, asegurando así su protección sanitaria frente a este tipo emisiones electromagnéticas.

6. Beneficios del trabajo realizado

Conviene señalar los beneficios derivados de la ejecución del proyecto dado que estos justifican la utilidad de su realización. Es por ello que tales beneficios se detallan a continuación ordenados según su naturaleza técnica, económica o social.

6.1. Beneficios técnicos

Gracias al estudio de las emisiones radiadas por los sistemas WiFi se ha verificado una nueva metodología que cumple con los requisitos para poder medir este tipo de exposición en un futuro. Cualquiera que necesite realizar un estudio para corroborar que su sistema cumple con la normativa o simplemente que desee caracterizar la exposición WiFi existente en un emplazamiento, podrá hacer uso de este procedimiento. Además, conociendo los niveles de exposición a partir de dicha metodología, se podrá ajustar la zona de cobertura deseada, cumpliendo de manera fiable los criterios de protección sanitaria frente a radiaciones electromagnéticas. Además, tras medir en la banda de 5 GHz se podrá caracterizar mucho mejor el funcionamiento y el nivel de exposición de los sistemas WiFi en esta banda.

Por otro lado, gracias a la campaña de medidas y a su posterior análisis se podrá estudiar el comportamiento de la señal en ambas bandas, analizar sus características y mostrar unos estadísticos predictivos de medida de la propia señal, y poder así caracterizar fielmente en un futuro las emisiones debidas a este tipo de sistemas.

6.2. Beneficios económicos

El uso de metodología adecuada para medir la exposición electromagnética permite planificar una red WiFi en base a valores reales de exposición, lo cual a su vez evita correcciones a posteriori derivadas de incumplimientos que se cometan. Este tipo de correcciones suponen un gran gasto económico, ya que pueden implicar la reducción de la potencia de transmisión con objeto de no sobrepasar los límites de exposición, lo cual supondría una disminución de la zona de la cobertura que podría derivar en una modificación de los equipos, a fin de cubrir nuevamente el área deseada. Gracias a la verificación de esta metodología se podrán prevenir todos estos gastos innecesarios.

Desde otro punto de vista, puesto que se ha comprobado la fiabilidad de la metodología objeto de este proyecto, se podrían obtener beneficios de explotación de la misma mediante servicios de consultoría o certificación. En el caso de servicios de consultoría, se podría proponer a diversos clientes la instalación de sistemas WiFi adoptando criterios de seguridad frente a la radiación electromagnética, aconsejándoles sobre los pasos a seguir para alcanzar el rango de cobertura deseada, e indicándoles aquellas áreas en la que pueden tener mayor o menor nivel de exposición, de manera que dispongan de toda la información necesaria al respecto. Por otro lado, el trabajo realizado se puede considerar como el primer paso para la estandarización de la metodología de medida estudiada con fines de certificación. Dicha estandarización permitiría que cualquier cliente que deseara instalar una red WiFi pudiese demostrar de manera legal que cumple con la normativa de exposición, contratando a una empresa certificadora que haga uso de dicha metodología, lo cual implica indudablemente beneficios económicos para ambas partes.

A su vez, este beneficio resulta especialmente relevante desde julio de 2016, momento en que entró en vigor la normativa de protección en entornos ocupacionales que obliga a las empresas e instituciones a certificar la seguridad de sus instalaciones en lo que hace referencia a la exposición electromagnética.

Por último, se podrían también realizar charlas o cursos de formación remunerados, sobre una metodología fiable para medir la exposición a radiación electromagnética derivada de sistemas WiFi, tanto en empresas como asociaciones o instituciones que tenga intereses directamente relacionados con este tema.

6.3. Beneficios sociales

La continua evolución tecnológica de las redes WiFi, así como el crecimiento exponencial de los correspondientes terminales y puntos de acceso, no hace más que suscitar cierta preocupación en los ciudadanos acerca de la radiación a la que estamos expuestos y de los efectos que ésta puede tener sobre nuestra salud. Además, en entornos públicos como la Escuela de Ingeniería de Bilbao, las señales WiFi coexisten con otro tipo de emisiones que aumentan el nivel total de exposición electromagnética en el entorno. No obstante, los resultados derivados de este trabajo suponen un conjunto de información muy útil que se puede utilizar para disminuir las preocupaciones no sólo de las personas familiarizadas con el entorno en el que se han hecho las medidas, sino del conjunto de sociedad en general.

Por tanto, el trabajo realizado implica también un considerable beneficio social, puesto que de alguna manera da respuesta a las preocupaciones de la población sobre los riesgos en la salud que suponen las radiaciones electromagnéticas.

En cualquier caso, la opinión pública podría dejar de especular a partir de la publicación de documentos basados en resultados como los que se han obtenido en este trabajo, ya que se conocerían los niveles de exposición WiFi real a la que estamos sometidos.

7. Estado del arte

En este apartado se trata el estado del arte en el que se encuentra el tema objeto del trabajo realizado. En él, tras explicar el marco legal y ciertos aspectos generales sobre la exposición WiFi, se describen diferentes procedimientos de medida de este tipo de emisiones considerados por diversos autores, para posteriormente detallar las características principales de la metodología que finalmente fue utilizada.

7.1. Marco legal y aspectos generales sobre la medida de la exposición WiFi

Los niveles de campo electromagnéticos producidos por las emisiones radioeléctricas debidas a sistemas de radiocomunicaciones deben estar por debajo de los límites impuestos por la ley vigente.

Los parámetros que se deben tener en cuenta para cumplir el anterior propósito son los expuestos en las diferentes tablas del Real Decreto 1066/2001 [3]. De todos ellos, los más representativos son la intensidad del campo eléctrico E [V/m], la intensidad del campo magnético H [A/m] y la densidad de potencia S [W/m²]. Para cada uno de ellos se indican valores de referencia que no podrán ser sobrepasados, de lo cual se deduce que es necesario el poder medirlos.

Las metodologías para medir dichos parámetros deben cumplir la Orden CTE/23/2002 [4]. No obstante, esta orden es de aplicabilidad obligatoria únicamente para tecnologías cuya operatividad requiera tener una licencia, y por tanto no contempla el caso de los sistemas WiFi. De hecho, en realidad, esta norma no incluye una descripción detallada del procedimiento de medida para obtener el campo eléctrico de señales emitidas a ráfagas, como por ejemplo ocurre en las redes inalámbricas que hacen uso de las tecnologías 802.11. Es por ello que existen diferentes estudios e interpretaciones de cómo se deben realizar las correspondientes medidas de radiación electromagnética. Por tanto, resulta necesario definir una metodología de medida a partir de la cual se obtengan muestras de la exposición electromagnética WiFi lo suficientemente representativas de la realidad. A la hora de definir un procedimiento de medida, los aspectos fundamentales a tener en cuenta serán los siguientes:

- Localización y cantidad de puntos a medir
- Conocimiento y aplicabilidad de los parámetros de medida
- Metodología específica de medida para cada parámetro a tener en cuenta
- Duración, tiempo y frecuencia con la que se realizarán las medidas

7.2. Estándares de medida de la exposición WiFi

Por otra parte, los estándares de medida que se va a medir en este trabajo son el estándar 802.11n (2,4 GHz) y el estándar 802.11a/c (5 GHz). El estándar 802.11n fue creado para aumentar el rendimiento de los estándares previos llegando a una velocidad máxima de transmisión de 54 Mbps. Actualmente su capa física soporta una velocidad 300 Mbps con el uso de dos flujos especiales en un canal de 40 MHz [9]. Sin embargo, el ancho de banda completo de la banda de 2,4 GHz es de 83 MHz. Por el otro lado, el estándar 802.11a/c o

también denominado como WiFi 5G fue una mejora del estándar anterior. Este estándar conseguía un aumento de las tasas de transferencia hasta los 433 Mbit/s, consiguiendo tasas de hasta 1,3 Gbit/s siempre y cuando utilizará tres antenas. A diferencia del estándar anterior el ancho de banda de canal se amplía hasta los 160 MHz [10].

7.3. Antecedentes: Metodologías de medida definidas por otros autores

Tal y como se ha comentado anteriormente, existen diversos estudios e interpretaciones sobre la metodología de medida de la exposición electromagnética a utilizar en el caso de emisiones WiFi. En un principio, numerosos autores a la hora de medir exposición electromagnética han utilizado una sonda de banda ancha como metodología de medida [11][12]. Sin embargo, las medidas que se tomaban con sondas isotrópicas eran medidas de banda ancha lo cual no interesaba dado que no se obtenían medidas específicas de los resultados de una banda concreta. Por otro lado, autores como Wout y Verloock han hecho numerosas pruebas con objeto de definir un procedimiento de medida de los niveles de radiación correspondientes a este tipo de tecnología [13][14]. Sin embargo, la no obligatoriedad de aplicar la Orden CTE/23/2002 ha supuesto que la mayoría de los autores que realizaban estudios sobre la medida de la exposición WiFi utilizaran dosímetros. Estos equipos son medidores que permiten obtener valores de campo en diferentes bandas frecuenciales. Con esto se consigue una mayor precisión que la obtenida con equipos de banda ancha que no proporcionan esta opción, y, por tanto, tienen la ventaja de ser una solución útil y manejable que permite comprobar si se cumplen las normas establecidas.

No obstante, estos instrumentos utilizan la misma antena y configuración para medir las emisiones de distintas frecuencias y servicios, y aunque aplican un factor de antena para cada banda de frecuencias, no lo hacen para el caso de la configuración. Es por ello que resulta necesario el aplicar un factor de corrección específico para cada tipo de servicio, ya que la manera en que se transmite la información varía de unos sistemas de radiocomunicación a otros, y, por tanto, hay que tener en cuenta que en cada caso habría que aplicar la configuración de medida más adecuada.

Por otro lado, la casi totalidad de los estudios realizados hasta ahora se basan en la medida del máximo, lo que implica una sobreestimación de la radiación electromagnética. Aunque esta manera de proceder resulta adecuada para determinar si se cumplen o no las normas, da lugar a resultados que no reflejan la realidad de las emisiones a las que estamos expuestos, y, por tanto, es este un criterio demasiado conservador que podría derivar en políticas de despliegue de las comunicaciones demasiado restrictivas.

Por otro lado, numerosos dosímetros no pueden medir por debajo de un nivel de campo eléctrico mínimo y, además, en general aplican un periodo de muestreo muy superior al de otro tipo de equipos de medida, lo cual hace que a veces no se puedan detectar señales emitidas a ráfagas, como son por ejemplo las asociadas a servicios WiFi.

Todo esto da lugar a una serie de errores en los resultados obtenidos que es necesario evitar o corregir a partir de la definición de una metodología específica para cada tecnología a estudiar, en la que se mida con la antena adecuada, se aplique el factor de ganancia correspondiente y se evite la sobreestimación de los niveles de exposición.

7.4. Metodología de medida considerada para la realización del TFM

El grupo de investigación TSR dedicado entre otras cosas al tratamiento de las señales de radiocomunicaciones con objeto de verificar que no presenten efectos nocivos de las mismas sobre la salud humana, ha desarrollado en los últimos años una nueva metodología para la medida de la exposición electromagnética debida a sistemas WiFi, en la que se evita la sobreestimación de los niveles de campo eléctrico recibido. Para ello se realizaron diversas pruebas de laboratorio en las que se controlaba el tráfico generado por los puntos de acceso, distinguiendo periodos en los que se enviaba tráfico de datos de aquellos en los que únicamente existía información de señalización [15].

La aplicación de dicha metodología requiere el uso de un sistema de medidas compuesto por una antena adecuada para la recepción de señales WiFi, como por ejemplo la antena Yagi empleada para este trabajo, el analizador de espectros EMI ESPI 3 de Rohde & Schwarz y un ordenador que utiliza una herramienta software propia, desarrollada en Matlab para guardar las muestras que posteriormente son procesadas y analizadas.

Sin embargo, hoy en día tras la habilitación de la banda de 5 GHz para sistemas WiFi muchos dispositivos se configuran para tener prioridad de conexión en esta banda por lo que es necesario decidir la caracterización de la banda de 5 GHz. Sin embargo, todavía existen muchos dispositivos que no son compatibles con el WiFi en esta banda por este motivo si se quiere caracterizar bien la exposición de estos sistemas se debe de hacer en las dos bandas.

De lo anterior se deduce que dicho sistema de medidas no incluye un dosímetro para la adquisición de muestras de la exposición, debido a las desventajas de este instrumento ya comentadas en el apartado anterior. Por el contrario, utiliza un analizador que ha de configurarse con objeto de obtener muestras de las señales existentes en el entorno que sean representativas de la cantidad de información que se está enviando en un momento determinado.

A continuación, se explicarán los parámetros más importantes a tener en cuenta en dicha configuración y se indicarán los valores adecuados que estos deben tener para cumplir el propósito anterior [16].

Lo primero a decir es que, para hacer las medidas hay que seleccionar el modo *Channel Power*, con objeto de obtener la potencia total en dBm existente en un ancho de banda determinado. Además de esto, los parámetros a tener en cuenta para la configuración óptima del analizador son los siguientes:

- **Tipo de detector:** La pantalla del analizador sólo puede mostrar 601 resultados en dirección horizontal. Sin embargo, el número de resultados de medida que recoge es mayor. Dependiendo del tipo de detector, se combinan los resultados de la medición de una forma u otra para su representación en la pantalla. Teniendo en cuenta que el *Span* es el rango de frecuencia que se desea visualizar, un pixel representa una frecuencia = $\text{Span}/601$. Desechando el resto de las configuraciones porque no dan valores reales, el tipo de detector elegido es el detector RMS (Root Mean Square). Al elegir esta opción, se muestra la verdadera potencia de la señal independientemente

de la forma que tenga, dado que se calcula a partir del valor cuadrático medio de todas las medidas recogidas.

- **Tipo de traza:** Este parámetro define la forma en la que el analizador dibuja la traza. La traza elegida es de tipo Clear&Write porque así se refresca la pantalla en cada barrido, lo cual es conveniente cuando se miden señales a ráfagas.
- **Frecuencia central:** Es la frecuencia situada en medio del ancho de banda que se pretende medir. Dicha frecuencia debe corresponderse con la frecuencia central de la banda WiFi de interés, puesto que se desea medir la exposición electromagnética en la banda entera y no únicamente en un canal. Para medir la banda de 2,4 GHz, el valor seleccionado debe ser por tanto 2441,75 MHz.
- **Span:** Se trata del ancho de banda que se ocupa en pantalla. En este caso, como se quiere medir la banda WiFi que va desde los 2400,0 MHz hasta los 2483,5 MHz el Span utilizado será de 150 MHz.
- **Channel Bandwidth:** Se trata del ancho de banda a medir el modo Channel Power. En este caso será de 83,5 MHz para medir la banda completa de 2,4 GHz.
- **RBW (Resolution Bandwidth):** Este parámetro determina la resolución de la frecuencia, es decir, indica la capacidad del analizador para separar frecuencias adyacentes. A la hora de visualizar señales que están muy juntas, se necesita un filtro de resolución cuyo ancho de banda sea lo suficientemente pequeño, a fin de diferenciar la frecuencia correspondiente a cada señal. El ancho de banda de resolución también afecta a la velocidad de medición, puesto que cuanto menor sea su valor, mayor será la precisión con la que se muestran las medidas, y por lo tanto, la velocidad disminuirá.
- **VBW (Video Bandwidth):** Este parámetro se utiliza para suavizar la traza reduciendo el ruido por medio de un filtro de vídeo. Cuando se miden señales moduladas, el ancho de banda de vídeo debe ser lo suficientemente grande como para que las componentes significativas de modulación no sean rechazadas. Por el contrario, si se desea captar muestras de señal libres de ruido, habrá que seleccionar un VBW pequeño. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que, para obtener mediciones correctas de la potencia, el valor de VBW debe ser al menos tres veces el ancho de banda de resolución [16]. Por tanto, en este trabajo se elige un valor de 3 MHz.
- **SWT (Sweep Time):** El Sweep Time, o tiempo de barrido, es el tiempo que el analizador tarda en obtener los resultados correspondientes al rango de frecuencias representado en la pantalla en un sólo barrido. Es decir, es el tiempo que se emplea en actualizar la traza en la pantalla.

La configuración de este parámetro supone tener en cuenta dos aspectos:

- Por un lado, el tiempo de barrido depende del ancho de banda de resolución (RBW). Si el RBW es bajo, el dispositivo requerirá más tiempo para recorrer el ancho de banda del Span.
- Por otro lado, el tiempo de barrido depende del Span. Si éste último aumenta, también aumentará el tiempo de barrido, puesto que, a mayor rango de frecuencias, mayor es el tiempo necesario para obtener los resultados correspondientes al nuevo intervalo de frecuencias. Se requiere un tiempo de barrido de al menos 20 ms para cada 600 MHz de Span.

Teniendo en cuenta los dos aspectos anteriores y los parámetros previamente seleccionados, el SWT elegido es de 5 ms.

Por lo tanto, la configuración del analizador correspondiente a la metodología considerada para medir la exposición electromagnética debida a sistemas WiFi en la banda de 2,4 GHz es la siguiente:

Parámetro	Unidad
Tipo de detector	RMS
Tipo de Traza	Clear&Write
Frecuencia Central	2441,75 MHz
Span	150 MHz
Channel Bandwidth	83,5 MHz
RBW (Resolution Bandwidth)	1 MHz
VBW (Video Bandwidth)	3 MHz
SWT (Sweep Time)	5 ms

Tabla 2. Configuración del analizador para la metodología para sistemas WiFi en la banda de 2,4 GHz

Un analizador así configurado, utilizado junto con una antena adecuada para las frecuencias de interés, constituye la base de una metodología de medida que daría como resultado muestras útiles para la realización de una caracterización realista de la exposición electromagnética debida a sistemas WiFi. Debido a ello, es posible que los diferentes organismos de estandarización puedan considerarla en un futuro como referencia para el desarrollo de un estándar relativo a la medida y caracterización de las radiaciones debidas a este tipo de sistemas. Sin embargo, debido a los nuevos estándares WiFi a día de hoy, es necesario medir en la banda de 5 GHz, por lo que será necesario crear una nueva metodología a partir de ésta y adaptar la instrumentación y sistemas de configuración a las nuevas necesidades.

8. Descripción del trabajo

En este apartado se van a explicar las tareas realizadas para cumplir los objetivos del Trabajo de Fin de Máster. La descripción de dichas tareas se va a realizar considerando los siguientes subapartados:

1. Adaptación de la metodología y realización del programa de medidas
2. Pruebas de laboratorio
3. Planificación y realización de la campaña de medidas
4. Procesado de datos
5. Análisis de resultados y conclusiones

8.1. Adaptación de la metodología y realización del programa de medidas

Para comenzar el trabajo, lo primero que se realizó fue un estudio profundo sobre la metodología diseñada con anterioridad por TSR, el porqué de su necesidad y sus principales características, los cuales son temas que ya se han comentado en apartados anteriores. A continuación, se recopiló información de los instrumentos necesarios para la aplicación de dicha metodología de medidas; en especial, del analizador de espectros EMI ESPI 3 de Rohde & Schwarz y de las antenas utilizadas. Recopilando dicha información se observó que únicamente permitían medir en la banda de 2.4 GHz por lo que fue necesario adaptar la instrumentación de medida a las nuevas características de los sistemas WiFi y utilizar otro analizador de espectros y otro tipo de antena. Por este motivo se decidió utilizar un dipolo dual en sustitución del sistema triaxial de antenas Yagi. Además, gracias a ello se simplificaba la adquisición de medidas dado que se utilizó una única antena y no fue necesario el uso de un sistema de divisores ni atenuadores para hacer llegar la señal completa captada al analizador.

En definitiva, fue necesario sustituir también el analizador espectros EMI ESPI 3 de Rohde & Schwarz por el analizador de espectros Anritsu MS2690A para poder medir en la banda de 5 GHz. Este analizador, al igual que el otro analizador, era necesario conectarlo al ordenador con un cable de red, a fin de automatizar la recogida de muestras mediante una herramienta software desarrollada en Matlab. Sin embargo, al ser analizadores diferentes fue necesario modificar la herramienta software. Ésta consistió en un script desarrollado en función de las necesidades de la nueva metodología de medidas y el nuevo analizador de espectros. El programa desarrollado identifica el aparato con el que se conecta el ordenador a través de la dirección IP, posteriormente configura el aparato de manera adecuada para la realización de las medidas, y, por último, toma muestras de señal en función del tiempo especificado.

El programa desarrollado fue el siguiente:

```
array_z=[];
s=0;
m=0;
numero_medidas=1;

% Create Interface Object
% In this example the interface used is
% VISA-TCP/IP by National Instruments
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PROGRAMA%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
while(numero_medidas)
    ipaddress = '192.168.1.8'; %IP Anritsu
    msInstr = visa('ni', ['TCPIP::' ipaddress '::INSTR']);
    fopen(msInstr);
    clear array_z;
    array_z=[];
    fprintf(msInstr, '*RST;*CLS');
    response = query(msInstr, '*IDN?');
    % Identification query--> identificación del instrumento
    fprintf(msInstr, 'FORM REAL');
    fprintf(msInstr, 'DET RMS');
    fprintf(msInstr, 'DISP:WIND:TRAC:Y:RLEV -35DBM');
    fprintf(msInstr, 'INIT:CHP');

    %%%%%%%%%Channel power%%%%%%%%
    fprintf(msInstr, 'ACP OFF');
    fprintf(msInstr, 'CALC:MARK:AOFF');
    fprintf(msInstr, 'CHP:FILT:TYPE RECT');
    fprintf(msInstr, 'FREQ:CENT 2441.75MHZ');
    fprintf(msInstr, 'FREQ:SPAN 150MHZ');
    fprintf(msInstr, 'BAND 1MHZ');
    fprintf(msInstr, 'SWE:POIN 501');
    fprintf(msInstr, 'SWE:TIME 20MS');
    fprintf(msInstr, 'CHPWRWIDTH 83.5MHZ');

    tic %start a stopwatch timer
    n=1;
    while(toc<600)
        if(toc>n*1)
            potencia = query(msInstr, 'FETC:CHP:CHP?');
            array_z(end+1)=str2num(potencia);
            n=n+1;
        end
        s=s+1;
        if(s==59)
            m=m+1;
            s=-1;
        end
    end

    array_z=array_z';
    fecha=strrep(datestr(now), ',', '-');
    fecha=strrep(fecha, ':', '-')
    nombrel=strcat('Wifi_', fecha, 'P3C3_2.4_SWT20GHz_pos6.txt');
    fichero1=fopen(nombrel, 'a');
    fprintf(fichero1, '%f\n', array_z);
    pause(0.1);
    fclose(fichero1);
    numero_medidas=numero_medidas-1;

end

```

Por otro lado, la configuración del analizador correspondiente a la metodología considerada para medir la exposición electromagnética debida a sistemas WiFi en la banda de 5 GHz es la siguiente:

Parámetro	Unidad
Tipo de detector	RMS
Tipo de Traza	Clear&Write
Frecuencia Central	5250 MHz
Channel Bandwidth	160 MHz
Span	200 MHz
RBW (Resolution Bandwidth)	1 MHz
VBW (Video Bandwidth)	3 MHz
SWT (Sweep Time)	5 ms

Tabla 3. Configuración del analizador para la metodología para sistemas WiFi en la banda de 5 GHz

Un analizador así configurado, utilizado junto con una antena adecuada para las frecuencias de interés, constituye la base de una metodología de medida que daría como resultado muestras útiles para la realización de una caracterización realista de la exposición electromagnética debida a sistemas WiFi a día de hoy.

8.2. Pruebas de laboratorio

Una vez finalizado el programa de medidas y tras haber seleccionado la instrumentación adecuada para medir en ambas bandas, hubo que estudiar el tipo de antena adecuado para medir en las frecuencias WiFi de interés, ya que como se ha explicado previamente, a diferencia de cómo se hace con los dosímetros típicamente utilizados por otros autores, conviene utilizar una antena específica para la tecnología que se pretende estudiar. Esto simplifica el procesado necesario para obtener valores de la exposición representativos de la realidad, lo cual se traduce en definitiva en una mayor precisión de la metodología de medidas. La antena seleccionada fue un dipolo dual capaz de medir en ambas bandas de WiFi, 2,4 y 5 GHz. Se trata de una antena con una ganancia variable en función de la banda de medida, 9 dBi en la banda de 2,4 GHz y 6 dBi en la banda de 5 GHz. Por lo tanto, tiene un factor de antena (K) diferente para cada banda. El factor K se utiliza en este trabajo para poder obtener valores de campo eléctrico, magnitud de media de los niveles de referencia, a partir de los valores de potencia proporcionados por el analizador de espectros en la medida. Es necesario este cambio para poder comparar los valores obtenidos con los valores de referencia y ver si se cumplen.

Por otro lado, se trata de una antena omnidireccional en el plano perpendicular al dipolo y capaz de medir en todos los planos. Sin embargo, el patrón de radiación no es igual cuando se mide con el dipolo de manera vertical que cuando se mide de manera horizontal. Este hecho motivó la realización de diversas pruebas cuyo fin era comprobar si era más adecuado medir con la antena de manera horizontal o de manera vertical.

Para hacer la comparación se optó por realizar medidas con cada una de las dos soluciones durante tres horas en un día laborable en el laboratorio de investigación del Grupo TSR, ubicando la antena a una altura de 1,50 metros respecto del nivel del suelo [17]. Las medidas se tomaron cada segundo y se almacenaron en ficheros de una hora. La comparación se ha realizado viendo la diferencia entre las dos soluciones de los percentiles 50, 90 y 99 y el máximo. A su vez, se añade una tabla de diferencias de todos los percentiles, máximos, mínimos y medias. Todos estos estadísticos utilizados en la comparación se explicarán en el apartado 8.4 de este trabajo.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

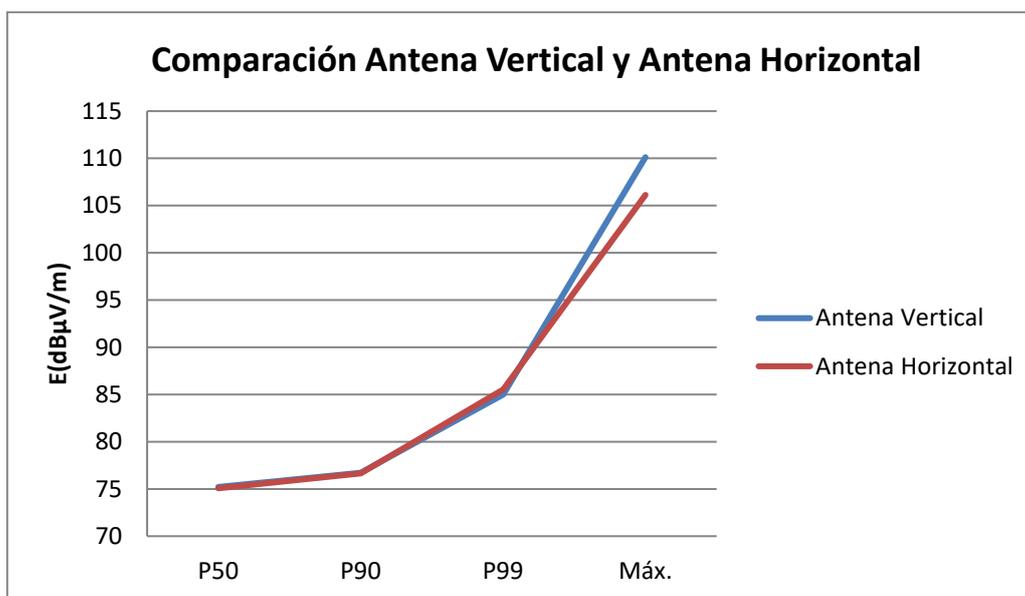


Ilustración 2. Comparación de soluciones: Antena Vertical y Antena Horizontal.

	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Media
Hora 1	0.11	0.16	0.31	2.23	4.27	28.50	0.02	0.78
Hora 2	0.04	0.03	0.14	0.07	-0.56	3.99	-0.01	-0.15
Hora 3	-0.01	-0.01	-0.02	-0.13	-1.81	4.33	-0.05	-0.03

Tabla 4. Diferencia de estadísticos entre medir con la antena vertical y la antena horizontal.

Como se puede ver en la gráfica y en la tabla, los valores obtenidos son muy similares y en la diferencia de los estadísticos entre los niveles adquiridos de ambas soluciones la mayoría de los valores se encuentran por debajo de la unidad. Por otra parte, los valores máximos en algún momento son considerablemente mayores. Dichas variaciones se deben a que las mediciones fueron en diferentes momentos del día y, por tanto, aunque el tráfico de información existente se correspondía al de un día laborable, pueden existir variaciones puntuales que den lugar a este tipo de diferencias. No obstante, hay que tener en cuenta que, de los estadísticos considerados, la mediana es el que da una idea más aproximada del conjunto de valores medidos, puesto que indica que al menos el 50% del tiempo la diferencia entre los valores captados por ambas soluciones es inferior a 0,5 dB. Teniendo en cuenta esto, se optó por utilizar la antena de manera vertical ya que permitía medir de una manera más cómoda gracias al soporte del carro donde se llevaba toda la instrumentación.

Por otro lado, previo a la planificación y realización de la campaña de medidas, se llevó a cabo una comparación del parámetro de medida "Sweep Time". En este caso se trata de ver cuál es la mejor configuración del parámetro ya que con el nuevo analizador de espectros nos permitía utilizar un amplio rango de este parámetro. Para la comparación se optó por realizar medidas con dos valores del parámetro (5 ms y 20 ms) durante tres horas en un día laborable en el laboratorio de investigación del Grupo TSR, ubicando la antena a una altura de 1,50 metros respecto del nivel del suelo [17]. Las medidas se tomaron cada segundo y se almacenaron en ficheros de una hora. La comparación se ha realizado viendo la diferencia de los percentiles 50, 90 y 99 y del máximo entre las dos soluciones de medida propuestas. A su

vez, se añade una tabla de diferencias de todos los percentiles, máximos, mínimos y medias. Los resultados obtenidos son los mostrados en la siguiente figura y en la siguiente tabla.

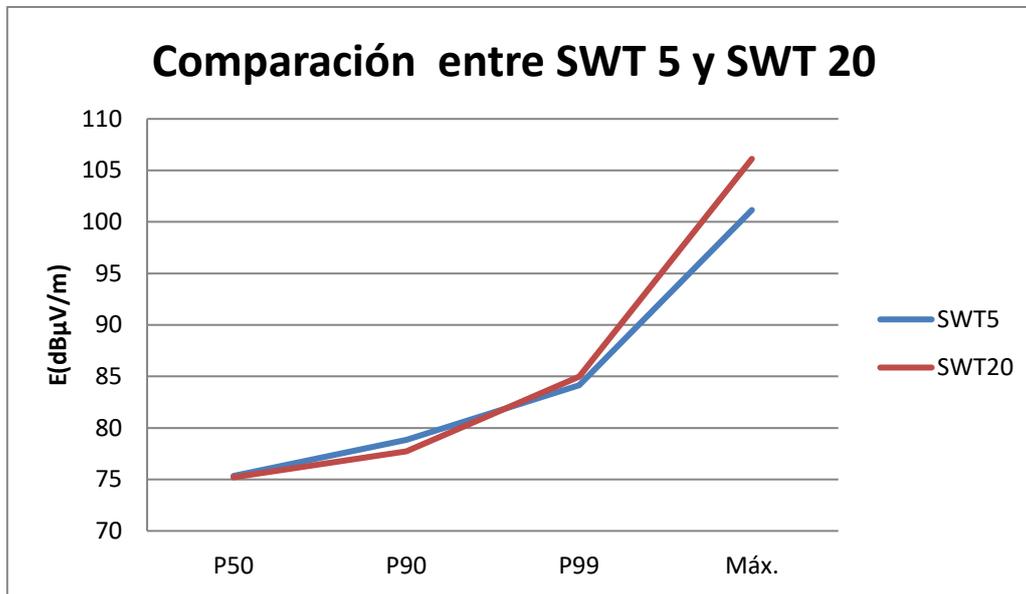


Ilustración 3. Comparación de soluciones: "Sweep Time" de 5 ms y "Sweep Time" de 20 ms

	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Media
Hora 1	-0.05	-0.03	0.29	1.90	-1.61	-8.69	-0.03	0.72
Hora 2	-0.09	-0.07	0.13	1.12	-0.84	-4.96	-0.08	0.68
Hora 3	0.10	0.19	0.59	1.97	1.95	3.63	0.10	0.26

Tabla 5. Diferencia de estadísticos entre medir con un "Sweep Time" de 5 ms y 20 ms

Como se puede ver en la gráfica y en la tabla, al igual que ocurría anteriormente, los valores obtenidos con ambos valores del parámetro de medida son muy similares y en la diferencia de los estadísticos la mayoría de los valores se encuentran por debajo de la unidad. Sin embargo, los valores máximos en algún momento vuelven a ser considerablemente mayores con el "Sweep Time" de 20 ms. Dichas variaciones al igual que ocurría en el escenario de prueba anterior, se deben a que las mediciones fueron en diferentes momentos del día y, por tanto, aunque el tráfico de información existente se correspondía al de un día laborable en ambos casos, pueden existir variaciones puntuales que den lugar a este tipo de diferencias. No obstante, es importante volver a resaltar los estadísticos que se tienen en cuenta y cuáles son los que caracterizan mejor el comportamiento. En este caso, la mediana es el estadístico que da una idea más aproximada del conjunto de datos medidos, puesto que indica que al menos el 50% del tiempo la diferencia entre los valores captados por ambas soluciones a inferior a 1 dB. Lo mismo ocurre con los percentiles 90 y 99 los cuales las diferencias de cada hora están por debajo de los 2 dB. Teniendo en cuenta esto, se optó por utilizar el parámetro de medida más bajo, es decir, 5 ms. De esta manera se han obtenido valores más exactos, ya que al tratarse de una tecnología que emite la señal a ráfagas cuanto más rápido hiciera el analizador de espectros el barrido mejor se detectaría la señal correspondiente a una ráfaga emitida en un momento dado.

8.3. Planificación y realización de campaña de medidas

Tras las pruebas realizadas y su consecuente elección de parámetros de configuración de la instrumentación de medida, seleccionamos el material necesario para la campaña de medidas. Como se ha comentado previamente se necesita un analizador de espectros Anritsu MS2690A, un dipolo dual capaz de medir en ambas bandas con una ganancia y un factor K distinto en cada banda, un cable para llevar la señal al analizador, conectores, un cable de red y un ordenador portátil donde ejecutaremos el programa para llevar a cabo las medidas y donde serán guardadas. El montaje de todos estos elementos se puede ver en el Anexo II de este documento.

Posteriormente se hizo una planificación de la campaña de medidas en la que se definieron los lugares, puntos y tiempo necesario para la adquisición de muestras. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del trabajo es caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la exposición WiFi, se decidió realizar medidas tanto de corta como de larga duración. Es por ello que en los diversos puntos de un mismo lugar se tomaron muestras a lo largo de diferentes días distinguiendo, en el caso de la variabilidad temporal, entre días laborables y fines de semana y entre el día y la noche.

El motivo de realizar un estudio de la variabilidad espacial y temporal es que es necesario saber cómo se comporta la señal en diferentes ubicaciones, puesto que habrá sitios en los que llegue más o menos nivel de señal. Además, se deseaba también saber cómo varían en un mismo punto los valores de exposición a lo largo de los días, con objeto de identificar los periodos en los que la radiación WiFi es mayor.

Por otra parte, antes de mencionar los lugares de medida, sus respectivos puntos y su duración, es importante detallar que las medidas se realizarán en las dos bandas de trabajo de la tecnología WiFi, es decir, en la banda de 2,4 GHz y en la banda de 5 GHz. De este modo, se podrá caracterizar la exposición de la universidad en ambas bandas de trabajo.

Medidas de larga duración: Variabilidad temporal

Estas medidas consisten en la adquisición de valores de exposición en una misma posición durante 24 horas, tomando muestras cada segundo y guardando los datos medidos en ficheros correspondientes a 1 hora de medida.

Lugar de medidas	Número de puntos	Tiempo requerido	Sistemas de medidas
Laboratorio TSR	5	14 días	Analizador/Exposímetro

Tabla 6. Lugares de medida variabilidad temporal

A continuación, se puede ver la ubicación del emplazamiento considerado para el estudio de la variabilidad temporal:

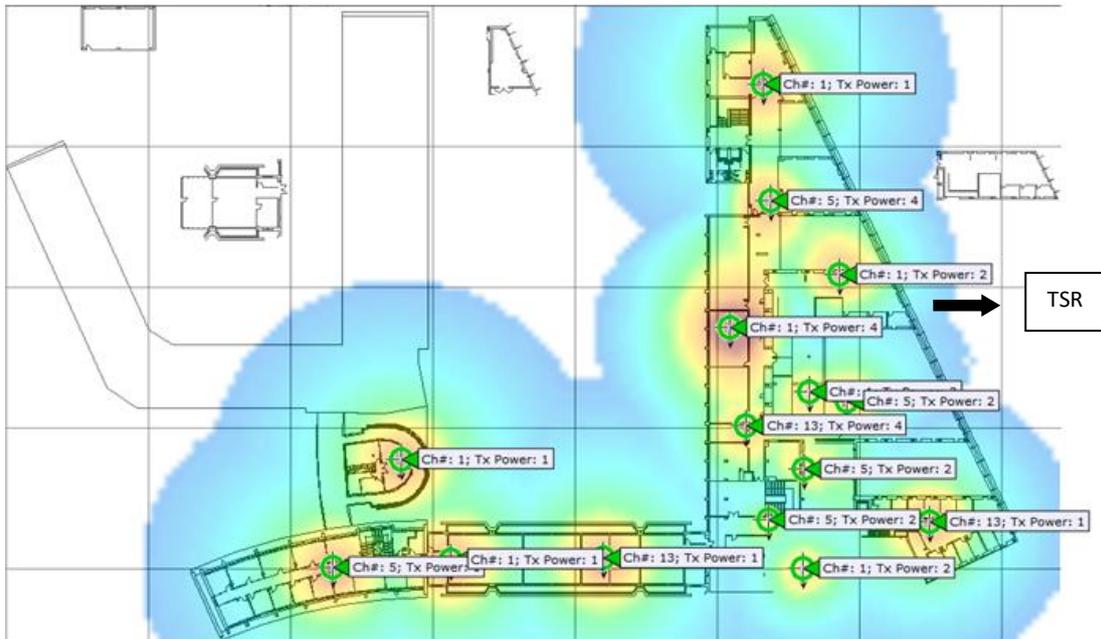


Ilustración 4. Ubicación de los lugares de medida para el estudio de variabilidad temporal

Para registrar la variabilidad temporal en esos 14 días, se midió durante todas las horas de cada día, incluyendo el fin de semana. Por otro lado, los 5 puntos de medida fueron concretamente las 4 esquinas, con una separación para evitar reflexiones, y el centro del laboratorio.

Todas estas medidas se realizaron a una altura de 1,2 m, lo cual está en concordancia con la normativa aplicable en la cual se indica que la toma de medidas debe hacerse a una altura comprendida entre 1,1 m y 1,7 m [17]. La elección del valor 1,2 m se debe a que las personas que trabajan en estos laboratorios permanecen sentadas la mayor parte del tiempo, estando su cabeza aproximadamente a esa altura.

Medidas de corta duración: Variabilidad espacial

Consisten en medidas de una hora en una misma posición, guardando los datos en ficheros de hora en hora en cada punto medido de la clase o pasillo considerando de nuevo un periodo de muestreo de un segundo.

Los lugares seleccionados fueron aquellos en los que podía haber mayor nivel de radiación viendo el posicionamiento de los puntos de acceso, es decir los lugares en los que el nivel de exposición podía ser más crítico.

Lugar de medidas	Número de puntos	Tiempo requerido	Sistemas de medida
Aula P3C3 (3)	6	12 horas	Analizador/Exposímetro
Aula P3B1 (3)	6	12 horas	Analizador/Exposímetro
Aula P1G1 (1)	6	12 horas	Analizador/Exposímetro

*Entre paréntesis la planta del aula o pasillo

Tabla 7. Lugares de medida para estudiar la variabilidad espacial

A continuación, se puede ver la ubicación de los emplazamientos de medida para el estudio de la variabilidad espacial:

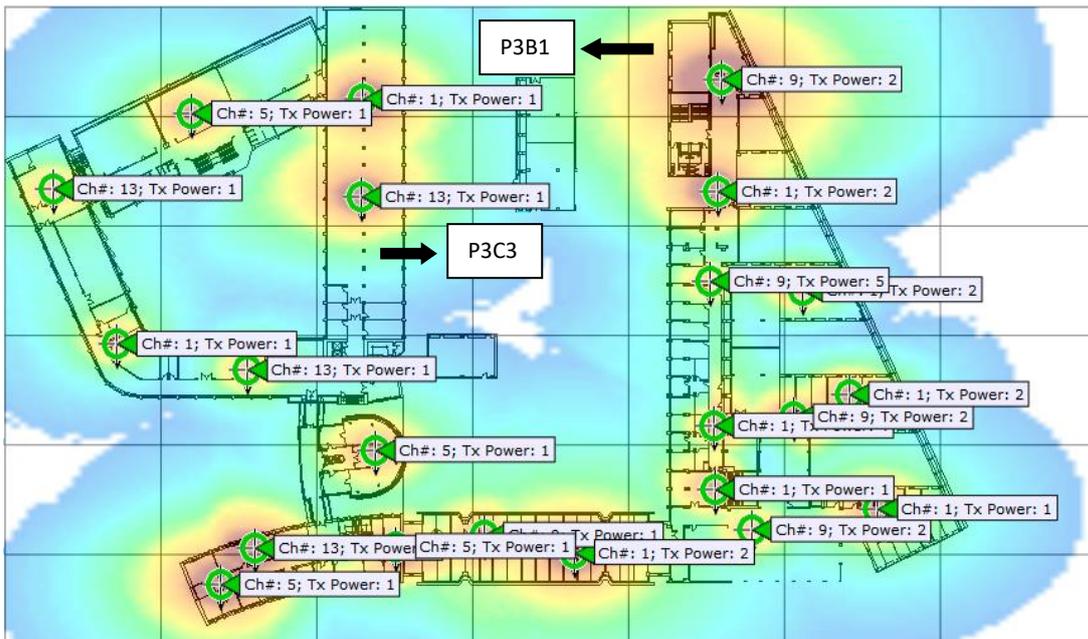


Ilustración 5. Ubicación de los lugares de medida para estudiar la variabilidad espacial (piso 3)

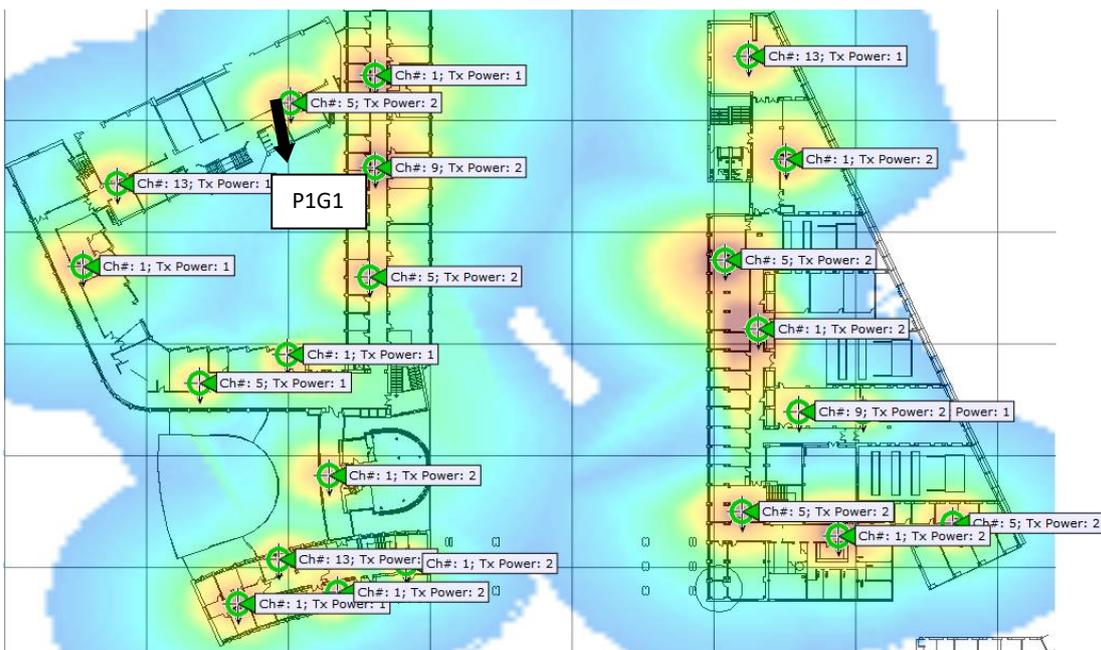


Ilustración 6. Ubicación de los lugares de medida para estudiar variabilidad espacial (piso 1)

En el caso de las aulas y de manera similar a las medidas realizadas para el estudio de la variabilidad temporal, los 6 puntos fueron 2 ubicaciones cercanas al centro del aula y las 4 esquinas, separando el equipamiento de las paredes con objeto de evitar reflexiones. Por otro lado, la altura de medición, al igual que para la variabilidad temporal, fue 1,2 m la cual se corresponde con la altura media de la cabeza de una persona que está sentada.

Para cumplir la variación espacial lo que se hará es medir en diferentes puntos de una clase y en diferentes clases.

Se tratará de medir lo máximo posible en el tiempo en el que se ha asignado, de este modo se podrá hacer un análisis mejor de la radiación a la que estamos expuestos en nuestra propia universidad.

Una vez recopilados los datos se ha procedido a sacar los siguientes estadísticos por cada posición acordada a medir de este modo se podrá ver la variación en los diferentes puntos, en el mismo tiempo. Estos estadísticos serán explicados en el próximo apartado.

8.4. Procesado de datos

Se explican a continuación diferentes cuestiones referentes al procesamiento de datos relativo al estudio de la exposición electromagnética realizado.

En primer lugar, hay que comentar que las herramientas de procesamiento empleadas fueron dos: Matlab y Microsoft Excel. La primera de ellas se utilizó para realizar un script de tratamiento de los ficheros de texto en los que se guardaban automáticamente los valores de las medidas. Dicho procesado consistió en el cálculo de una serie de estadísticos cuyo valor se copiaba posteriormente en un fichero Excel con el fin de obtener una serie de tablas y gráficas que diesen cuenta de la variabilidad de las radiaciones WiFi registradas. Por otra parte, los resultados del exposímetro se obtuvieron en otro fichero Excel, lo cual fue determinante en la elección de esta herramienta, dado que permitía comparar de una manera sencilla los valores obtenidos mediante este instrumento con aquellos proporcionados por el sistema de medidas de referencia considerado para este trabajo.

Es de relativa importancia el hecho de que las unidades de potencia que utiliza el analizador y el exposímetro son dBm y V/m respectivamente. Por tanto, fue necesario realizar una conversión de magnitudes en el primer caso y de unidades que permitiese la comparación de los resultados obtenidos en cada caso, siendo finalmente el dB μ V/m la unidad seleccionada para la realización de las tablas y gráficas que se muestran en el siguiente apartado.

Por otro lado, los estadísticos de primer orden obtenidos para el estudio de la variabilidad temporal y espacial fueron los indicados a continuación:

- **Percentil:** Se trata de un estadístico que indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentran un porcentaje de las muestras obtenidas. Por ejemplo, el percentil 30 (ó P30) indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentra el 30% de las muestras obtenidas. El procesado de datos realizado contemplaba el cálculo de los percentiles P01, P10, P50 o mediana, P90 y P99.
- **Media:** Se trata de un valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio. Sirve para hacernos una idea sobre el valor medio de señal que hay en un punto concreto durante un cierto tiempo.
- **Máximo:** Es el valor más grande de un conjunto de valores en estudio. En nuestro caso, sirve para saber el máximo nivel de radiación WiFi a la que estamos expuestos (caso más pesimista).
- **Mínimo:** Es el valor más pequeño de un conjunto de valores en estudio. En nuestro caso, sirve para saber el nivel mínimo de radiación WiFi a la que estamos expuestos (caso más optimista).

- **Rango:** Se trata del intervalo comprendido entre los valores máximo y mínimo y da una idea de la dispersión de las medidas. A mayor rango, mayor dispersión.
- **Desviación estándar:** Permite caracterizar la dispersión de datos respecto del valor medio, aportando más información para el análisis de resultados, puesto que no suele ser suficiente con conocer la tendencia central del conjunto de las muestras de estudio.

Tras la breve explicación de los estadísticos considerados, se indican aquellos que fueron calculados específicamente para el estudio de la variabilidad espacial, por un lado, y temporal por otro.

Variabilidad espacial

En este caso los estadísticos calculados fueron los que se presentan en la siguiente tabla:

Posición	Percentiles P01, P10, P50 (Mediana), P90, P99	Media	Desviación estándar	Rango	Max	Min
Pos 1	P01 ₁ ... P99 ₁	M1	D1	R1	Max1	Min1
Pos 2	P01 ₂ ... P99 ₂	M2	D2	R2	Max2	Min2
Pos 3	P01 ₃ ... P99 ₃	M3	D3	R3	Max3	Min3
Pos 4	P01 ₄ ... P99 ₄	M4	D4	R4	Max4	Min4
Pos 5	P01 ₅ ... P99 ₅	M5	D5	R5	Max5	Min5
Pos 6	P01 ₆ ... P99 ₆	M6	D6	R6	Max6	Min6

Tabla 8. Estadísticos calculados para el estudio de la variabilidad espacial

Para cada lugar de medida utilizado para caracterizar la variabilidad espacial

Se juntaron todos los valores de todas las posiciones correspondientes a esa clase en un único fichero y se determinaron los valores de los mismos estadísticos calculados para cada posición: P01, P10, P50, P90, P99, media, desviación estándar, rango, máximo y mínimo.

Gráficas y tablas

Una vez calculados los estadísticos descritos hasta ahora, se realizaron representaciones gráficas de los valores más relevantes.

A partir de ahí, se obtuvieron tablas con los valores estadísticos más significativos para los diferentes análisis de variabilidad, o considerando todo el conjunto de lugares de medición.

Ejemplo: Gráfico de barras.

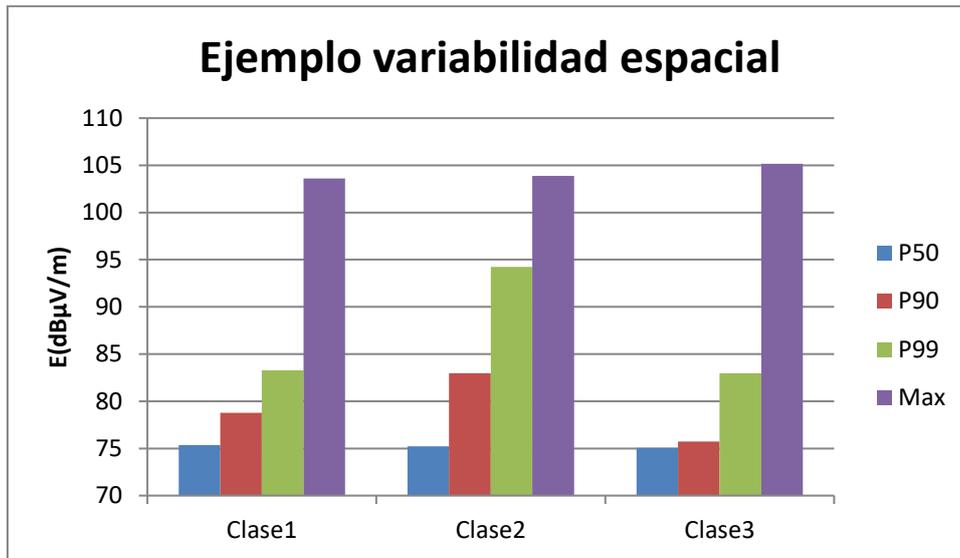


Ilustración 7. Ejemplo gráfica variabilidad espacial

- Eje horizontal: Clase 1, Clase 2, Clase 3
- Eje vertical: Estadísticos (P50, P90, P99 y Máx.)

O por clases:

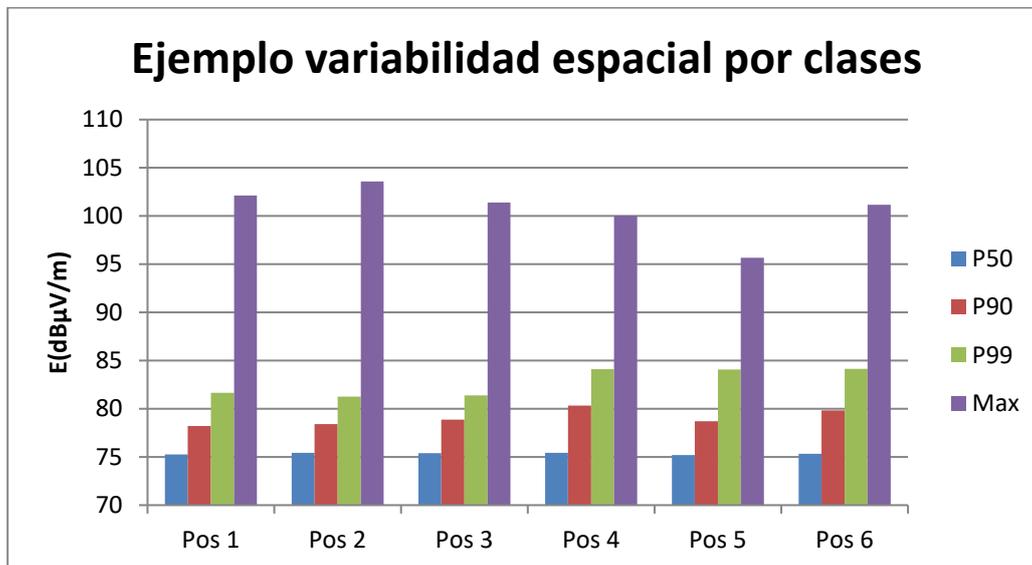


Ilustración 8. Ejemplo gráfico variabilidad espacial por clases

- Eje horizontal: Pos 1, Pos 2, Pos 3, Pos 4, Pos 5, Pos 6
- Eje vertical: Estadísticos (P50, P90, P99 y Máx.)

Hecho esto, se procedió a sacar conclusiones sobre la variación espacial de la exposición electromagnética existente en la Escuela, para finalmente realizar una comparación entre los resultados de las dos bandas de medida y entre los resultados logrados a partir del analizador y del exposímetro.

Variabilidad temporal

Para cada hora se calcularon los siguientes estadísticos: P01, P10, P50, P90, P99, media, desviación estándar, rango, máximo y mínimo. Mediante estos estadísticos, se ha analizado la variabilidad horaria o variabilidad a corto plazo.

Además, se obtuvieron gráficas con los valores estadísticos obtenidos para cada hora de 1 día, con objeto de ver el comportamiento de la exposición a lo largo de un periodo de 24 horas o en una misma hora los diferentes días de la semana. De esta forma se ha analizado la variabilidad diaria y la variabilidad semanal, ambas variabilidades a medio plazo.

Ejemplo: Gráfico de líneas

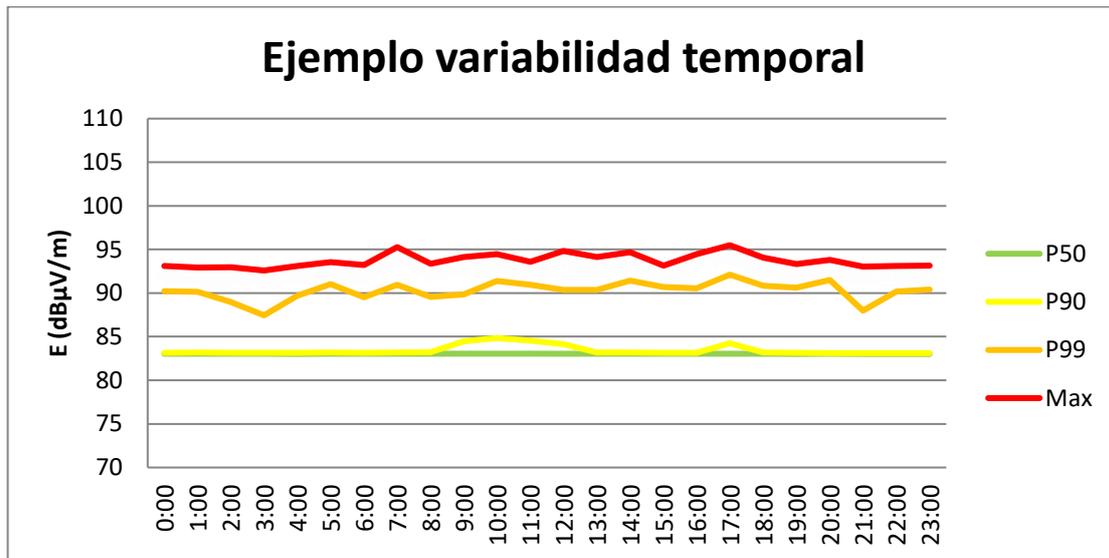


Ilustración 9. Ejemplo gráfica variabilidad temporal

- Eje horizontal: Horas del día
- Eje vertical: Valor de los estadísticos (P50, P90, P99 y Máx.) a largo de las horas

A partir de ahí, se hizo una clasificación en función de los resultados obtenidos, esto es, por días de la semana, por jornada laboral, por horas diurnas y nocturnas etc., y se obtuvo una tabla representativa de la exposición electromagnética correspondiente para cada una de las dos bandas medidas, 2,4 GHz y 5 GHz.

Finalmente se procedió a analizar los datos obtenidos y se compararon los resultados derivados de las dos bandas consideradas, a fin de obtener conclusiones globales sobre la variabilidad temporal en los sistemas WiFi.

Estudio del comportamiento de la señal

Finalmente, mediante la herramienta de Matlab, se utilizó la función *dfittool* para determinar la distribución estadística de mejor ajuste para caracterizar la variabilidad temporal y la variabilidad espacial de la señal. De esta manera, se realizó una foto completa de la variabilidad de la señal y una distribución de cuando hay actividad o no en diferentes entornos de la Escuela y en diferentes horas y días de la semana.

8.5. Análisis de resultados y conclusiones

A continuación, se describirán y analizarán los resultados más significativos del trabajo realizado. El resto de los resultados obtenidos se han incluido en el Anexo III – Ampliación de resultados.

Variabilidad espacial

En lo que a variabilidad espacial se refiere, se incluyen tablas y gráficas con los valores de exposición WiFi P50, P90, P99 y máximo derivados de las medidas realizadas tanto en la banda de 2,4 GHz y en la banda de 5 GHz. En primer lugar, se muestran los resultados en la banda de 2,4 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Max
Clase 1	75,34	78,78	83,27	103,59
Clase 2	75,22	82,96	94,22	103,86
Clase 3	75,05	75,72	82,95	105,16

Tabla 9. Resultados variabilidad espacial en la banda de 2,4 GHz

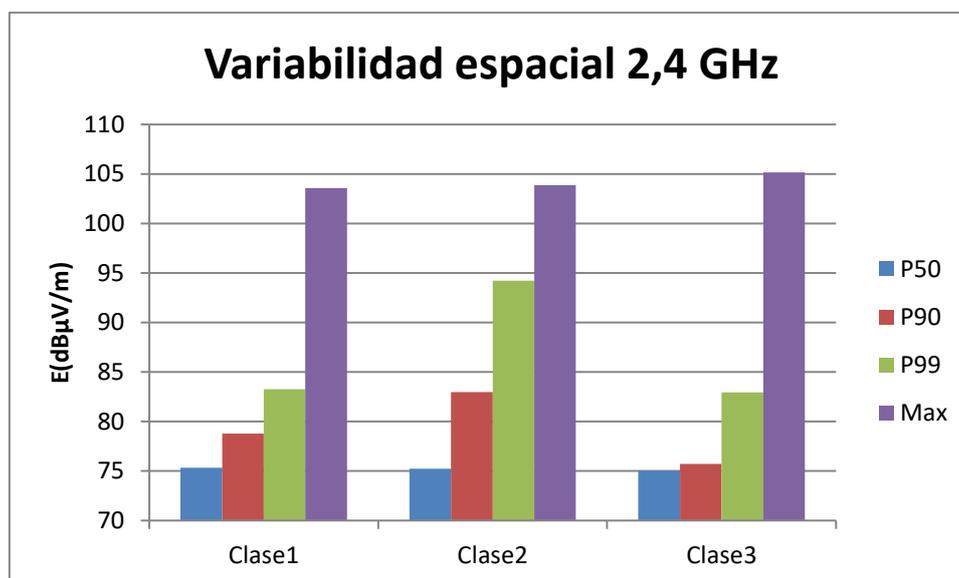


Ilustración 10. Resultados variabilidad espacial en la banda de 2,4 GHz

Se puede apreciar que para el 50% de las muestras tomadas en clases y pasillos no se supera los 75,5 dB μ V/m. Del mismo modo, el mayor de los niveles máximos de exposición, es decir, del conjunto de clases es de 105,16 dB μ V/m, o equivalentemente 0,18 V/m, y, por tanto, se encuentra muy lejos de los 61 V/m correspondientes al nivel de referencia máximo impuesto por el Real Decreto 1066/2001. A continuación, se puede observar los resultados en la banda de 5 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Max
Clase 1	83,96	84,06	86,97	93,59
Clase 2	85,21	85,33	91,21	103,46
Clase 3	85,23	85,46	90,71	96,78

Tabla 10. Resultados variabilidad espacial en la banda de 5 GHz

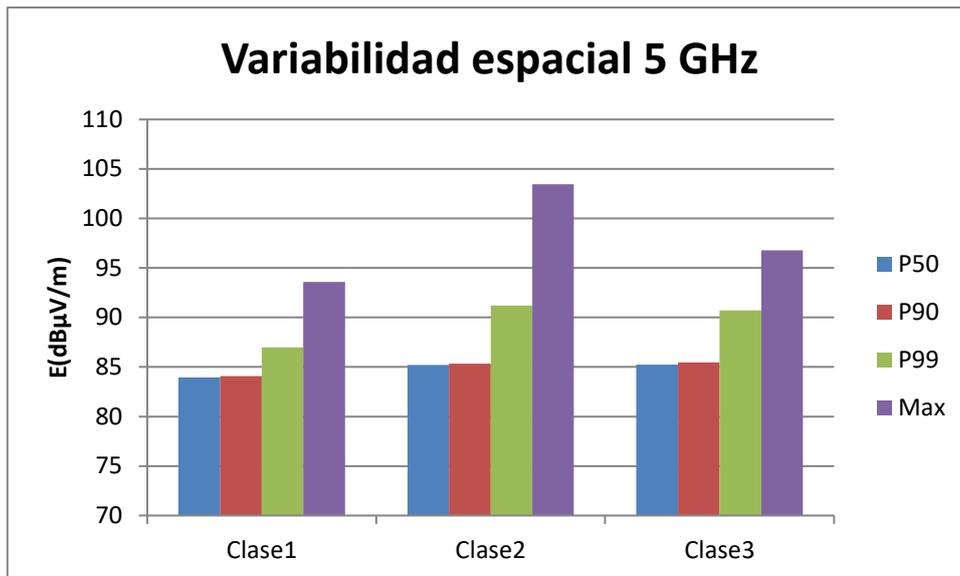


Ilustración 11. Resultados variabilidad espacial en la banda de 5 GHz

Se puede apreciar que para el 50% de las muestras tomadas en clases y pasillos no se supera los 85,5 dBµV/m. Del mismo modo, el mayor de los niveles máximos de exposición, es decir, del conjunto de clases es de 103,47 dBµV/m, o equivalentemente 0,15 V/m, y por tanto, se encuentra muy lejos de los 61 V/m correspondientes al nivel de referencia máximo impuesto por el Real Decreto 1066/2001.

Sin embargo, se puede observar que existen unas diferencias de nivel de señal en ambas bandas. Es por ello que en el trabajo se decidió compararlas con el objetivo de analizarlas y sacar conclusiones de las diferencias entre ellas.

A continuación, se incluyen gráficas de cada una de las clases con los valores de exposición WiFi P50, P90, P99 y máximo derivados de las medidas realizadas de ambas bandas conjuntamente.

P1G1

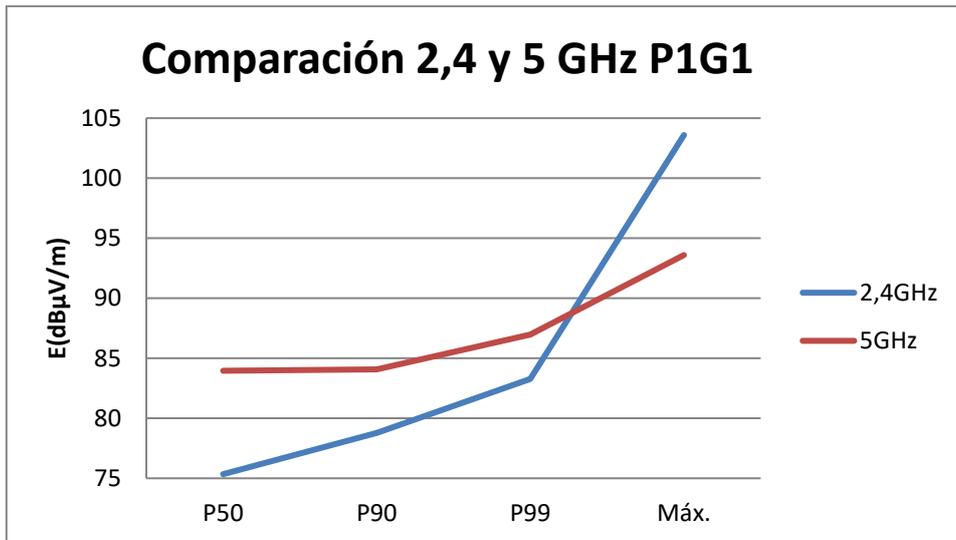


Ilustración 12. Comparación de bandas en la clase P1G1

P3C3

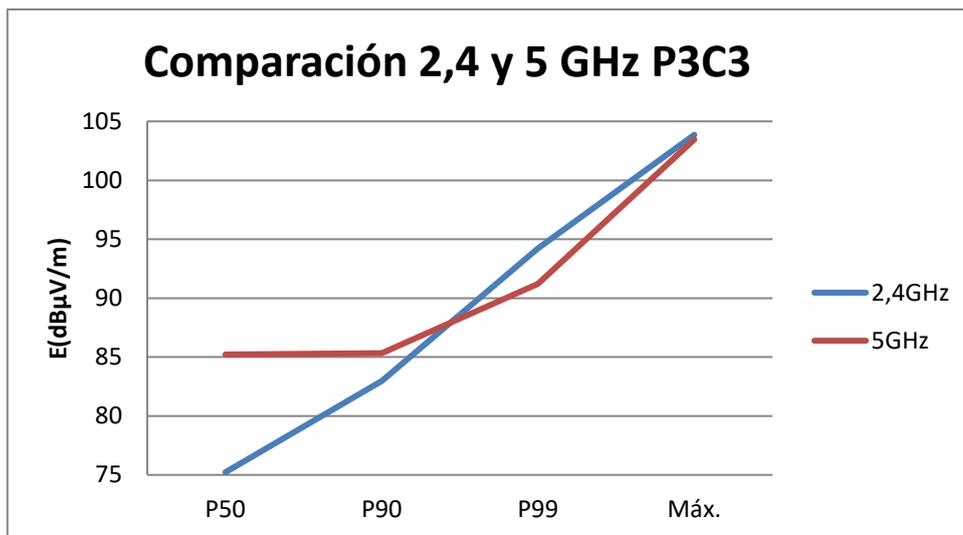


Ilustración 13. Comparación de bandas en la clase P3C3

P3B1

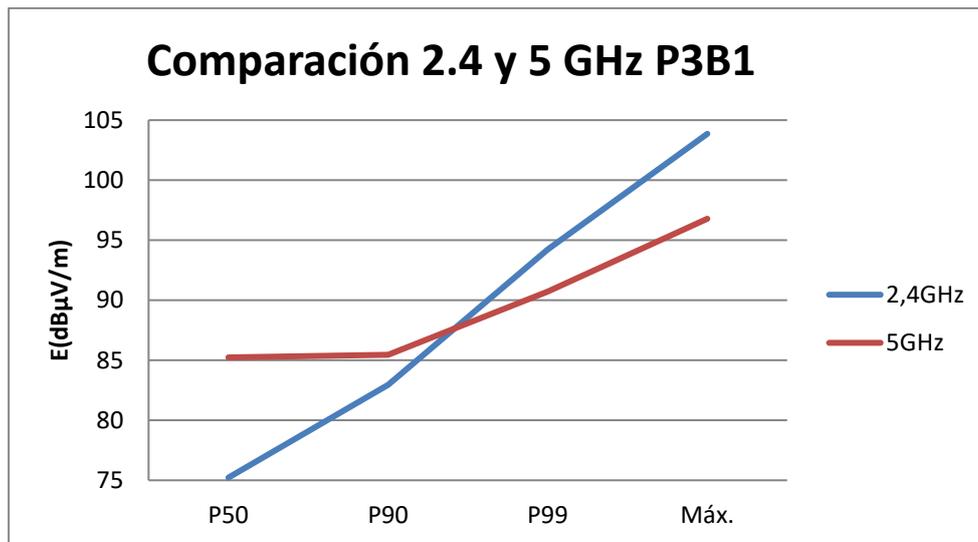


Ilustración 14. Comparación de bandas en la clase P3B1

Por último, se añade una tabla de diferencias de señal de los valores de exposición WiFi P50, P90, P99 y máximo del nivel señal en la banda de 5 GHz respecto al nivel de señal en la banda de 2,4 GHz.

dB	P50	P90	P99	Máx.
P1G1	8,61	5,28	3,70	-9,99
P3C3	9,99	2,37	-3,00	-0,39
P3B1	10,18	9,74	7,76	-8,37

Tabla 11. Comparación de nivel de señal en clases entre ambas bandas

Como se puede observar en la tabla y en las gráficas anteriores, los valores de los percentiles 50, 90 y 99 son mayores en la banda de 5 GHz mientras que los valores de máximo nivel de señal son mayores en la banda de 2,4 GHz. Esto especialmente se debe a varias razones. En primer lugar, debido a que la tecnología que utilizan los puntos de acceso de la universidad es la 802.11 a/c para la banda de 5 GHz, el ancho de banda que se mide en esta banda es de 160 MHz. Por el contrario, en la banda de 2,4 GHz el ancho total de la banda a medir es aproximadamente la mitad (83 MHz) ya que la tecnología utilizada es la 802.11 n. Esto provoca que, al medir con el doble del ancho de banda, se mide mayor nivel de señal en la banda de 5 GHz en iguales condiciones de ocupación del canal. Por ello, si hubiera la misma actividad y misma densidad de potencia por hercio en el aire se debería medir 3 dB más en la banda de 5 GHz. Sin embargo, las características de cada banda y tecnología hacen que se pronuncie aún más la diferencia dado que en 5 GHz se transmite con una mayor potencia de señal con el objetivo de alcanzar el mismo rango de cobertura (para compensar las mayores pérdidas de espacio libre al aumentar de frecuencia) que en 2,4 GHz. Es por esto que fijándose en la mediana y en los percentiles 90 y 99, en el 99% en la mayoría de las ocasiones el nivel de señal va a ser mayor en la banda de 5 GHz que en la banda de 2,4 GHz en emplazamientos cercanos al punto de acceso WiFi.

Por otro lado, para explicar la diferencia de los niveles máximos es importante recordar que los servicios de WiFi en la banda de 5 GHz se han desplegado no hace mucho y a día de hoy no todos los dispositivos los soportan. Es por esto que los niveles máximos siempre se obtienen en la banda de 2,4 GHz dado que a pesar de transmitir con menor potencia hay un número mayor de dispositivos utilizando esta banda frente a la de 5 GHz.

A su vez, otra parte del trabajo era comparar los resultados obtenidos en 2016 y los obtenidos actualmente. Los últimos han sido medidos empleando la metodología de este TFM, adaptada para medir también WiFi en la banda de 5 GHz, mientras que los primeros se midieron en 2016 con la metodología propuesta por el grupo TSR. Para ello, se incluyen gráficas con los valores de exposición WiFi P50, P90, P99 y máximo derivados de las medidas realizadas con ambas metodologías en la banda de 2,4 GHz.

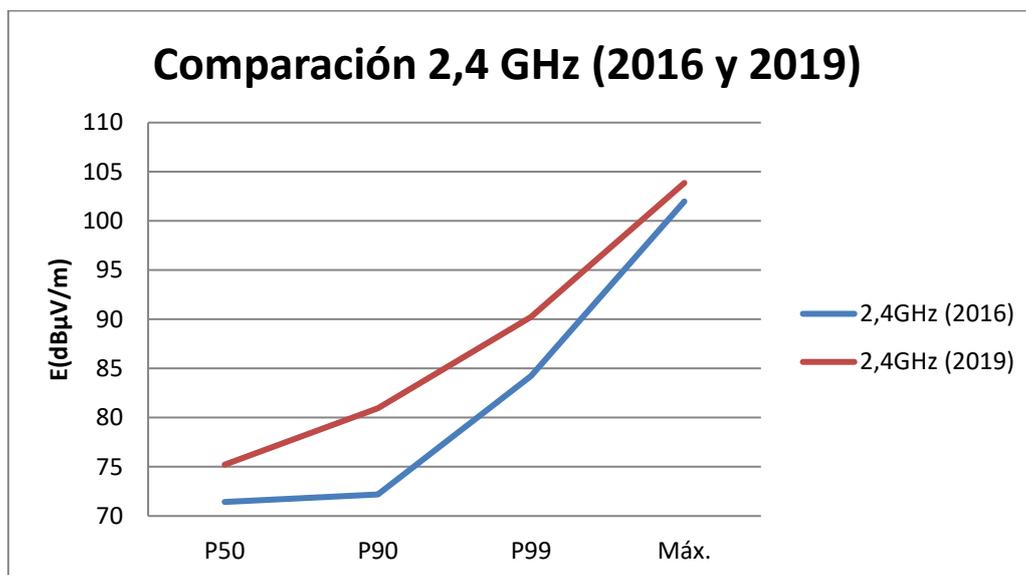


Ilustración 15. Comparación de percentiles y máximos medidos en 2,4 GHz en 2016 y 2019

En esta gráfica se puede observar cómo se mide un mayor nivel de señal en la actualidad. Esto, además de por el incremento del uso de los servicios WiFi, podría deberse a que se ha modificado el sistema de medidas. El sistema de medidas utilizado en la metodología propuesta por el grupo TSR en 2016 estaba formado por un sistema triaxial de antenas Yagi, en el que se utilizaban un divisor y dos atenuadores para tratar de recibir la misma señal en el analizador desde las tres antenas. Sin embargo, en la metodología de este TFM se ha utilizado un dipolo dual el cual se conecta directamente al analizador. Esto sumado al citado incremento de redes inalámbricas y puntos de accesos a día de hoy frente a 2016 y a que poco a poco más usuarios se conectan a la banda de 5 GHz (lo que implica menos interferencias en la banda de 2,4 GHz) ha generado esa diferencia de nivel de señal entre ambas metodologías.

Otra parte del trabajo era comparar los resultados obtenidos de esta metodología frente a los resultados obtenidos con el exposímetro en el año 2016. Para ello se incluyen gráficas con los valores de exposición WiFi P50, P90, P99 y máximo derivados de las medidas realizadas tanto en la banda de 2,4 GHz con el exposímetro como con el analizador Anritsu en una clase al azar.

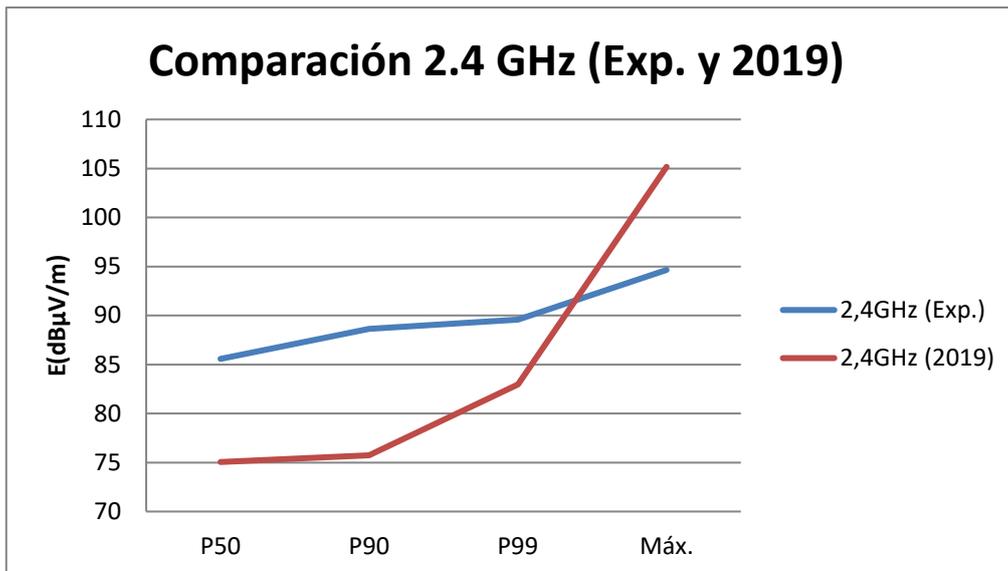


Ilustración 16. Comparación de metodologías con el exposímetro y el analizador

Comparando los valores obtenidos a partir del exposímetro con los derivados de las medidas con el analizador se deduce que, en el caso del exposímetro, tanto las diferencias entre los valores de exposición medidos en las distintas ubicaciones, como los valores en sí mismos, son mayores. Esto se debe especialmente a que, según los datos proporcionados por el fabricante, el exposímetro empleado en las medidas no es capaz de detectar señal por debajo de 0,005 V/m, lo cual implica que cada vez que el nivel de señal de exposición sea inferior a ese umbral, el exposímetro guardará dicho umbral como valor de medida, obteniéndose por tanto percentiles de mayor valor. Este es un claro ejemplo que muestra cómo con el exposímetro se sobreestiman los valores, y por tanto, se deduce que las medidas con este aparato no reflejan la realidad de la radiación a la que estamos expuestos.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la señal WiFi es una señal transmitida a ráfagas, el hecho de que el exposímetro solo pueda medir cada cuatro segundos como mínimo también es un inconveniente a la hora de proporcionar resultados de exposición realistas. He ahí, por tanto, la razón de definir una nueva metodología para medir los niveles de exposición electromagnética debida a sistemas WiFi.

No obstante, el valor máximo de señal obtenido con el exposímetro fue 105,29 dBµV/m, o equivalentemente, 0,184 V/m. Dicho valor está muy lejos también de los 61 V/m impuestos como nivel de referencia máximo, concluyéndose en definitiva que la Escuela de Ingeniería de Bilbao por el momento cumple con la normativa de exposición en lo que a la tecnología WiFi hace referencia.

Por último, se estudió el comportamiento de la señal y se trató de determinar la distribución estadística de mejor ajuste para caracterizar la variabilidad espacial y ver qué comportamiento sigue la señal en las diferentes situaciones.

Para ello, se comparó cada uno de los archivos de medida de las 6 posiciones de todas las clases y en ambas bandas con las siguientes distribuciones estadísticas: Lognormal, Nagakami, Normal, Rayleigh, Rice y Weibull. La elección de estas 6 distribuciones estadísticas se debe a la

consideración de que son las que, a priori, presentan una mayor similitud al comportamiento de la señal medida [18].

Para hacer la comparación se utilizó la herramienta de Matlab *Dfittool*, en el que se muestra cuánto se asemejan los datos obtenidos a cada una de las distribuciones obtenidas. A continuación, se muestra una gráfica en la que se puede ver cuánto se asemeja los datos obtenidos en una posición al azar en una clase al azar a cada una de las distribuciones estadísticas previamente mencionadas.

Posición 4 P1G1

	Log-normal	Nakagami	Normal	Rayleigh	Rician	Weibull
Pos 4 P1G1	-6177,88	-6213,14	-6248,01	-16711,95	-6248,01	-9971,15

Tabla 12. Valores de similitud de las distribuciones estadísticas respecto de la señal medida en una posición de aula al azar

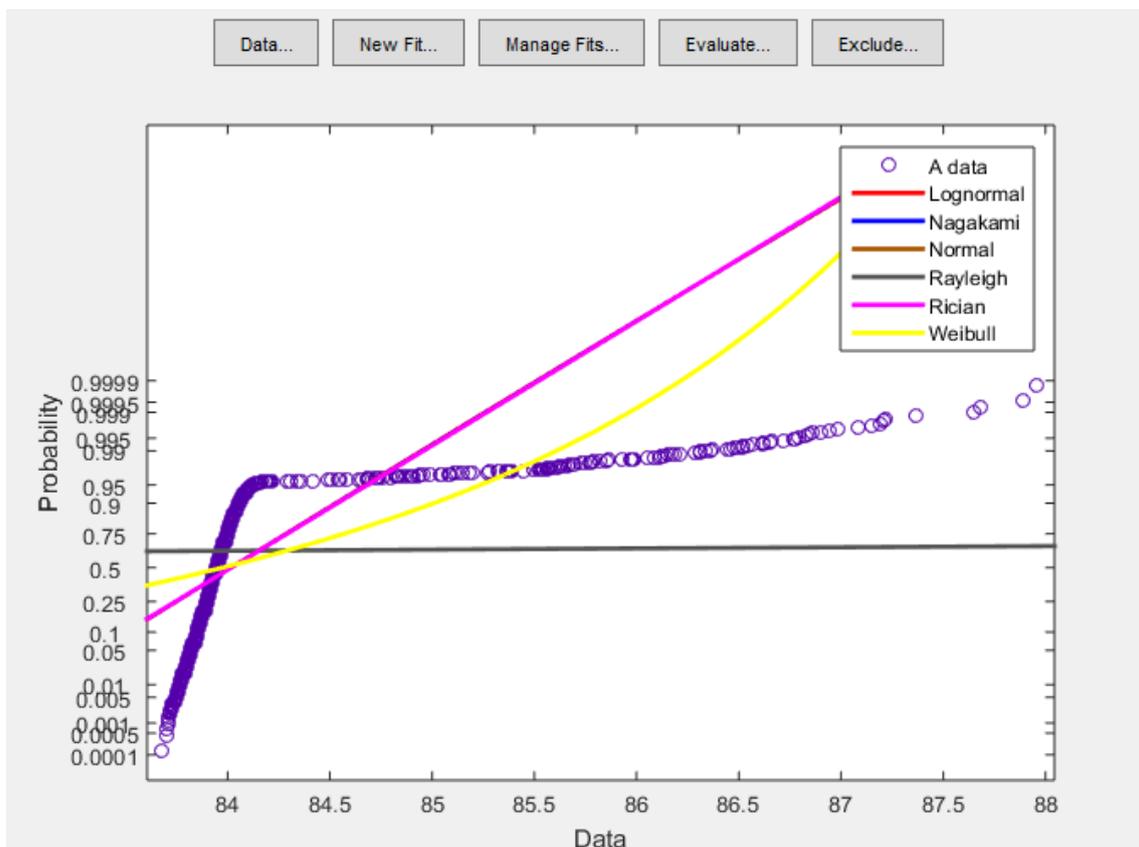


Ilustración 17. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida

En la gráfica se puede ver como la señal se asemeja a las distribuciones estadísticas Lognormal, Nakagami, Normal y Rice mientras que las distribuciones de Rayleigh y Weibull se asemejan muy poco. Según los datos de verosimilitud proporcionados por el programa, la distribución estadística a la que más se asemeja es la distribución estadística Lognormal. Esto mismo, ocurre para todas las posiciones de la clase y en las dos bandas de medida. A su vez, la distribución de Nakagami, siempre tiene valores de similitud cercanos a la distribución Lognormal, pero nunca se asemeja más que esta última. Por lo que se puede determinar que la

distribución estadística que sigue la señal tanto en las esquinas como en el centro de la clase y en cada una de las aulas y cada una de las bandas es la distribución Lognormal.

Variación temporal

Respecto a la variabilidad temporal, se mostrarán las diferencias existentes entre el día y la noche en el laboratorio del Grupo TSR en cada una de las dos bandas. También se incluirá un ejemplo de la diferencia de exposición entre ambas bandas en un día laborable.

Los siguientes resultados muestran niveles de exposición WiFi por el día y por la noche en el laboratorio de investigación del Grupo TSR. En las gráficas se incluyen estadísticos de primer grado que dan idea de la radiación global existente en cada laboratorio. El desglose por horas en los diferentes días y noches en los que se realizaron medidas se puede ver en el Anexo III – Ampliación de resultados.

En primer lugar, se observa los resultados obtenidos en la banda de 2,4 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,35	80,76	91,58	100,19
Noche (20:00-08:00)	74,98	76,95	88,55	90,79

Tabla 13. Diferencias de los estadísticos durante el día y la noche en TSR en 2,4 GHz

El significado de estos estadísticos de primer grado es el siguiente: en el caso del percentil 50, significa que el 50 por ciento de los valores es inferior a 75,35 o 74,98 dB μ V/m, respectivamente. De este modo, se obtienen las peores situaciones de nivel de exposición y las mejores. Como se puede ver en la tabla y era de esperar, los niveles son ligeramente mayores durante el día. Esto se debe a que la actividad en la universidad del mismo modo que el horario laboral se encuadra en este periodo de tiempo, por lo que existe un número mayor de personas conectadas a los diversos puntos de acceso. A continuación, se muestra la gráfica de estos resultados:

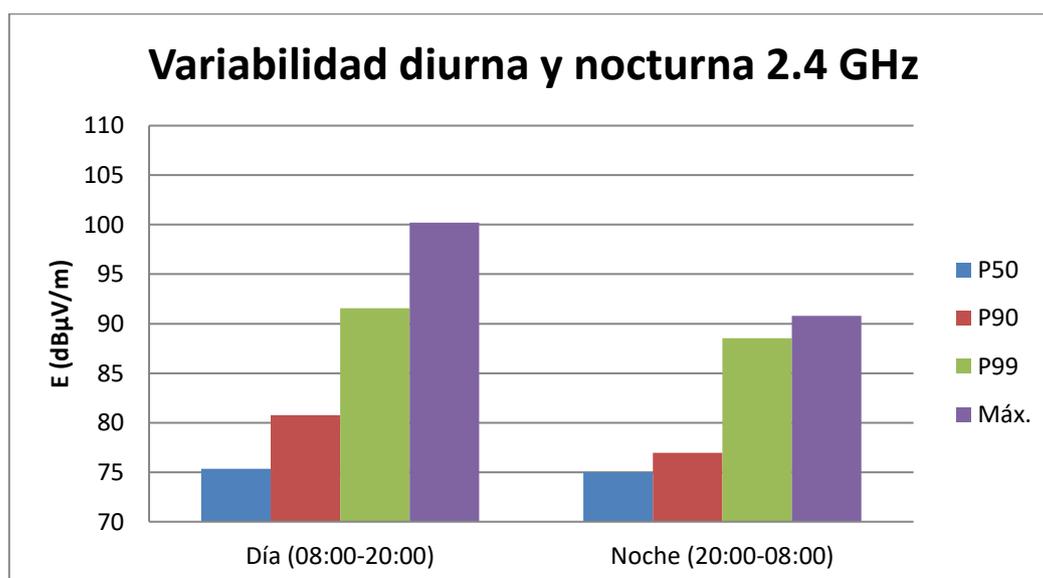


Ilustración 18. Diferencias gráficas entre el día y la noche en TSR en 2,4 GHz

El máximo valor obtenido en este caso se trata de 100,19 dB μ V/m, 0,1 V/m, que está muy lejos también de los 61 V/m impuestos como nivel de referencia máximo. A continuación, se muestran los resultados en la banda de 5 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	80,67	84,93	95,27	99,53
Noche (20:00-08:00)	80,26	82,03	88,31	94,82

Tabla 14. Diferencias de los estadísticos durante el día y la noche en TSR en 5 GHz

Al igual que en la banda de 2,4 GHz, se pueden apreciar pequeñas diferencias entre el día y la noche, por lo que se puede concluir que como era de esperar que hay mayor nivel de exposición durante el día que durante la noche. Los resultados se pueden apreciar en la siguiente gráfica:

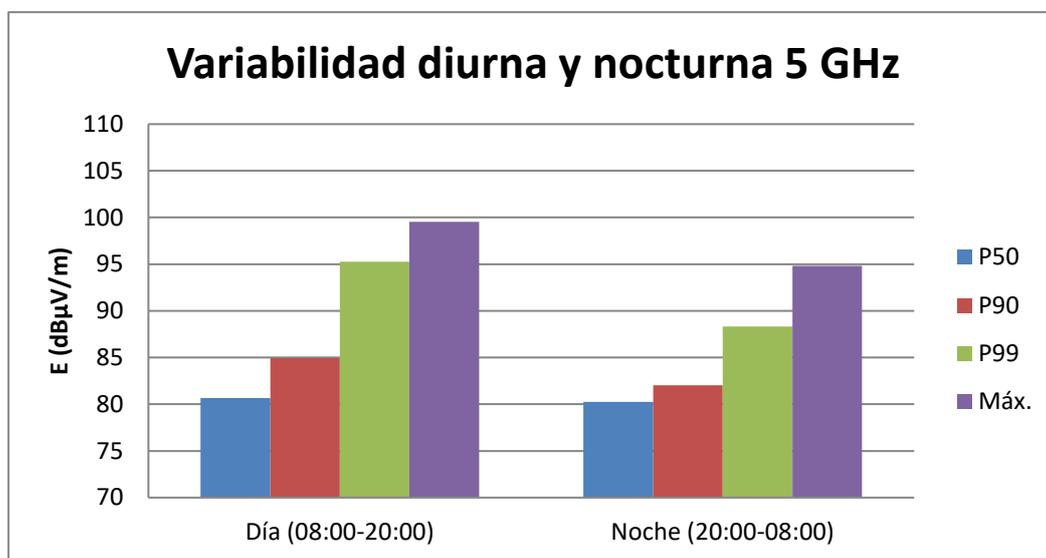


Ilustración 19. Diferencias gráficas durante el día y la noche en TSR en la banda de 5 GHz

Además de los resultados anteriores, se incluye seguidamente un ejemplo de un día laboral, útil para analizar las diferencias entre las dos bandas de medida de los sistemas WiFi. Los resultados obtenidos sirven para hacer una comparación de la exposición registrada por una y otra banda de medidas. Las gráficas siguientes reflejan las diferencias de los estadísticos P50, P90, P99 y máximo registrados en ambas bandas un lunes a lo largo del día en el laboratorio de TSR.

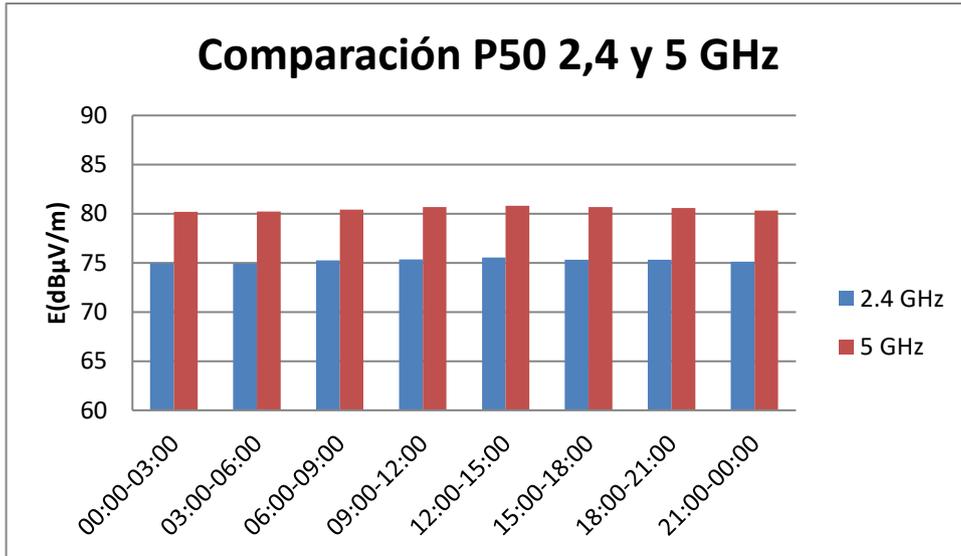


Ilustración 20. Comparación del percentil 50 entre las bandas de 2,4 y 5 GHz

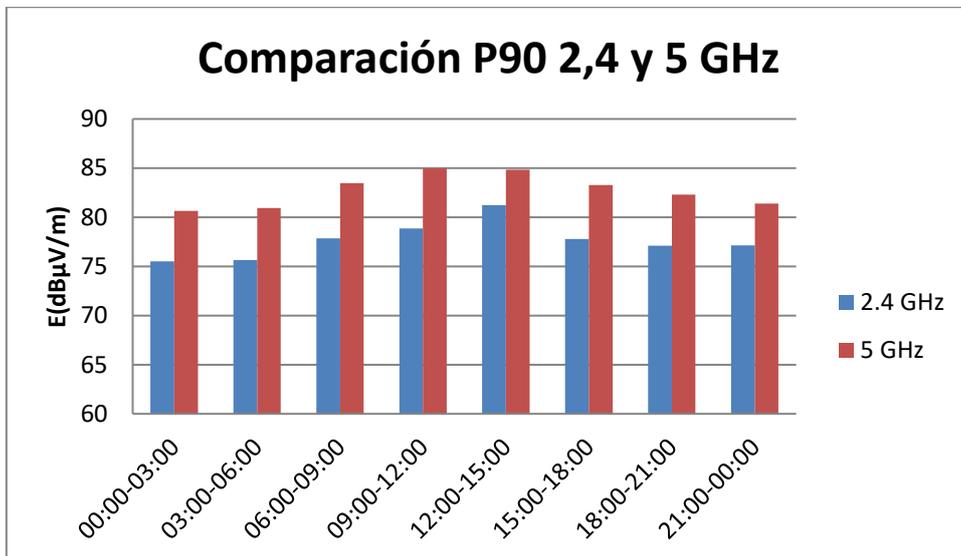


Ilustración 21. Comparación del percentil 90 entre las bandas de 2,4 y 5 GHz

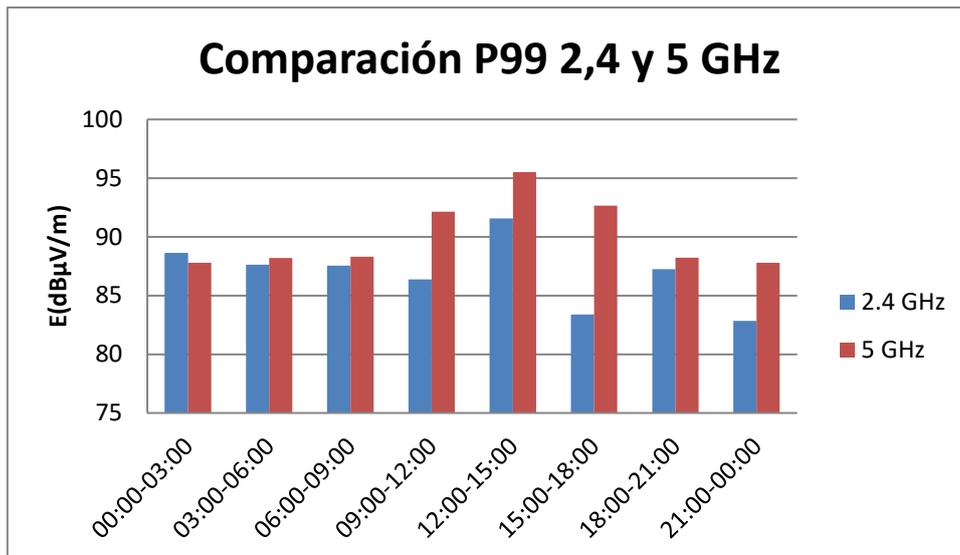


Ilustración 22. Comparación del percentil 99 entre las bandas de 2,4 y 5 GHz

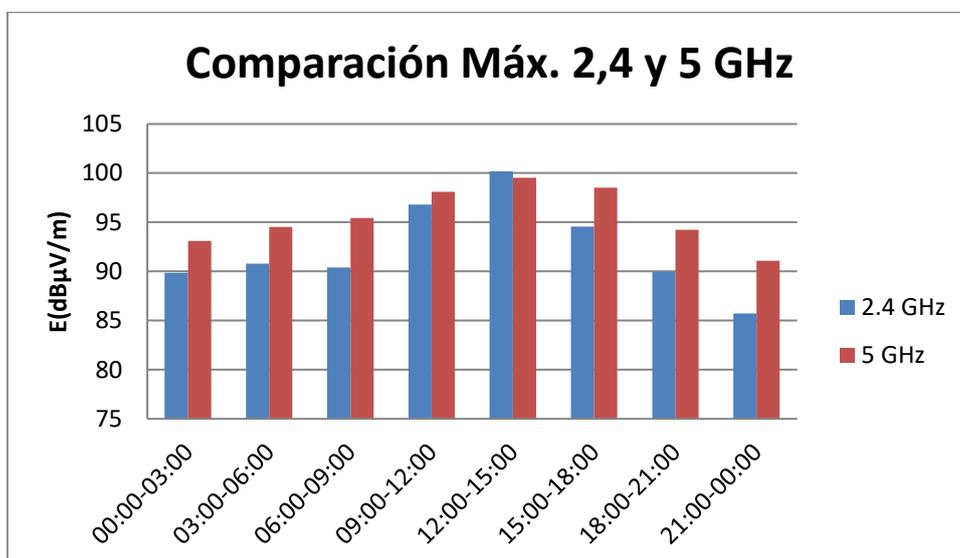


Ilustración 23. Comparación del valor máximo entre las bandas de 2,4 y 5 GHz

Estos resultados han sido obtenidos un lunes. Las diferencias obtenidas son las medidas de la banda de 5 GHz respecto a las de la banda de 2,4 GHz. Estas diferencias se deben a lo explicado anteriormente en la variabilidad espacial. En los percentiles bajos los valores de la banda de 5 GHz son mayores debido a que estamos midiendo el doble del ancho de banda. Además, la potencia de señal transmitida en la banda de 5 GHz es mayor respecto a la potencia transmitida en la banda de 2,4 GHz.

Como conclusión se puede afirmar que las diferencias que se presentan vienen dadas por las diferencias de tecnologías en ambas bandas y el uso a día de hoy de cada una de ellas, ya que muchos dispositivos no disponen todavía de la capacidad de conectarse en la banda de 5 GHz.

Por lo tanto, en un día normal con tráfico las diferencias en percentiles pequeños de la banda de 5 GHz son positivas, sin embargo, en percentiles altos y en el máximo negativas. Un ejemplo de diferencias de una hora tomada en un día de tráfico es el siguiente:

<u>dBμV/m</u>	P01	P10	P50	P90	P99	Máximo
2,4 GHz	75.80	75.33	75.45	79.98	92.56	104.67
5 GHz	80.83	82.92	85.77	87.58	89.21	90.55

Tabla 15. Diferencias entre las bandas de 2,4 y 5 GHz en una hora al azar (de 10:00 a 11:00)

En la tabla se puede observar lo previamente comentado, como la medida de mayor percentil o incluso el máximo el nivel medido por la banda de 2,4 GHz es mayor, debido al número de dispositivos que se conectan a esta banda. Es por esto que se debe medir necesariamente en las dos bandas de trabajo de los sistemas WiFi para caracterizar la exposición global a campos electromagnéticos debida a los servicios WiFi.

Por último, al igual que para la variabilidad espacial se estudió el comportamiento de la señal para determinar la distribución estadística de mejor ajuste, se ha seguido la misma metodología de análisis para caracterizar la variabilidad temporal, es decir, determinar la distribución estadística que sigue la señal a lo largo de las horas y días.

Para ello, se comparó cada día y noche de cada día de la semana en ambas bandas con las siguientes distribuciones estadísticas: Lognormal, Nagakami, Normal, Rayleigh, Rice y Weibull.

Para hacer la comparación se utilizó la herramienta de Matlab *Dfittool*, en el que se muestra cuánto se asemeja los datos obtenidos a cada una de las distribuciones obtenidas. A continuación, se muestra una gráfica en la que se puede ver cuánto se asemeja los datos obtenidos de un día y una noche de un día cualquiera a cada una de las distribuciones estadísticas previamente mencionadas.

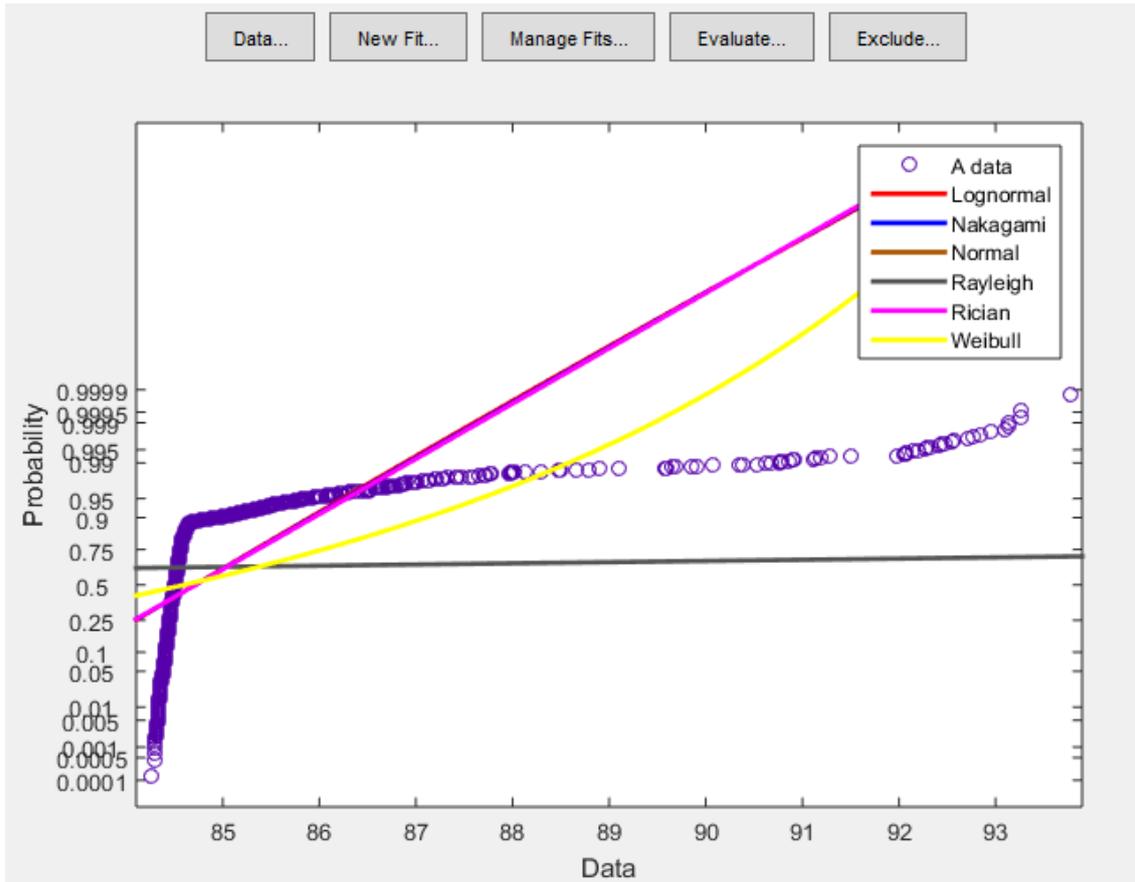


Ilustración 24. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida durante la noche

Esta gráfica se tomó durante la noche de un martes en la banda de 5 GHz. Como se puede observar, la señal se asemeja a las distribuciones estadísticas Lognormal, Nakagami, Normal y Rice mientras que las distribuciones de Rayleigh y Weibull se asemejan muy poco. Al sacar los datos de similitud con el programa, la distribución estadística a la que más se asemeja es la distribución estadística de Lognormal. Sin embargo, en la gráfica se ven las cuatro distribuciones de mejor ajuste (Lognormal, Nakagami, Normal y Rice) superpuestas. Esto se debe a que los valores de verosimilitud de esos cuatro ajustes se asemejan mucho entre sí, pero la que más se aproxima a los datos obtenidos es la distribución Lognormal.

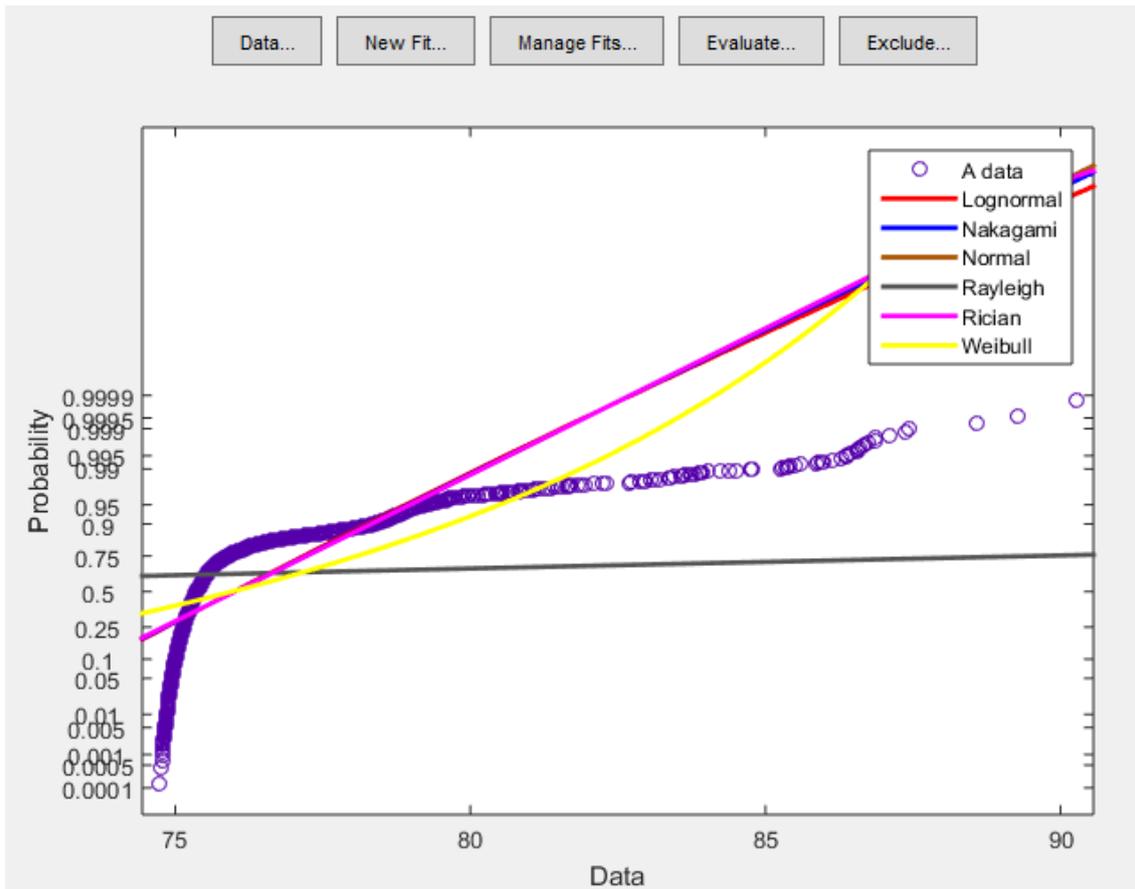


Ilustración 25. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida durante el día

Esta gráfica por el contrario se tomó durante el día de un lunes en la banda de 2,4 GHz. Al igual que en la gráfica anterior se puede ver como las cuatro distribuciones estadísticas de mejor ajuste (Lognormal, Nakagami, Normal y Rice) están casi superpuestas y los valores de similitud obtenidos en Matlab se aproximan mucho. Sin embargo, la distribución estadística que tiene un mejor valor de verosimilitud es la Lognormal. Esto sucede, para cada día y noche de cada día de la semana en ambas bandas. Es decir, la distribución estadística que más se aproxima al comportamiento de la señal durante el día y la noche de cada día de la semana es la distribución Lognormal. A continuación, se pueden ver los valores de similitud de cada distribución respecto de la señal medida en cada caso:

	Log-normal	Nakagami	Normal	Rayleigh	Rician	Weibull
Martes Noche (5 GHz)	-2115,68	-2176,99	-2192,31	-17244,08	-2191,31	-8111,91
Lunes Día (2,4 GHz)	-4832,55	-4891,01	-4915,87	-16081,77	-4915,87	-9005,60

Tabla 16. Valores de similitud de las distribuciones estadísticas respecto de la señal medida en cada caso

Dado estos resultados, se puede concluir que el comportamiento de la señal WiFi en ambas bandas se aproxima a una distribución estadística Lognormal. Sin embargo, es importante resaltar que al realizar esta comparación la señal medida estaba en escala logarítmica lo que significa que realmente el comportamiento de la señal WiFi se ajusta más a una distribución Normal.

9. Descripción de tareas

En este apartado se va a exponer el plan de trabajo que se ha llevado a cabo para la realización de este Trabajo de Fin de Máster.

9.1. Equipo de trabajo

La tabla que se presenta a continuación indica los miembros del equipo de trabajo:

Nombre	Cargo
David Guerra	Ingeniero sénior/Director del TFM
Iñigo Trigo	Ingeniero junior/Desarrollador del TFM

Tabla 17. Miembros del equipo de trabajo y cargo

El director del TFM es un doctor en Ingeniería de Telecomunicaciones que se ha encargado de la gestión del proyecto, así como de la toma de decisiones importantes a la hora de afrontarlo. Además, ha tratado de aconsejar en todo momento sobre los pasos a seguir y ha supervisado las tareas realizadas.

El desarrollador del TFM ha tenido la función de recoger información, ordenarla, investigar y ejecutar el trabajo. También ha debido de seguir las pautas indicadas por el director del proyecto y por supuesto, ha debido mantenerle informados de cómo progresa el trabajo mediante reuniones realizadas cada cierto tiempo.

9.2. Definición de Paquetes de Trabajo y Tareas

En este apartado se definen los paquetes de trabajo con sus correspondientes tareas.

P.T.1 Gestión y Documentación

Este paquete de trabajo consiste en la redacción del documento, así como en la recopilación de toda la información necesaria para su elaboración. Además, incluye la gestión y el seguimiento del trabajo realizado por todos los miembros.

- **T.1.1 Supervisión y seguimiento**
Consiste en el acuerdo de reuniones entre los miembros en las que se discute sobre el desarrollo del trabajo, las dudas que surgen y el cumplimiento de los plazos.
- **T.1.2 Redacción del informe**
Consiste en la redacción del informe a lo largo de todas las tareas. Esta ha sido la última tarea en concluir.
- **T.1.3 Definición de la gestión del alcance**
Reunión de los miembros del equipo para definir los objetivos del trabajo.
- **T.1.4 Recopilación de información y gestión de recursos**
Se determina los recursos e información necesarios para la elaboración del trabajo.

P.T.2 Planificación del trabajo

Este paquete de trabajo tiene como propósito la organización del resto de tareas constituyentes del trabajo.

- **T.2.1 Realización de una planificación del trabajo**
Una vez definidos los objetivos, se redactan las tareas y se organizan con objeto de completar el trabajo.
- **T.2.2 Seguimiento de la planificación del trabajo**
Una vez realizada la planificación del trabajo, se lleva a cabo reuniones semanales para ver el cumplimiento de dicha planificación.

P.T.3 Estudio de la metodología y primeras pruebas

Este paquete consiste en recopilar información, estudiarla, determinar cómo trabajar con ella y adecuarla a las necesidades actuales. Además, incluye la comprobación de la idoneidad de la metodología a utilizar, su adaptación a las actuales condiciones del sistema, el diseño del programa de medidas y la elección de diversas alternativas, previamente a la realización de la campaña de medidas.

- **T.3.1 Estudio del estado del arte y adaptación de la metodología**
Consiste en leer todos los detalles posibles acerca de la metodología, adecuarla a la nueva situación de la tecnología, ver el porqué de los parámetros a utilizar, etc.
- **T.3.2 Diseño del programa de medidas**
Se trata de la elaboración de un programa de medidas en la herramienta Matlab para automatizar el proceso de captación de medidas en función de la metodología escogida.
- **T.3.3 Pruebas para elección de sistema de medidas**
Se trata de varias pruebas en las que se comparan los resultados derivados de medir con la antena de forma horizontal y vertical y diferentes valores del parámetro "Sweep Time".
- **T.3.4 Análisis de resultados y elección del sistema**
Tras observar los resultados, elegir el sistema apropiado para el trabajo que se va a llevar a cabo.

P.T.4 Campaña de medidas

Este paquete de trabajo consiste en la elaboración de una campaña de medidas para verificar el nivel de fiabilidad de la metodología de medida de la exposición WiFi considerada, a partir de la comparación con los resultados obtenidos previamente por una metodología distinta. Incluye además la caracterización de la exposición electromagnética WiFi existente en la Escuela en ambas bandas de trabajo y un análisis del comportamiento de la señal en estos sistemas.

P.T.4.1 Planificación campaña de medidas

Se realizará la planificación correspondiente a la campaña de medidas, así como el acopio y organización de los materiales o equipamiento a utilizar.

- **T.4.1.1 Selección de emplazamientos**
Elección de los lugares a medir para llevar a cabo la caracterización de la variabilidad de la exposición WiFi en la escuela.

- **T.4.1.2 Definición de los intervalos de medida**
Definición de los tiempos y días de medida.
- **T.4.1.3 Gestión de los elementos de medida**
Organización de toda la instrumentación necesaria para llevar a cabo las medidas

P.T.4.2 Realización de las medidas

Se llevará a cabo la realización de las medidas planificadas.

- **T.4.2.1 Medidas planificadas**
Se llevarán a cabo las diferentes medidas según la variabilidad que queramos analizar: espacial o temporal.
- **T.4.2.2 Recopilación de datos**
Se procede a guardar los datos de manera ordenada para su posterior análisis.

P.T.4.3 Análisis de datos, comparativas y conclusiones.

Se llevará a cabo el análisis de los datos recogidos para la caracterización de la variabilidad de la exposición, obteniendo las conclusiones oportunas. Por otra parte, se compararán las metodologías utilizadas para reafirmar que la solución propuesta es la adecuada para medir en ambas bandas. Finalmente, se analizará el comportamiento de las señales WiFi en ambas bandas.

- **T.4.3.1 Estudio estadístico**
Se calcularán diferentes valores estadísticos para el análisis de los datos.
- **T.4.3.2 Comparación entre metodologías y caracterización de ambas bandas**
Se procederá a comparar las metodologías estudiadas para obtener conclusiones acerca de la solución propuesta. A su vez, se caracterizará ambas bandas de trabajo en los diferentes entornos de la escuela.
- **T.4.3.3 Análisis del comportamiento de la señal WiFi en ambas bandas**
Se estudiará el comportamiento de la señal en ambas bandas. De esta manera se verá el comportamiento de la señal en función del tiempo y en función del lugar de medida.
- **T.4.3.4 Sacar resultados y conclusiones**
Se procederá a obtener los resultados y conclusiones finales sobre la metodología empleada y la variabilidad de la exposición registrada en la escuela.

9.3. Diagrama de Gantt

A continuación, se muestra de manera gráfica la planificación del Trabajo de Fin de Máster dividido en paquetes de trabajo y tareas. Se puede observar que el trabajo ha durado un total de 150 días, en los cuales no se han tenido en cuenta los fines de semana.

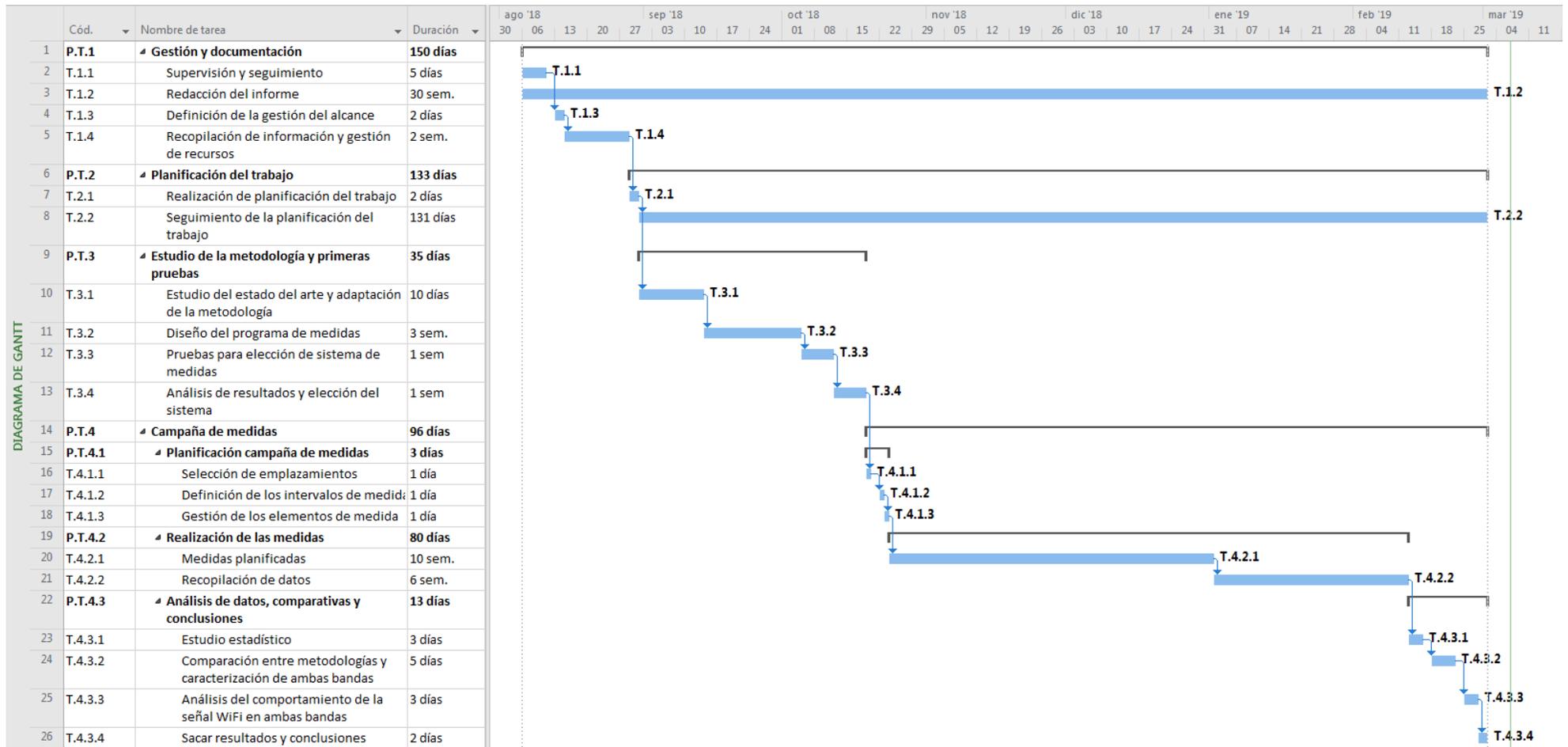


Ilustración 26. Diagrama de Gantt de la planificación del trabajo

10. Presupuesto ejecutado

En este apartado se llevará a cabo el desglose de los diferentes apartados del presupuesto del trabajo realizado.

Para calcular el gasto total del trabajo hemos tenido en cuenta los siguientes subapartados: recursos humanos, amortizaciones de materiales y gastos.

Costes unitarios de recursos humanos

En la siguiente tabla se calculan los costes unitarios de cada miembro del proyecto, teniendo en cuenta los costes indirectos de cada uno.

Nombre	Cargo	Coste unitario (€/h)
David Guerra	Director del TFM	50
Iñigo Trigo	Ingeniero junior	25

Tabla 18. Costes unitarios recursos humanos

Costes previstos debido a amortizaciones

Son los costes realizados debido a material que constaba previamente antes del trabajo, y que debido a su uso en el proyecto se debe de realizar su respectiva amortización. En este apartado se incluye las herramientas de trabajo Matlab, Microsoft Office y el software asociado al dosímetro, los cuales, debido a sus usos anteriores, se consideran amortizados.

Descripción	Vida útil (sem)	Coste inicial (€)	Coste unitario (€/sem)
Ordenador portátil	270	520	1.93
Ordenador de sobremesa	300	1,050	3.50
Analizador de espectros Anritsu	420	9,500	22.62
Antena dual WiFi	500	190	0.38
Cables y conectores	450	60	0.13
Impresora	420	250	0.60

Tabla 19. Costes unitarios amortizaciones

Gastos del trabajo

Son los gastos realizados en materiales que sirven en exclusividad para este trabajo, es decir no podrán volver a ser utilizados.

Descripción	Coste (€)
Material de oficina	100
Conexión a Internet	55
Desplazamientos	80
Total Gastos	235

Tabla 20. Costes en el apartado de gastos

Cálculo de costes finales

A continuación, se realiza el desglose del coste total final teniendo en cuenta el número de horas empleadas por los recursos humanos y las horas de utilización de los materiales amortizados.

Costes finales de recursos humanos

En la siguiente tabla se muestra el coste total de cada miembro del equipo teniendo en cuenta su participación en horas dentro del trabajo.

Nombre	Responsabilidad	Coste unitario (€/h)	Horas	Coste (€)
David Guerra	Director del TFM	50	45	2,250
Iñigo Trigo	Ingeniero Junior	25	800	20,000
			Total RH	22,250

Tabla 21. Costes desglosados recursos humanos

Costes finales de amortizaciones

Descripción	Coste unitario (€/sem)	Utilización(sem)	Coste (€)	
Ordenador portátil	1.93	25	48.15	
Ordenador de sobremesa	3.50	20	70.00	
Analizador de espectros Anritsu	22.62	8	180.95	
Antena dual WiFi	0.38	8	3.04	
Cables y conectores	0.13	8	1.07	
Impresora	0.60	1	0.60	
			Total AM	303.80

Tabla 22. Costes desglosados amortizaciones

Resumen económico

Por último, en la tabla 24 se representa el gasto final del trabajo desglosado en las facetas más importantes dentro del presupuesto, a los que añadimos un 5 % en costes indirectos.

Concepto	Importe (€)	
Recursos humanos	22,250	
Recursos materiales	303.80	
Gastos	235	
	Subtotal	22,788.80
Costes indirectos (5%)	1,139.44	
	Total	23,928.24

Tabla 23. Costes desglosados y coste final del trabajo

Por lo tanto, el gasto final del trabajo asciende a 23,928.24 €.

11. Análisis Previo de Riesgos

En este apartado se tratarán los diferentes riesgos que ha conllevado el trabajo. Para ello, primero se identificaron los probables riesgos que se pudieron dar, luego se vio de qué modo nos afectarían y por último se propuso diversas soluciones en el caso de que ocurriesen. Posteriormente en este apartado, ilustraremos gráficamente estos riesgos mediante una matriz probabilidad-impacto. Para realizar la gráfica clasificaremos cada riesgo según:

Probabilidad de ocurrencia (Po):

- Rara vez (0.1)
- Poco probable (0.3)
- Probable (0.5)
- Bastante probable (0.7)
- Casi seguro (0.9)

Impacto del riesgo en caso de que ocurra (Ir):

- Muy bajo (0.1)
- Bajo (0.3)
- Moderado (0.5)
- Alto (0.7)
- Muy alto (0.9)

Descripción de Riesgos

A continuación, se identificará cada uno de los riesgos y se clasificarán según el criterio acordado previamente. Por último, se propondrá soluciones a cada uno de ellos.

Mala elección de los materiales (R1)

Este riesgo surge debido a la incorrecta elección de los materiales a la hora de la toma de medidas.

Solución: Realizar un estudio previo de la metodología a utilizar para saber los componentes adecuados, por otro lado, realizar pequeñas pruebas previas a la campaña de medidas, para ver que se mide de forma apropiada.

Po = 0.3 Ir = 0.3 **PT = 0.09**

Mala ejecución de las medidas (R2)

Este riesgo consiste en la mala ejecución de las medidas debido a diferentes motivos como pueden ser: no cumplir con la normativa, alturas incorrectas o mala recopilación de datos debido a resultados incoherentes, del modo que habría que volver a realizarlas.

Solución: Tras la realización de cada medida, archivar y ordenar cada una de ellas, cerciorándose previamente que los resultados obtenidos tienen coherencia a través de estudios previos o mediante programas de comprobación.

Po = 0.3 Ir = 0.9 **PT = 0.27**

Mal funcionamiento de los recursos materiales (R3)

Este riesgo consiste en el mal funcionamiento de los recursos materiales disponibles dentro del trabajo.

Solución: Asegurar el funcionamiento de cada material previo al comienzo del trabajo, y en el caso que fuera posible, optar a una pieza de repuesto.

Po = 0.5 Ir = 0.5 **PT = 0.25**

Retraso en la entrega de plazos (R4)

Este riesgo consiste en el incumplimiento de los plazos previstos en el trabajo, lo que conlleva a un retraso en las tareas posteriores y una mayor utilización de los recursos.

Solución: Tratar de respetar los plazos acordados para cada tarea e intentar dejar márgenes amplios entre tareas para imprevistos.

Po = 0.5 Ir = 0.1 **PT = 0.05**

11.1. Matriz Probabilidad-Impacto

En esta matriz se ven representados los diferentes riesgos. Los riesgos situados en la esquina inferior izquierda son riesgos de menor importancia. Sin embargo, aquellos riesgos situados en la esquina opuesta son los riesgos de mayor importancia, y, por tanto, aquellos en los que hay que dedicar un mayor tiempo de análisis. También se puede diferenciar su importancia por el color, siendo el color verde poco riesgo, el color amarillo riesgo moderado y el color rojo máximo riesgo.

Casi seguro					
Bastante probable					
Probable	R4		R3		
Poco probable		R1			R2
Rara vez					
Probabilidad/ Impacto	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto

Tabla 24. Matriz probabilidad-impacto

R1 = Mala elección de los materiales

R2 = Mala ejecución de las medidas

R3 = Mal funcionamiento de los recursos materiales

R4 = Retraso en la entrega de plazos

12. Conclusiones

El incremento de la cantidad de instalaciones de redes de datos inalámbricas y la proximidad de éstas a la población en general, ha provocado en los últimos años una alarma social por la presencia de emisiones radioeléctricas. A su vez, la evolución de estas redes a nuevas bandas y mayor número de puntos de acceso ha generado realizar un análisis de los niveles de radiación de este tipo de servicios.

Hoy en día, no existe una metodología de referencia para medir la exposición a las señales derivadas de los servicios WiFi en 5 GHz. Es por ello que en este trabajo se estableció como objetivo el estudio y adaptación de una metodología que en un futuro pueda adoptarse como estándar a tener en cuenta a la hora de medir los niveles de este tipo de radiación en hogares, colegios, universidades, centros públicos, etc., y que, además, sirva para apaciguar de alguna manera la preocupación de los ciudadanos por estar constantemente sometidos a esta clase de radiaciones.

En este trabajo se ha comprobado que una solución apropiada es la metodología propuesta por el Grupo TSR de la UPV/EHU [15]. El hecho de utilizar un analizador de espectros con una antena adecuada para la recepción de las señales de interés presenta grandes ventajas frente a la utilización de un exposímetro. Se ha podido ver, que los exposímetros realizan una sobreestimación de los niveles electromagnéticos existentes en el ambiente, debido a que no son capaces de medir por debajo de un determinado umbral. Además, se ha observado que el periodo de muestreo mínimo que utilizan es demasiado grande para la captación de señales transmitidas a ráfagas. Por ello, se deduce que utilizar un sistema de medidas cuyo elemento principal sea un analizador de espectros es más adecuado.

Sin embargo, a día de hoy los sistemas WiFi también transmiten en la banda de 5 GHz por lo que fue necesario la adaptación de esta metodología a las nuevas características de estos sistemas. No solo adecuando el sistema de medidas, sino también los valores de los parámetros que utiliza.

El trabajo anterior ha permitido caracterizar además los niveles de radiación WiFi existentes en ambas bandas en la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Para ello, se planificó y realizó una campaña de medidas a partir de las cual se obtuvieron una serie de muestras que finalmente fueron utilizadas para realizar un análisis de la variación espacial y temporal de ese tipo de emisiones. Los resultados derivados de dicho análisis muestran que la radiación diurna es ligeramente superior que la nocturna, y como era de esperar, que la actividad electromagnética es mayor entre semana. Por otro lado, el nivel máximo de radiación obtenido fue 0.43 V/m; valor que está muy lejos de límite establecido en Real Decreto 1066/2011 para las frecuencias de los servicios WiFi [3].

A su vez, los resultados de dicho análisis muestran la diferencia de potencia de señal en la banda de 5 GHz frente a la banda de 2,4 GHz. Esto surge debido a que en la banda de 5 GHz el ancho de banda de un canal que se está midiendo es de 160 MHz mientras que en la banda de 2,4 GHz es la mitad. Además, en la banda de 5 GHz se emite con mayor potencia con el objetivo de alcanzar el mismo rango de cobertura que en la banda de 2,4 GHz.

Este análisis también nos muestra la diferencia de potencia de señal medida en la banda de 2,4 GHz con la metodología adaptada respecto a la metodología propuesta por el grupo TSR. Esta diferencia principalmente se debe al cambio de sistemas de medidas y al incremento de redes inalámbricas y puntos de accesos a día de hoy frente a 2016.

Por último, el estudio realizado ha permitido caracterizar el comportamiento de la señal en ambas frecuencias. Para ello, se determinó la distribución estadística de mejor ajuste para caracterizar la variabilidad espacial y la variabilidad temporal mediante un estudio en Matlab. Los resultados de este estudio muestran que la señal debido a estos sistemas se asemeja en comportamiento a una distribución estadística *Lognormal*, sin embargo, estos resultados han sido comparados en escala logarítmica. Por lo tanto, el comportamiento de la señal debido a los sistemas WiFi se ajusta a una distribución estadística normal a la hora de caracterizar ambas variabilidades dentro de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

13. Referencias

- [1] ICNIRP. "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," ICNIRP Guidelines, Vol. 74, nº 4. April 1998.
- [2] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Orden IET/787/2013, de 25 de abril, BOE núm. 111, pág. 35006-35330, mayo 2013.
- [3] Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, BOE núm. 234, pág. 36217-36227, septiembre 2001.
- [4] Ministerio de Ciencia y Tecnología, Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, BOE núm. 11, pág. 1528-1536, enero 2002.
- [5] Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 299/2016, de 22 de Julio, BOE núm. 128, pág. 52811-52829, julio 2016.
- [6] U. Varshney, The status and future of 802.11-based WLANs, Georgia State University, Atlanta, GA, USA, June 2003
- [7] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Real Decreto 863/2008, de 23 de mayo, BOE núm. 138, pág. 26305-26320, junio 2008.
- [8] ETSI, EN 300 328 V1.7.1, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques, September 2006
- [9] C-IEEE Computer Society, IEEE 802.11n-2009-IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks, October 2009
- [10] C-IEEE Computer Society, IEEE 802.11ac-201-IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks, December 2013
- [11] Djuric N, Kljajic D, Kasas-lazetic K, Bajovic V. The SEMONT continuous monitoring of daily EMF exposure in an open area environment. Environmental Monitoring and Assessment, vol. 187m n.4, pp. 1-17, 2015
- [12] Fernández-García R, Gil I. Measurement of the environmental broadband electromagnetic waves in a mid-size European city. Environmental Research, vol158, pp. 768-772, 2017
- [13] Wout Joseph, Leen Verloock, Francis Goeminne, Günter Vermeeren and Luc Martens, Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments, Belgium, February 2012

- [14] Leen Verloock, Wout Joseph, Francis Goeminne, Luc Martens, Mart Verlaek, and Kim Constandt, Temporal 24-hour assessment of radio frequency exposure in schools and homes, Belgium, October 2014
- [15] Measurement Methodology for Determining the Optimal Frequency Domain Configuration to Accurately Record WiFi Exposure Levels. M. Fernández, D. Guerra, U. Gil, I. Peña, A. Arrinda. *EEE Transactions on Instrumentation & Measurement / Volume 68, Issue 2, February 2019, Page(s): 547-557*
- [16] Marta Fernández, Análisis de Equipos de Medida de Exposición Electromagnética en Redes WiFi, septiembre 2015.
- [17] Área de Comprobación Técnica de Emisiones Radioeléctricas/Subdirección General de Inspección de las Telecomunicaciones, Procedimiento de medida de radiaciones no ionizantes, enero 2003.
- [18] D. Guerra, Estudio de parámetros para la planificación de redes DRM en la banda de onda media diurna, pág. 163-167, 2006

Anexo I. Normativa aplicable

En este anexo se hace referencia a la normativa más significativa aplicable a este trabajo.

Orden IET/787/2013

Orden IET/787/2013, de 25 de abril, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias [2].

Mediante esta orden se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), el utilizado principalmente para asignar las frecuencias a los diferentes servicios de telecomunicaciones.

La utilidad de esta orden para este trabajo es conocer las frecuencias de trabajo de los sistemas WiFi.

Orden CTE/23/2002

Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, que establece las condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones de estaciones radioeléctricas [4].

A través de esta orden, se regula los contenidos y los formatos de los estudios, así como las certificaciones a presentar exigiendo que dichos estudios sean realizados por técnicos competentes en el ámbito de las telecomunicaciones y visadas por su colegio profesional.

En este trabajo se ha empleado esta orden con el fin de cumplir los pasos para presentar de manera adecuada un estudio de la metodología empleada.

Real Decreto 1066/2001

Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el reglamento que establece las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, las restricciones a las emisiones electromagnéticas y las medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas [3].

Este Real Decreto se basa en publicaciones de la ICNIRP (International Commission of NonIonizing Radiation Protection) y tiene como objetivo establecer medidas de protección sanitaria frente a campos electromagnéticos [1]. Para ello, se establecen restricciones básicas y niveles de referencia que se deberán respetar. Además, por otra parte, el reglamento describe mecanismos de seguimiento de los niveles de exposición que contemplan la presentación de certificaciones e informes por parte de operadores de telecomunicaciones, la realización de planes de inspección y la elaboración de un informe anual por parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Las restricciones básicas son niveles impuestos basados directamente en los efectos de las radiaciones electromagnéticas sobre la salud. En cambio, los niveles de referencia se ofrecen como una herramienta práctica para determinar la probabilidad de que se sobrepasen las restricciones básicas. Estas magnitudes son más fáciles de medir, por lo tanto, de la información proporcionada por este Real Decreto se ha extraído la tabla de los niveles de referencia establecidos que se muestra a continuación:

Intervalos de frecuencia	Intensidad campo E [V/m]	Intensidad campo H [A/m]	Campo B [μ T]	Densidad de potencia S [W/m ²]
0 - 1 Hz	-	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	-
1 - 8 Hz	10000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 - 25 Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$	-
0,0025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	-
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,0092	2
400 - 2000 MHz	$1,375 \cdot f^{1/2}$	$0,0037 \cdot f^{1/2}$	$0,0046 \cdot f^{1/2}$	$f / 200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,2	10

Tabla 25. Niveles máximos de referencia para diversas frecuencias

En este trabajo hemos utilizado los límites de referencia correspondientes a la banda de trabajo de los sistemas WiFi. Se puede observar que el nivel de referencia máximo de exposición electromagnética para este caso es 61 V/m.

Real Decreto 299/2016

Real Decreto 299/2016, de 22 de Julio, que tiene por objeto establecer las disposiciones mínimas para la protección de los trabajadores contra los riesgos para su salud y su seguridad derivados o que puedan derivarse de la exposición a campos electromagnéticos durante su trabajo [5].

Mediante este Real Decreto, las empresas o instituciones deben de garantizar la protección de sus trabajadores contra los riesgos para su salud y seguridad derivados la exposición a campos electromagnéticos. Para ello, deben de tratar de evitar la exposición continuada de sus trabajadores a estos campos y deberán de tener caracterizado el entorno ocupacional donde se encuentran los trabajadores a fin de garantizar dicha protección.

Por lo tanto, mediante este trabajo se debe de garantizar que se cumple con la protección de los trabajadores y alumnado contra los riesgos para su salud y su seguridad derivados o que puedan derivarse de la exposición electromagnética dentro de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Anexo II. Aspectos relativos al sistema de medidas

En este anexo se detallan los diferentes equipos o conjuntos que se utilizan en este trabajo para la realización de las medidas.

En primer lugar, se muestra el sistema de captación de señales elegido, puesto que inicialmente hubo que comprobar si era mejor medir con el dipolo dual de forma horizontal o vertical. Al comprobar que los resultados obtenidos fueron similares, se optó por medir con el dipolo de manera vertical.



Ilustración 27. Sistema de medidas elegido

Posteriormente, para llevar la señal del sistema de captación al analizador se emplea un cable coaxial con dos conectores. Una vez que llega la señal al analizador de espectros, éste realiza la toma de datos con la configuración indicada por el software de automatización de medidas y envía los datos resultantes mediante un cable de red al ordenador donde se almacena en un fichero de texto indicando la fecha en la que se toman las medidas, la frecuencia y la posición. Todo esto es posible gracias al programa elaborado para automatizar la toma de medidas. Por lo que finalmente el montaje final de la metodología propuesta se compone de los siguientes elementos:

- Un dipolo dual para sistemas WiFi
- Un cable coaxial
- Dos conectores
- Un analizador de espectros Anritsu MS2690A
- Un cable de red
- Un ordenador portátil
- Un programa para automatizar la toma de medidas.

A continuación, se puede observar una imagen del montaje completo de la metodología de medidas.



Ilustración 28. Montaje completo del sistema de medidas completo

Por otro lado, los resultados de la metodología con los que se comparan los resultados obtenidos están realizados mediante un dosímetro EME SPY 200, el cual se puede ver a continuación:



Ilustración 29. Exposímetro EME SPY

Por último, mencionar que el traslado de los materiales por la universidad para realizar las medidas se realizó mediante un carro de metal.

Anexo III. Ampliación de resultados

En este anexo se van a mostrar con más detalle los resultados obtenidos tras el procesamiento de los datos obtenidos en la campaña de medidas. En concreto se incluyen los resultados relativos a la variabilidad espacial y la temporal.

En primer lugar, se mostrará en detalle los resultados sobre la variabilidad espacial. Se podrán observar individualmente los estadísticos obtenidos en cada clase de cada una de las bandas de medida. A su vez, se podrá ver las diferencias entre la metodología utilizada por el grupo TSR y la metodología adaptada con la nueva instrumentación para este trabajo en cada una de las clases en la banda de 2,4 GHz. Además, se mostrará la comparación de esta nueva metodología respecto al exposímetro utilizado en años anteriores.

Por otro lado, se mostrará los resultados obtenidos sobre la variabilidad temporal, es decir, los resultados obtenidos cada día en el laboratorio de TSR viendo como varía la exposición a lo largo de las horas en cada una de las bandas. También, se podrán observar las diferencias entre ambas bandas de medida durante el día y la noche de cada día de la semana.

Por último, se mostrarán más ejemplos del comportamiento de la señal tanto en la variabilidad espacial como en la variabilidad temporal viendo a qué distribución estadística se ajusta más.

Variabilidad espacial

A continuación, se detallan los resultados obtenidos por cada posición de cada clase en cada una de las frecuencias, y a su vez, los resultados generales de dicho aulas en ambas bandas de medida.

P1G1:

2,4 GHz:

dBμV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Pos 1	74,72	74,81	75,27	78,21	81,67	2,24	102,12	74,55	27,57	76,03
Pos 2	74,77	74,92	75,43	78,39	81,27	2,35	103,59	74,67	28,92	76,12
Pos 3	74,77	74,91	75,38	78,87	81,40	2,16	101,38	74,68	26,70	76,21
Pos 4	74,74	74,86	75,41	80,33	84,11	1,58	100,05	74,61	25,44	76,55
Pos 5	74,72	74,83	75,18	78,71	84,07	3,28	95,66	74,65	21,01	76,02
Pos 6	74,73	74,85	75,34	79,84	84,15	2,26	101,16	74,60	26,56	76,17

Tabla 26. Estadísticos del aula P1G1 por posición en la banda de 2,4 GHz

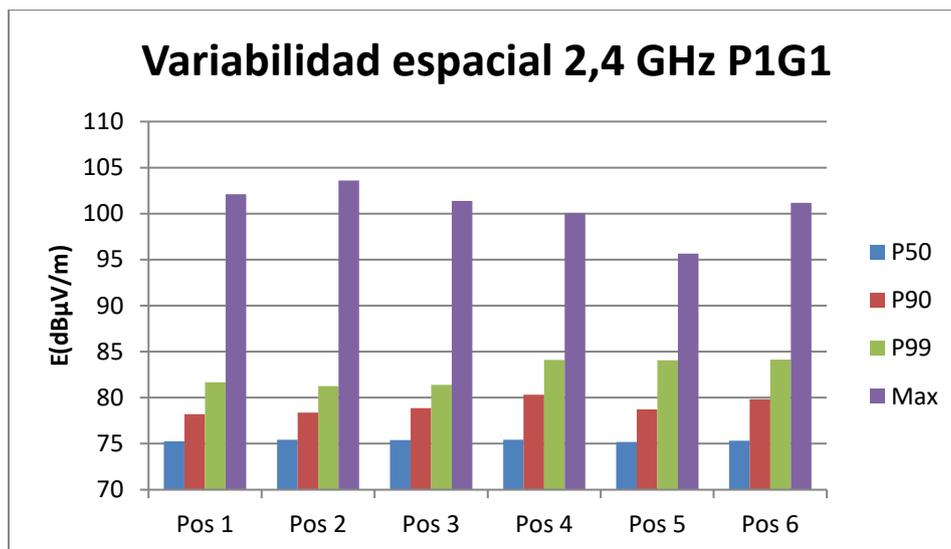


Ilustración 30. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P1G1 en la banda de 2,4 GHz

Los estadísticos generales del aula P1G1 en la banda de 2,4 GHz son:

dBµV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Total	74,73	74,86	75,34	78,78	83,27	1,35	103,59	74,55	29,04	76,19

Tabla 27. Estadísticos generales del aula P1G1 en la banda de 2,4 GHz

5 GHz:

dBµV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Pos 1	83,79	83,86	83,96	84,06	85,75	2,24	89,73	83,70	6,03	84,00
Pos 2	83,79	83,86	83,96	84,06	84,99	2,35	86,04	83,73	2,31	83,97
Pos 3	83,80	83,86	83,96	84,10	86,98	2,16	88,57	83,73	4,84	84,10
Pos 4	83,78	83,86	83,95	84,07	86,36	1,58	87,97	83,69	4,28	84,02
Pos 5	83,77	83,85	83,95	84,06	90,72	3,28	92,61	83,67	8,94	84,18
Pos 6	83,79	83,86	83,96	84,09	87,71	2,26	93,60	83,73	9,87	83,73

Tabla 28. Estadísticos del aula P1G1 por posición en la banda de 5 GHz

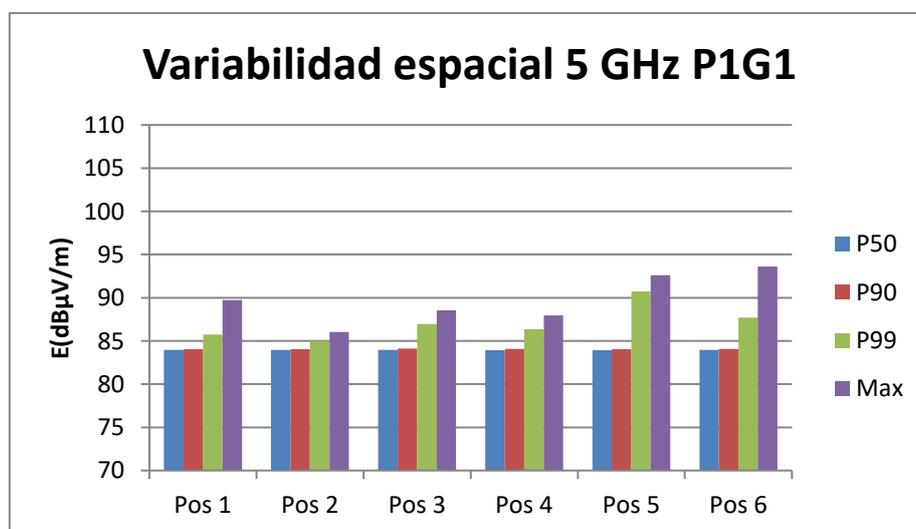


Ilustración 31. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P1G1 en la banda de 5 GHz

Los estadísticos generales del aula P1G1 en la banda de 5 GHz son:

dBμV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Total	83,78	83,86	83,96	84,07	86,98	1,02	93,60	83,67	9,93	84,05

Tabla 29. Estadísticos generales del aula P1G1 en la banda de 5 GHz

P3B1:

2,4 GHz:

dBμV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Pos 1	74,75	74,86	75,11	76,12	90,09	2,24	105,16	74,62	30,54	75,77
Pos 2	74,73	74,84	75,02	75,50	87,15	2,35	99,30	74,63	24,67	75,36
Pos 3	74,78	74,88	75,08	75,60	82,78	2,16	84,60	74,65	9,95	75,40
Pos 4	74,74	74,83	75,02	75,58	79,85	1,58	86,02	74,62	11,40	75,26
Pos 5	74,77	74,87	75,06	75,70	79,40	3,28	100,65	74,71	25,94	75,32
Pos 6	74,75	74,84	74,99	77,65	79,47	2,26	99,86	74,65	25,21	75,45

Tabla 30. Estadísticos del aula P3B1 por posición en la banda de 2,4 GHz

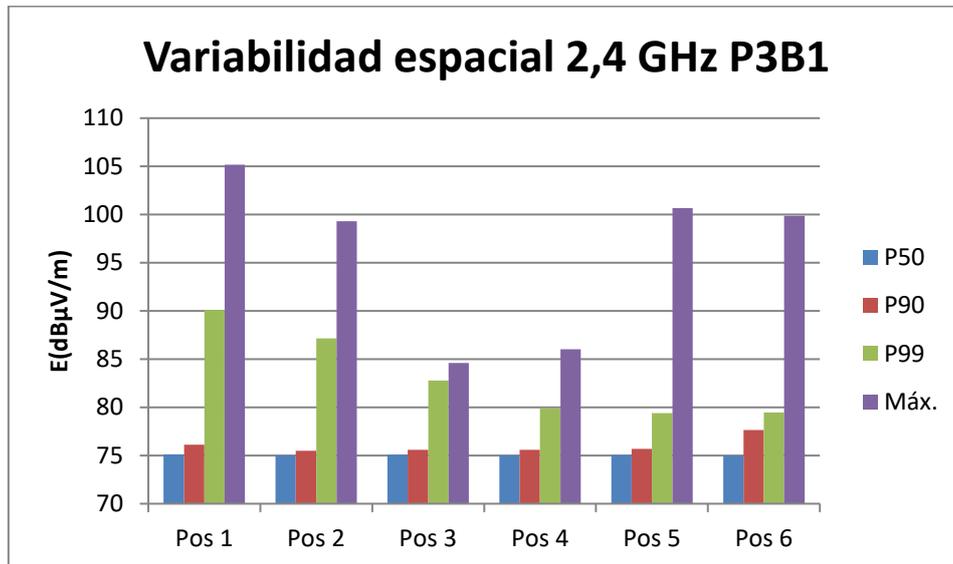


Ilustración 32. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3B1 en la banda de 2,4 GHz

Los estadísticos generales del aula P3B1 en la banda de 2,4 GHz son:

dBμV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Total	74,75	74,85	75,05	75,72	82,95	2,11	105,61	74,61	30,55	75,43

Tabla 31. Estadísticos generales del aula P3B1 en la banda de 2,4 GHz

5 GHz:

$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Pos 1	85,06	85,14	85,24	85,53	87,57	2,24	95,33	85,00	10,34	85,50
Pos 2	85,06	85,14	85,24	85,61	88,68	2,35	96,01	84,98	11,03	85,44
Pos 3	85,07	85,14	85,25	86,45	92,69	2,16	96,79	85,01	11,78	85,63
Pos 4	85,07	85,14	85,25	86,51	92,23	1,58	96,26	85,01	11,25	85,69
Pos 5	85,07	85,14	85,24	85,44	86,36	3,28	87,77	85,00	2,77	85,30
Pos 6	85,06	85,14	85,24	85,37	87,10	2,26	94,78	84,96	9,82	85,30

Tabla 32. Estadísticos del aula P3B1 por posición en la banda de 5 GHz

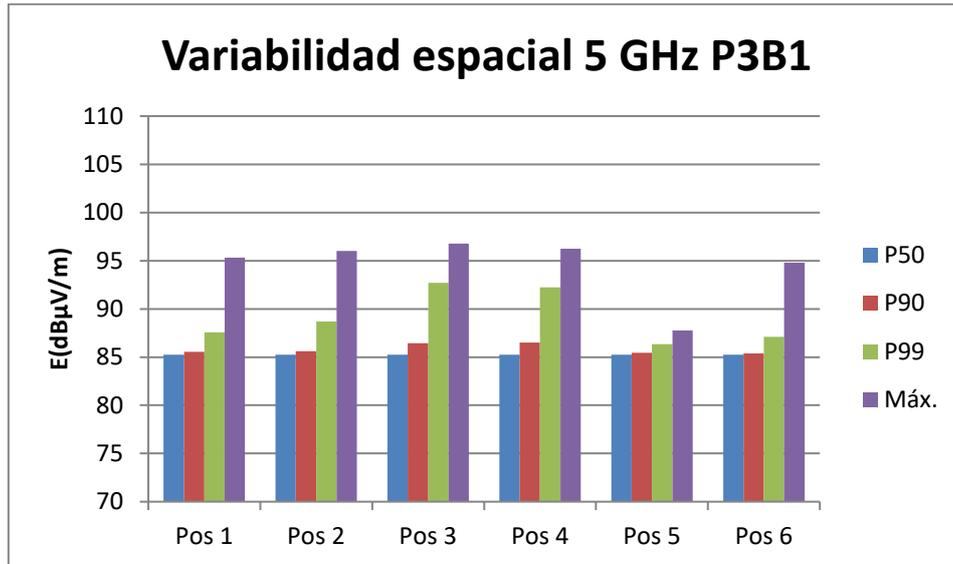


Ilustración 33. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3B1 en la banda de 5 GHz

Los estadísticos generales del aula P3B1 en la banda de 5 GHz son:

$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Total	85,07	85,14	85,24	85,47	90,72	1,17	96,79	84,96	11,83	85,43

Tabla 33. Estadísticos generales del aula P3B1 en la banda de 5 GHz

P3C3:

2,4 GHz:

$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Pos 1	74,73	74,84	75,08	78,08	88,61	2,24	99,33	74,61	24,72	76,18
Pos 2	74,78	74,88	75,24	81,59	91,15	2,35	103,86	74,64	29,22	76,65
Pos 3	74,79	74,91	75,33	84,52	92,17	2,16	100,86	74,69	26,17	77,08
Pos 4	74,77	74,89	75,25	83,80	97,52	1,58	100,56	74,63	25,93	77,19
Pos 5	74,77	74,88	75,21	83,19	95,99	3,28	98,41	74,65	23,76	77,14
Pos 6	74,79	74,90	75,16	81,73	93,99	2,26	100,03	74,68	25,35	76,91

Tabla 34. Estadísticos del aula P3C3 por posición en la banda de 2,4 GHz

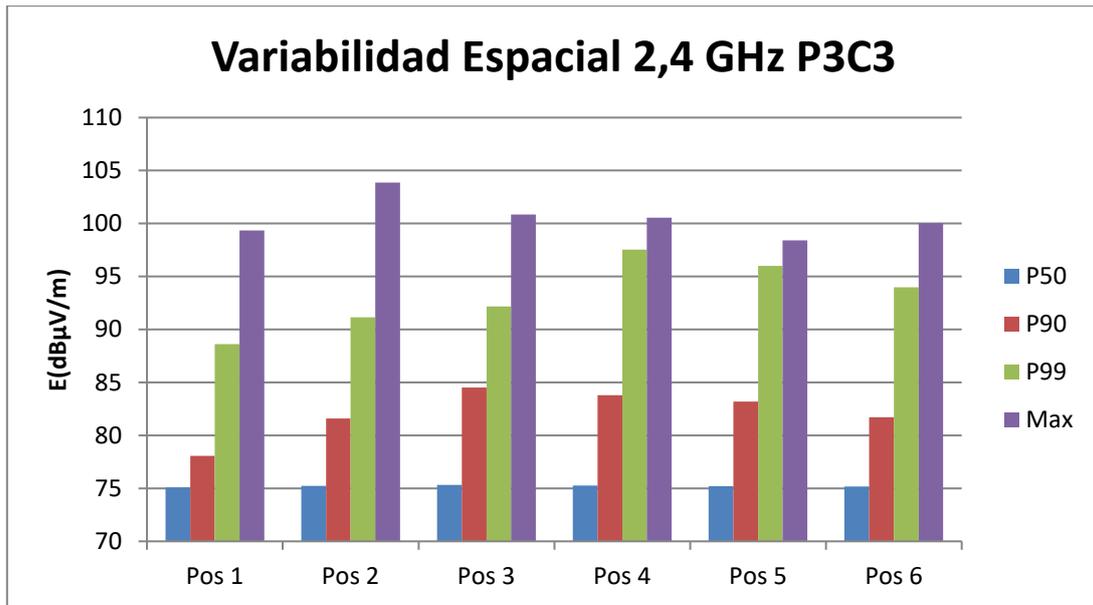


Ilustración 34. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3C3 en la banda de 2,4 GHz

Los estadísticos generales del aula P3C3 en la banda de 2,4 GHz son:

dBµV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Total	74,76	74,88	75,22	82,96	94,22	1,78	103,86	74,61	29,25	76,85

Tabla 35. Estadísticos generales del aula P3C3 en la banda de 2,4 GHz

5 GHz:

dBµV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Pos 1	85,04	85,13	85,23	85,34	94,13	2,24	95,68	84,94	10,75	85,41
Pos 2	85,05	85,14	85,22	85,35	96,25	2,35	95,14	84,95	10,19	85,38
Pos 3	85,06	85,14	85,23	85,38	98,90	2,16	103,47	84,89	18,58	85,53
Pos 4	85,05	85,13	85,22	85,33	89,82	1,58	91,72	84,97	6,75	85,32
Pos 5	85,05	85,13	85,22	85,34	96,58	3,28	99,55	84,93	14,62	85,49
Pos 6	85,04	85,13	85,22	85,36	90,92	2,26	92,94	84,88	8,06	85,42

Tabla 36. Estadísticos del aula P3C3 por posición en la banda de 5 GHz

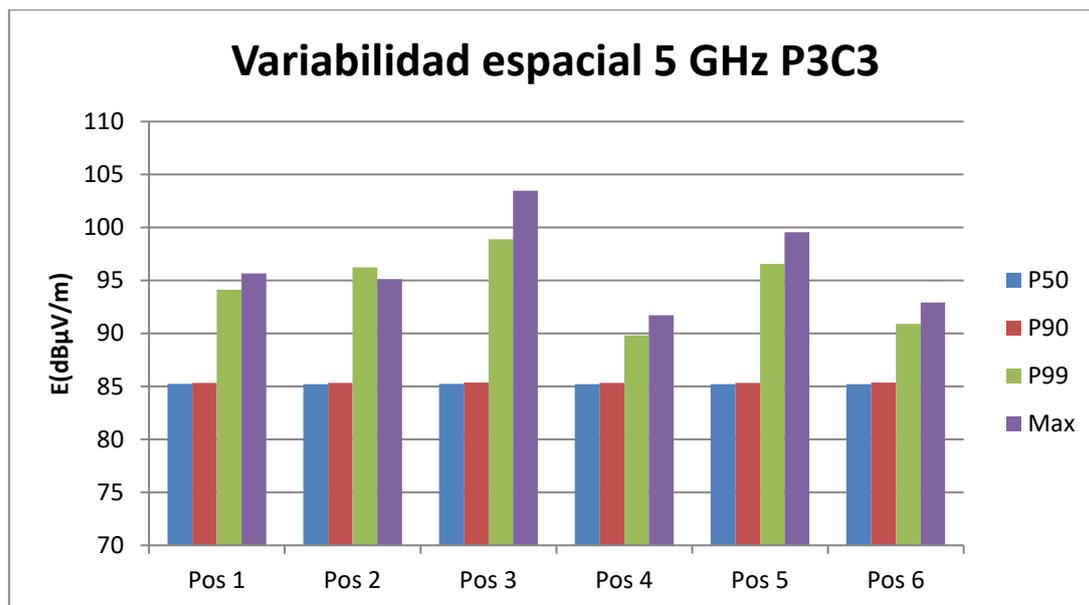


Ilustración 35. Gráfico percentiles y máximos por posiciones en P3C3 en la banda de 5 GHz

Los estadísticos generales del aula P3C3 en la banda de 5 GHz son:

dBµV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Desv. Estándar	Max	Min	Rango	Media
Total	85,05	85,13	85,22	85,34	91,22	1,43	103,47	84,88	14,67	85,41

Tabla 37. Estadísticos generales del aula P3C3 en la banda de 5 GHz

En las tablas anteriores se puede observar el nivel de señal medido en ambas bandas de frecuencias en los diferentes puntos de las clases. En principio vemos que hay niveles parecidos de señal en todas las aulas, aunque viendo los estadísticos sacados, observamos que hay ciertas posiciones en las aulas donde el nivel de señal es mayor. Esto se debe a que estos puntos son los más cercanos a los puntos de acceso.

A su vez, es importante destacar la diferencia de nivel de potencia medido en ambas bandas. Como se ha explicado con anterioridad esto surge debido a que en la banda de 5 GHz el ancho de banda de un canal que se está midiendo en esta banda es de 160 MHz mientras que en 2,4 GHz es la mitad. A su vez, el nivel en la banda de GHz es mayor debido a que se emite con mayor potencia en esta banda con el objetivo de alcanzar el mismo rango de cobertura que en 2,4 GHz.

A continuación, se muestra las diferencias entre la metodología utilizada por el grupo TSR y la metodología adaptada con la nueva instrumentación para este trabajo en cada una de las clases en la banda de 2,4 GHz.

P1G1:

dBµV/m	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Rango	Media
2,4GHz (2016)	70,98	71,08	71,30	72,51	77,38	102,70	70,86	31,84	71,70
2,4GHz (2019)	74,73	74,86	75,34	78,78	83,27	103,59	74,55	29,04	76,19

Tabla 38. Estadísticos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P1G1

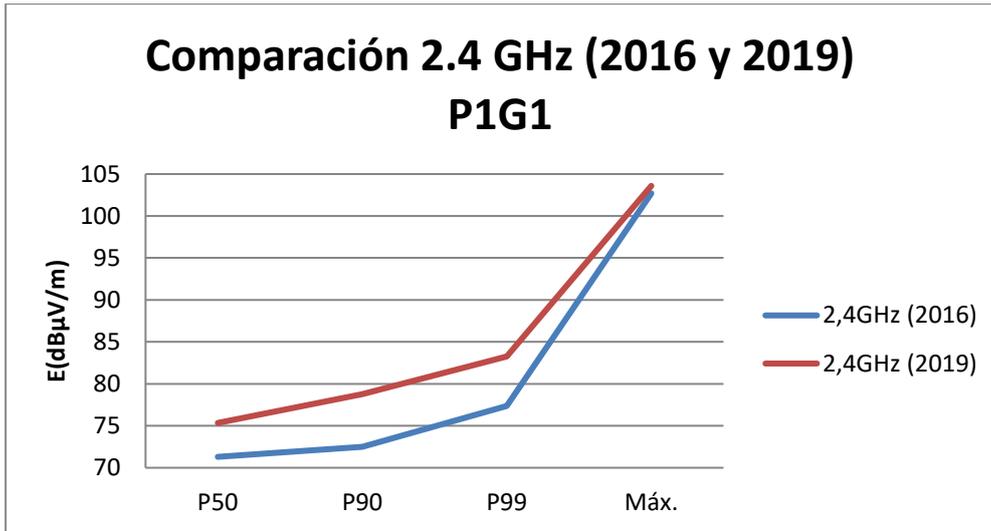


Ilustración 36. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P1G1

P3B1:

<u>dBµV/m</u>	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Rango	Media
2,4GHz (2016)	70,96	71,03	71,14	71,54	76,90	94,64	70,87	23,77	71,35
2,4GHz (2019)	74,75	74,85	75,05	75,72	82,95	105,16	74,61	30,55	75,43

Tabla 39. Estadísticos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3B1

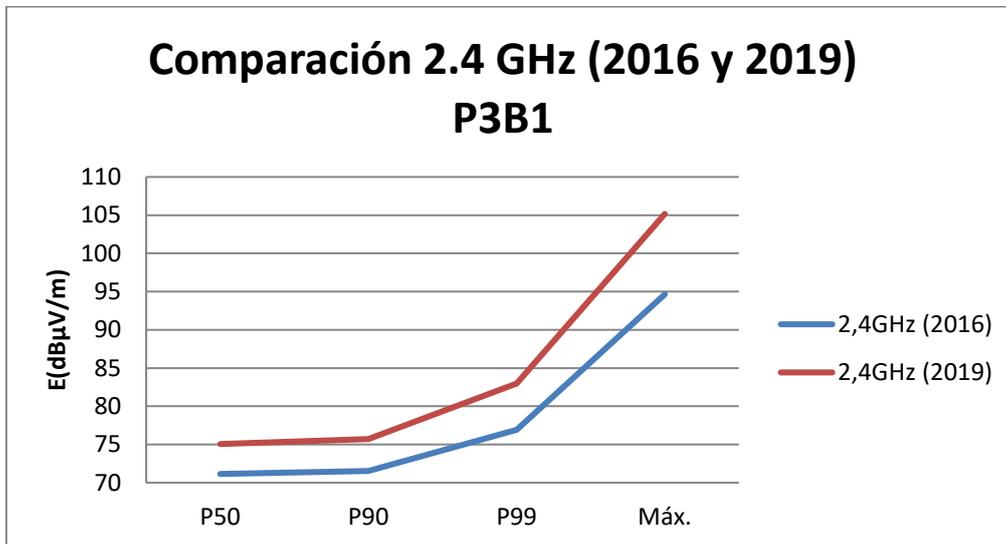


Ilustración 37. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3B1

P3C3:

<u>dBµV/m</u>	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Rango	Media
2,4GHz (2016)	71,15	71,26	71,43	72,21	84,22	105,99	71,04	34,95	71,98
2,4GHz (2019)	74,76	74,88	75,22	82,96	94,22	103,86	74,61	29,25	76,85

Tabla 40. Estadísticos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3C3

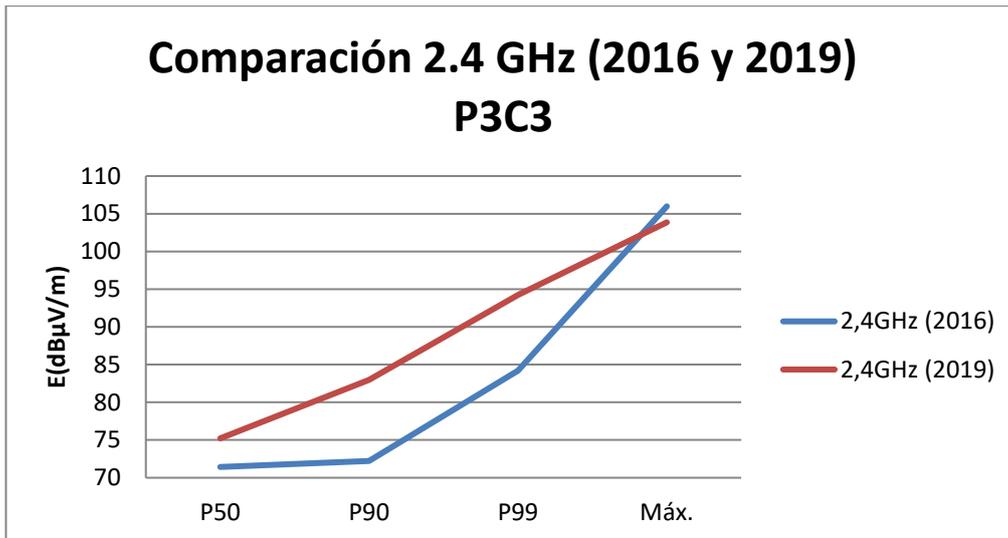


Ilustración 38. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología de TSR y la metodología adaptada en P3C3

En estas tablas y gráficas se puede observar como con la nueva metodología adaptada se mide un mayor nivel de señal esto se debe principalmente a que se ha modificado el sistema de medidas. El sistema utilizado en la metodología propuesta por el grupo TSR en 2016 estaba formado por un sistema triaxial de antenas Yagi, en el que se utilizaban varios divisores y atenuadores para tratar de recibir la misma señal en el analizador desde las tres antenas. Sin embargo, en la metodología adaptada se utiliza un dipolo dual el cual se conecta directamente al analizador e introduce menos pérdidas a la señal recibida. Esto sumado al incremento de redes inalámbricas y puntos de accesos a día de hoy frente a 2016 y a que poco a poco más usuarios se conectan a la banda de 5 GHz (lo que implica menos interferencias en la banda de 2,4 GHz) ha podido generar esa diferencia de nivel de señal entre ambas metodologías.

A continuación, se muestra las diferencias entre metodología adaptada con la nueva instrumentación para este trabajo y el exposímetro en cada una de las clases en la banda de 2,4 GHz.

P1G1:

<u>dBµV/m</u>	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Rango	Media
2,4GHz (Exp.)	70,98	71,08	80,83	83,02	84,24	101,06	70,86	31,84	71,70
2,4GHz (2019)	74,73	74,86	75,34	78,78	83,27	103,59	74,55	29,04	76,19

Tabla 41. Estadísticos de la metodología adaptada y el exposímetro en P1G1

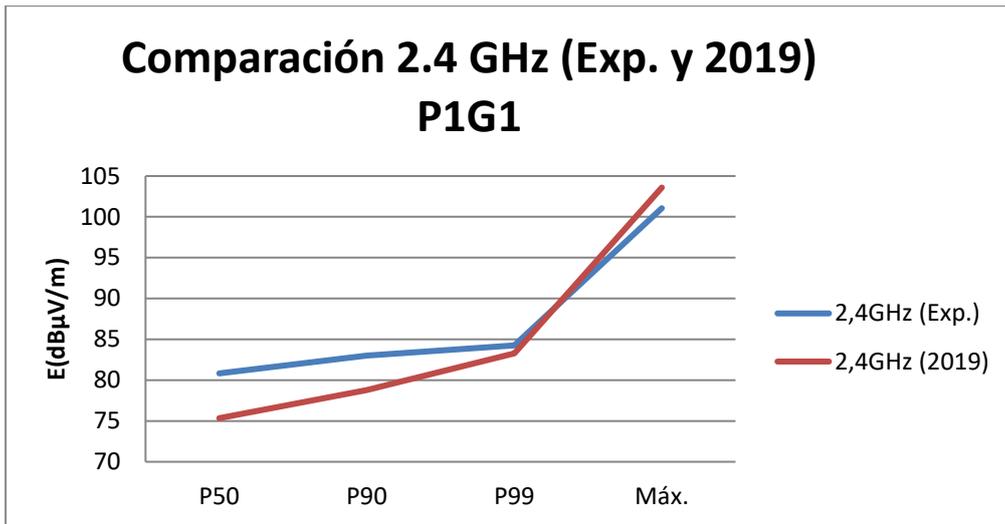


Ilustración 39. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología adaptada y el exposímetro en P1G1

P3B1:

<u>dBµV/m</u>	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Rango	Media
2,4GHz (Exp.)	70,96	71,03	80,58	82,63	84,60	94,65	70,87	23,77	71,35
2,4GHz (2019)	74,75	74,85	75,05	75,72	82,95	105,16	74,61	30,55	75,43

Tabla 42. Estadísticos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3B1

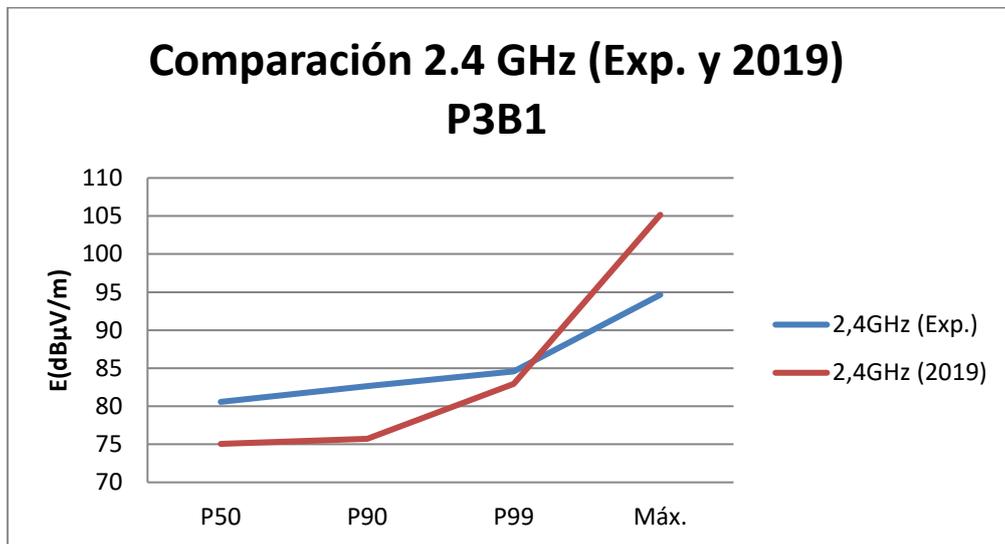


Ilustración 40. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3B1

P3C3:

<u>dBµV/m</u>	P01	P10	P50	P90	P99	Máx.	Min	Rango	Media
2,4GHz (Exp.)	71,15	71,26	80,50	82,75	91,23	105,68	71,04	34,95	71,98
2,4GHz (2019)	74,76	74,88	75,22	82,96	94,22	103,86	74,61	29,25	76,85

Tabla 43. Estadísticos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3C3

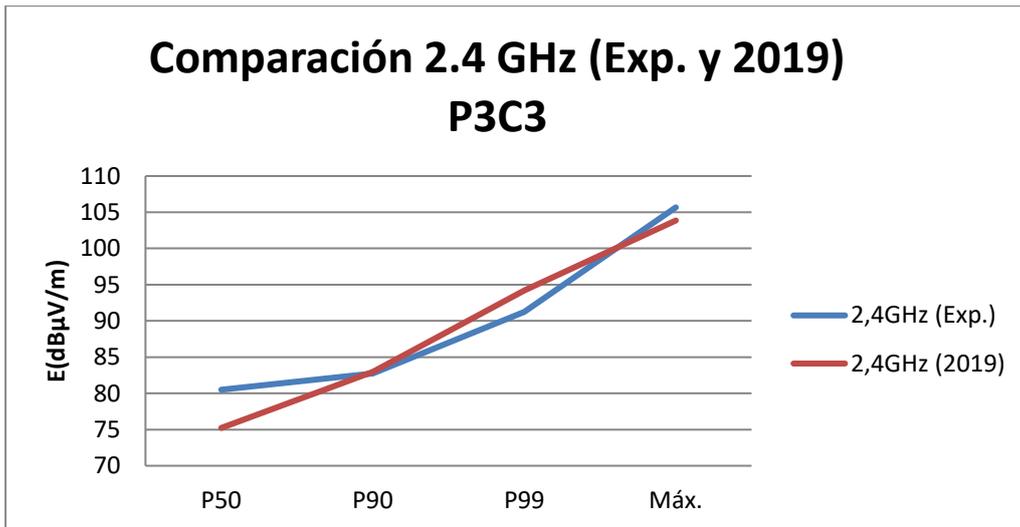


Ilustración 41. Gráfico de percentiles y máximos de la metodología adaptada y el exposímetro en P3C3

Con los resultados obtenidos se puede observar que lo expuesto y desarrollado en este trabajo tiene lugar, esto es, que los niveles de señal medidos siguen estando muy lejos de los niveles de referencia establecidos por el Real Decreto 1066/2011 y que los resultados proporcionados por el exposímetro están sobreestimados respecto a los valores reales obtenidos con el analizador.

Variación temporal

En la variación temporal se mostrarán los resultados en el laboratorio de TSR durante una semana en cada una de las bandas de los sistemas WiFi y los estadísticos durante el día y la noche de cada día. Por último, se mostrará los resultados obtenidos de la comparación de ambas bandas durante el día y la noche de cada día de la semana.

2,4 GHz:

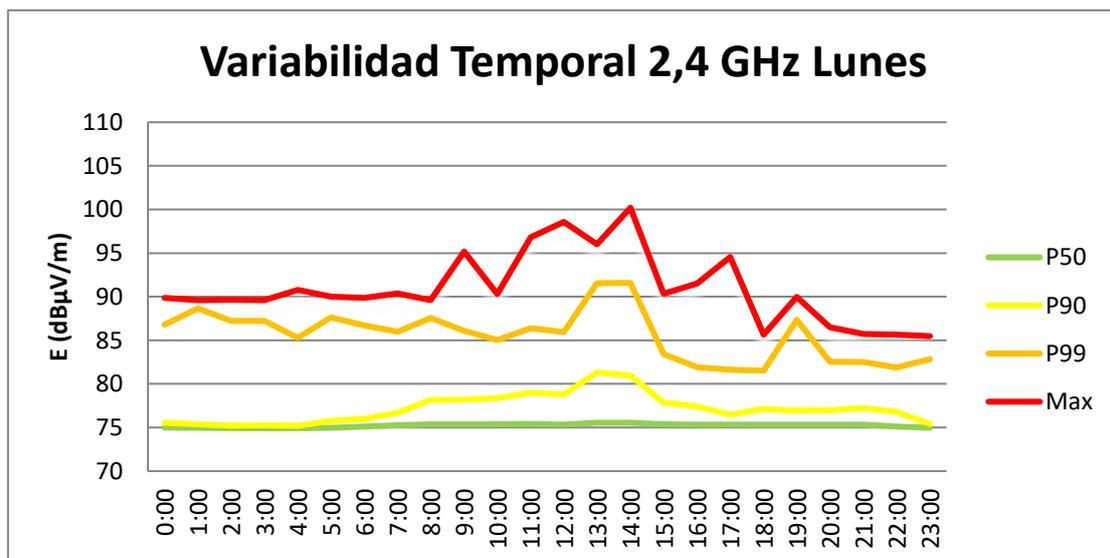


Ilustración 42. Gráfico variación temporal durante el lunes en TSR en la banda de 2,4 GHz

dBμV/m	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,35	80,76	91,58	100,19
Noche (20:00-08:00)	74,99	76,96	88,55	90,79

Tabla 44. Tabla de percentiles y máximos durante el lunes en TSR en la banda de 2,4 GHz

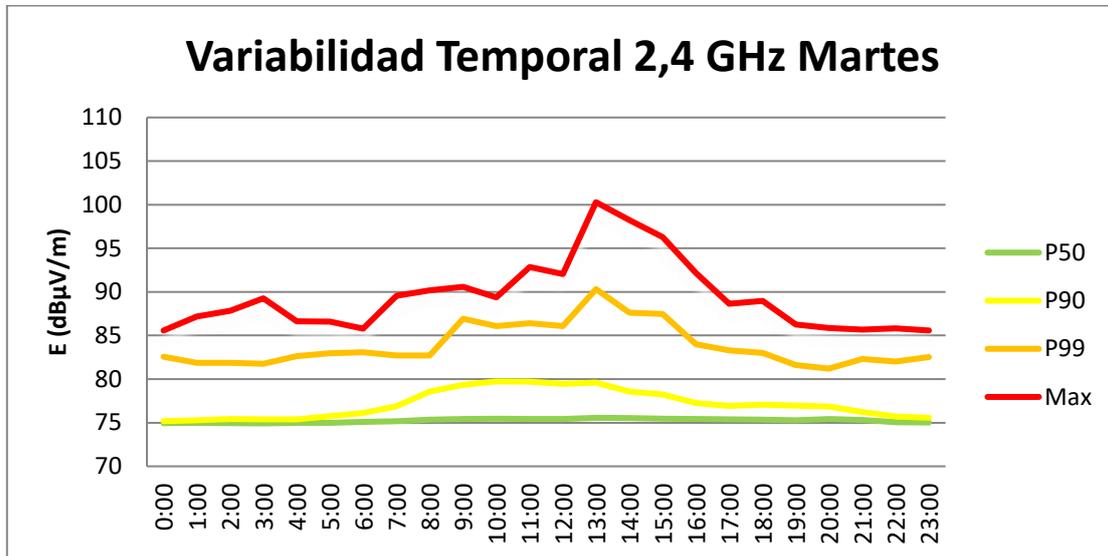


Ilustración 43. Gráfico variación temporal durante el martes en TSR en la banda de 2,4 GHz

dBμV/m	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,42	79,69	90,02	100,28
Noche (20:00-08:00)	75,01	75,64	82,42	89,57

Tabla 45. Tabla de percentiles y máximos durante el martes en TSR en la banda de 2,4 GHz

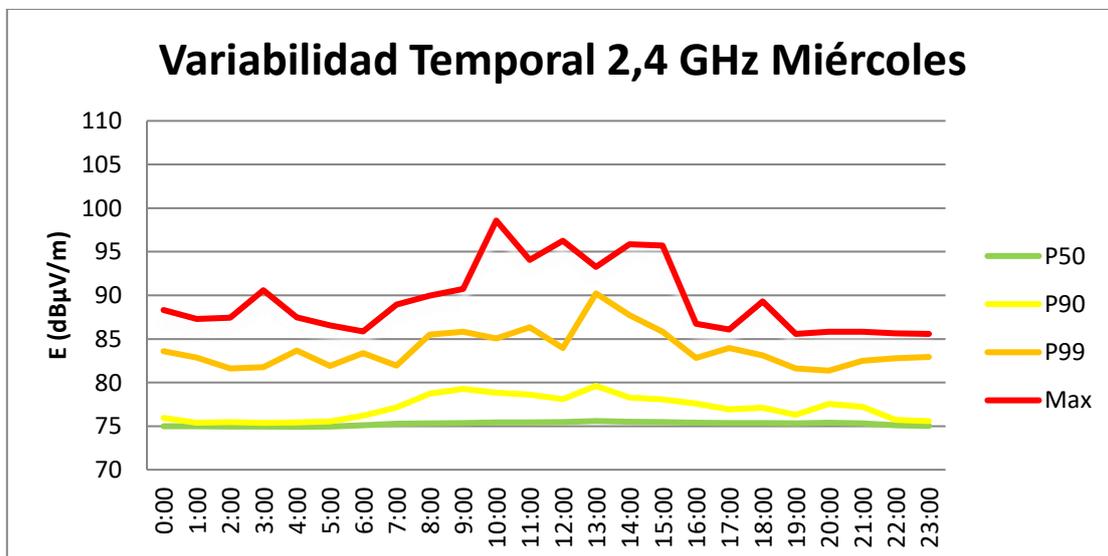


Ilustración 44. Gráfico variación temporal durante el miércoles en TSR en la banda de 2,4 GHz

dBμV/m	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,41	79,23	89,95	98,57
Noche (20:00-08:00)	75,00	77,20	83,65	90,57

Tabla 46. Tabla de percentiles y máximos durante el miércoles en TSR en la banda de 2,4 GHz

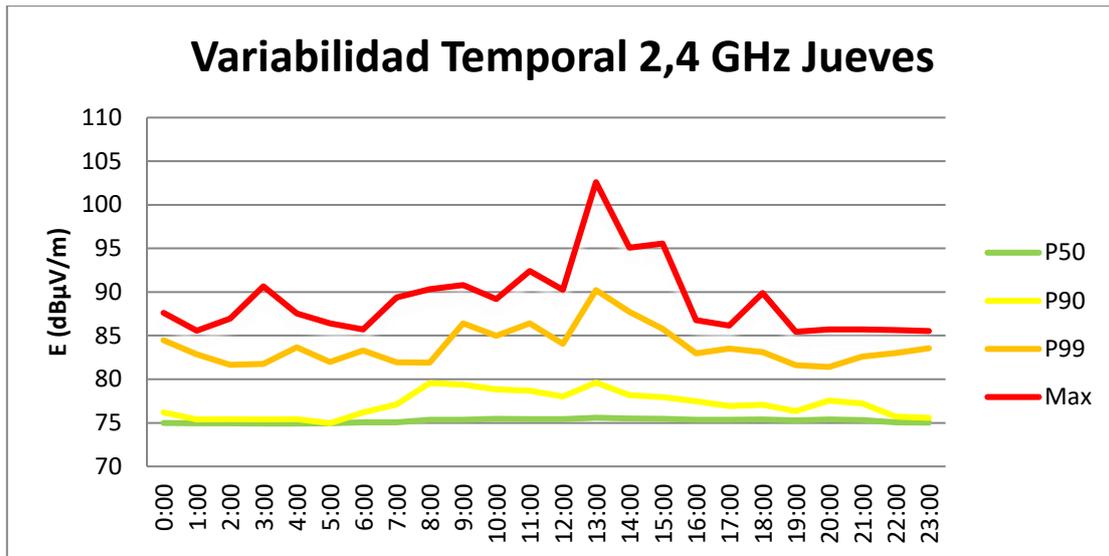


Ilustración 45. Gráfico variación temporal durante el jueves en TSR en la banda de 2,4 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,39	79,54	89,94	102,59
Noche (20:00-08:00)	74,99	77,22	84,37	90,64

Tabla 47. Tabla de percentiles y máximos durante el jueves en TSR en la banda de 2,4 GHz

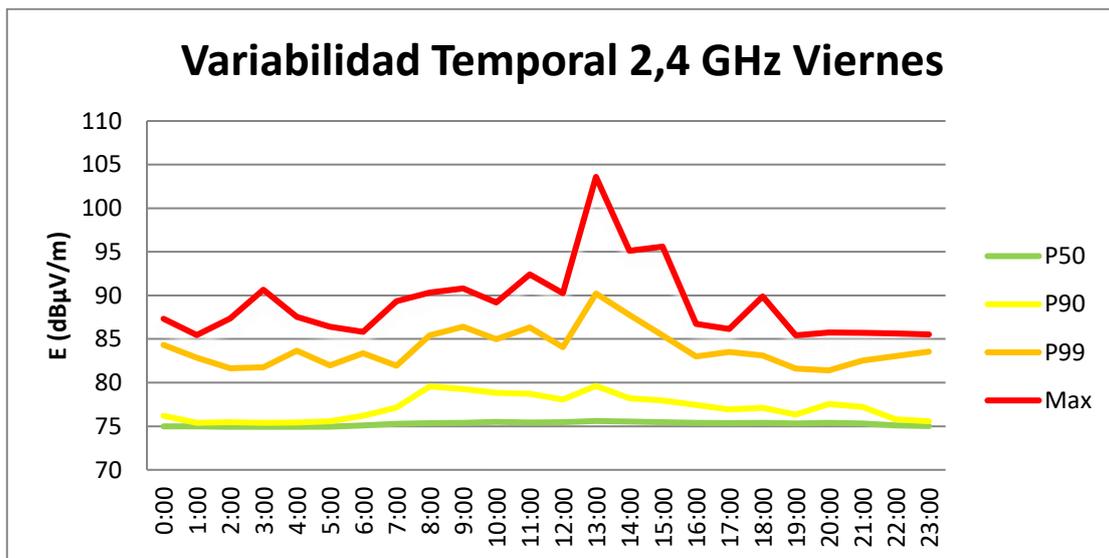


Ilustración 46. Gráfico variación temporal durante el viernes en TSR en la banda de 2,4 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,41	79,54	89,95	103,59
Noche (20:00-08:00)	75,01	77,22	84,25	90,64

Tabla 48. Tabla de percentiles y máximos durante el viernes en TSR en la banda de 2,4 GHz

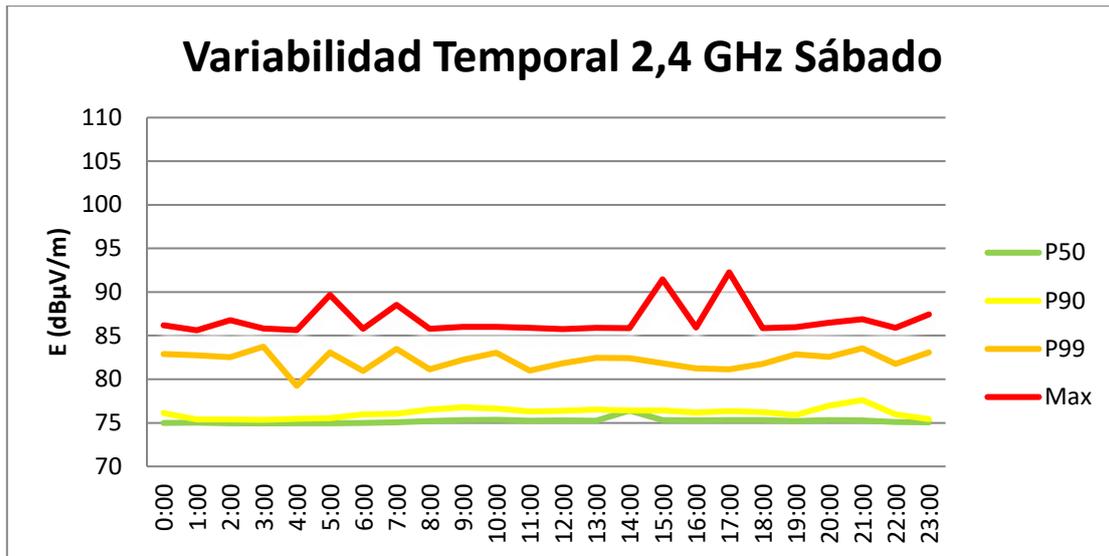


Ilustración 47. Gráfico variación temporal durante el sábado en TSR en la banda de 2,4 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,29	76,61	83,03	92,26
Noche (20:00-08:00)	75,01	76,89	83,71	89,67

Tabla 49. Tabla de percentiles y máximos durante el sábado en TSR en la banda de 2,4 GHz

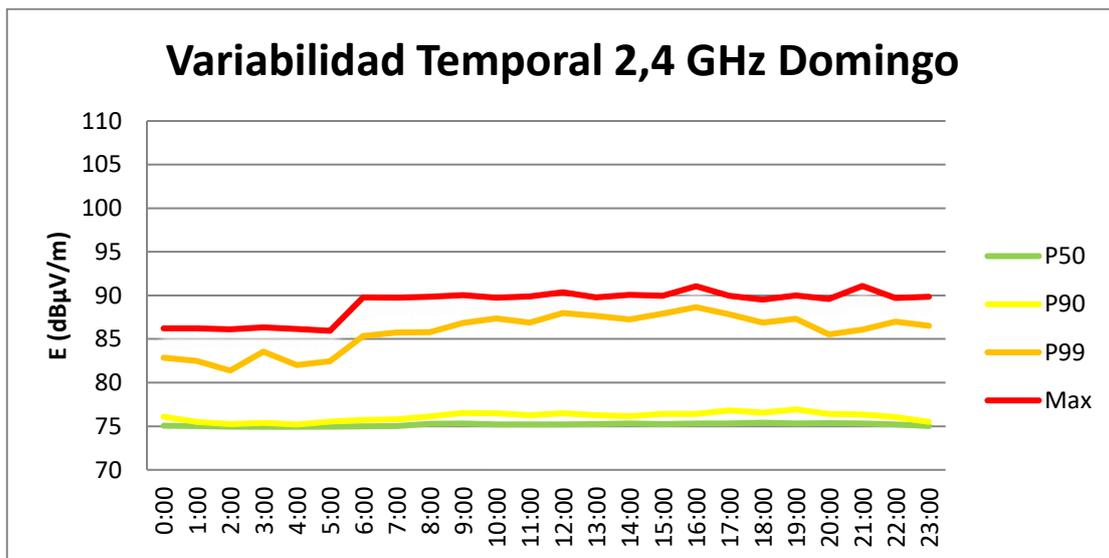


Ilustración 48. Gráfico variación temporal durante el domingo en TSR en la banda de 2,4 GHz

	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	75,28	76,78	88,57	91,07
Noche (20:00-08:00)	75,02	76,31	86,93	91,08

Tabla 50. Tabla de percentiles y máximos durante el domingo en TSR en la banda de 2,4 GHz

Con estos resultados se puede observar la variación temporal en la banda de 2,4 GHz en el laboratorio de TSR durante una semana, en la que se puede apreciar que hay mayor nivel de radiación electromagnética entre semana, siendo muy diferente respecto al fin de semana, especialmente, los domingos donde hay menos nivel de radiación.

5 GHz:

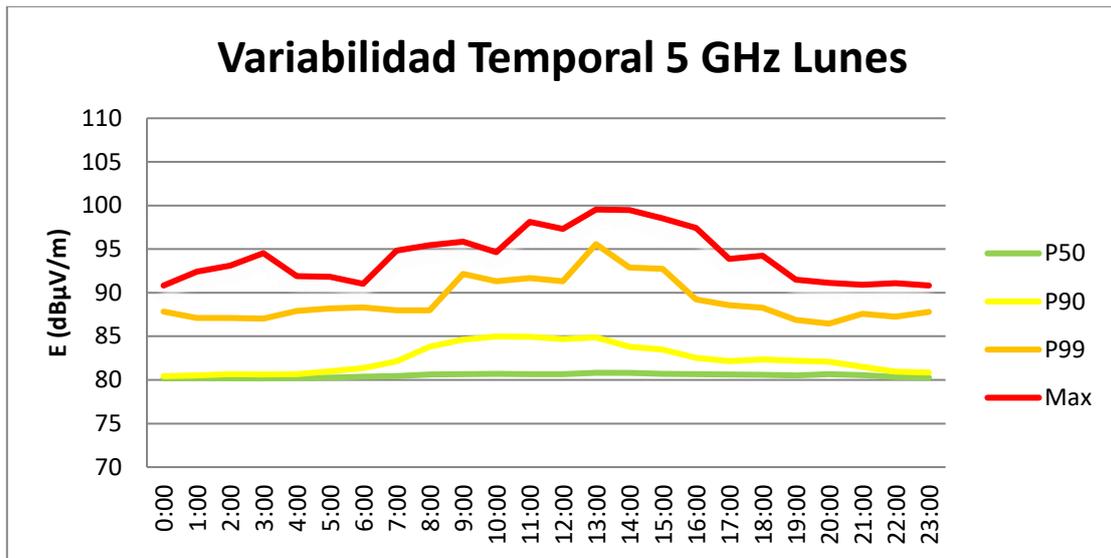


Ilustración 49. Gráfico variación temporal durante el lunes en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	80,67	84,94	95,27	99,54
Noche (20:00-08:00)	80,26	82,04	88,32	94,83

Tabla 51. Tabla de percentiles y máximos durante el lunes en TSR en la banda de 5 GHz

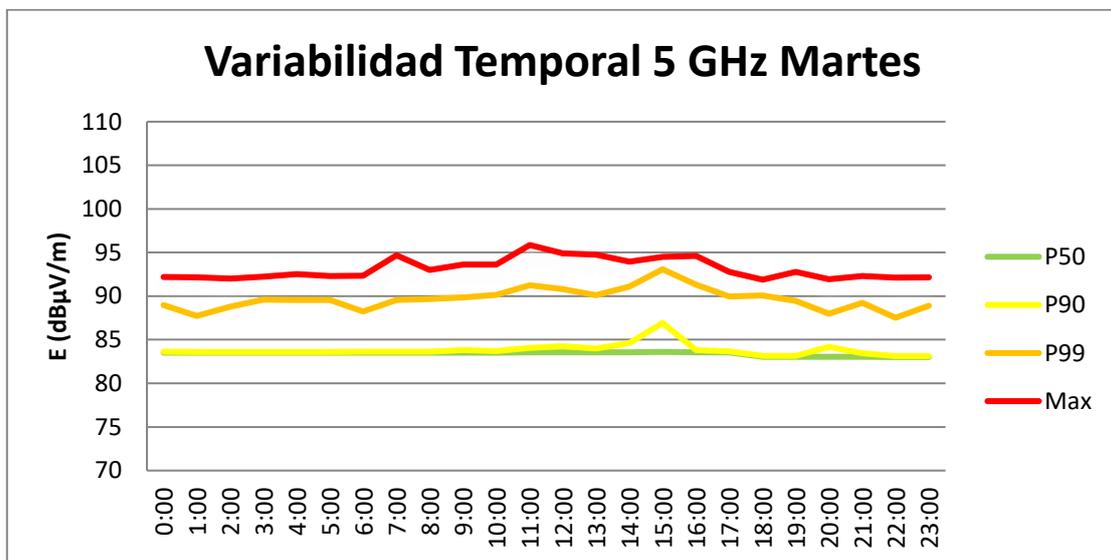


Ilustración 50. Gráfico variación temporal durante el martes en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	83,54	84,59	92,88	95,86
Noche (20:00-08:00)	83,52	83,61	88,94	94,69

Tabla 52. Tabla de percentiles y máximos durante el martes en TSR en la banda de 5 GHz

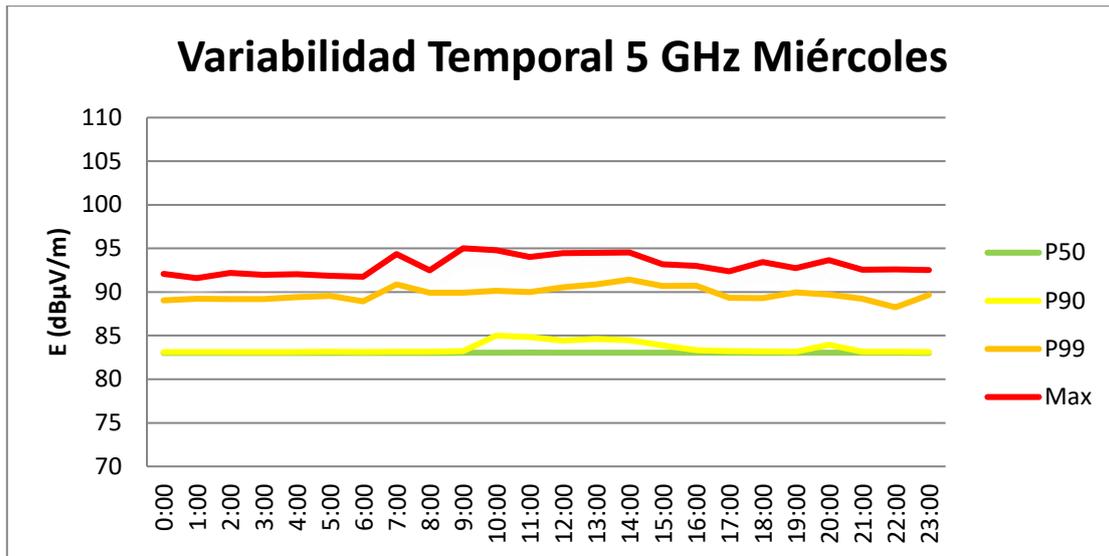


Ilustración 51. Gráfico variación temporal durante el miércoles en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	83,03	84,80	91,36	95,02
Noche (20:00-08:00)	83,02	83,15	90,76	94,37

Tabla 53. Tabla de percentiles y máximos durante el miércoles en TSR en la banda de 5 GHz

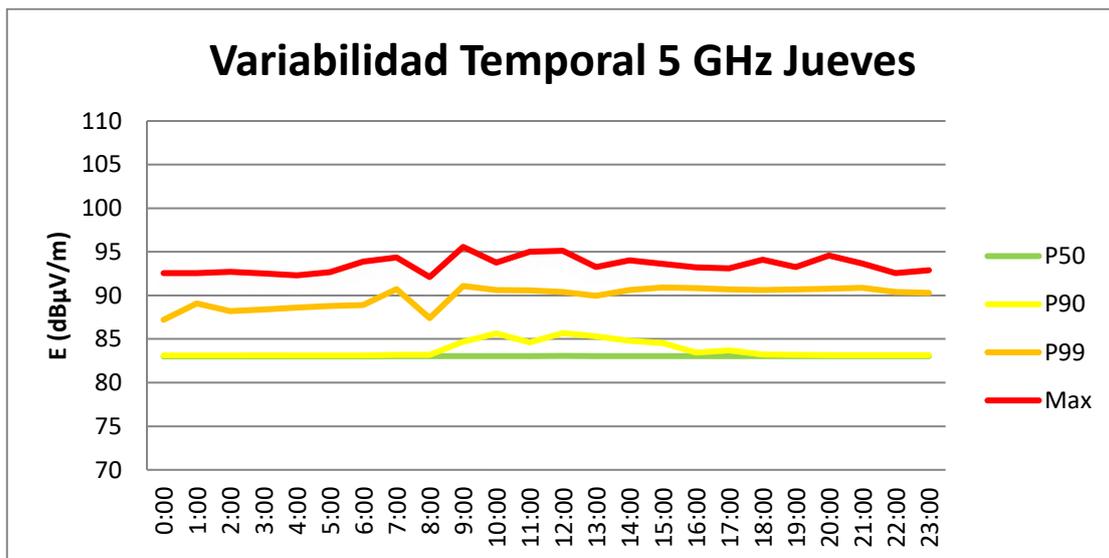


Ilustración 52. Gráfico variación temporal durante el jueves en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	83,04	85,61	91,06	95,57
Noche (20:00-08:00)	83,02	83,17	90,85	94,34

Tabla 54. Tabla de percentiles y máximos durante el jueves en TSR en la banda de 5 GHz

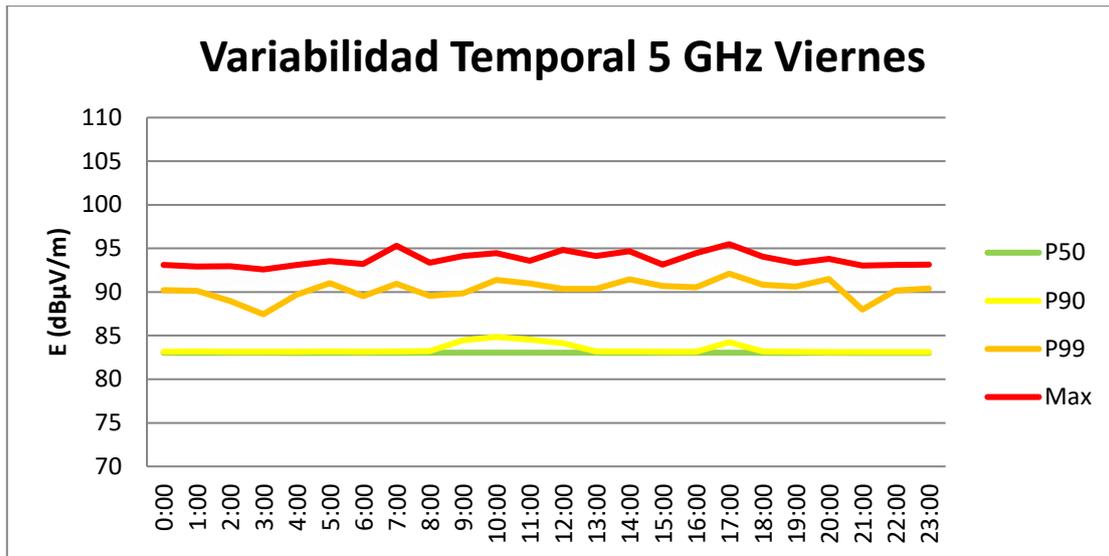


Ilustración 53. Gráfico variación temporal durante el viernes en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	83,03	84,54	92,03	95,49
Noche (20:00-08:00)	83,03	83,18	91,43	95,29

Tabla 55. Tabla de percentiles y máximos durante el viernes en TSR en la banda de 5 GHz

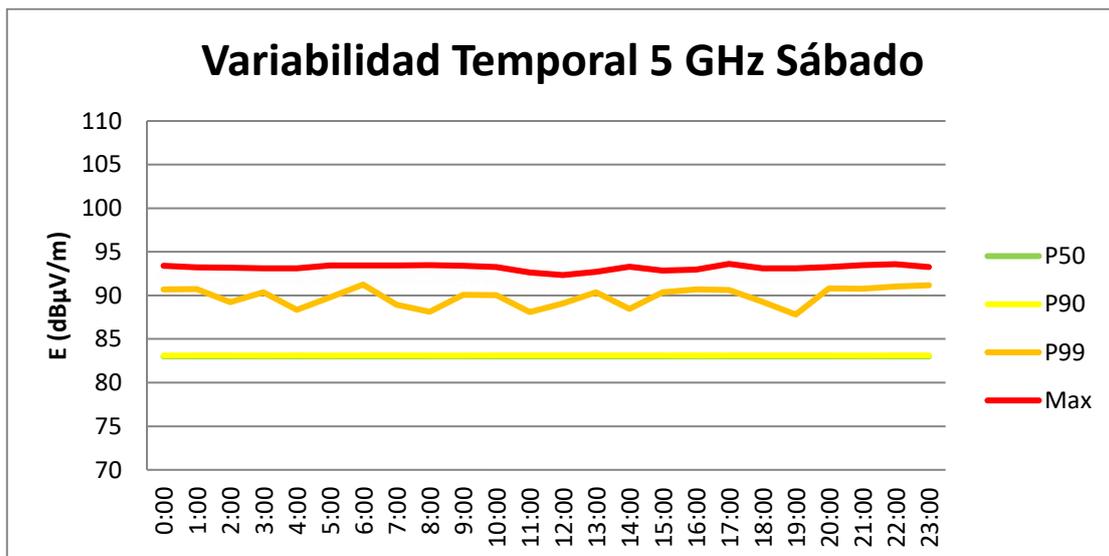


Ilustración 54. Gráfico variación temporal durante el sábado en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	83,01	83,11	90,69	93,61
Noche (20:00-08:00)	83,01	83,11	91,23	93,57

Tabla 56. Tabla de percentiles y máximos durante el sábado en TSR en la banda de 5 GHz

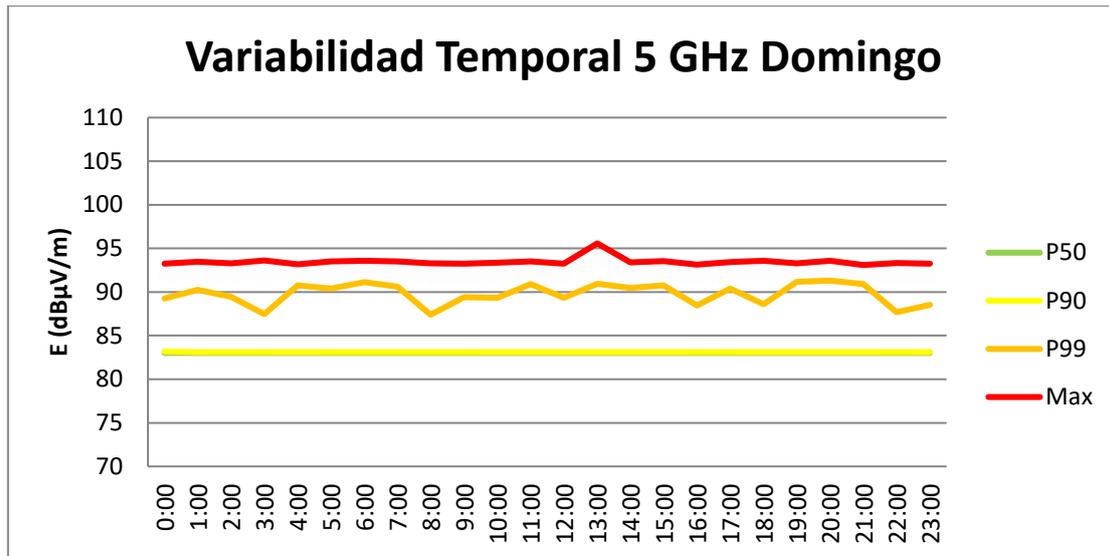


Ilustración 55. Gráfico variación temporal durante el domingo en TSR en la banda de 5 GHz

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Día (08:00-20:00)	83,02	83,12	91,15	95,58
Noche (20:00-08:00)	83,02	83,12	91,29	93,62

Tabla 57. Tabla de percentiles y máximos durante el domingo en TSR en la banda de 5 GHz

Al igual que sucede anteriormente se puede apreciar que hay mayor nivel de radiación electromagnética entre semana, siendo diferente respecto al fin de semana. Sin embargo, en la banda de 5 GHz se aprecia mucho menos respecto a las diferencias que hay en la banda de 2,4 GHz. A su vez, durante el día y la noche se vuelven a apreciar diferencias, pero en menor medida que en la banda de 2,4 GHz.

A continuación, podrán observar las diferencias entre ambas bandas de medida durante el día y la noche de cada día de la semana.

Día

Valores en la banda de 2,4 GHz:

<u>dBµV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Lunes	75,35	80,76	91,58	100,19
Martes	75,42	79,69	90,02	100,28
Miércoles	75,41	79,23	89,95	98,57
Jueves	75,39	79,55	89,94	102,59
Viernes	75,41	79,54	89,95	103,59
Sábado	75,29	76,61	83,03	92,26
Domingo	75,28	76,78	88,57	91,07

Tabla 58. Tabla de percentiles y máximos durante el día de cada día de la semana en la banda de 2,4 GHz

Valores en la banda de 5 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Lunes	80,67	84,94	95,27	99,54
Martes	83,54	84,59	92,88	95,86
Miércoles	83,03	84,80	91,36	95,02
Jueves	83,04	85,61	91,06	95,57
Viernes	83,03	84,54	92,03	95,49
Sábado	83,02	83,12	90,69	93,62
Domingo	83,02	83,12	91,15	95,58

Tabla 59. Tabla de percentiles y máximos durante el día de cada día de la semana en la banda de 5 GHz

Diferencias (valores en 5 GHz – valores en 2,4 GHz):

<u>dB</u>	P50	P90	P99	Máx.
Lunes	5,319	4,174	3,692	-0,659
Martes	8,113	4,901	2,859	-4,429
Miércoles	7,616	5,563	1,411	-3,559
Jueves	7,641	6,061	1,118	-7,026
Viernes	7,616	4,997	2,085	-8,109
Sábado	7,726	6,509	7,660	1,351
Domingo	7,731	6,335	2,578	4,501

Tabla 60. Tabla de diferencias de percentiles y máximos durante el día de cada día de la semana entre ambas bandas

Noche:

Valores en la banda de 2,4 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Lunes	74,98	76,96	88,55	90,79
Martes	75,01	75,64	82,42	89,57
Miércoles	75,00	77,20	83,65	90,57
Jueves	74,99	77,22	84,38	90,64
Viernes	75,01	77,22	84,25	90,64
Sábado	75,01	76,89	83,71	89,67
Domingo	75,02	76,31	86,93	91,08

Tabla 61. Tabla de percentiles y máximos durante la noche de cada día de la semana en la banda de 2,4 GHz

Valores en la banda de 5 GHz:

<u>dBμV/m</u>	P50	P90	P99	Máx.
Lunes	80,26	82,04	88,32	94,83
Martes	83,52	83,61	88,94	94,69
Miércoles	83,02	83,15	90,76	94,37
Jueves	83,02	83,17	90,85	94,34
Viernes	83,03	83,18	91,43	95,29
Sábado	83,02	83,12	91,24	93,58
Domingo	83,02	83,12	91,29	93,62

Tabla 62. Tabla de percentiles y máximos durante la noche de cada día de la semana en la banda de 5 GHz

Diferencias (valores de 5 GHz – valores de 2,4 GHz):

dB	P50	P90	P99	Máx.
Lunes	5,276	5,081	-0,235	4,031
Martes	8,506	7,966	6,513	5,111
Miércoles	8,011	5,956	7,115	3,791
Jueves	8,021	5,942	6,475	3,693
Viernes	8,016	5,951	7,181	4,641
Sábado	8,006	6,225	7,526	3,901
Domingo	7,996	6,806	4,360	2,531

Tabla 63. Tabla de diferencias de percentiles y máximos durante la noche de cada día de la semana entre ambas bandas

En estos resultados se puede ver las diferencias de nivel de radiación de la banda de 5 GHz respecto de la banda de 2,4 GHz durante cada día de la semana. Al igual que sucede en la comparación por horas, el nivel de radiación electromagnética es mayor en la banda de 5 GHz especialmente en los percentiles 50 y 90. Esto se debe a que en la banda de 5 GHz se ha medido el doble de ancho de banda que en la banda de 2,4 GHz. Además, en 5 GHz se transmite con una mayor potencia de señal con el objetivo de alcanzar el mismo rango de cobertura que en 2,4 GHz. Sin embargo, en los percentiles 99 y en el máximo el nivel de señal medido se asemeja más dado que la banda de 5 GHz se ha desplegado no hace mucho y a día de hoy no todos los dispositivos los soportan

Por último, se puede observar que en laboratorio de TSR es donde tiene lugar el mayor nivel de señal medida, 112,74 dB μ V/m, lo que equivale a 0.43 V/m, el cual está muy lejos de 61 V/m establecidos como nivel de referencia.

Estudio del comportamiento de la señal

Por último, se muestran dos ejemplos del comportamiento de la señal tanto en la variabilidad espacial como en la variabilidad temporal viendo a qué distribución estadística se ajusta más.

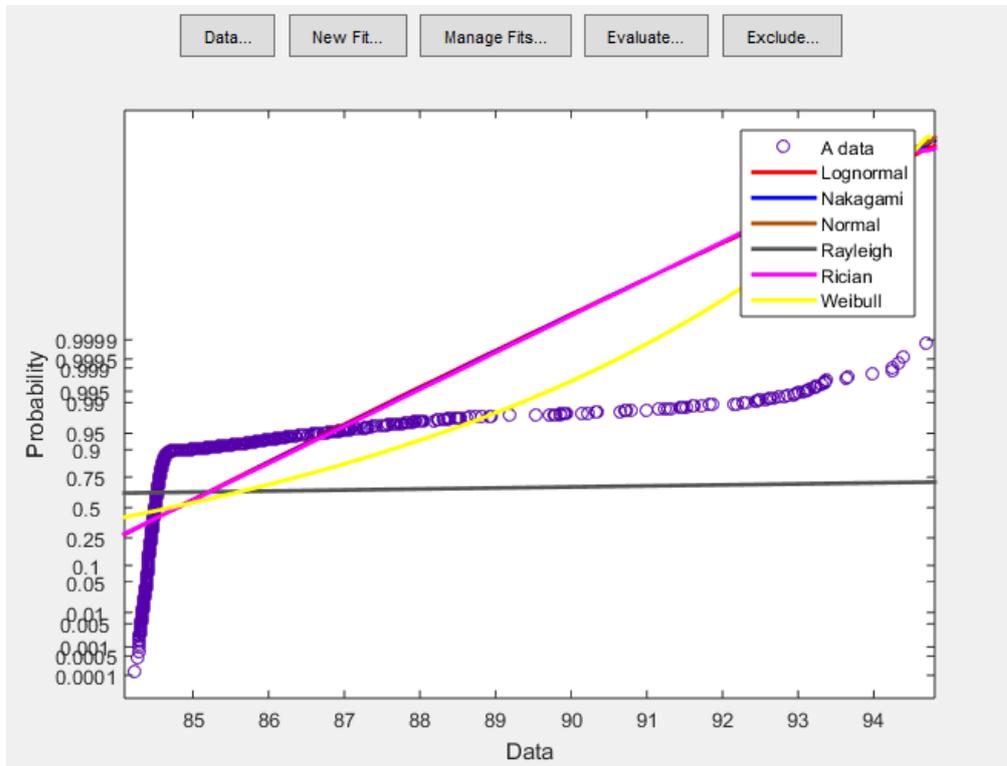


Ilustración 56. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida en 5 GHz en el aula P3B1

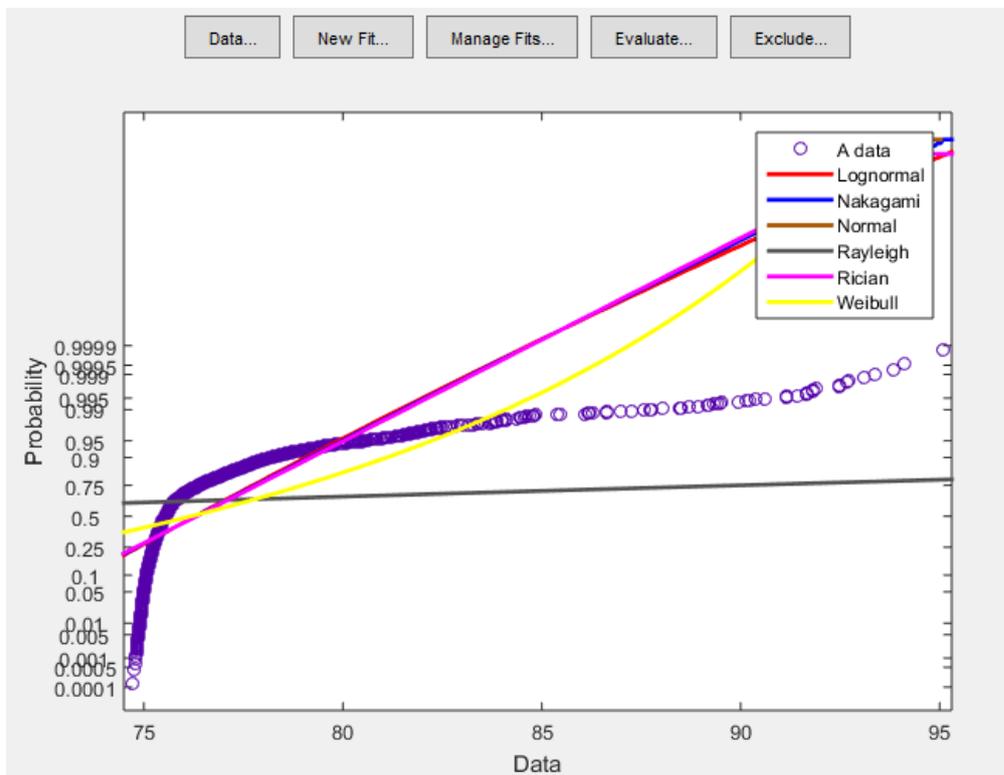


Ilustración 57. Comparación de distribuciones estadísticas con la señal medida en 2,4 GHz en el laboratorio de TSR

Estas dos gráficas muestran dos ejemplos de la caracterización del comportamiento de la señal en la variabilidad temporal y la variabilidad espacial de la señal. El primer ejemplo se trata de la comparación de las distribuciones estadísticas propuestas en este trabajo (Log-normal, Nakagami, Normal, Rayleigh, Rice y Weibull) respecto a la señal medida en el aula P3B1 en la posición 4 (centro del aula) para caracterizar la variabilidad espacial en la banda de 5 GHz. El segundo, sin embargo, se trata de la comparación de las distribuciones estadísticas respecto a la señal medida en el laboratorio de TSR durante un jueves en la banda de 2,4 GHz.

Como se ha visto a lo largo del trabajo, en todas las ocasiones, el comportamiento de la señal medida se asemeja más a la distribución estadística Log-normal. Sin embargo, esto se aprecia mejor al calcular el parámetro de similitud mediante el programa *dfittool* de Matlab. En él se puede observar como la distribución estadística Nakagami se aproxima mucho a los resultados de la distribución estadística Log-normal pero siempre con una menor similitud respecto a la señal medida. A su vez, las distribuciones estadísticas Normal y Rice se aproximan también a estas últimas dos, pero de nuevo con menor similitud respecto a la señal medida. Por último, las distribuciones de Weibull y Rayleigh guardan muy poca similitud con el comportamiento de la señal medida.

	Log-normal	Nakagami	Normal	Rayleigh	Rician	Weibull
Pos 4 P3B1 (5 GHz)	-1551,34	-1602,86	-1670,92	-17743,33	-1670,93	-4932,55
Jueves TSR (2,4 GHz)	-4467,81	-4521,03	-4577,19	-16530,87	-4577,2	-8711,01

Tabla 64. Valores de similitud de las distribuciones estadísticas respecto de la señal medida

Como conclusión a estos resultados, la distribución estadística de mejor ajuste para caracterizar la variabilidad espacial y la variabilidad temporal de la señal medida es la distribución Log-normal, pero, sin embargo, al comparar la señal medida en escala logarítmica la distribución estadística de mejor ajuste para caracterizar la variabilidad espacial y la variabilidad temporal de la señal WiFi es la distribución normal.