



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Trabajo Fin de Grado

**Estudio de la cobertura en un convoy de metro
para sistemas de 5G mediante una herramienta de
trazado de rayos**

Autora:

Elena Carrión Cavas

Director:

Juan Pascual García

Agradecimientos.

Quiero agradecer a mi tutor la dedicación, el apoyo y la paciencia que ha tenido conmigo a lo largo de todo el proceso de desarrollo de este trabajo. Gracias a su orientación, he podido introducirme en el apasionante camino de investigación a los diversos usos y tecnologías del 5G.

A mi familia, sobre todo a mis padres y a mi hermano, por apoyarme siempre en todo y empujarme a no tirar la toalla y a seguir estudiando. Sin vosotros no habría podido hacer nada de esto ni ser quién soy.

A mi grupo de amigos de toda la vida, por ser mi red de apoyo desde hace muchos años y ayudarme a desconectar cuando lo necesito.

Índice.

Índice.....	3
1. Introducción.....	4
2. Modelo de pérdidas por bloqueo humano.....	5
2.1 Caso de estudio.....	6
2.2 Comparativa entre nuestro modelo y el modelo DKED.....	7
2.3 Estudio sobre cómo afecta la anchura de las personas en el modelo de pérdidas. 8	
3. Entorno geométrico del convoy de metro y gráficas de potencia.....	11
3.1 Descripción del convoy de metro. Generación del modelo geométrico del convoy de metro. (Entorno geométrico del metro).....	11
3.2 Ratios de ocupación del convoy de metro.	12
3.3 Trazador de rayos (mecanismos de propagación, reflexión hasta orden 2). 20	
3.4 Análisis de la cobertura en el convoy de metro cuando el punto de acceso se encuentra en un extremo.	20
3.5 Análisis de la cobertura en el convoy de metro cuando el punto de acceso se encuentra en el centro.....	33
4. Conclusiones.....	45
Referencias.....	46

1. Introducción

En este trabajo fin de grado se ha analizado la influencia de los pasajeros en un convoy de metro en una frecuencia para aplicaciones de 5G. Los convoyes de metro constituyen un entorno de difícil análisis debido a que se tratan de entornos confinados en los que existen numerosos elementos metálicos. La presencia de pasajeros en los convoyes de metro no ha sido estudiada con profundidad hasta el momento [1]. El estudio en este trabajo se ha limitado a la estimación de la potencia recibida dentro de un convoy de metro para dos posiciones diferentes del punto de acceso para diferentes porcentajes de ocupación. Para ello se ha utilizado una herramienta de trazado de rayos, la cual nos permite estudiar de manera precisa la cobertura dentro de este entorno.

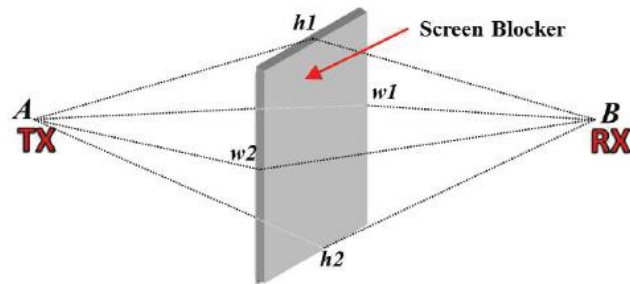
Lo primero que haremos, será replicar y validar distintos estudios para conseguir los modelos exactos del cuerpo humano que será el que introduciremos en nuestro trazador de rayos.

Después, simularemos el convoy de metro de Valencia para poder calcular la atenuación de potencia con diferentes ocupaciones del metro y en diferentes posiciones del transmisor.

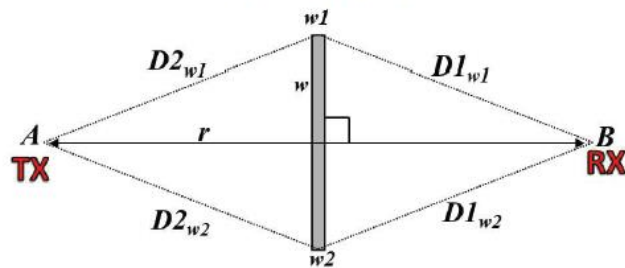
Para finalizar, analizaremos los resultados obtenidos y explicaremos las utilidades futuras de nuestro proyecto.

2. Modelo de pérdidas por bloqueo humano.

Nuestro objetivo en este punto es replicar el modelo de pérdidas por bloqueo humano DKDE (Double Knife-Edge Diffraction Blockage Model), propuesto en el artículo [1]. En él, se considera el cuerpo humano como una pantalla 3-D. Este modelo, evalúa las pérdidas por bloqueo en cuatro puntos: la cabeza, los pies y los dos hombros.



(a) 3D screen projection.



(b) Top-down screen projection.

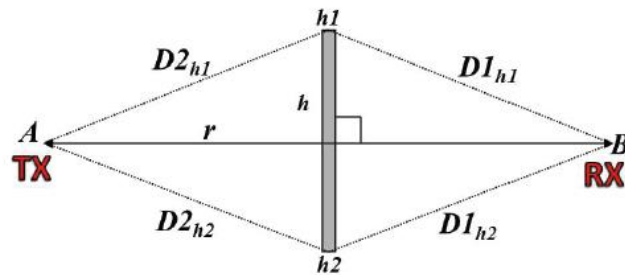


Figura 1. Representación gráfica del modelo de pérdidas por bloqueo humano del artículo [1].

Para ello, usaremos las siguientes fórmulas:

$$F_{w1|w2} = \frac{\tan^{-1} \left(\pm \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda} (D2_{w1|w2} + D1_{w1|w2} - r)} \right)}{\pi}$$

$$F_{h1|h2} = \frac{\tan^{-1} \left(\pm \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda} (D2_{h1|h2} + D1_{h1|h2} - r)} \right)}{\pi}$$

Ecuación 1. Cálculo de la atenuación de los cuatro representados en la figura 1 explicados en [1].

$$L_{\text{screen}}[\text{dB}] = -20 \log_{10} (1 - (F_{h1} + F_{h2})(F_{w1} + F_{w2}))$$

$$L_{\text{screen}}[\text{dB}] = -20 \log_{10} (1 - (F_{w1} + F_{w2}))$$

Ecuación 2. Cálculo de la pérdida de potencia por bloqueo humano del modelo DKED explicado en [1].

2.1 Caso de estudio.

Lo primero de todo, tomaremos las medidas dadas en el artículo [1], en él, tenemos los siguientes datos:

- Frecuencia: 73.5 GHz.
- Altura del individuo: 1,80 m.
- Distancia entre hombros: 0.47 m.
- Distancia entre la espalda y el pecho: 0.28 m.
- Altura del TX/RX: 1.4 m.
- Distancia entre TX/RX: 5 m.
- Velocidad: 1m/s.

En este artículo, la persona comienza a una distancia del transmisor de 0.5m y se va desplazando en incrementos de 0.5 m hasta llegar a los 4.5 m.

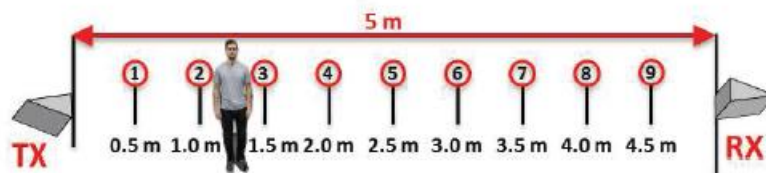


Figura 2. Representación gráfica de las distintas distancias que recorre la persona entre transmisor y receptor [1].

Más tarde, cuando vayamos aumentando la ocupación en el convoy, variaremos las distintas posiciones, anchura del cuerpo y distancia del transmisor de los modelos. Por ahora, sólo queremos ver que nuestro modelo es válido

2.2 Comparativa entre nuestro modelo y el modelo DKED.

Lo que buscamos en este punto, es poder replicar el modelo para poder usar dicho modelo de pérdidas en el convoy de metro. Para validarlo, comparamos la potencia relativa recibida respecto al tiempo mostrada en [1] con la programación realizada. Dado que nosotros no tenemos el dato de tiempo sino de distancia, pasaremos a tiempo en segundos mediante:

$$tiempo(s) = \frac{distancia(m)}{velocidad(m/s)}$$

El resultado obtenido es el siguiente:

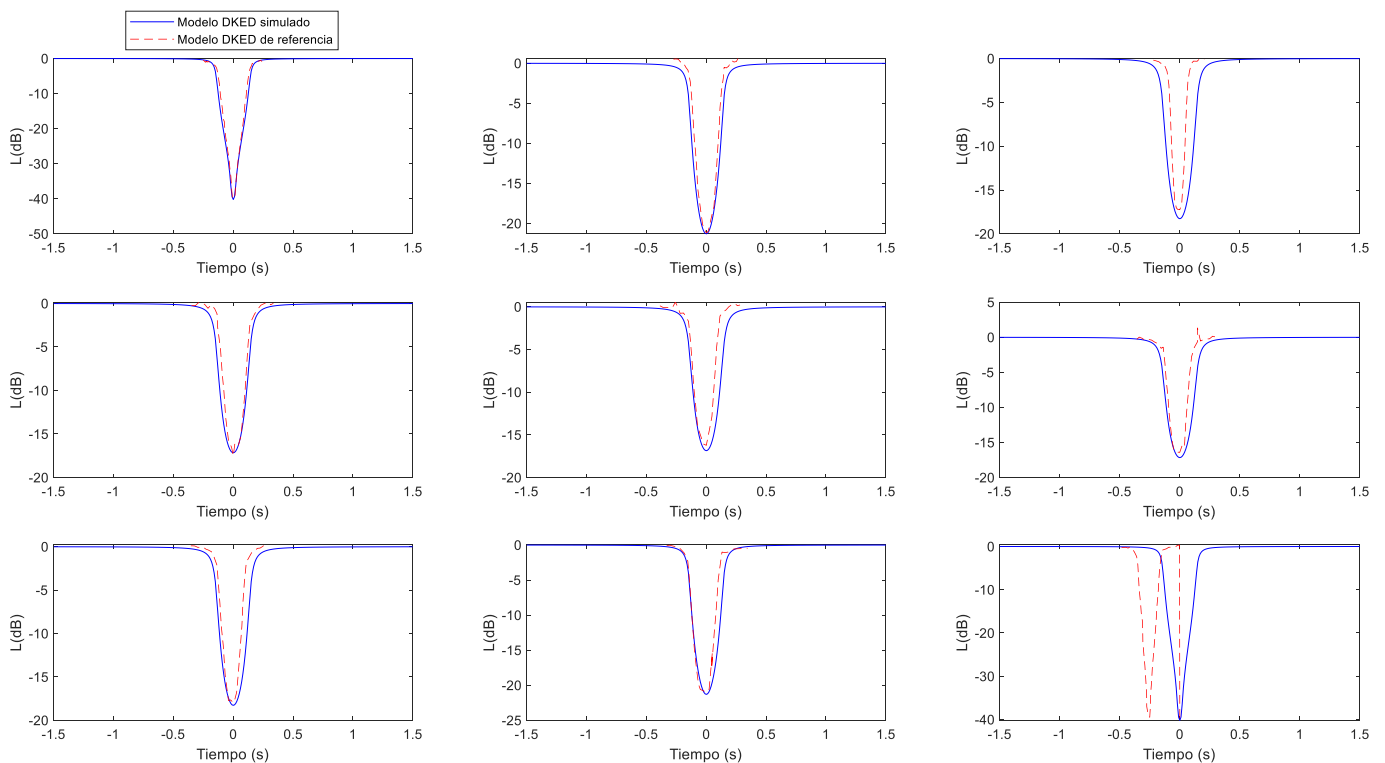


Figura 3. Gráficas para comprobar que nuestro estudio es válido y confirma en el que nos basamos.

Como podemos comprobar en la figura 3, tanto nuestro modelo DKED como el del artículo de referencia [1] son muy parecidos, por lo que podemos validar nuestro estudio. La diferencia que vemos en la última gráfica es debido a la diferencia del diagrama de radiación tomado en este trabajo con respecto al de la referencia del artículo [1].

2.3 Estudio sobre cómo afecta la anchura de las personas en el modelo de pérdidas.

Para simular con mayor realismo la propagación dentro del vagón de metro, debemos tener en cuenta que la anchura del cuerpo humano influye en la atenuación por bloqueo. Pero no sólo influye en los vértices del cuerpo, sino las cercanías de éste. Por lo tanto, se ha realizado un estudio para comprobar hasta qué distancia influían las personas en el comportamiento de la propagación.

Para ello, lo que hicimos fue tomar las distancias entre transmisor y receptor y simular también con distintas anchuras de cuerpo de la persona, para así sacar una media de porcentaje de ampliación en el que un pasajero interfiere en la propagación. Estos resultados se muestran en la tabla 1.

anchura	distancia	p1=0db	punto central	p2=0db	total	porcentaje	porcentaje medio
0,25	0,5	1,8	2,05	2,3	0,25	100	112
0,28	0,5	1,8	2,05	2,3	0,25	89	
0,3	0,5	1,8	2,05	2,3	0,25	83	
0,45	0,5	1,5	2,05	2,6	0,55	122	
0,5	0,5	1,3	2,05	2,8	0,75	150	
0,6	0,5	1,26	2,05	2,84	0,79	132	
0,25	1	2,14	2,42	2,7	0,28	112	129
0,28	1	2,14	2,42	2,7	0,28	100	
0,3	1	2,14	2,42	2,7	0,28	93	
0,45	1	1,84	2,42	3	0,58	129	
0,5	1	1,54	2,42	3,3	0,88	176	
0,6	1	1,44	2,42	3,4	0,98	163	
0,25	1,5	1,9	2,25	2,6	0,35	140	151
0,28	1,5	1,9	2,25	2,6	0,35	125	
0,3	1,5	1,9	2,25	2,6	0,35	117	
0,45	1,5	1,5	2,25	3	0,75	167	
0,5	1,5	1,3	2,25	3,2	0,95	190	
0,6	1,5	1,23	2,25	3,27	1,02	170	
0,25	2	2,54	2,87	3,2	0,33	132	122
0,28	2	2,54	2,87	3,2	0,33	118	
0,3	2	2,54	2,87	3,2	0,33	110	
0,45	2	2,24	2,87	3,5	0,63	140	
0,5	2	2,24	2,87	3,5	0,63	126	
0,6	2	2,24	2,87	3,5	0,63	105	
0,25	2,5	2,08	2,79	3,5	0,71	284	170
0,28	2,5	2,48	2,79	3,1	0,31	111	
0,3	2,5	2,38	2,79	3,2	0,41	137	
0,45	2,5	2,08	2,79	3,5	0,71	158	
0,5	2,5	1,88	2,79	3,7	0,91	182	
0,6	2,5	1,88	2,79	3,7	0,91	152	
0,25	3	2,14	2,82	3,5	0,68	272	173
0,28	3	2,54	2,82	3,1	0,28	100	
0,3	3	2,24	2,82	3,4	0,58	193	
0,45	3	2,14	2,82	3,5	0,68	151	
0,5	3	1,94	2,82	3,7	0,88	176	
0,6	3	1,94	2,82	3,7	0,88	147	
0,25	3,5	2,3	2,9	3,5	0,6	240	164
0,28	3,5	2,6	2,9	3,2	0,3	107	
0,3	3,5	2,4	2,9	3,4	0,5	167	
0,45	3,5	2,1	2,9	3,7	0,8	178	
0,5	3,5	2,1	2,9	3,7	0,8	160	
0,6	3,5	2,1	2,9	3,7	0,8	133	
0,25	4	2,34	2,92	3,5	0,58	232	158
0,28	4	2,64	2,92	3,2	0,28	100	
0,3	4	2,44	2,92	3,4	0,48	160	
0,45	4	2,14	2,92	3,7	0,78	173	
0,5	4	2,14	2,92	3,7	0,78	156	
0,6	4	2,14	2,92	3,7	0,78	130	

0,25	4,5	2,31	2,89	3,47	0,58	232	149
0,28	4,5	2,63	2,89	3,15	0,26	93	
0,3	4,5	2,48	2,89	3,3	0,41	137	
0,45	4,5	2,19	2,89	3,59	0,7	155	
0,5	4,5	2,14	2,89	3,64	0,75	150	
0,6	4,5	2,12	2,89	3,66	0,77	128	

Tabla 1. Estudio del porcentaje de ampliación del cuerpo humano que interacciona con el campo electromagnético de nuestro estudio.

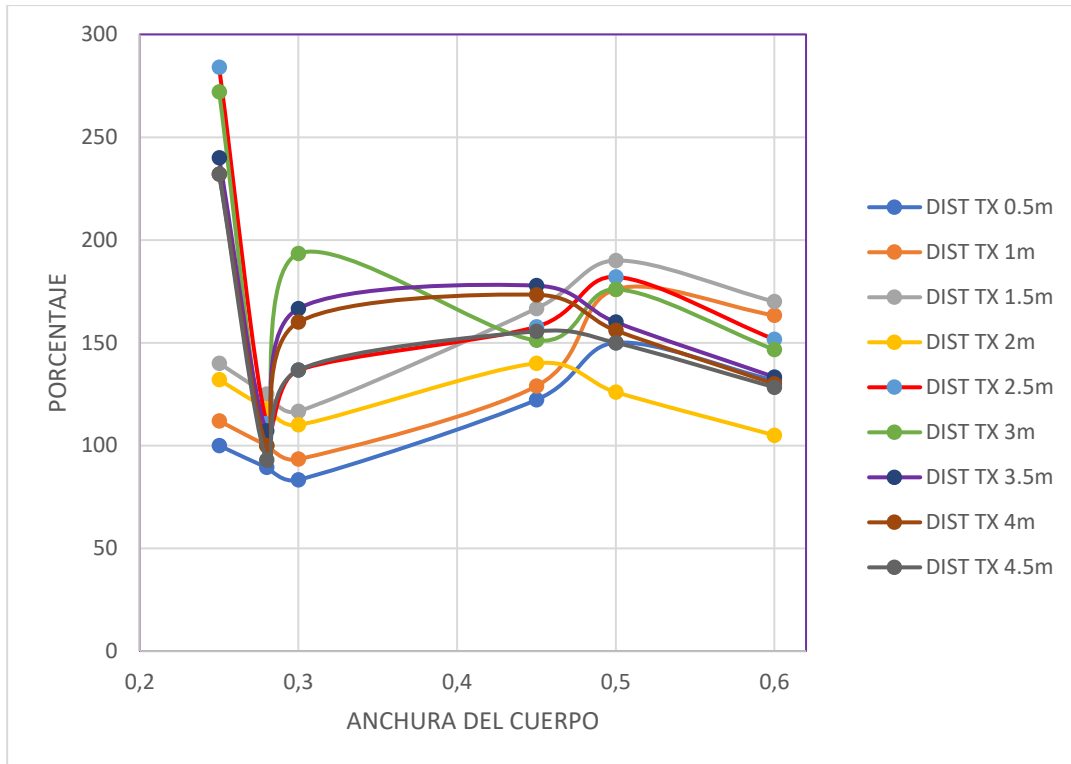


Figura 4. Gráfica que relaciona la distancia al transmisor con el porcentaje de ampliación del cuerpo humano en nuestro estudio.

Como se puede ver en la tabla 1 y en la figura 4, el porcentaje medio de ampliación supera el 100%, es decir, el cuerpo humano influye en la propagación como si doblase su tamaño. Por ello, para simular los pasajeros del vagón de metro y ver cómo interfieren de manera más realista en el estudio, hemos multiplicado por dos la altura y la anchura del cuerpo para ajustarlo al estudio realizado.

3. Entorno geométrico del convoy de metro y gráficas de potencia.

3.1 Descripción del convoy de metro. Generación del modelo geométrico del convoy de metro. (Entorno geométrico del metro)

Para representar el metro, hemos tomado como referencia a la serie 4300 del metro de Valencia. Esta serie está formada por 4 coches, con asientos a cada lado y una parte de separación entre cada unidad que sirve para dar flexibilidad al tren.

La representación del entorno geométrico ha sido en Matlab, y se ha tenido en cuenta la disposición de los asientos, barandillas, ventanas y puertas, así como los materiales de los que están hechos.

Las fotos que hemos tomado de referencia son las siguientes:



Figura 6. Imagen del interior de los vagones de metro.



Figura 7. Imagen del convoy con el transmisor en un extremo.

El entorno geométrico simulado tomando como referencia las figuras 6 y 7 quedaría de esta manera:

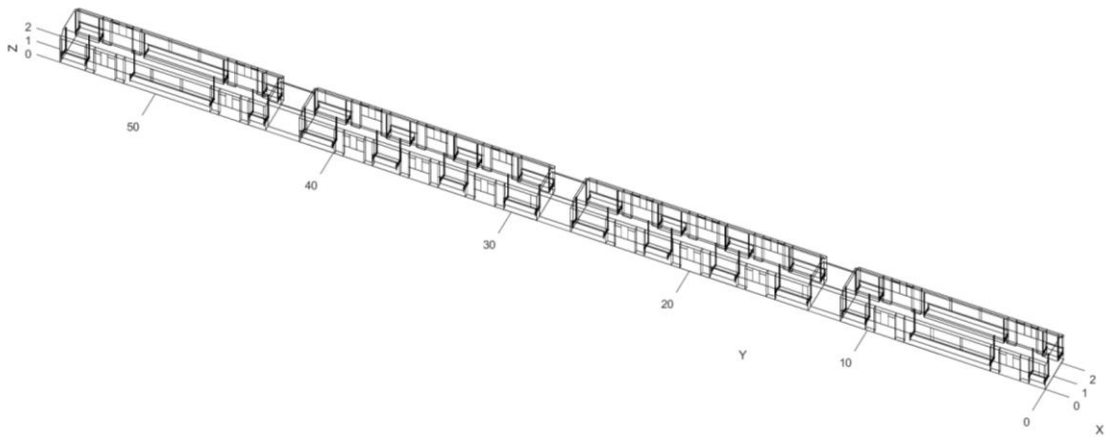


Figura 8. Entorno geométrico del convoy simulado.

3.2 Ratios de ocupación del convoy de metro.

El convoy representado en la figura 8 está compuesto por 4 unidades y se basa en la serie 4300 del metro de Valencia, cuya capacidad es de 588 pasajeros, de los cuales 116 plazas son con asientos y 472, de pie, según [3]. En este último caso,

hemos supuesto 236 personas de pie cerca de las puertas, ya que cuando el metro no está muy lleno en la parte sin asientos, lo que busca la gente es estar al lado de la salida, y las otras 236 que se vayan acumulando poco a poco en el resto del convoy, primeramente, en la zona central más cercanas a las salidas, y luego más próximas a la zona entre vagones conforme menos espacio haya.

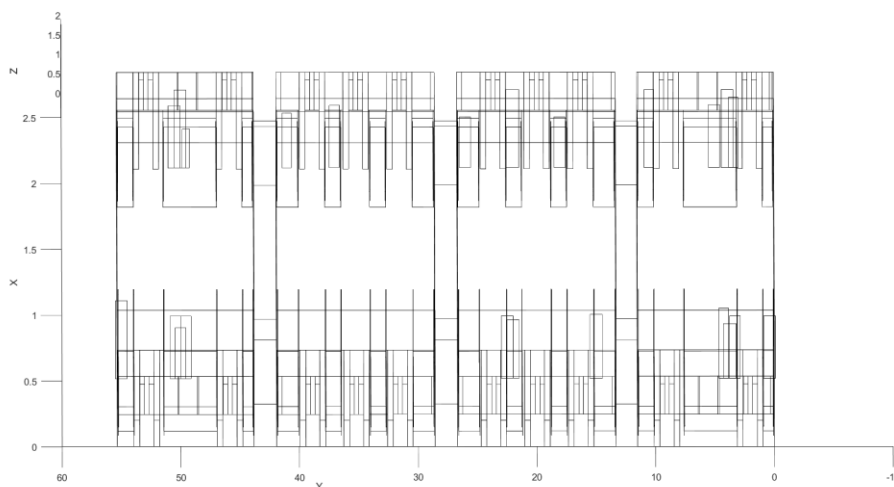
En [2] se establecen tres tipos de aforo: bajo, medio y alto. La ocupación baja se produce en las horas entre las 17:00 y las 19:00, y el porcentaje de aforo es del 14% aproximadamente. Por el contrario, tenemos una ocupación alta entre las 7:00 y las 9:00, con un 95% de capacidad. Durante el resto de las horas del día, la ocupación es media, con un 50% de aforo.

En este trabajo, y basándonos en los datos de [2], se han tomado las siguientes capacidades:

Capacidad.	Sentados.	De pie cerca de las puertas.	De pie en el pasillo o entre las puertas.	Ocupación total.
Baja	20% de 116=23	0	0	23
Baja	50% de 116=58	0	0	58
Baja	50% de 116=58	10% de 472=47	0	105
Media	80% de 116=93	20% de 472=94	0	187
Media	80% de 116=93	30% de 472=142	10% de (472-142)=33	268
Media	100% de 116=116	40% de 472=189	20% de (472-187)=57	362
Alta	116	50% de 472=236	100	452
Alta	116	236	200	552
Alta	116	236	236	588

Tabla 2. Ocupaciones analizadas.

Con las capacidades descritas en la tabla 2, obtenemos las siguientes figuras:



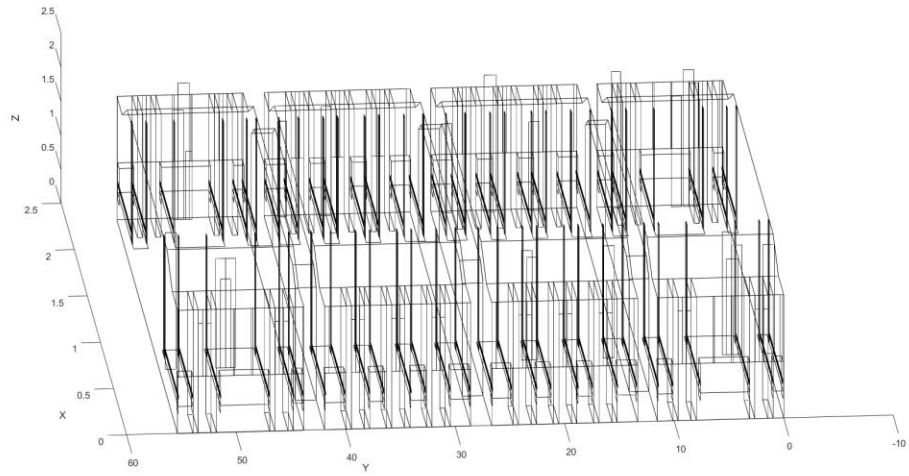


Figura 9. Ocupación de 23 personas.

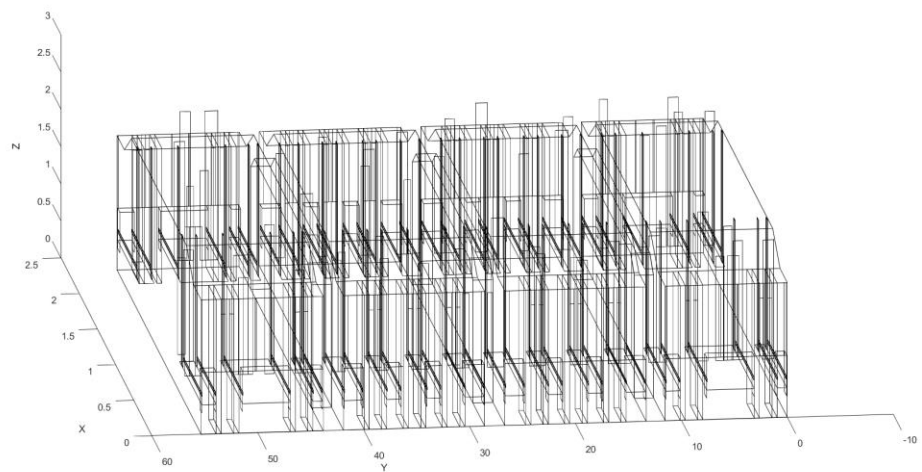
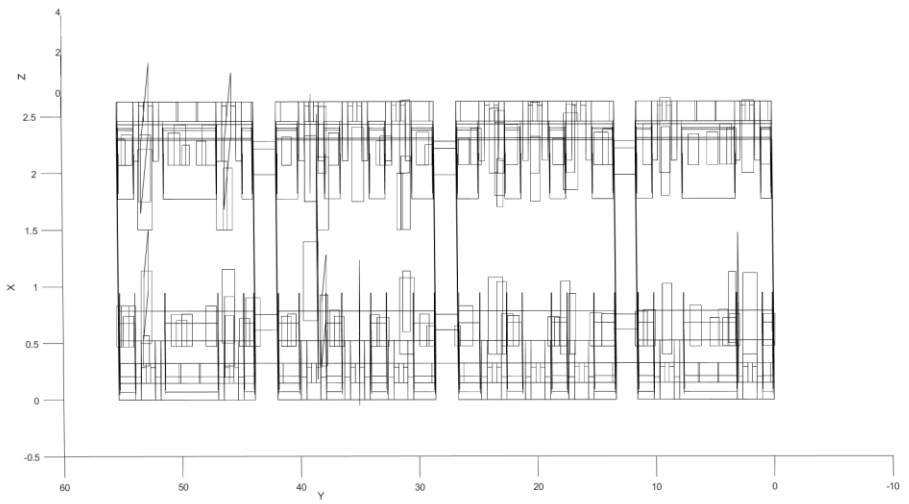


Figura 10. Ocupación de 58 personas.

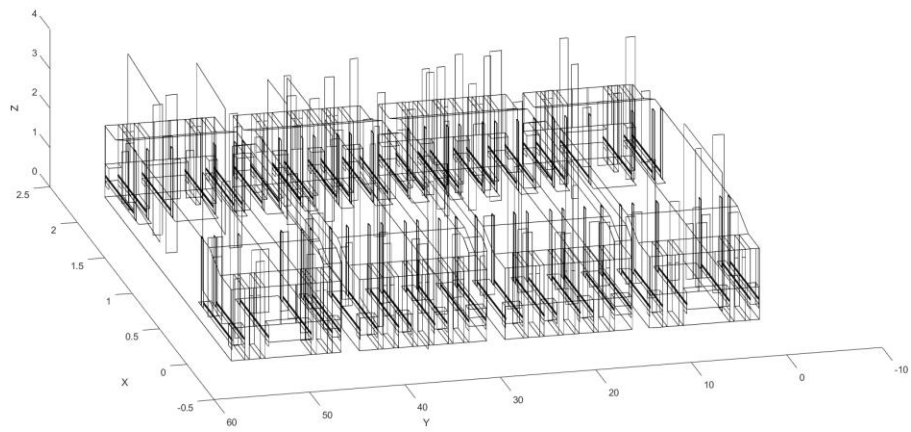
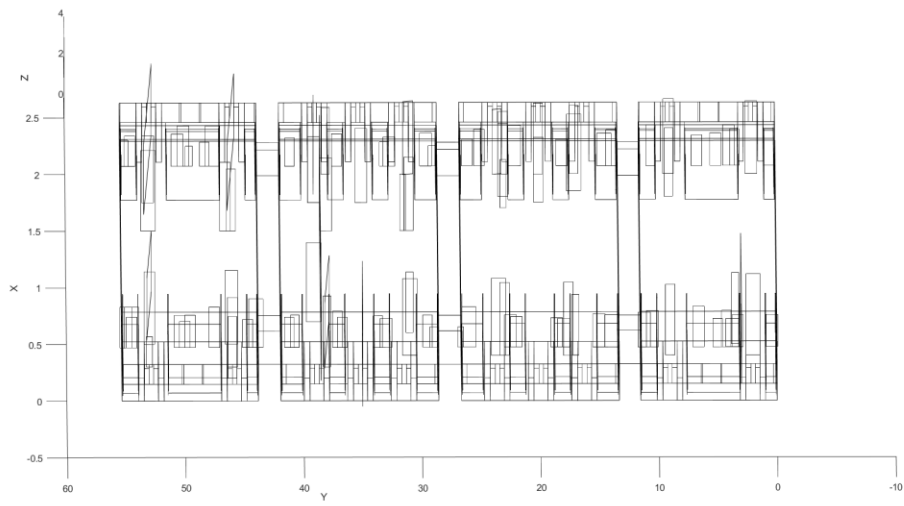
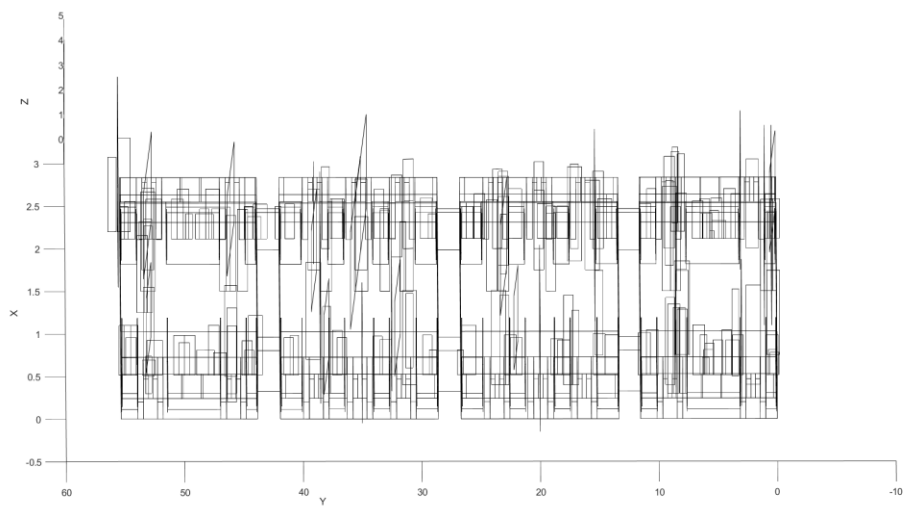


Figura 11. Ocupación de 105 personas.



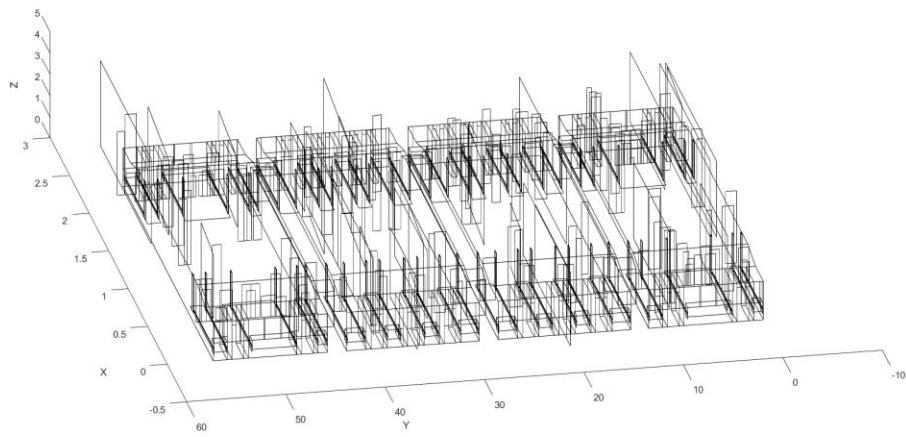


Figura 12. Ocupación de 187 personas

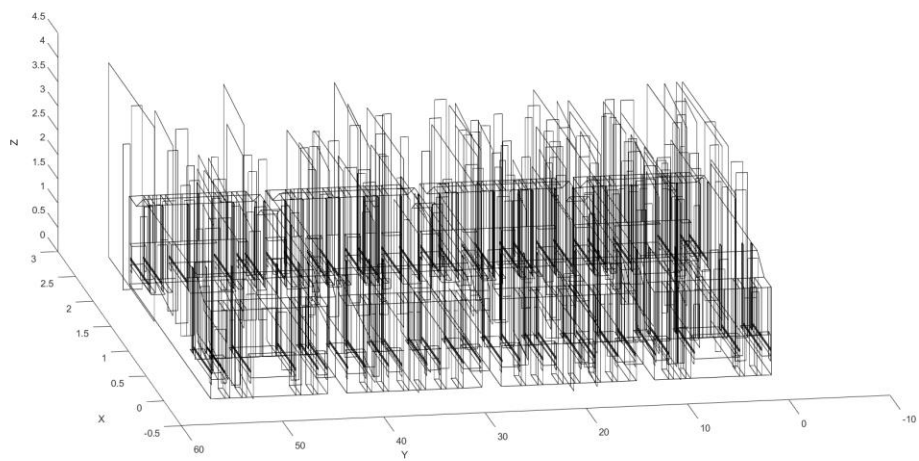
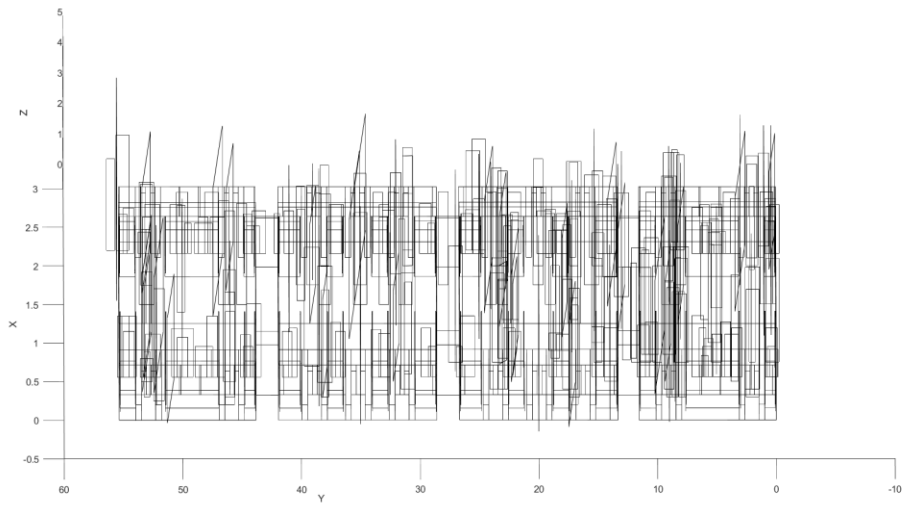


Figura 13. Ocupación de 268 personas

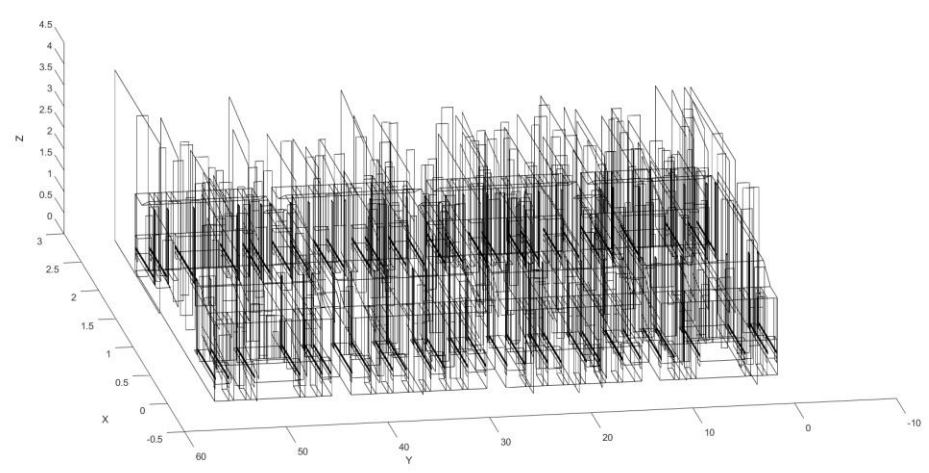
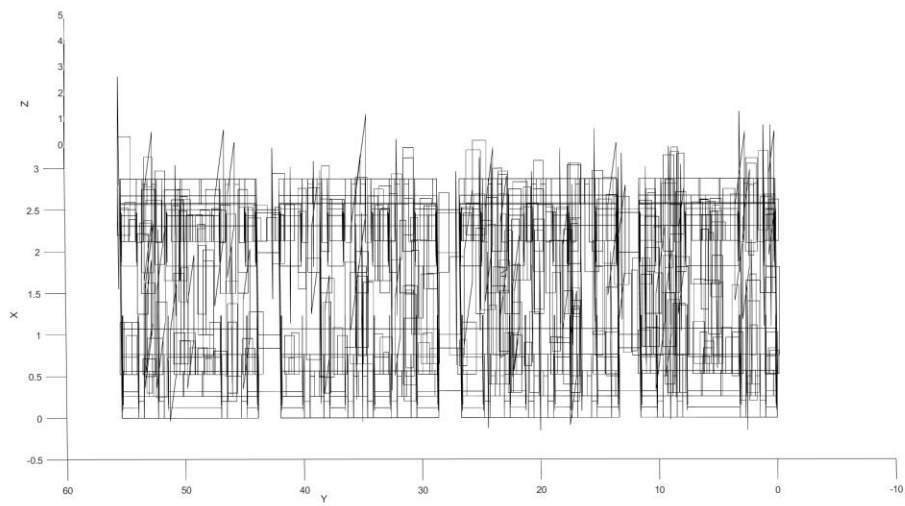
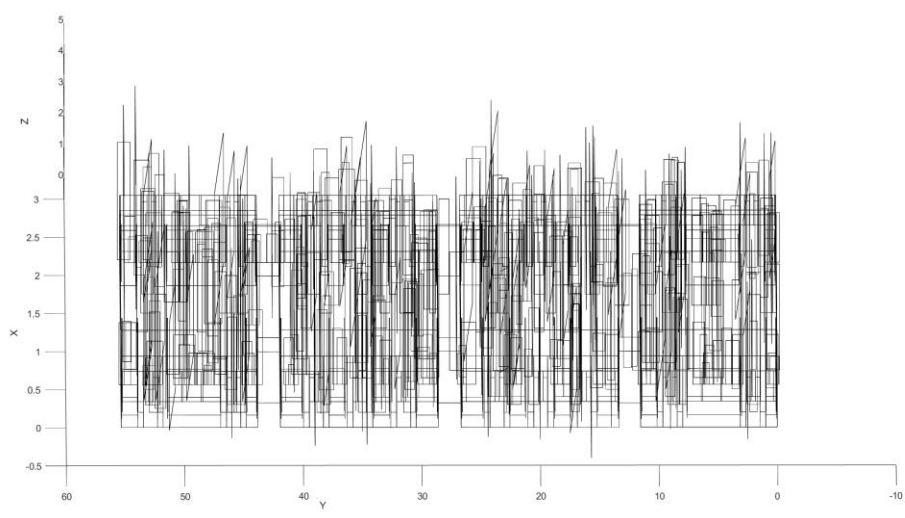


Figura 14. Ocupación de 362 personas.



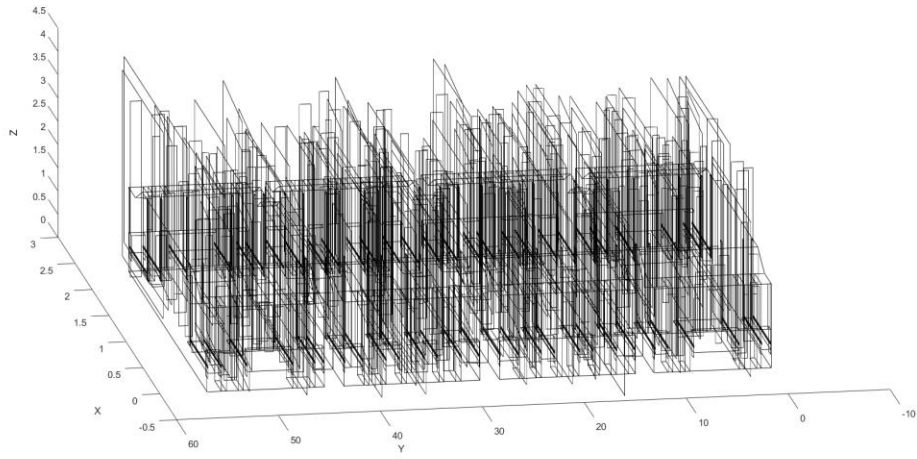


Figura 15. Ocupación de 452 personas

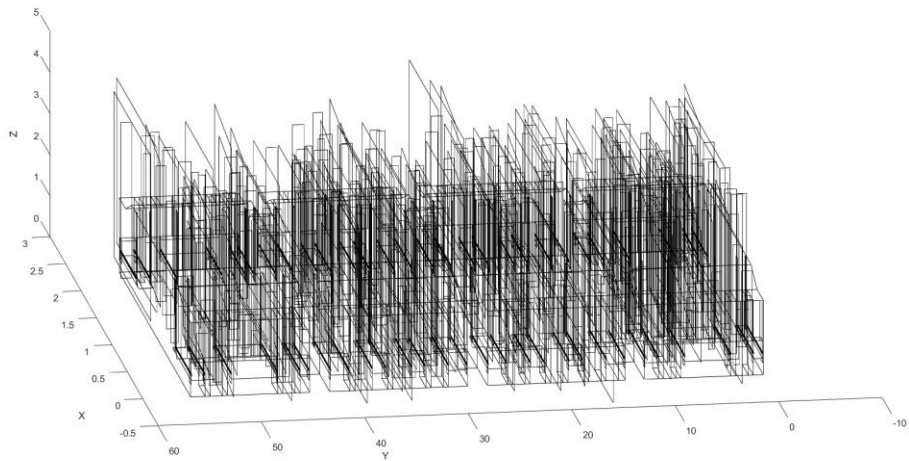
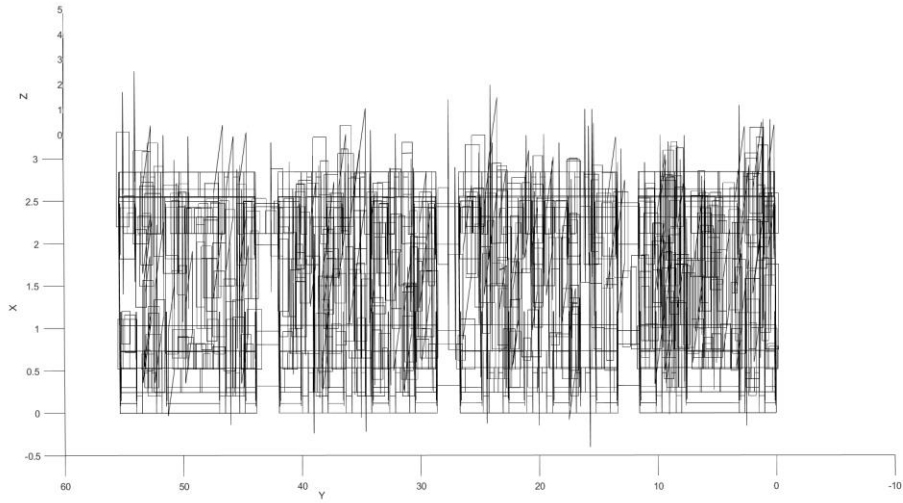


Figura 16. Ocupación de 552 personas

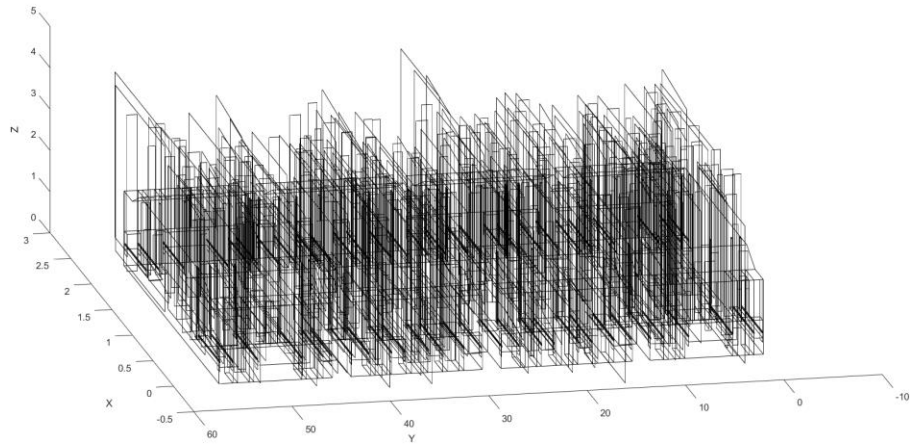
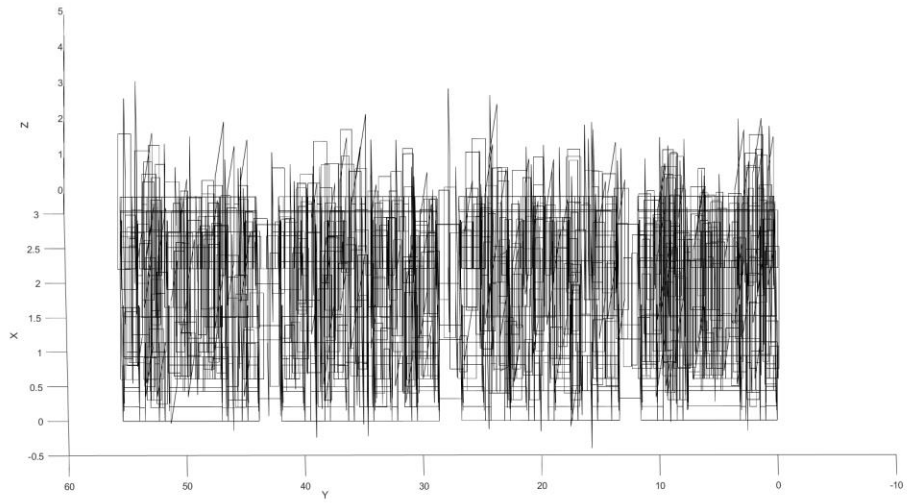


Figura 17. Ocupación de 568 personas.

3.3 Trazador de rayos.

Para realizar las simulaciones del análisis de cobertura del convoy, vamos a utilizar un Trazador de Rayos 3D programado en Matlab. Se basa en una técnica utilizada para simular y visualizar cómo se propagan las ondas electromagnéticas en un entorno tridimensional. Aunque el Trazador es más usado en la industria del entretenimiento y el diseño para renderizar imágenes realistas, en el contexto de este estudio se utiliza como una herramienta de modelado para comprender la propagación de las ondas electromagnéticas. El funcionamiento del Trazador es el siguiente:

- *Generación de la escena:* En primer lugar, se crea un modelo tridimensional del entorno en el que se quiere analizar la propagación de la radiación (figura 8). En nuestro caso, como hemos comentado antes, incluye barandillas, ventanas y cualquier objeto y material que puedan afectar a la propagación.
- *Emisión de rayos:* Se emiten “rayos” virtuales desde una fuente emisora simulada, que representa un punto de acceso. Estos rayos viajan en todas las direcciones posibles desde la fuente emisora.
- *Interacción con objetos:* A medida que los rayos atraviesan el entorno geométrico, interactúan con los objetos presentes. Esto incluye reflexiones, refracciones y absorciones de los rayos por parte de los objetos.
- *Propagación y cálculo de intensidad:* Los rayos continúan propagándose a través del entorno, reflejándose y refractándose en función de las propiedades de los objetos que encuentran a su paso.
- *Visualización de resultados:* Finalmente, se visualizan los resultados de los rayos trazados para representar cómo se distribuye la radiación en el entorno. Esto nos ayudará a comprender el comportamiento de la señal en diferentes ubicaciones.

Durante el proceso de trazado de rayos 3D, se tienen en cuenta los mecanismos de propagación de las ondas electromagnéticas, como la reflexión, la difracción, dispersión y la atenuación, que serán fundamentales para conocer cómo funciona la radiación en el convoy. Por ejemplo, al simular la reflexión, los rayos que inciden sobre una superficie pueden reflejarse, cambiando su dirección y propagación. La difracción permite que las ondas se curven alrededor de obstáculos, mientras que la dispersión puede causar que las ondas se dispersen en diferentes direcciones. La atenuación representa la pérdida de energía de las ondas a medida que viajan a través del espacio (ecuación 2).

En este estudio han considerado, por limitaciones computacionales, como mecanismos de propagación el rayo directo y las reflexiones de hasta orden 2

Al integrar todos estos elementos, lo que se consigue es una representación detallada de la propagación de la radiación electromagnética. Esto proporciona información valiosa para planificar y optimizar las redes de comunicaciones 5G, asegurando una cobertura confiable en nuestro entorno geométrico.

Tras esto, se han realizado dos análisis de cobertura distintos: uno con el transmisor en un extremo del convoy y otro en el centro, tomando en ambos casos las capacidades descritas en la tabla 2. Se han tenido en cuenta dos alturas diferentes de receptores, siendo las distintas posiciones de recepción las personas que se simulan:

- Cuando la persona está sentada, la altura del receptor es de 0.8m.
- Cuando la persona está de pie, la altura del receptor es de 1.8m.

3.4 Análisis de la cobertura en el convoy de metro cuando el punto de acceso se encuentra en un extremo.

A continuación, veremos las gráficas del análisis de cobertura cuando colocamos el transmisor en un extremo, comenzando por cuando no hay personas en el convoy (figura 8).

- Análisis de cobertura cuando la capacidad es baja:

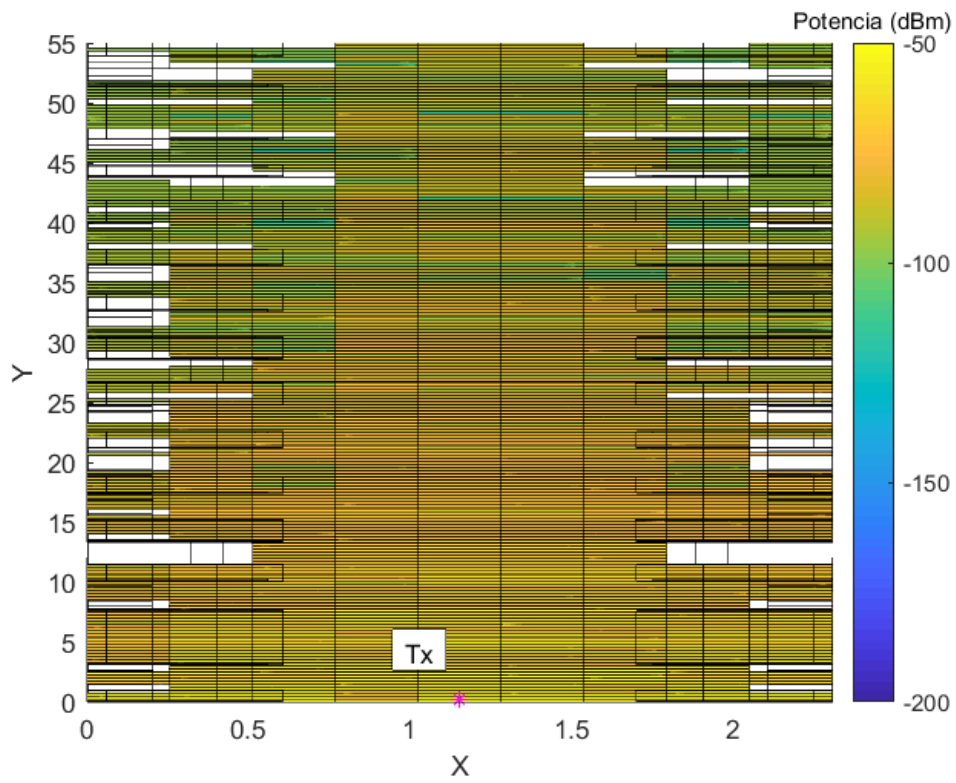


Figura 18. Tx en el extremo sin personas.

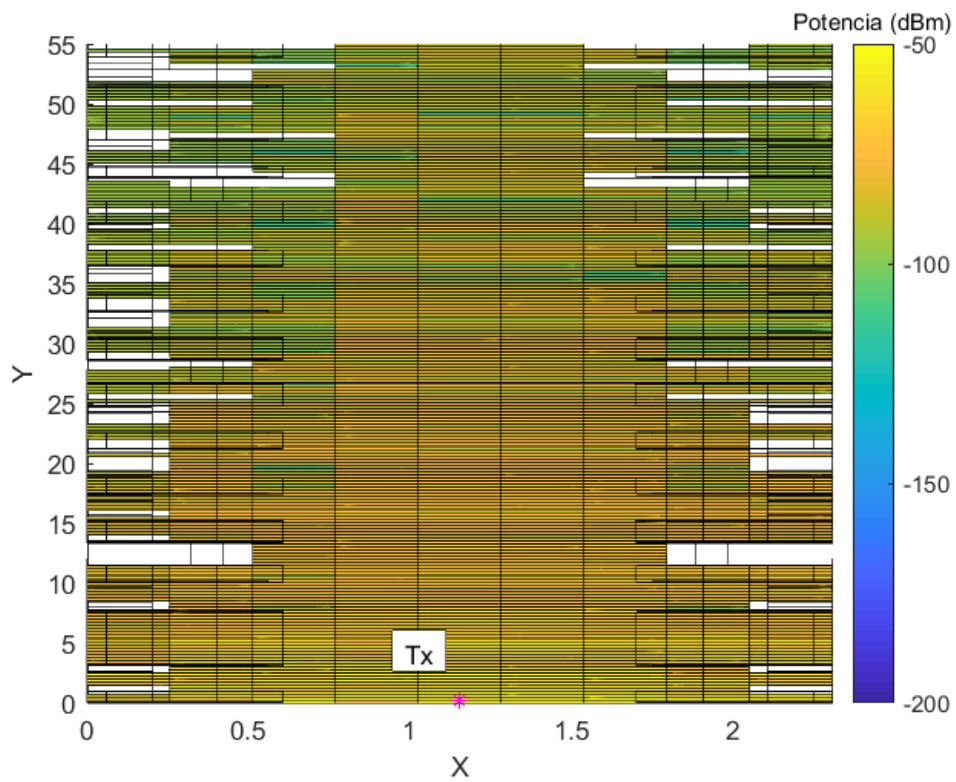


Figura 19. Tx en el extremo con 23 personas.

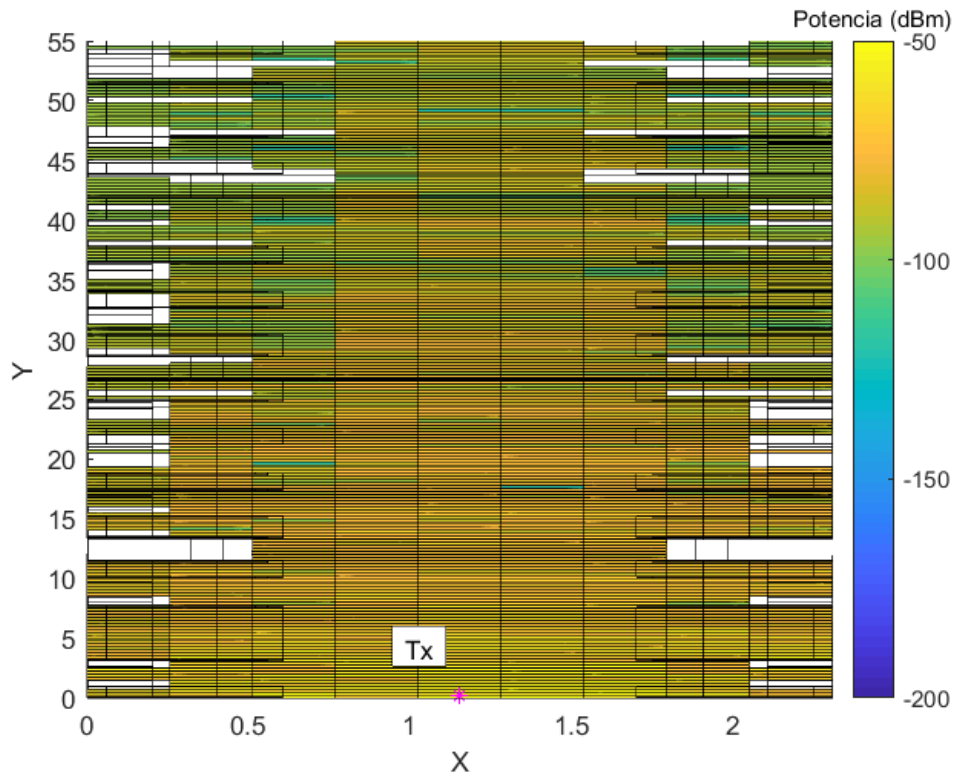


Figura 20. Tx en el extremo con 58 personas.

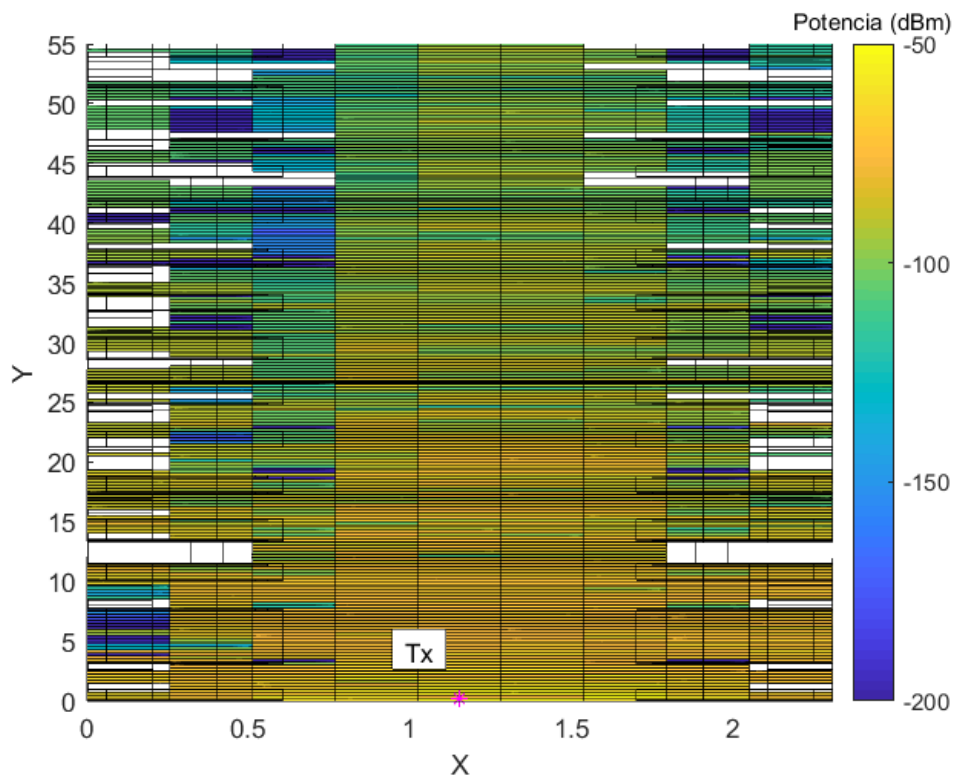


Figura 21. Tx en el extremo con 105 personas.

- Análisis de cobertura cuando la capacidad es media:

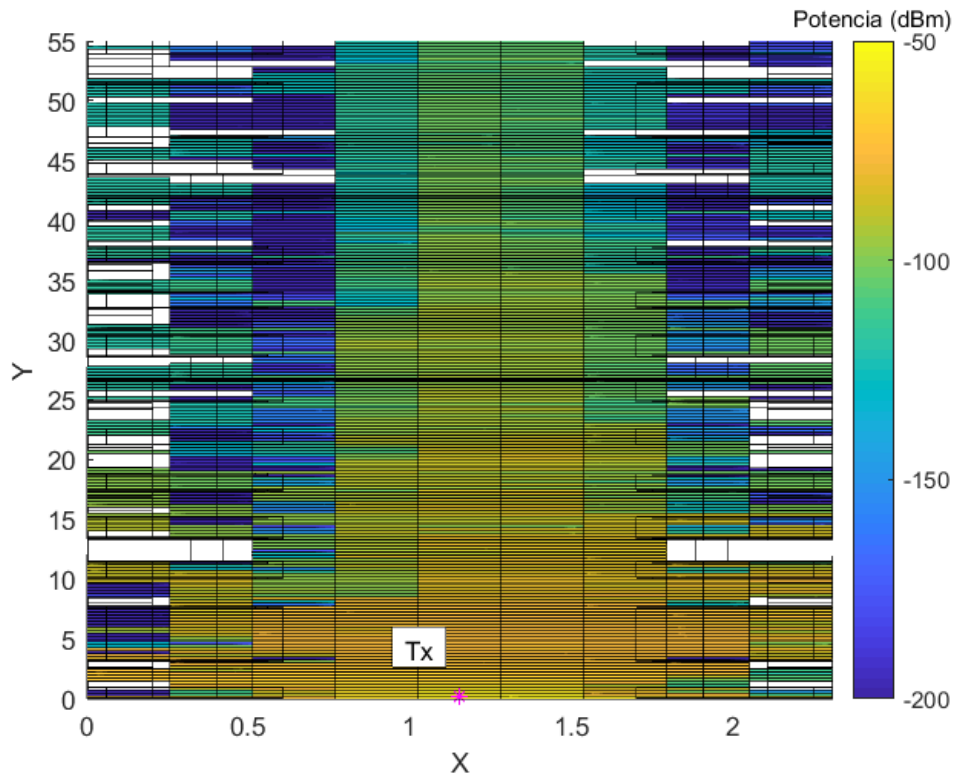


Figura 22. Tx en el extremo con 187 personas.

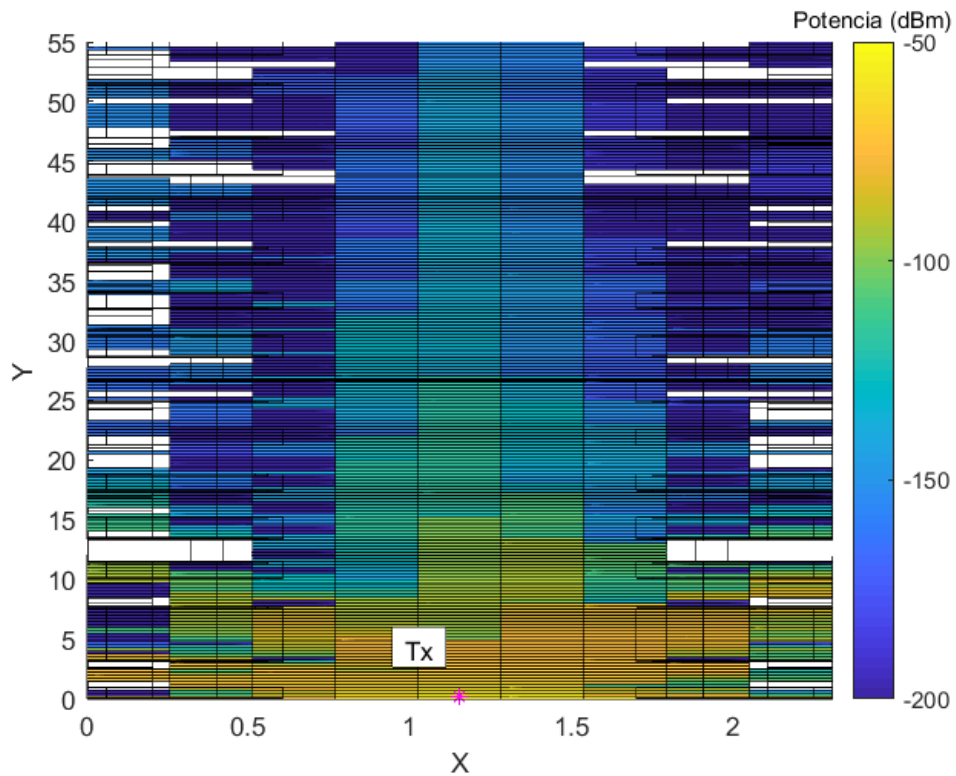


Figura 23. Tx en el extremo con 268 personas.

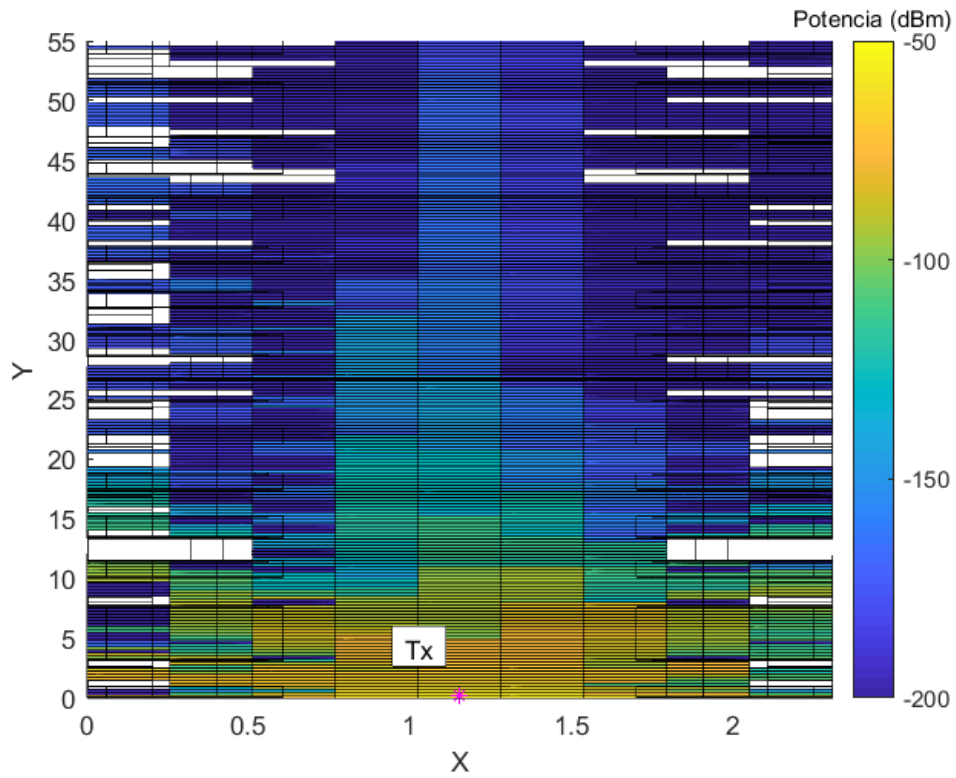


Figura 24. Tx en el extremo con 362 personas.

- Análisis de cobertura cuando la capacidad es alta:

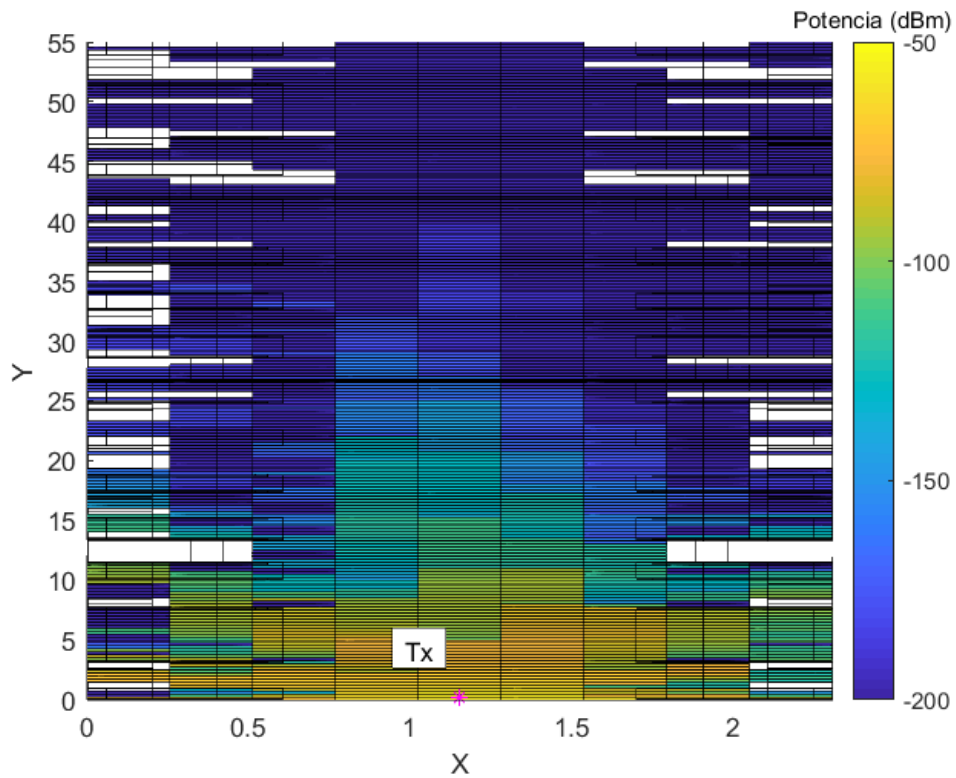


Figura 25. Tx en el extremo con 452 personas.

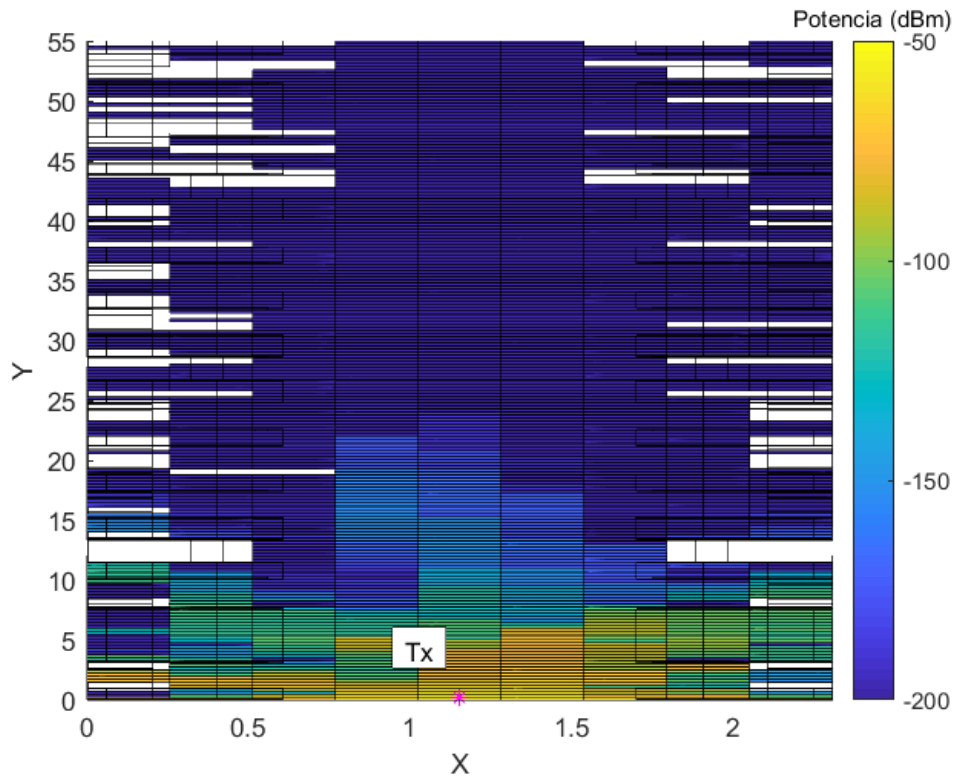


Figura 26. Tx en el extremo con 552 personas.

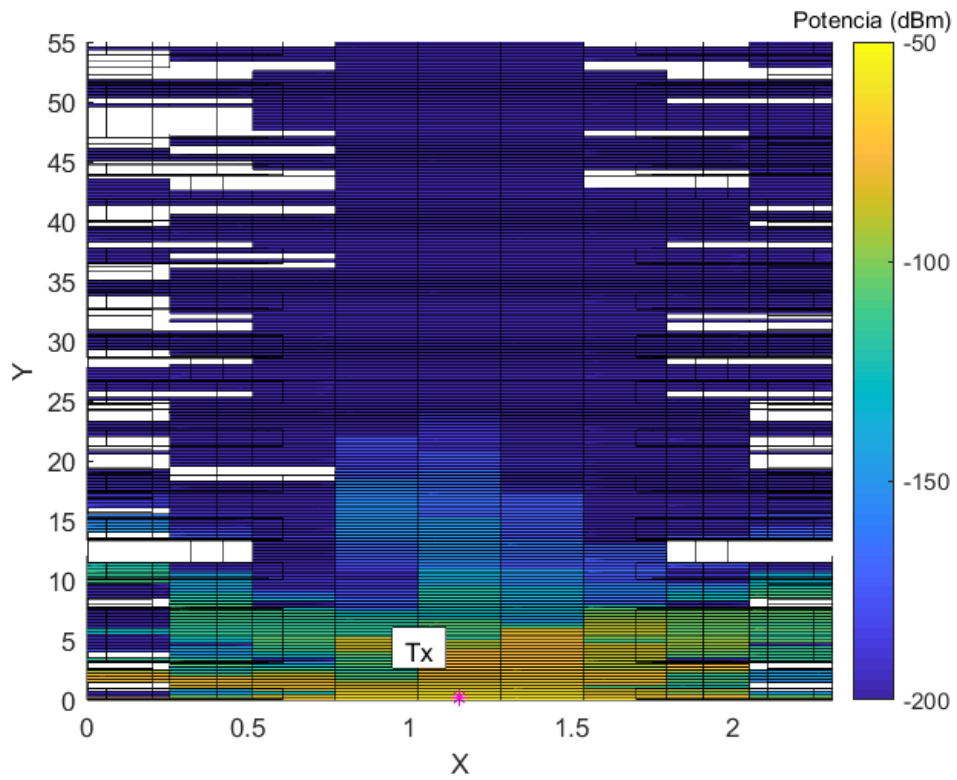


Figura 27. Tx en el extremo con 588 personas.

Se puede comprobar con las figuras anteriores, que la potencia es menor en aquellos puntos más alejados del transmisor. Además, el descenso de ésta comienza en los extremos y las esquinas, como se puede comprobar a partir de la figura 21, ya que en esa zona existen elementos como asientos, barandas, puertas o ventanas que influyen en que se produzca la caída de la señal por las atenuaciones que provocan dichos elementos.

Ahora, veamos las diferencias de potencia obtenidas entre el convoy sin personas y los diferentes escenarios de ocupación.

- Diferencias de potencia cuando la capacidad es baja:

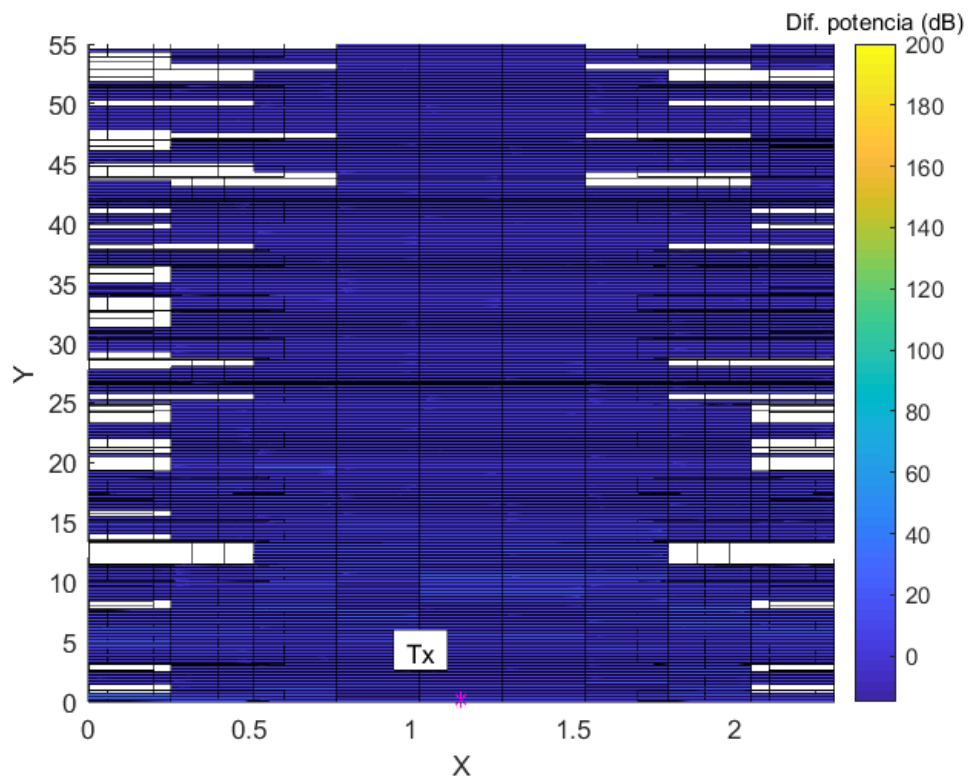


Figura 28. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 23 personas.

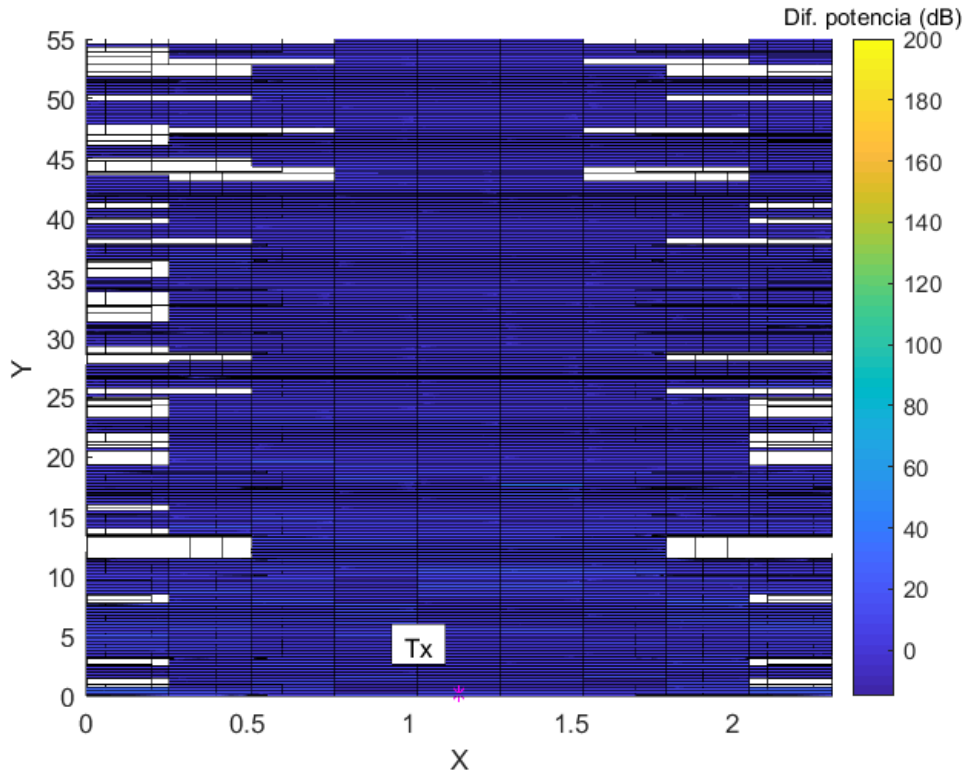


Figura 29. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 58 personas.

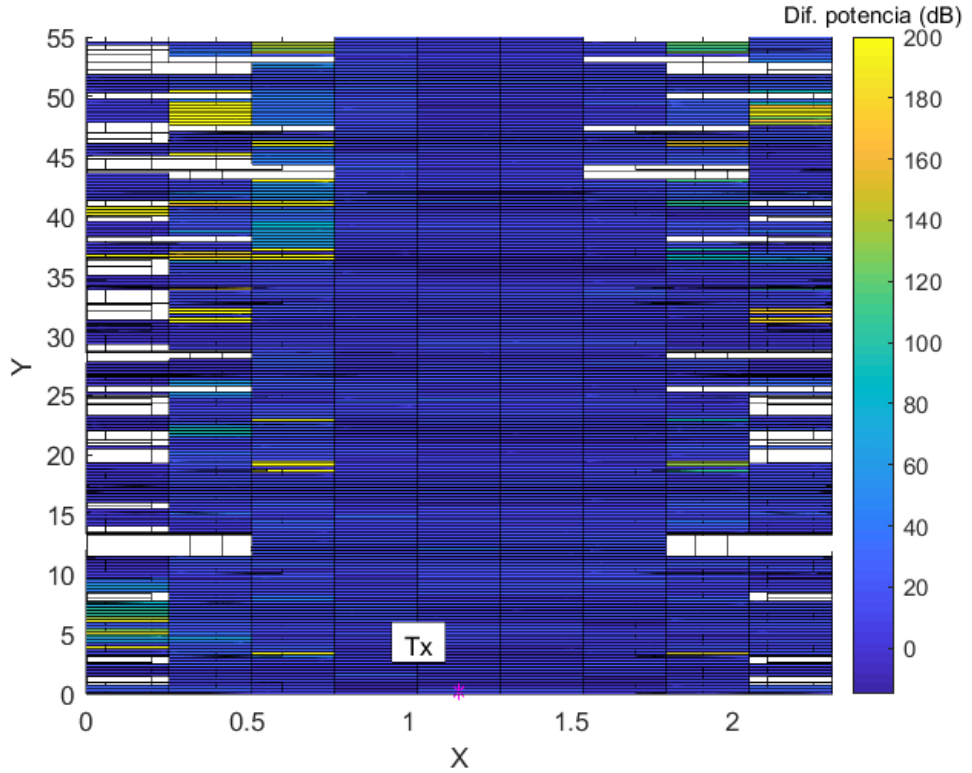


Figura 30. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 105 personas.

- Diferencias de potencia cuando la capacidad es media:

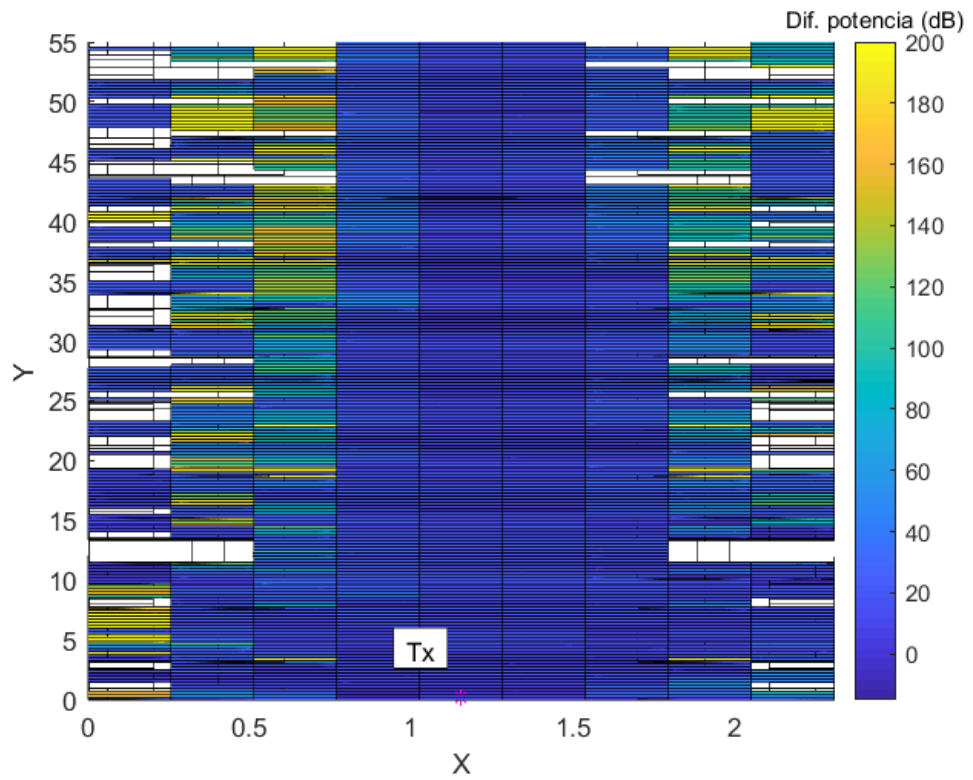


Figura 31. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 187 personas.

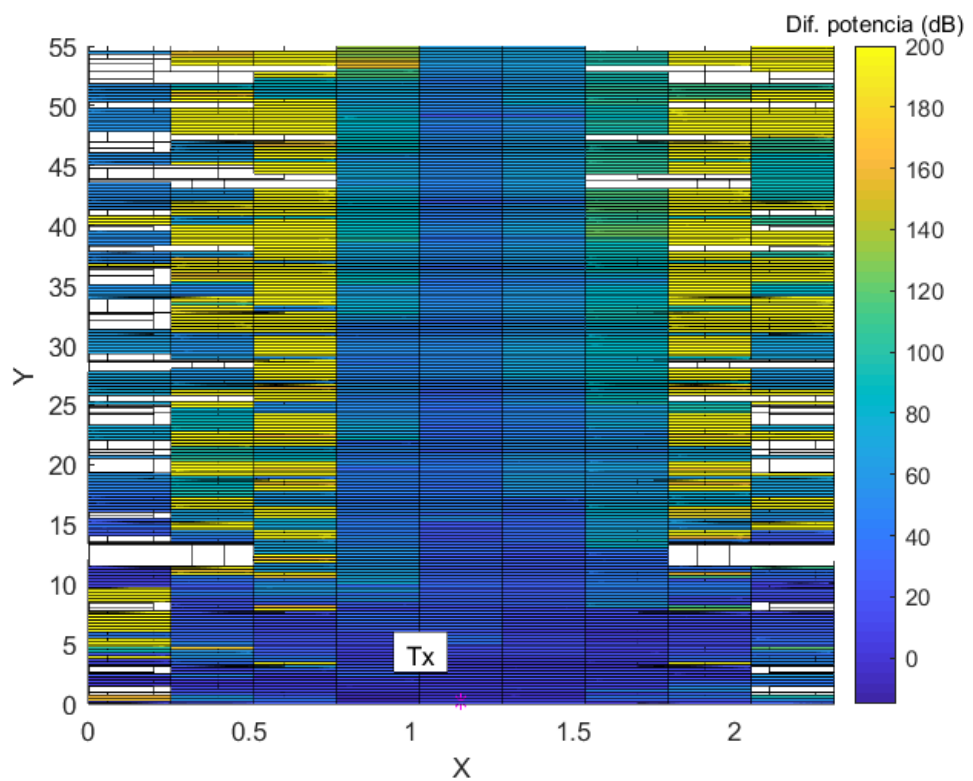


Figura 32. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 268 personas.

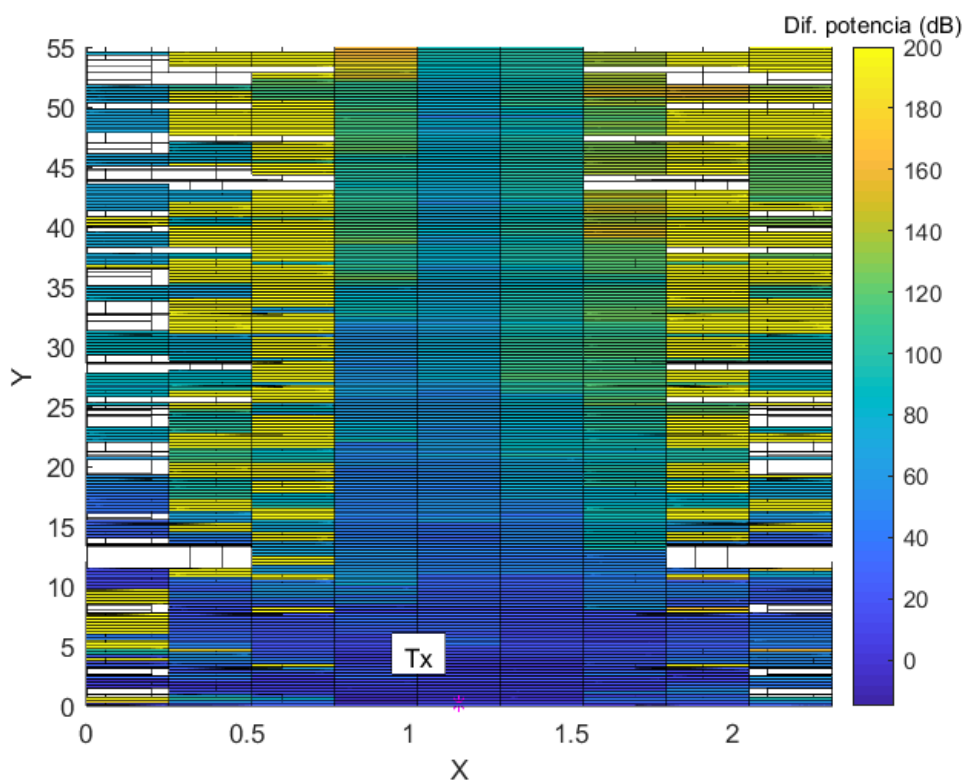


Figura 32. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 362 personas.

- Diferencias de potencia cuando la capacidad es alta:

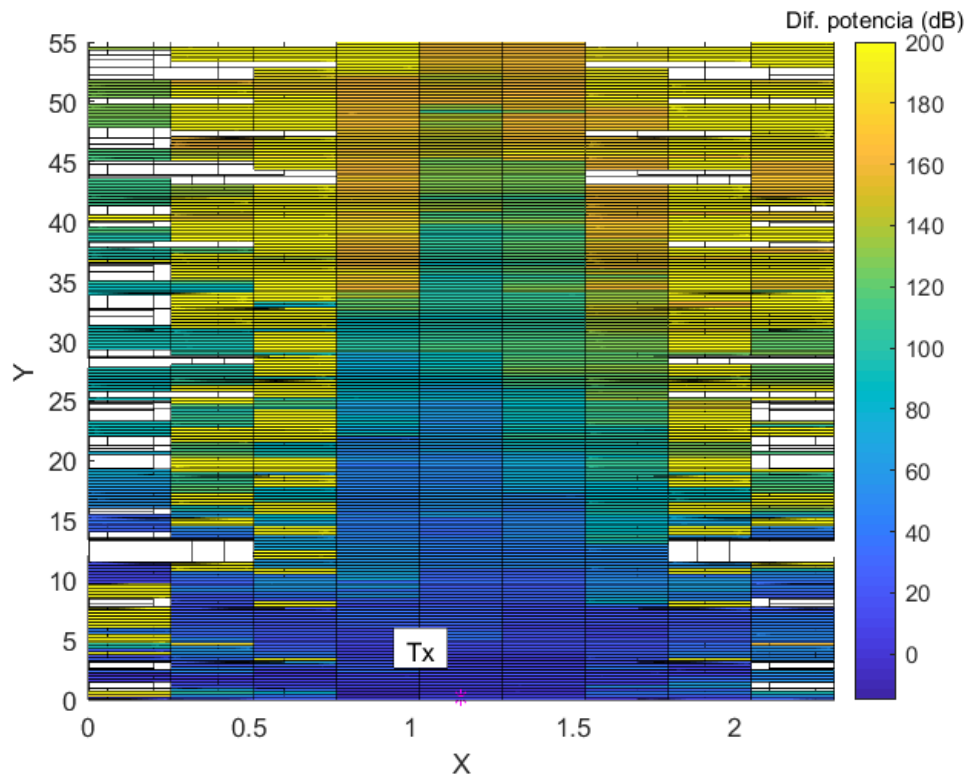


Figura 33. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 452 personas.

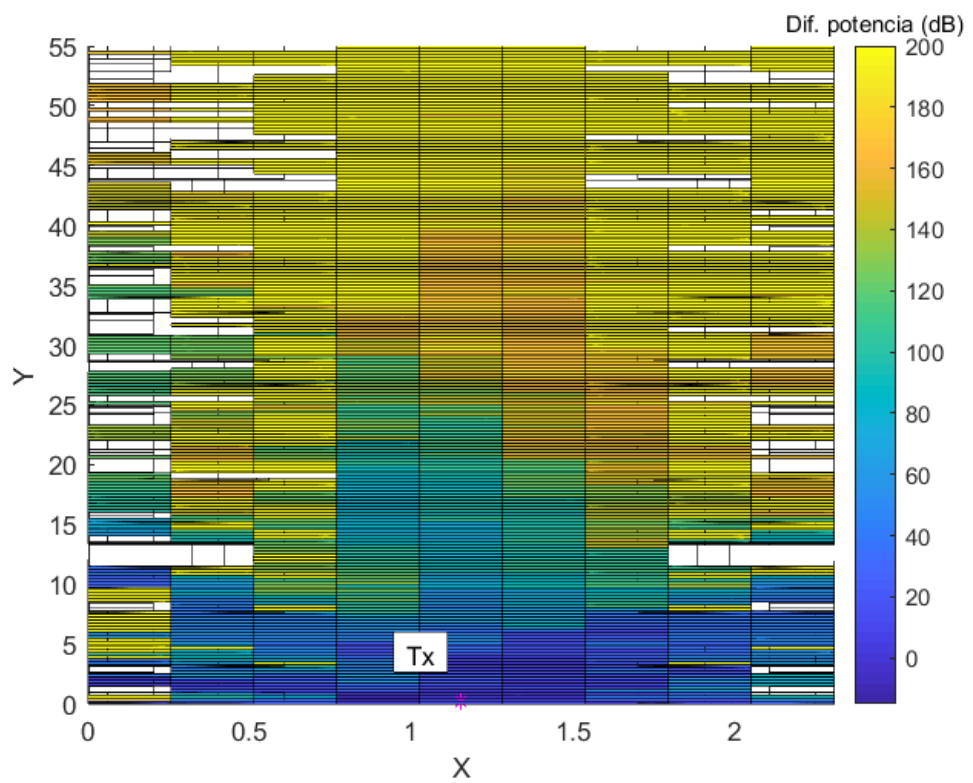


Figura 34. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 552 personas.

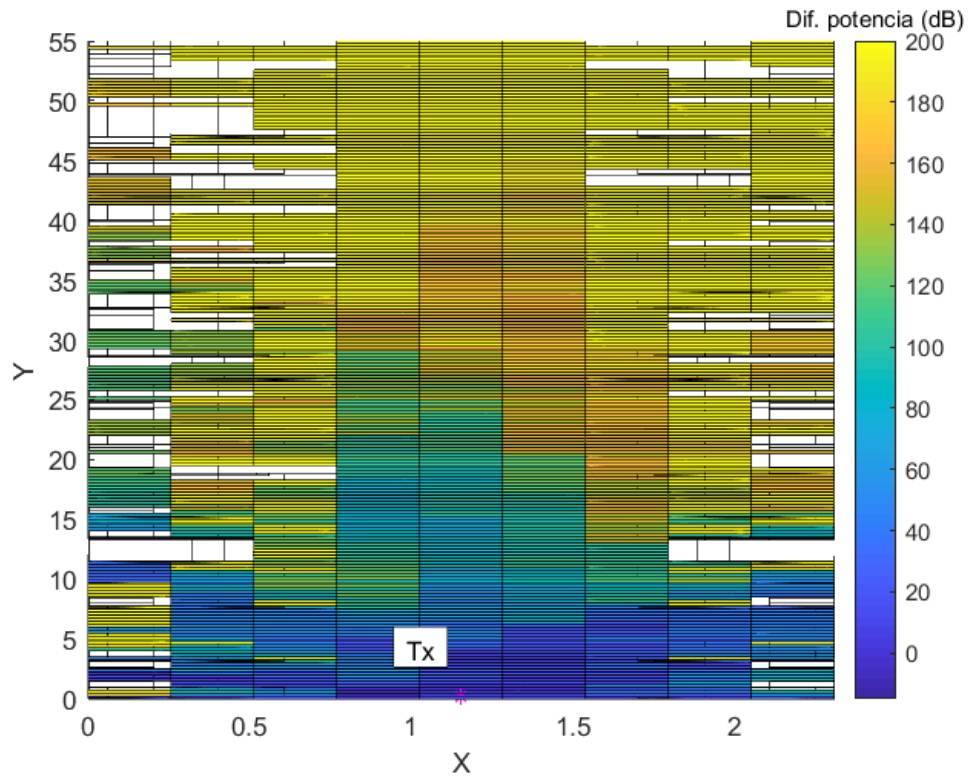


Figura 35. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 568 personas.

Se puede destacar la diferencia de potencia entre la figura 28, dónde no hay mucha afluencia de personas, y la figura 35, dónde el convoy llega a su máxima ocupación. Se ve de manera evidente cómo el aumento de la capacidad dentro del convoy provoca que la energía de la señal sea mucho menor, debido al aumento de las pérdidas por bloqueo debidas a la cantidad de personas que hay, lo que hace que las pérdidas por bloqueo humano aumenten.

3.5 Análisis de la cobertura en el convoy de metro cuando el punto de acceso se encuentra en el centro.

A continuación, veremos las gráficas del análisis de cobertura cuando colocamos el transmisor en el centro, comenzando por cuando no hay personas en el convoy (figura 8).

- Análisis de cobertura cuando la capacidad es baja:

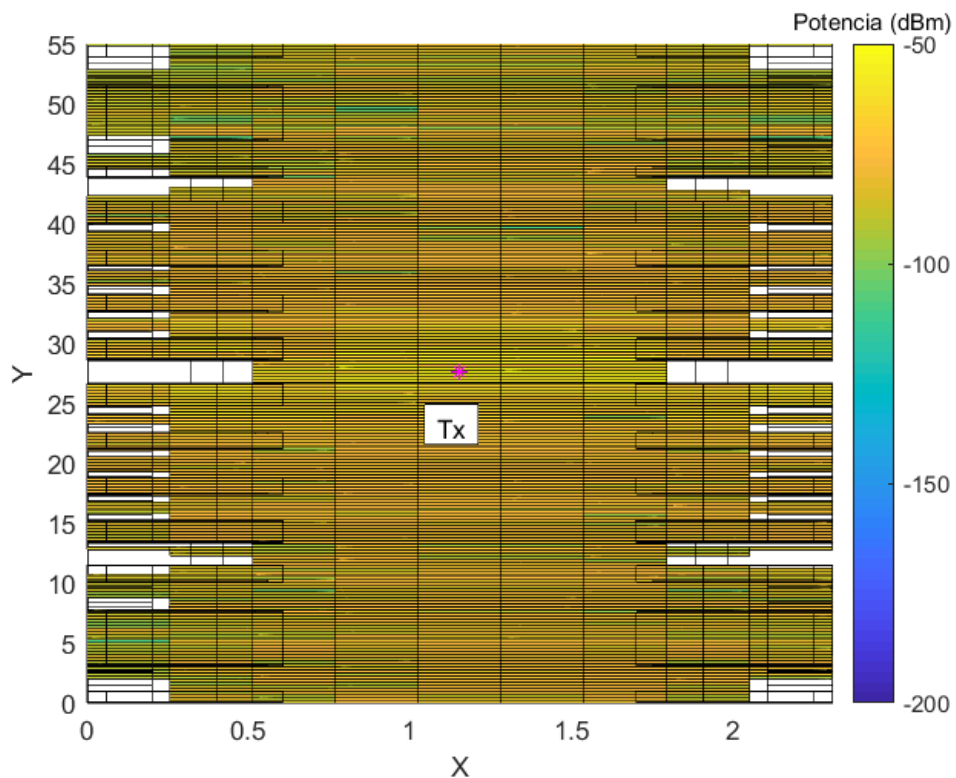


Figura 36. Tx en el centro sin personas.

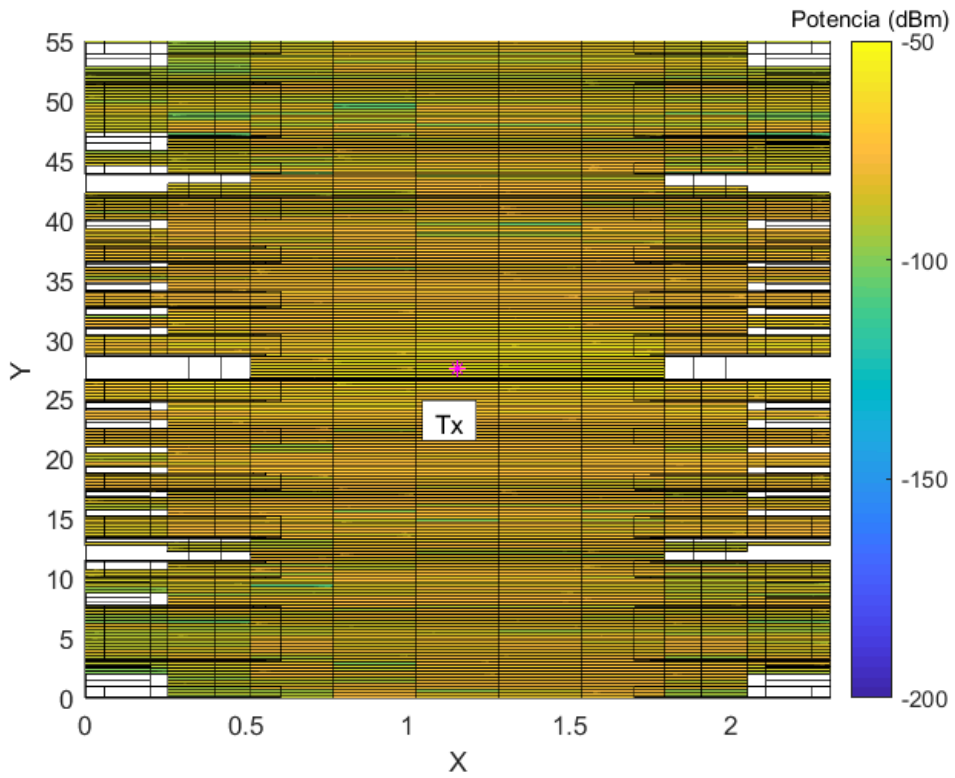


Figura 37. Tx en el centro con 23 personas.

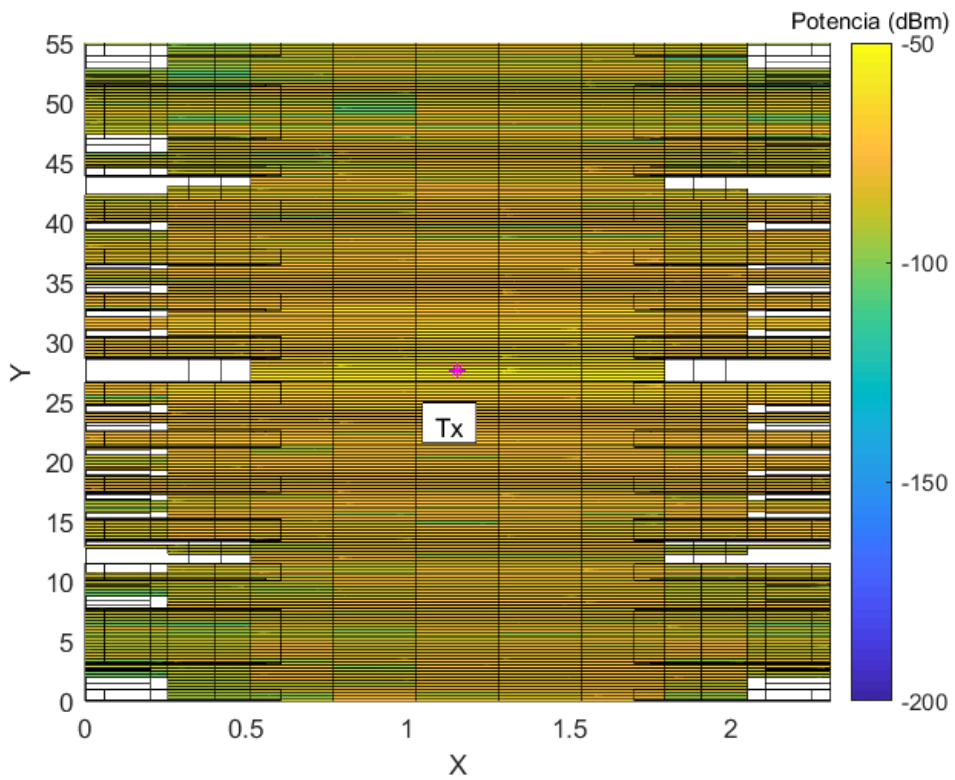


Figura 38. Tx en el centro con 58 personas.

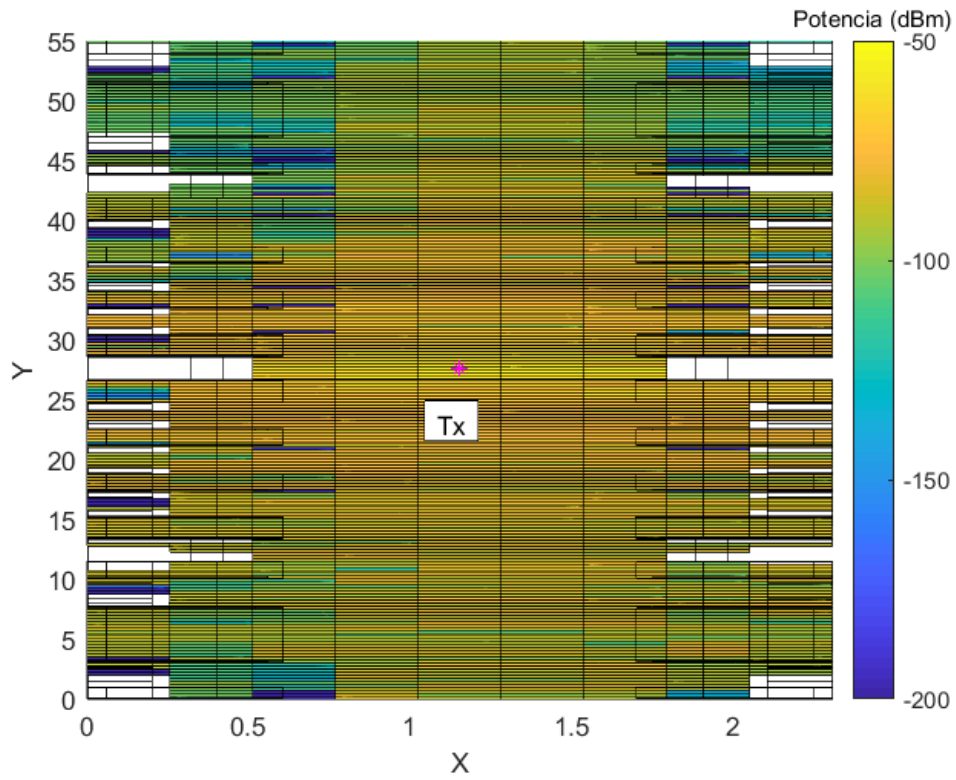


Figura 39. Tx en el centro con 105 personas.

- Análisis de cobertura cuando la capacidad es media:

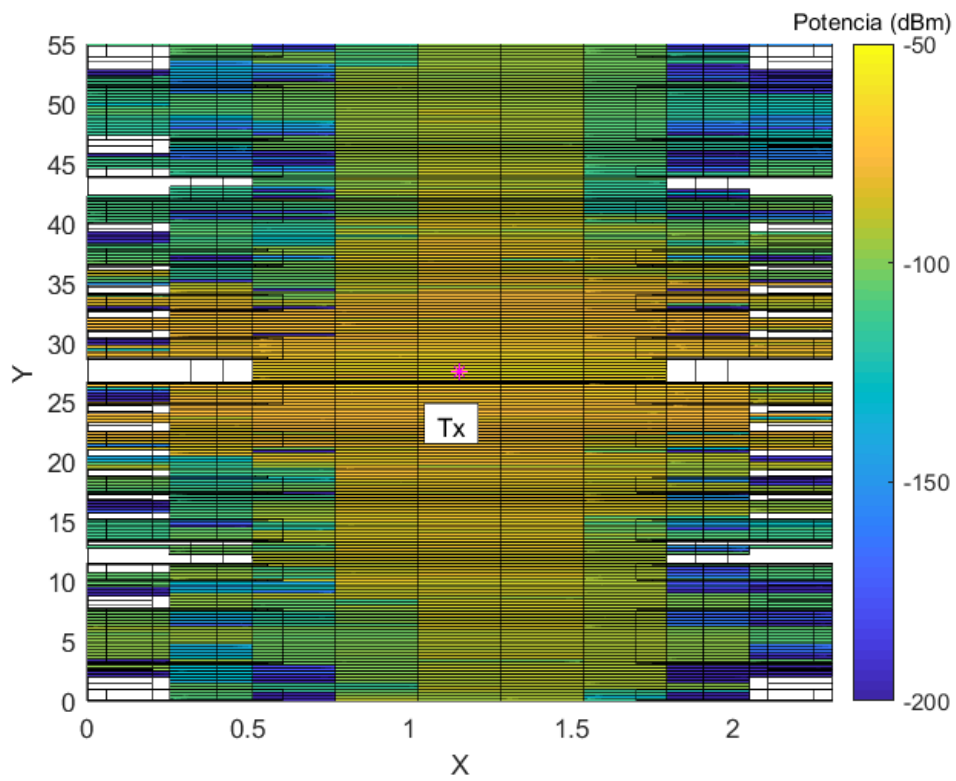


Figura 40. Tx en el centro con 187 personas.

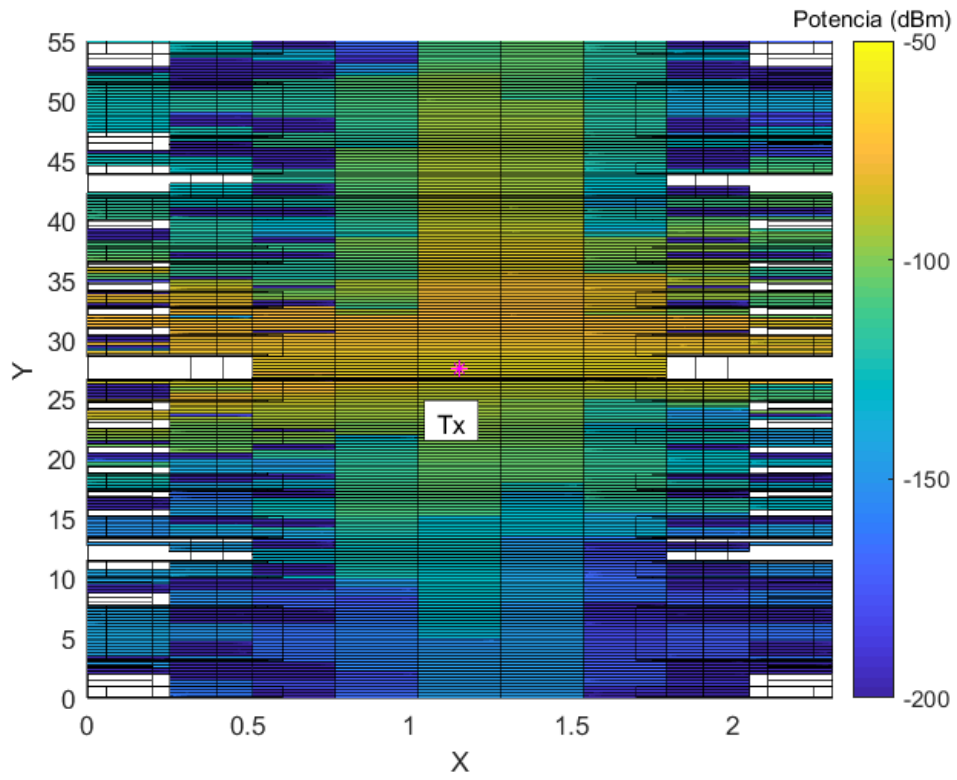


Figura 41. Tx en el centro con 268 personas.

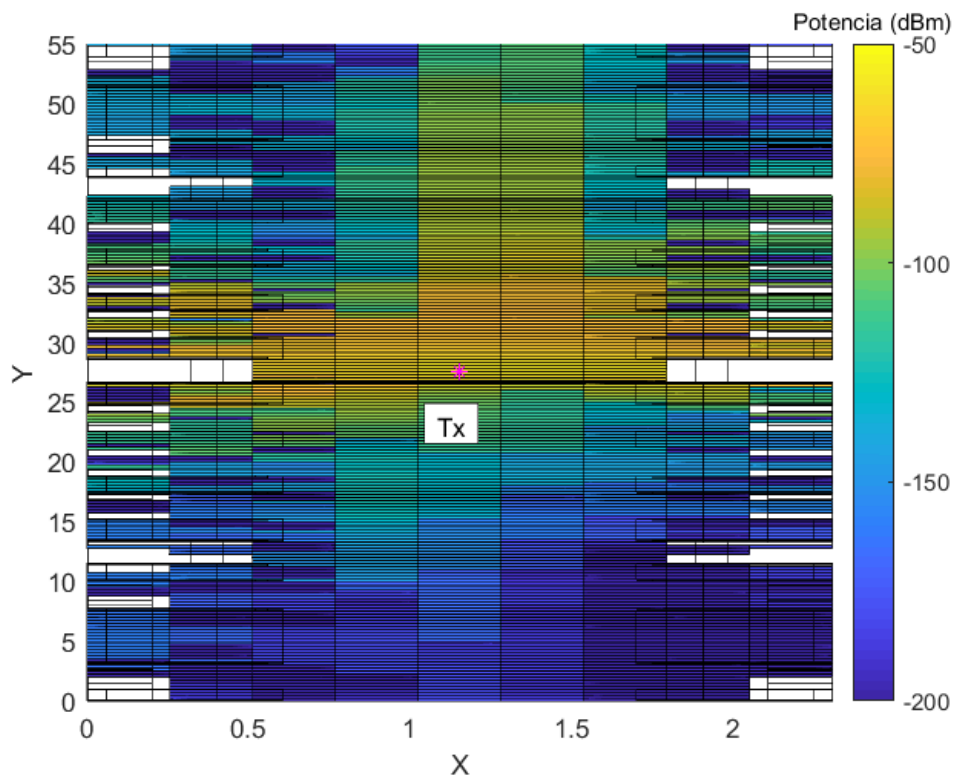


Figura 42. Tx en el centro con 362 personas.

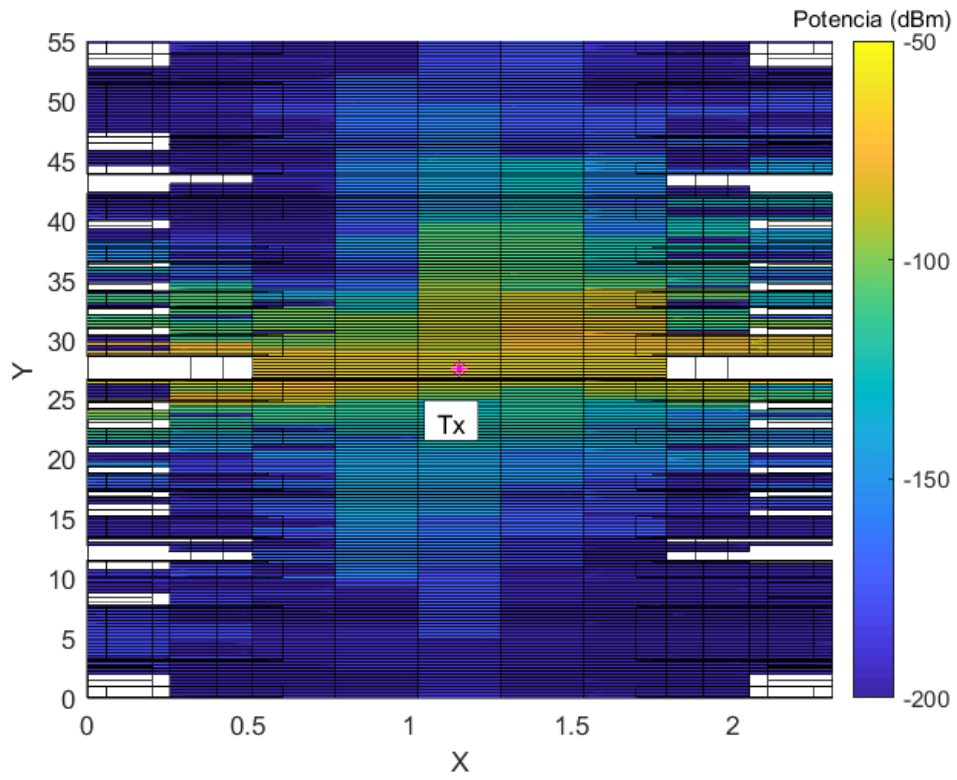


Figura 43. Tx en el centro con 452 personas.

- Análisis de cobertura cuando la capacidad es alta:

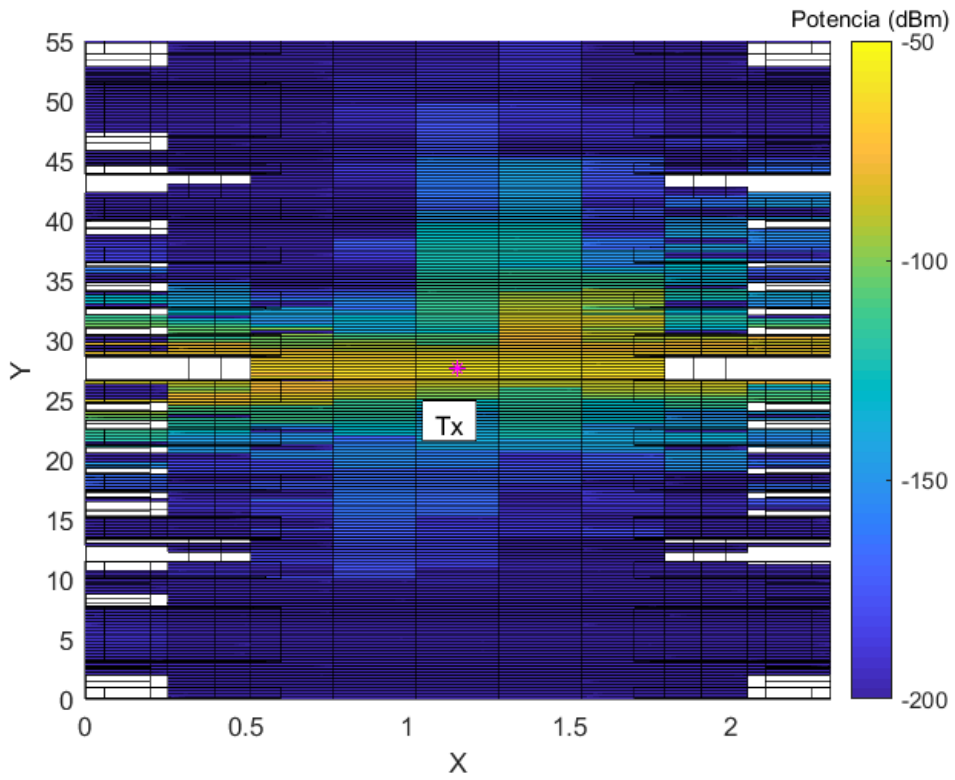


Figura 44. Tx en el centro con 552 personas.

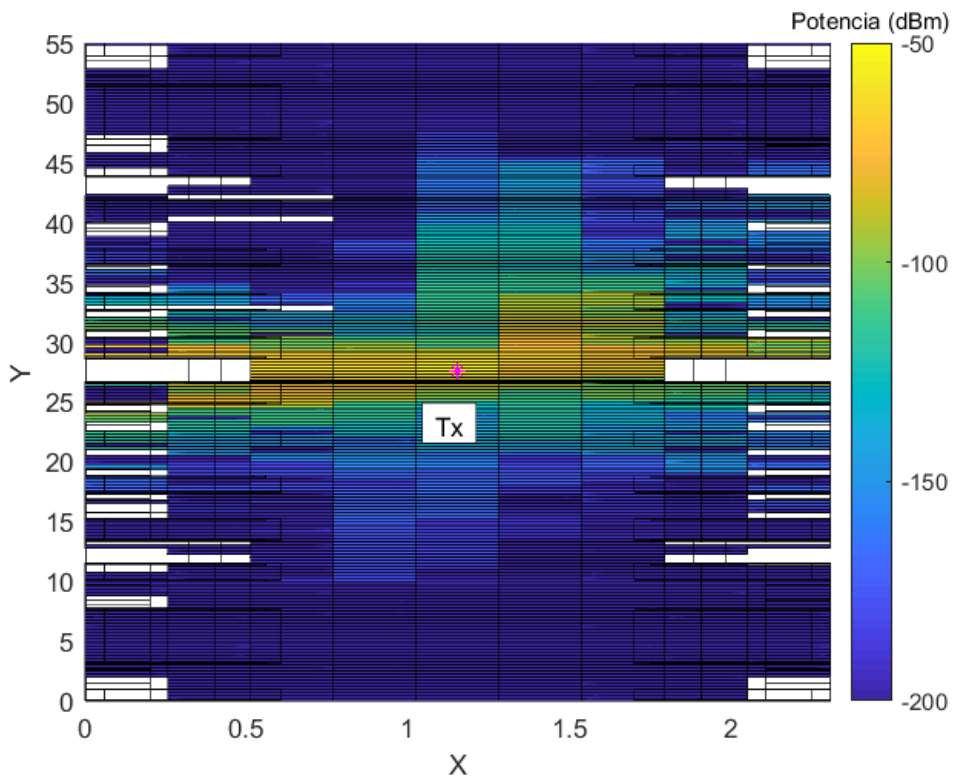


Figura 45. Tx en el centro con 568 personas.

Como vemos, igual que en el caso del transmisor en un extremo, las zonas más alejadas de éste reciben menos potencia. En este caso, la zona central es dónde la señal es mayor, aunque podemos comprobar a partir de la figura 38, cómo hay una disminución de señal en la zona de los asientos cercanos al transmisor debido, de nuevo, a todos los elementos que influyen en ella.

Ahora, veamos las diferencias de potencia obtenidas entre el convoy sin personas y los diferentes escenarios de ocupación.

- Diferencias de potencia cuando la capacidad es baja:

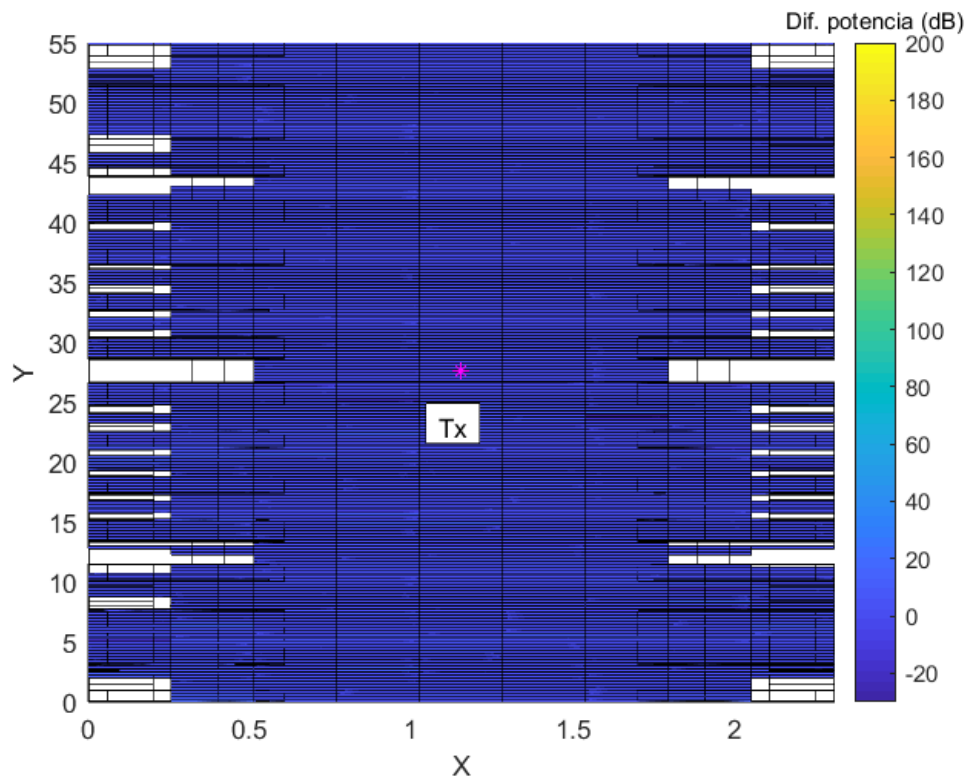


Figura 46. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 23 personas.

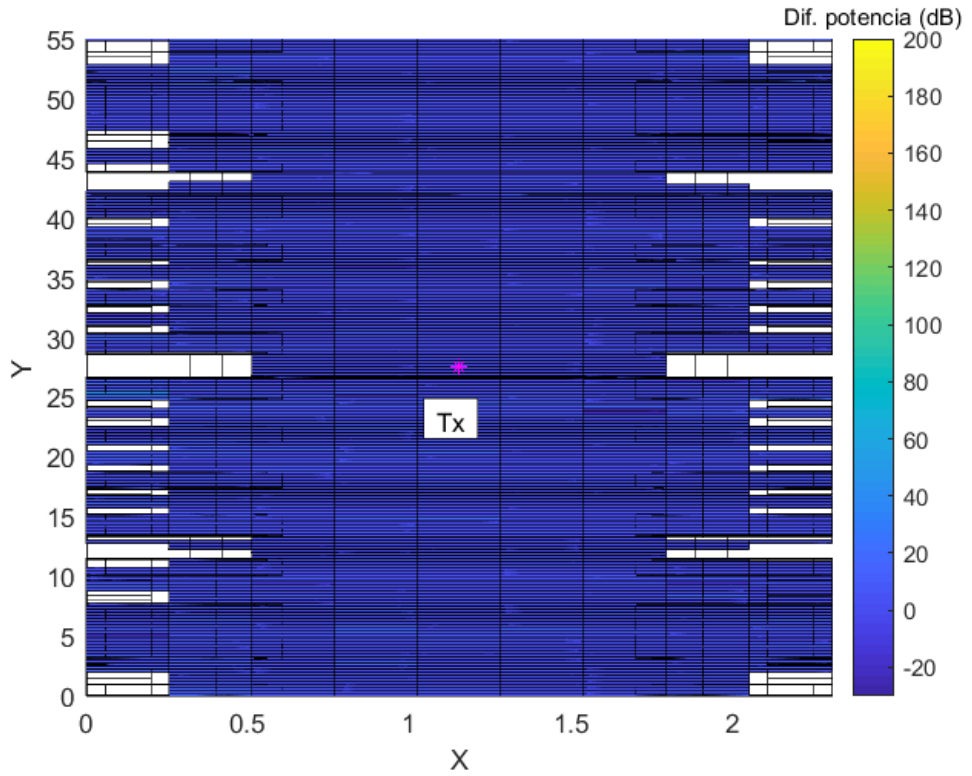


Figura 47. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 58 personas.

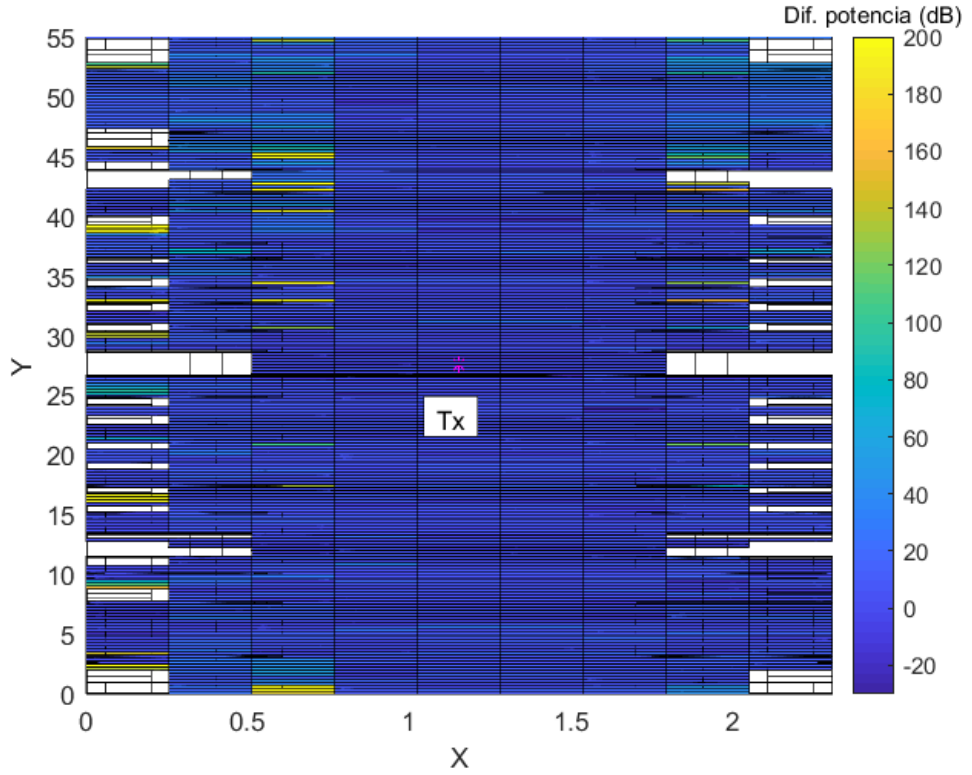


Figura 48. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 105 personas.

- Diferencias de potencia cuando la capacidad es media:

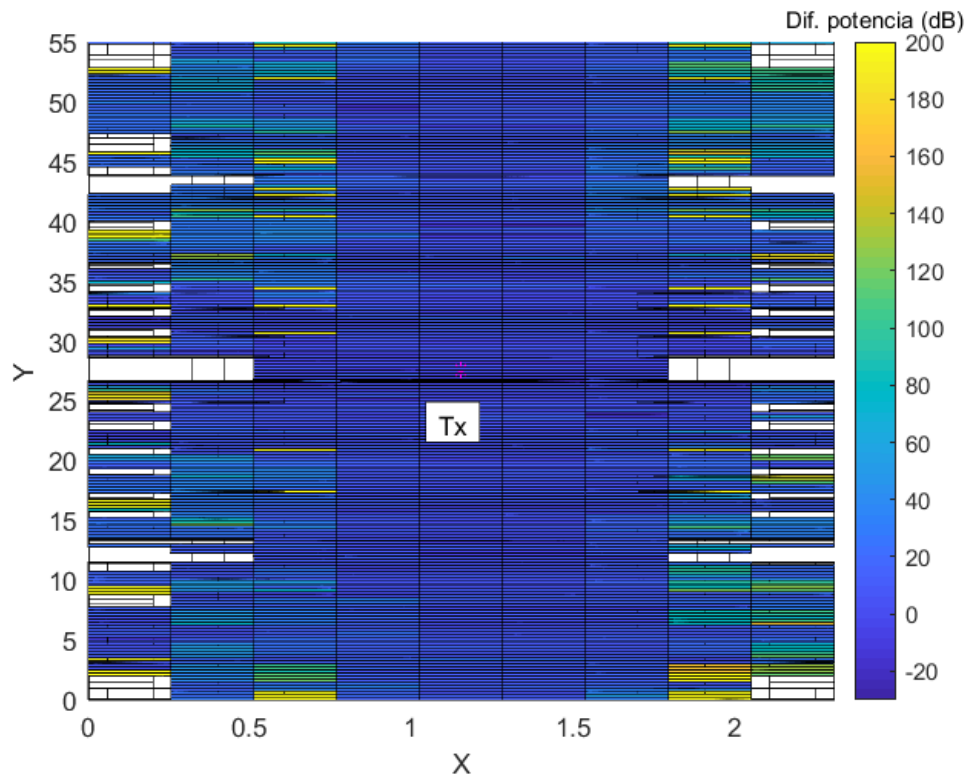


Figura 49. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 187 personas.

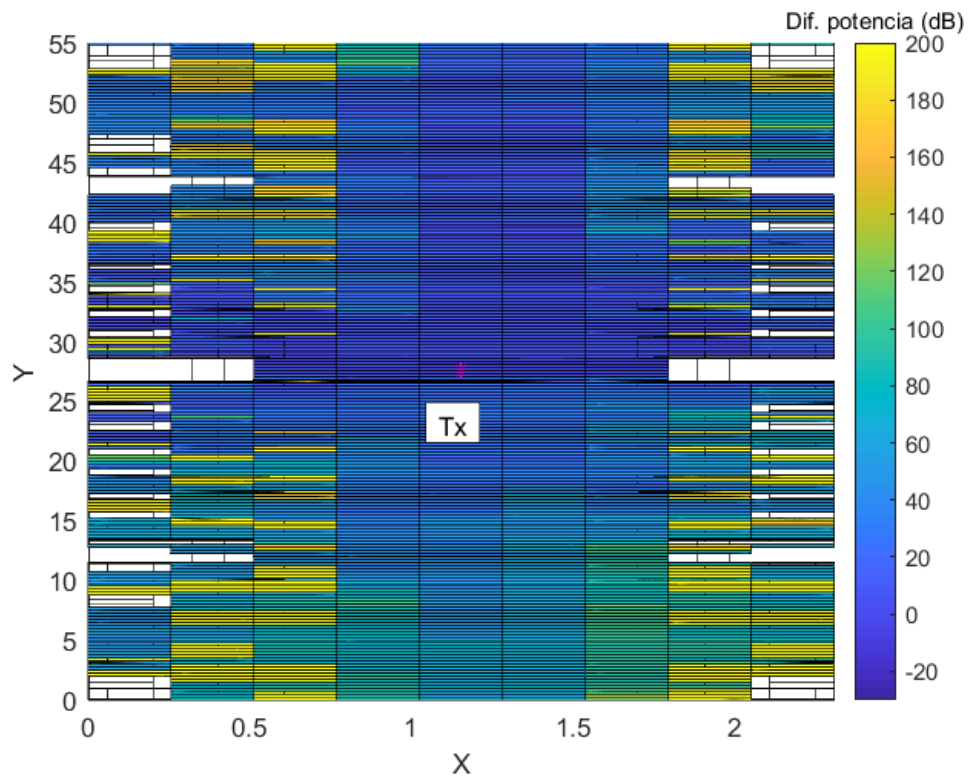


Figura 50. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 268 personas.

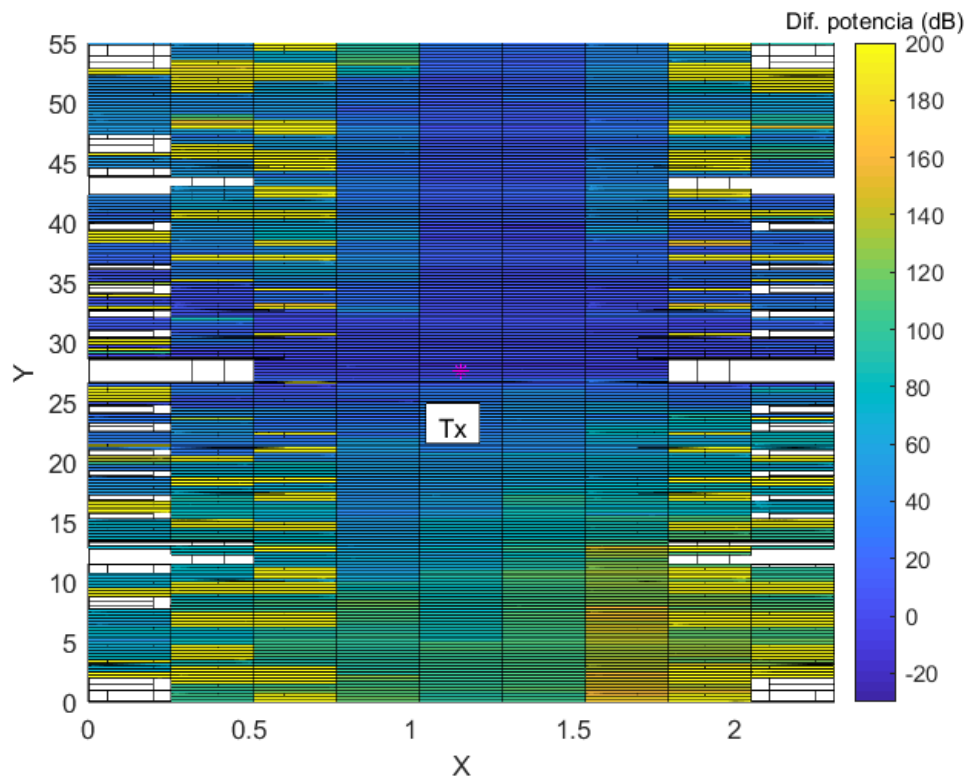


Figura 51. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 362 personas.

- Diferencias de potencia cuando la capacidad es alta:

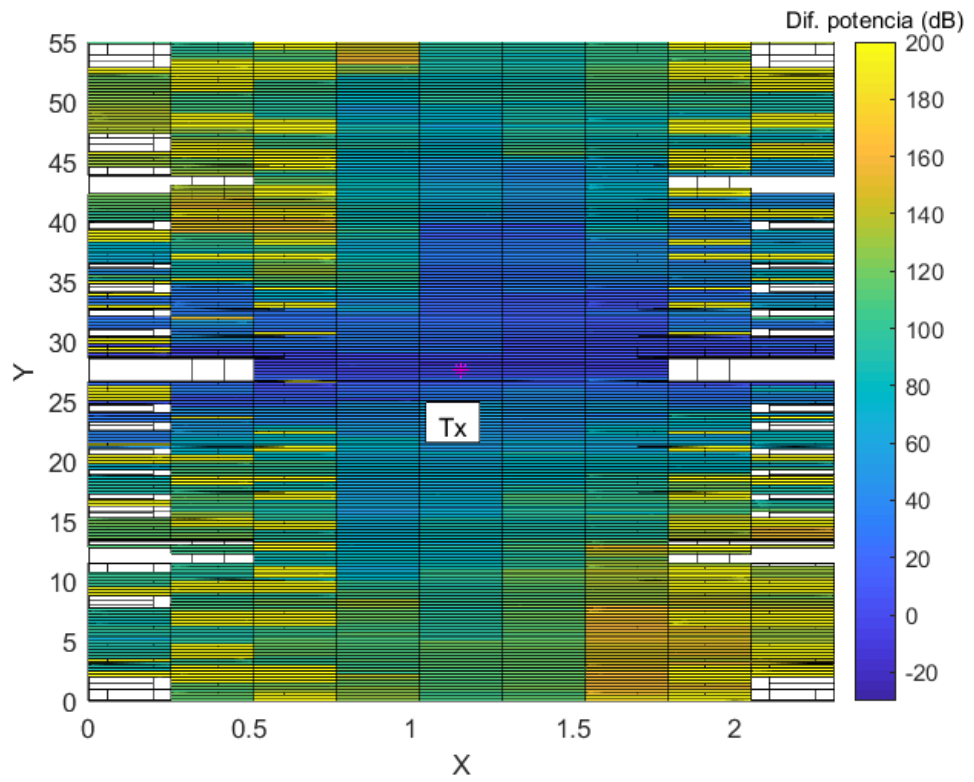


Figura 52. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 452 personas.

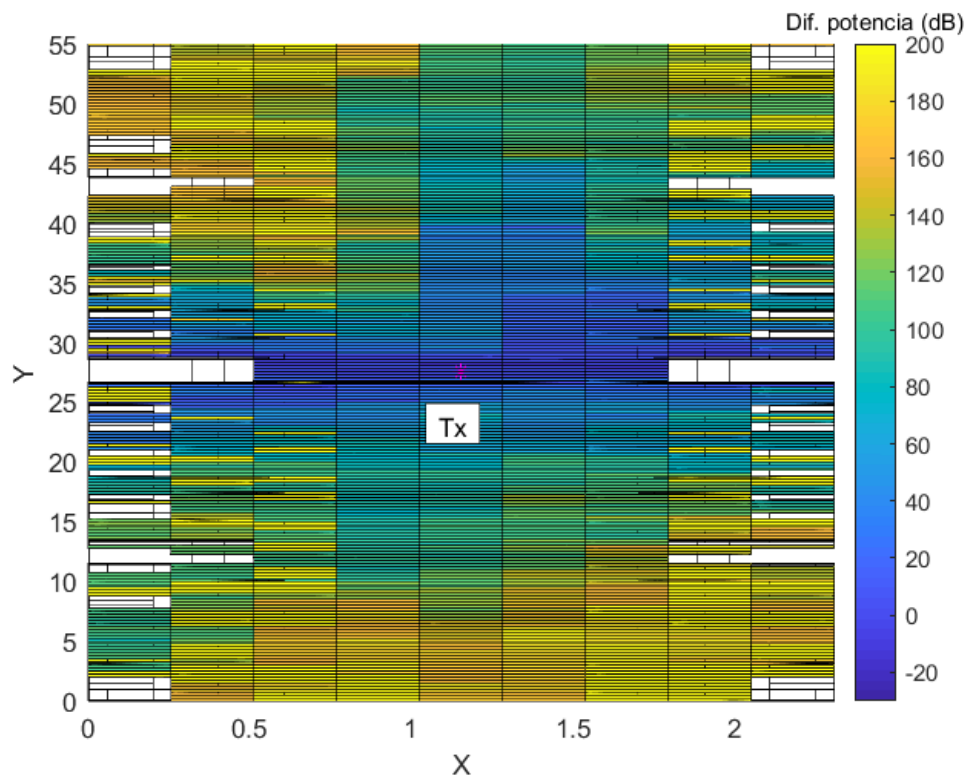


Figura 53. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 552 personas.

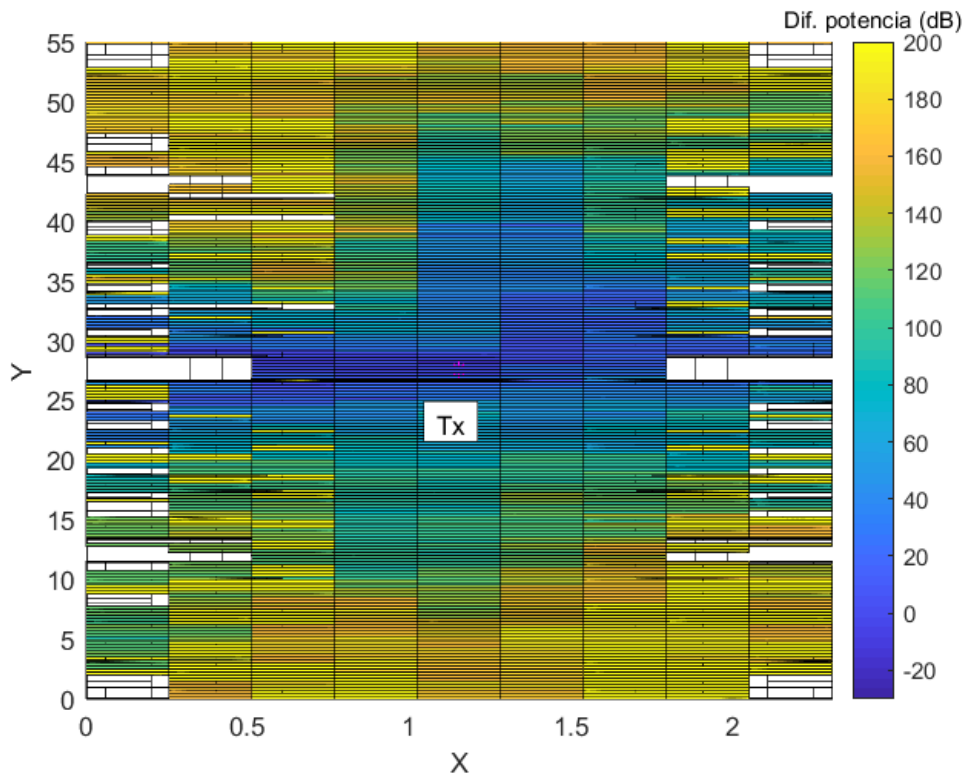


Figura 54. Diferencia entre la potencia con el convoy vacío y la potencia con 568 personas.

Como vemos, igual que en el caso del transmisor en un extremo, las zonas más alejadas de éste reciben menos potencia, así como en las zonas de los asientos dónde hay más elementos que repercuten en la señal. También se puede ver la diferencia entre la figura 46 y la figura 54, dónde, de nuevo, se comprueba la disminución de potencia con el aumento de la capacidad dentro del convoy debido a las pérdidas por bloqueo humano.

Cabe destacar que en algunos puntos podemos comprobar que la diferencia es negativa, es decir, en esas zonas la potencia cuando hay personas es mayor que cuando está el convoy vacío. Esto sucede ya que se produce una suma constructiva de componentes del campo eléctrico debido a las reflexiones en esos puntos, lo que hace que haya una ganancia de potencia mucho mayor.

4. Conclusiones.

En conclusión, el estudio de la cobertura con el Trazador de Rayos 3D ha proporcionado una representación detallada y precisa de la propagación de la radiación electromagnética en el entorno específico del convoy de metro. Uno de los aspectos cruciales que hemos considerado es el fenómeno del bloqueo humano de la señal. Este fenómeno, como se ha visto, ocurre cuando los cuerpos humanos dentro del convoy actúan como obstáculos para las ondas electromagnéticas, lo que puede provocar una atenuación significativa de la señal en ciertas áreas del tren, tal y cómo se puede comprobar en los resultados obtenidos en este trabajo.

Se ha demostrado que la presencia de pasajeros dentro del convoy obstaculiza la propagación de la señal, especialmente cuando la capacidad dentro de éste aumenta, lo que provoca que la potencia disminuya. Además, se puede comprobar visualmente cómo influyen en la intensidad de la señal tanto la distancia del transmisor como las diferentes estructuras metálicas del tren, como barandillas y puertas, lo que puede contribuir tanto al bloqueo como a la atenuación de la señal.

La comprensión de cómo el bloqueo humano afecta a la cobertura en las frecuencias del 5G en un convoy de metro sirve para la planificación y la optimización efectivas de las redes de comunicaciones. Nos permite identificar áreas problemáticas donde la señal puede ser débil o interrumpida, lo que puede ayudar a diseñar estratégicamente infraestructuras de red y colocar los puntos de acceso de manera óptima para garantizar una cobertura confiable y uniforme en todo el convoy.

En resumen, el análisis detallado proporcionado por el Trazador de Rayos 3D, incluyendo la consideración del bloqueo humano de la señal, es fundamental para comprender y abordar los desafíos respecto a la cobertura en entornos complejos como un convoy de metro. Esto nos permite tomar decisiones informadas para desarrollar soluciones efectivas que mejoren la calidad y la confiabilidad de las señales 5G en estos entornos críticos de transporte público.

Referencias.

[1] Millimeter-Wave Human Blockage at 73 GHz with a Simple Double Knife-Edge Diffraction Model and Extension for Directional Antennas. *George R. MacCartney, Jr., Student Member, IEEE, Sijia Deng, Student Member, IEEE, Shu Sun, Student Member, IEEE, Theodore S. Rappaport, Fellow, IEEE*

[2] P. Tang, "Path Loss in Metro Train in mm-wave Band with Consideration of Human Body Effect," *2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2021, pp. 1010-1014, doi: 10.1109/ICCC54389.2021.9674629.*

[3] <https://www.fgv.es/conoce-fgv/fgv-en-cifras/metrovalencia-en-cifras/parque-movil/>