



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CENTRO DE POSGRADOS

Maestría de Investigación en Electrónica

Análisis del Factor de Reducción de Interferencia de sistemas MIMO masivos con arreglos de gran apertura

Autor: Miguel Ángel Castillo Marcillo

Director: Ing. Carlos Daniel Altamirano Carrillo,
PhD.

6 de junio de 2023



AGENDA



1.- INTRODUCCIÓN



2.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA



3.- SIMULACIÓN Y RESULTADOS



4.- PROPUESTA ARREGLOS ULAA

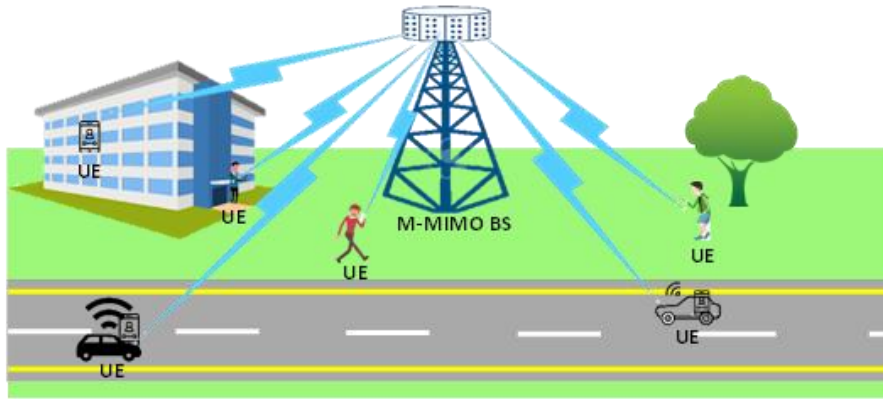


5.- CONCLUSIONES

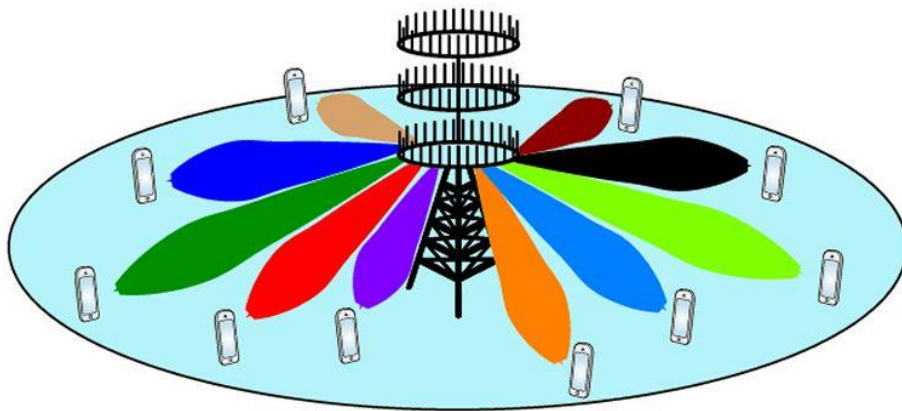


Introducción - Antecedentes

MIMO MASIVO = TRÁFICO MASIVO DE DATOS Y USUARIOS CONECTADO



- Eficiencia espectral
- Eficiencia energética
- Velocidad de datos
- Robusto contra interferencia

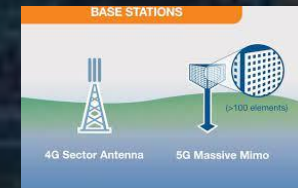


DESAFÍOS EN SISTEMAS M-MIMO

**NO ES POSIBLE
TENER UN
NÚMERO INFINITO
DE ANTENAS**



**HARDWARE –
TAMAÑO Y
UBICACIÓN**



**CONSUMO
ENERGÉTICO**



**GESTIÓN
EFICIENTE DE LA
INTERFERENCIA**





IMPORTANCIA TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

01



**AUMENTAR LA
CAPACIDAD
DEL SISTEMA**



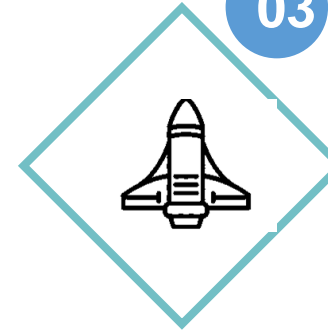
02



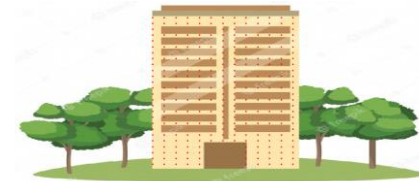
**FIABILIDAD -
DESPLIEGUE
ADECUADO DE
ANTENAS**



03



**HERRAMIENTA
DE
SIMULACIÓN**



Objetivo General

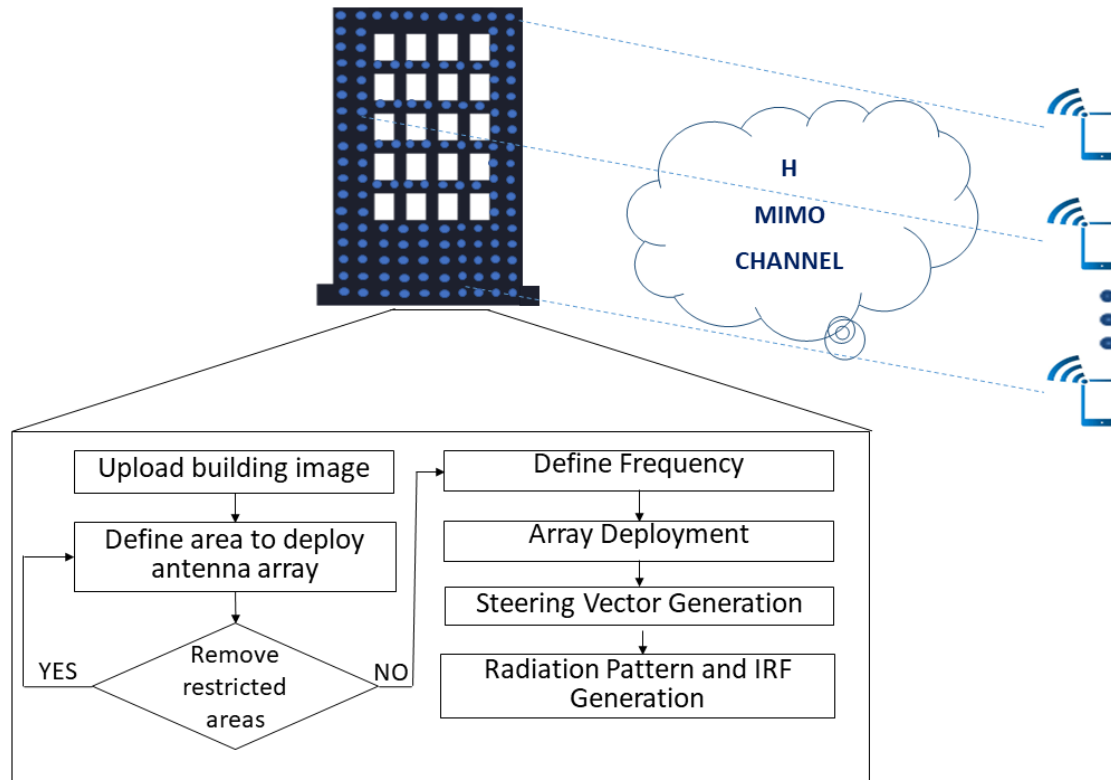
Analizar el Factor de Reducción de Interferencia de arreglos de antenas y sus características como arreglos de antenas extremadamente grandes (gran apertura) en M-MIMO.

Objetivos Específicos

- Identificar las capacidades y limitaciones de los arreglos geométricos ULA, UPA y UCA.
- Determinar las consideraciones técnicas requeridas para arreglos geométricos y arreglos de gran apertura que permita disponer de una solución favorable para sistemas MIMO masivo.
- Desplegar un gran número de antenas en las fachadas de los edificios a fin de analizar el Factor de Reducción de Interferencia IRF en escenarios prácticos.



PROPUESTA GENERAL



Fundamento teórico



Fundamento teórico



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



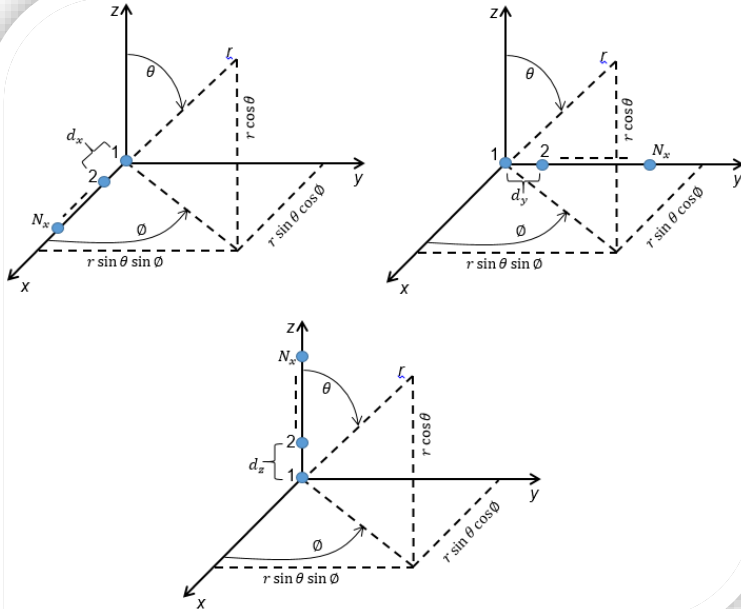
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



ARREGLOS DE ANTENAS UNIFORMES

ULA

Uniform Linear Array.- Arreglo de antenas en línea recta equidistante con una distancia igual entre elementos.



$$\Phi_{k,x} = 2\pi\Delta_x \cos \phi_k \sin \theta_k$$

$$\Phi_{k,y} = 2\pi\Delta_y \sin \phi_k \sin \theta_k$$

$$\Phi_{k,z} = 2\pi\Delta_z \cos \theta_k$$

$$\mathbf{h}_{k,x} = [1 \exp[-i\Phi_{k,x}] \dots \exp[-i(N_x - 1)\Phi_{k,x}]]^T$$

$$\mathbf{h}_{k,y} = [1 \exp[-i\Phi_{k,y}] \dots \exp[-i(N_y - 1)\Phi_{k,y}]]^T$$

$$\mathbf{h}_{k,z} = [1 \exp[-i\Phi_{k,z}] \dots \exp[-i(N_z - 1)\Phi_{k,z}]]^T$$



(d) Antenna deployment for $N = 300$

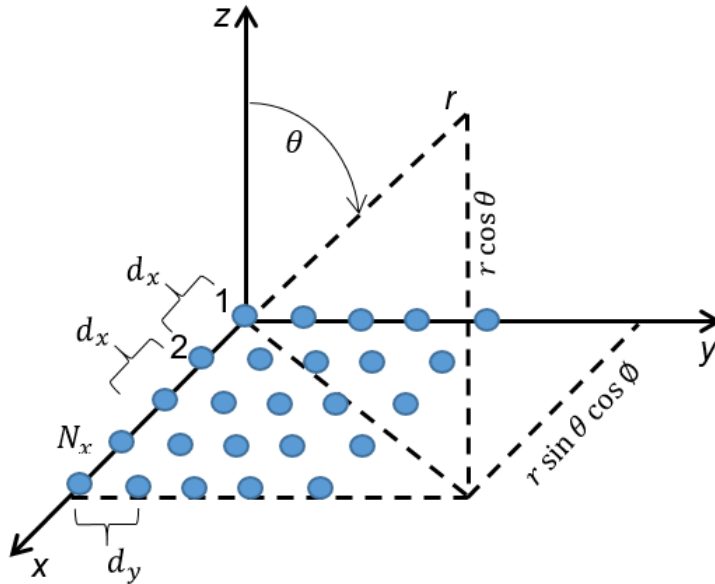




ARREGLOS DE ANTENAS UNIFORMES

UPA

Uniform planar Array.- Extensión de un arreglo lineal dispuestos en un plano y separados a una distancia uniforme entre sí .



$$\mathbf{h}_{k,xy} = \mathbf{h}_{k,x} \otimes \mathbf{h}_{k,y}$$

$$\mathbf{h}_{k,xz} = \mathbf{h}_{k,x} \otimes \mathbf{h}_{k,z}$$

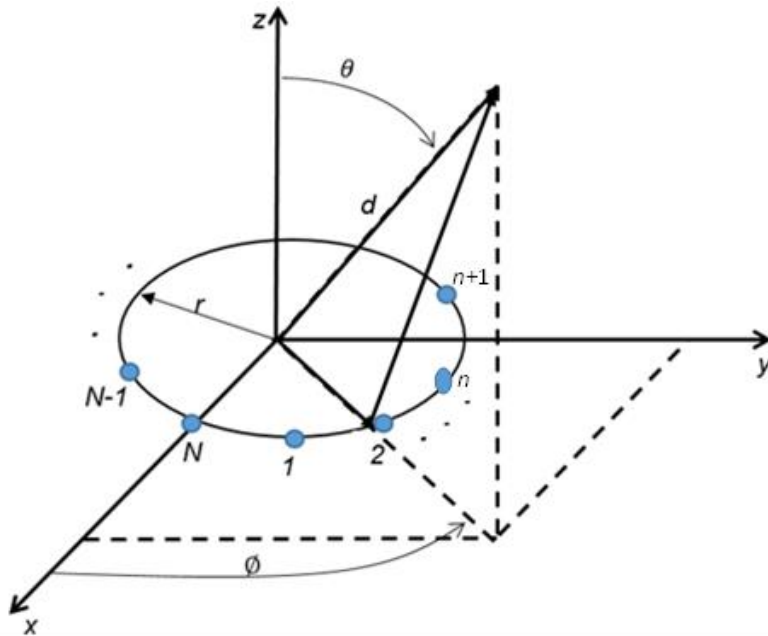
$$\mathbf{h}_{k,yz} = \mathbf{h}_{k,y} \otimes \mathbf{h}_{k,z}$$





ARREGLOS DE ANTENAS UNIFORMES

UCA



Uniform circular Array.- Antenas colocadas en un patrón circular uniforme

$$\mathbf{h}(\phi) = [\exp^{jk\rho\cos(\phi_0)}, \exp^{jk\rho\cos(\phi_0-\phi_s)}, \dots, \exp^{jk\rho\cos(\phi_0-(N-1)\phi_s)}]^T$$

Fundamento teórico



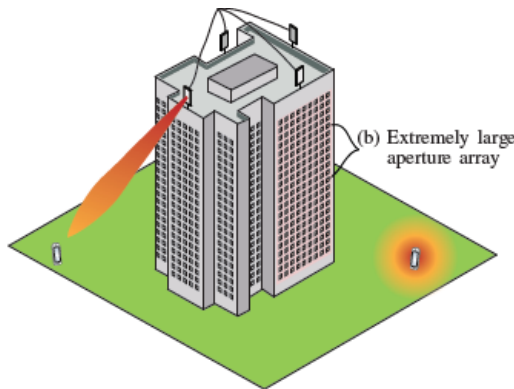
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



ARREGLOS DE GRAN APERTURA

- ✓ **M-MIMO** en el rango de las decenas a centenas elementos de antenas
- ✓ **Mejor desempeño del sistema en términos de alcance, velocidad y capacidad de usuarios conectados simultáneamente**

EXTREMELY LARGE APERTURE ARRAYS (ELAA)



Despliegue de cientos o miles de antenas, aprovechando las áreas de una edificación:

- **Reduce aún más las interferencias entre usuarios**
- **Pérdida de propagación**
- **Aumenta la eficiencia espectral**



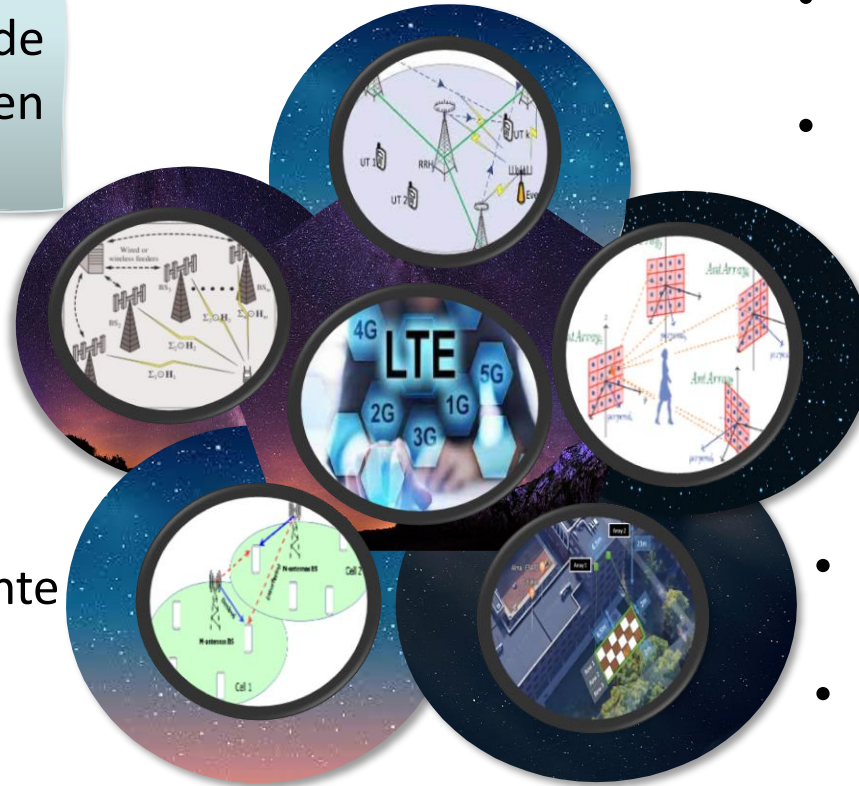
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



M-MIMO DISTRIBUIDO

Gran número de antenas distribuidas en múltiples estaciones

Áreas densamente pobladas

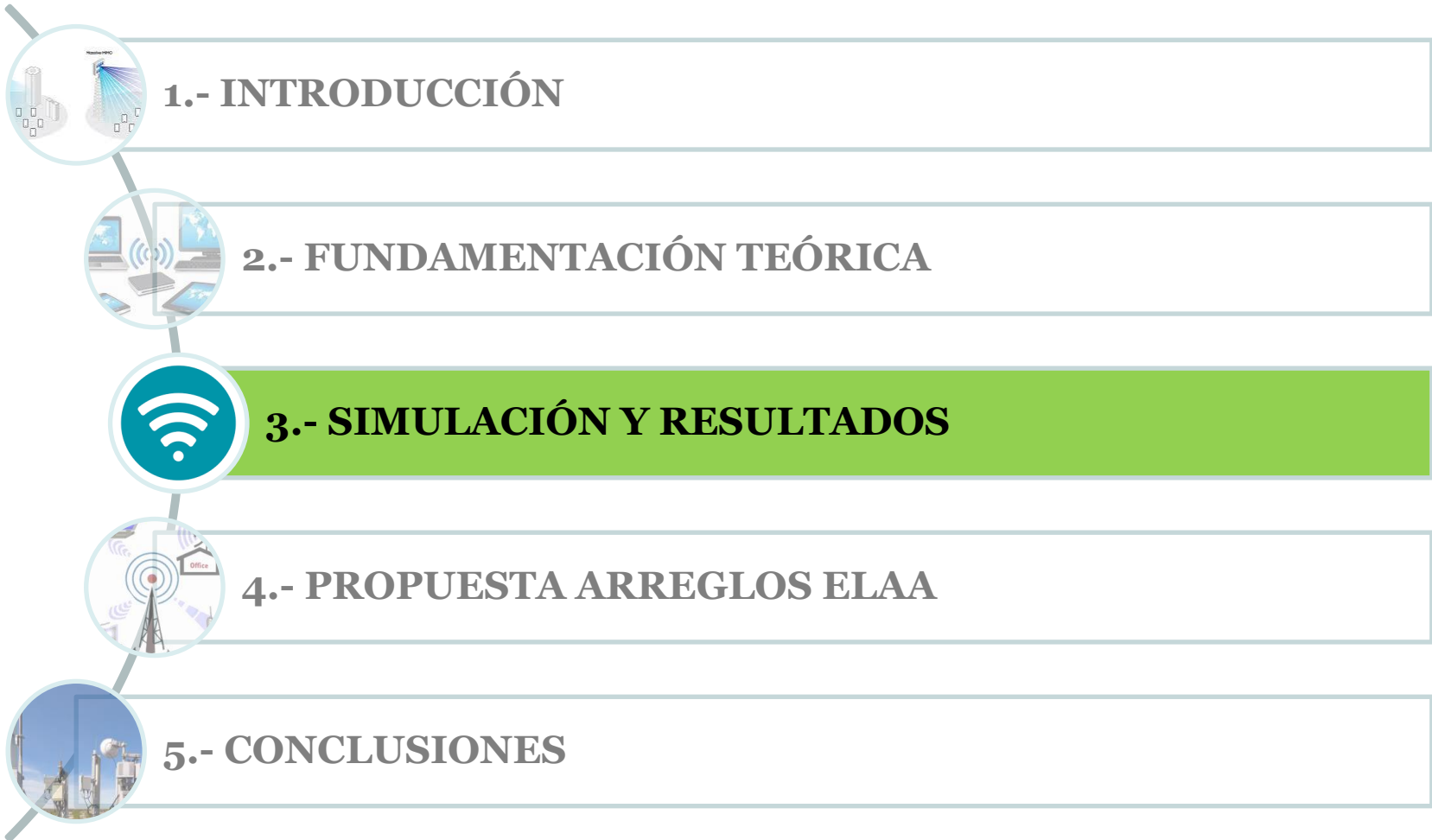


- Mejora aún más la eficiencia espectral
- Incrementa el área de cobertura

- Reduce la interferencia
- Mejora la calidad de la señal




AGENDA




Desarrollo e Implementación




SIMULACIÓN Y RESULTADOS

 **Análisis de los arreglos de gran apertura ULA, UPA y UCA**

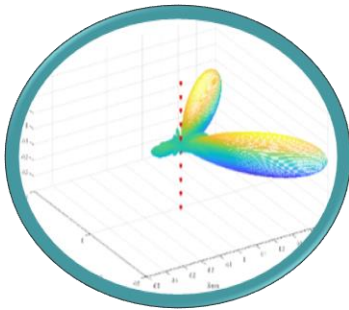
01

 **Propagación favorable de los arreglos para M-MIMO**

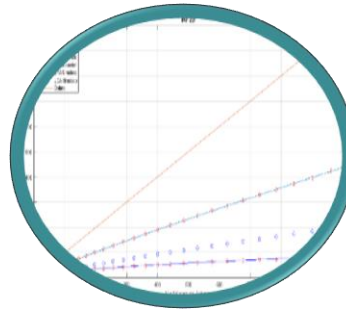
02

 **Implementación y análisis del IRF en escenarios prácticos**

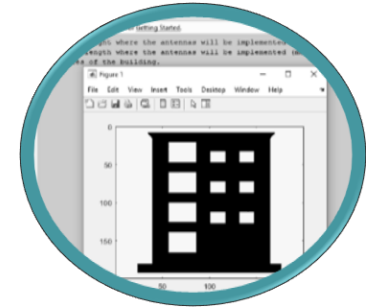
03



PATRÓN DE RADIACIÓN



IRF



IRF ELAA

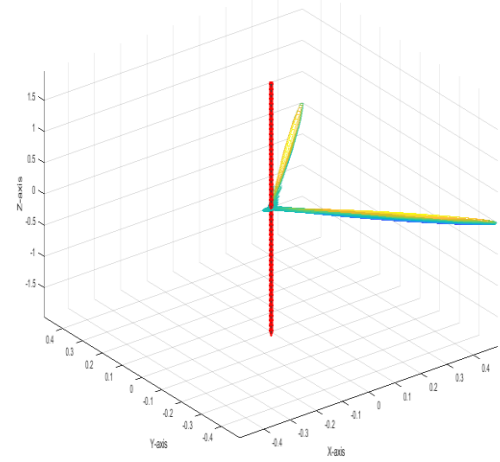
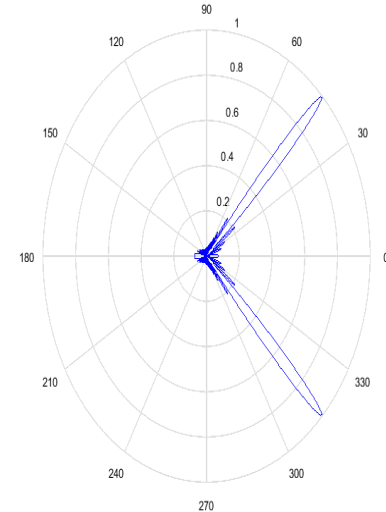
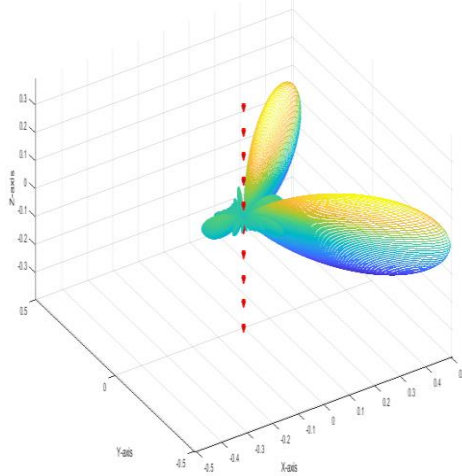
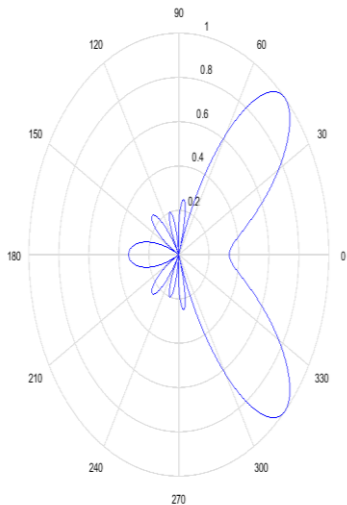


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA ULA

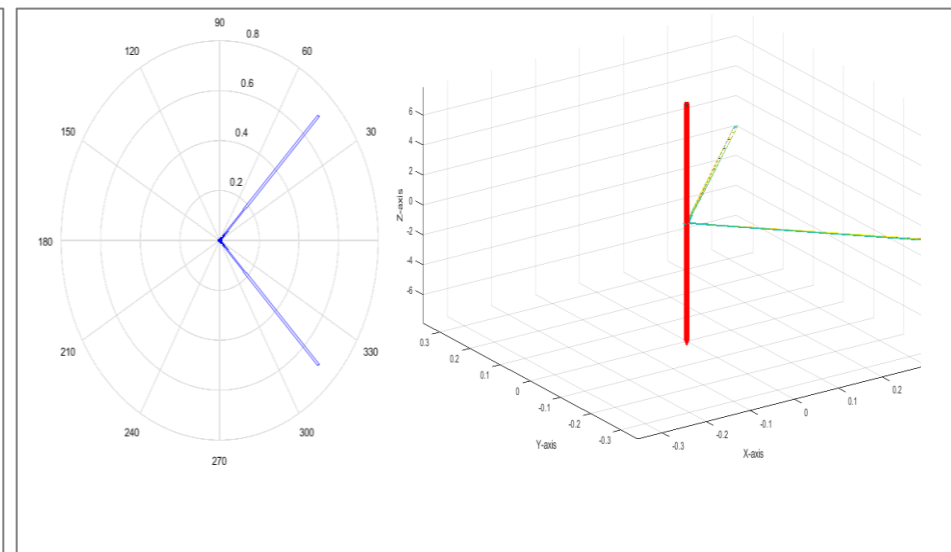
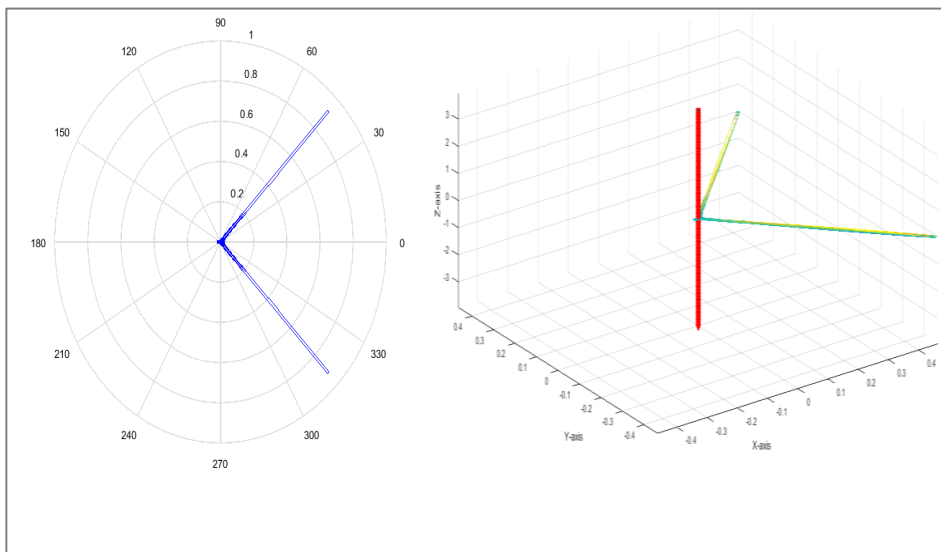
DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	ÁNGULO DE ARRIBO
$d = \frac{\lambda}{2}$	N = 10 N = 50	$\phi = \frac{\pi}{4}$





1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA ULA

DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	ÁNGULO DE ARRIBO
$d = \frac{\lambda}{2}$	N = 100 N = 200	$\phi = \frac{\pi}{4}$





1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA ULA

RESULTADOS

Radiación no deseada, reduce la eficiencia. Dificulta la directividad

Aparecimiento lóbulo reflejado con la misma ganancia

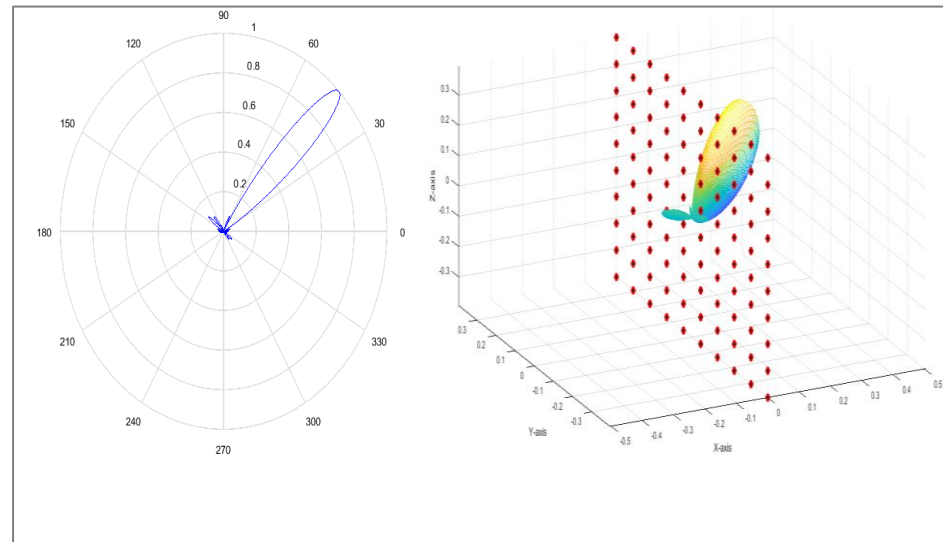
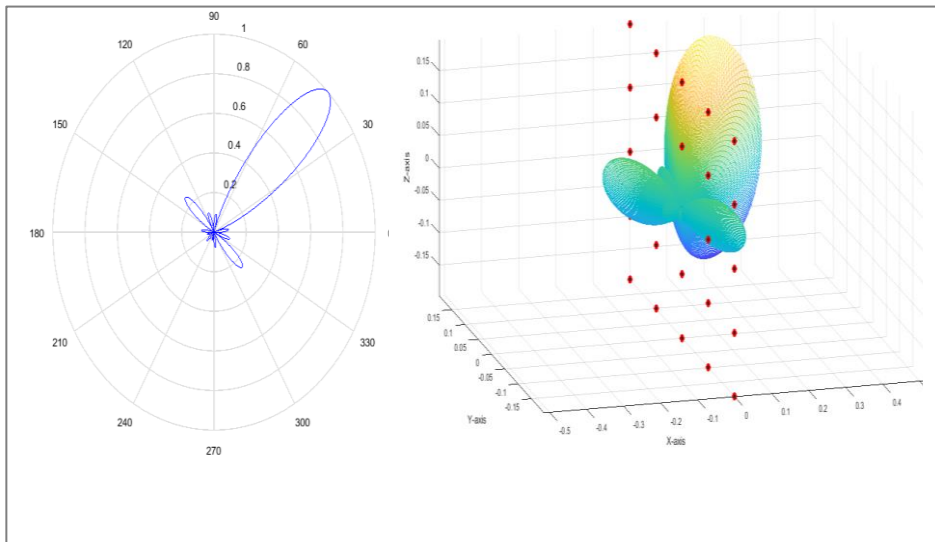


Lóbulo principal más estrecho a medida que aumenta el número de antenas



1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA UPA

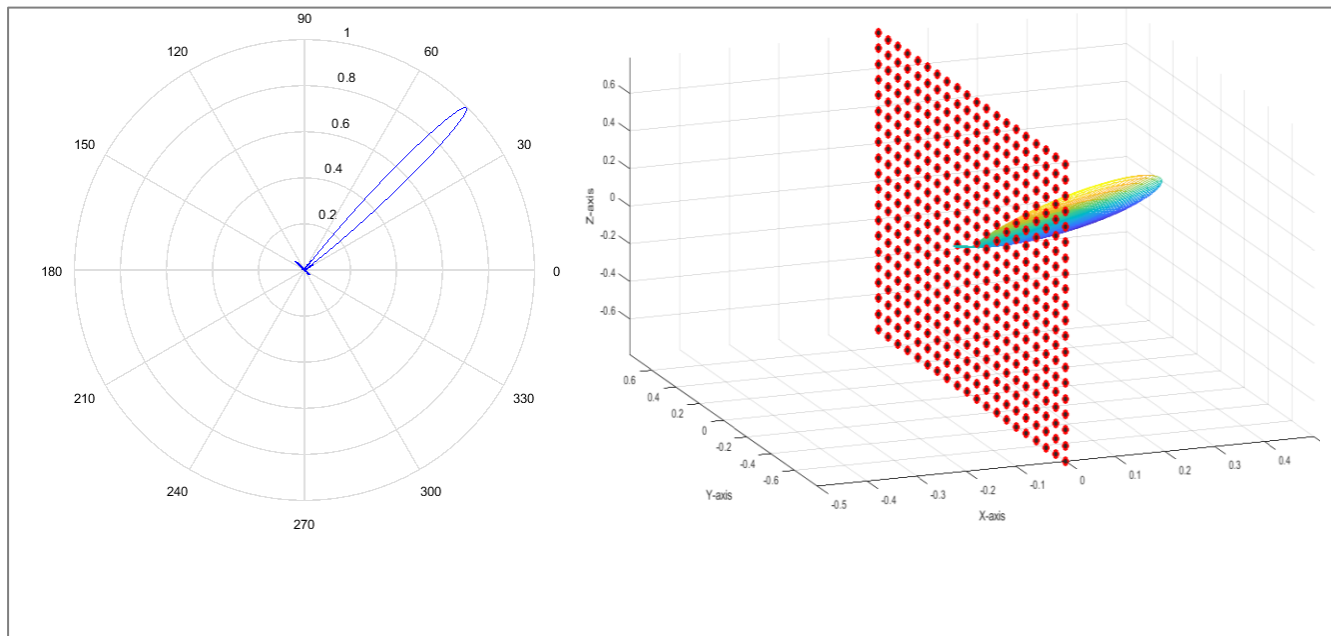
DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	ÁNGULO DE ARRIBO
$d = \frac{\lambda}{2}$	N = 5 X 5 N = 10 X 10	$\phi = \frac{\pi}{4}$





1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA UPA

DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	ÁNGULO DE ARRIBO
$d = \frac{\lambda}{2}$	$N = 20 \times 20$	$\phi = \frac{\pi}{4}$





1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA UPA

RESULTADOS

Radiación más amplia que ULA con misma cantidad antenas

No presenta la misma simetría axial

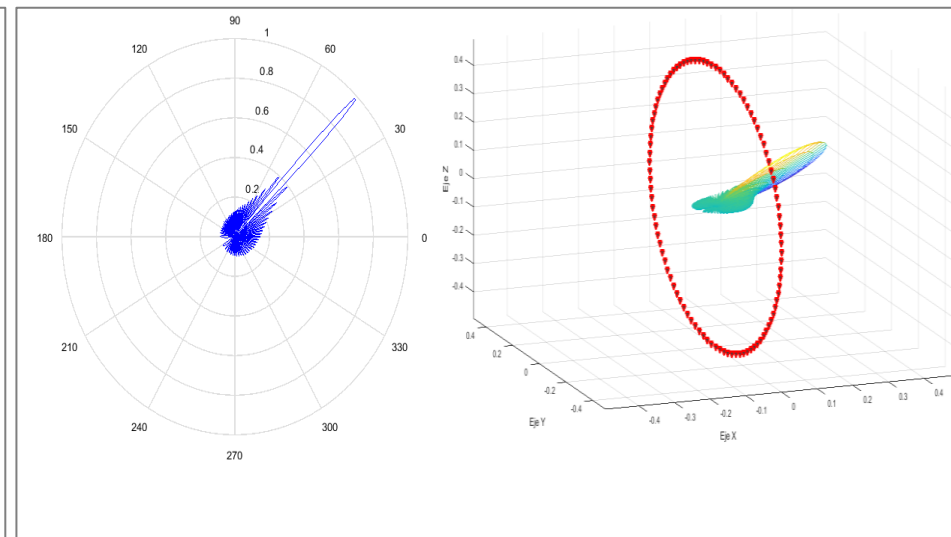
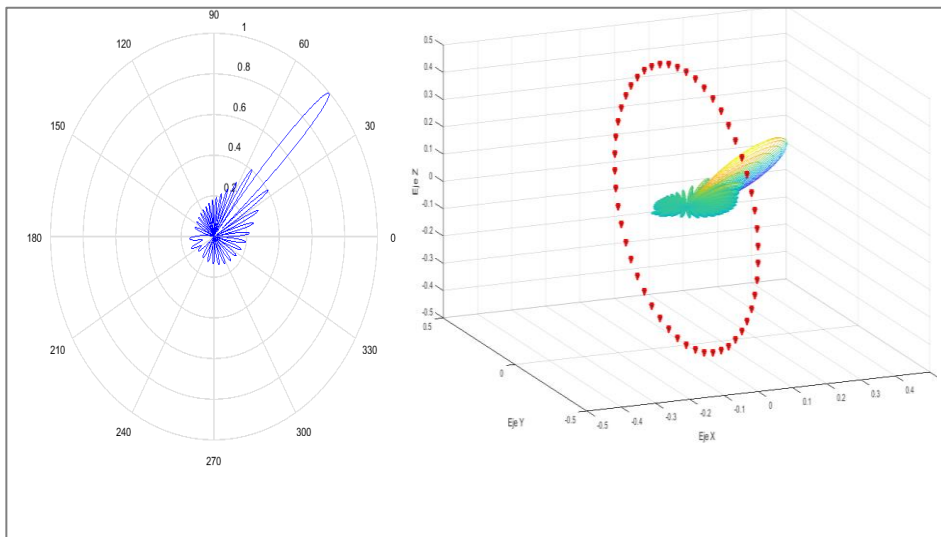


Lóbulo principal más estrecho a medida que aumenta el número de antenas



1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA UCA

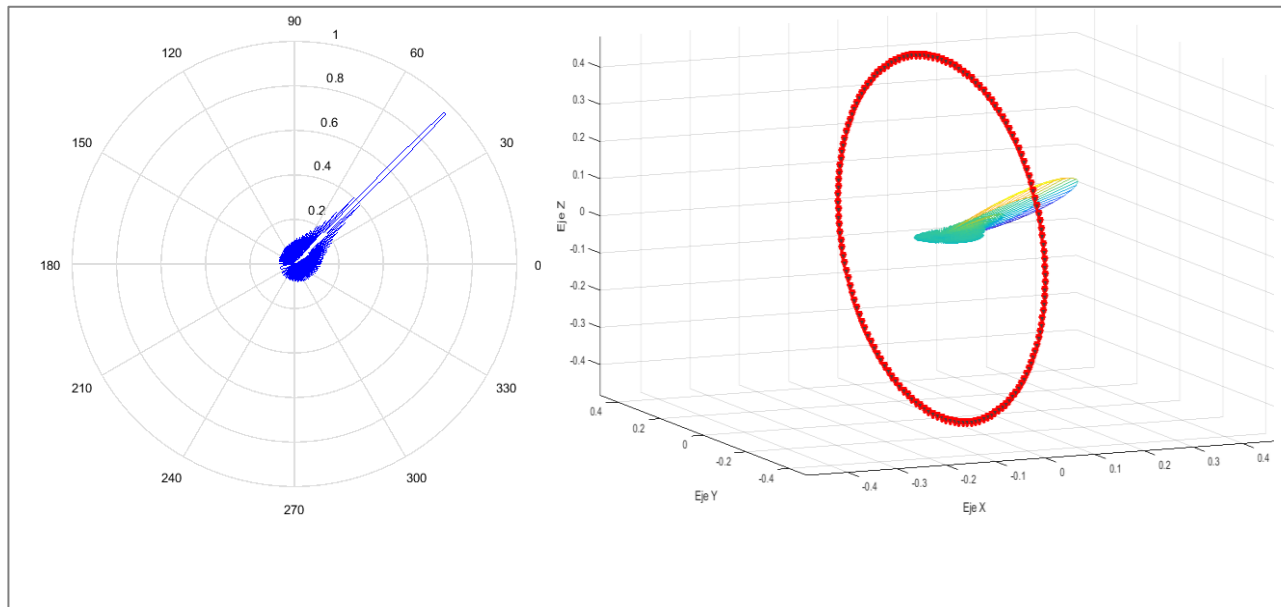
DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	ÁNGULO DE ARRIBO
$d = \frac{\lambda}{2}$	N = 50 N = 100	$\phi = \frac{\pi}{4}$





1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA UCA

DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	ÁNGULO DE ARRIBO
$d = \frac{\lambda}{2}$	$N = 150$	$\phi = \frac{\pi}{4}$





1. ARREGLOS DE GRAN APERTURA UCA

RESULTADOS

Aumenta el número de antenas
disminuye el nivel del módulo principal

No presenta la misma simetría axial



Lóbulo principal más estrecho a medida que aumenta el número de antenas con presencia de lóbulos secundarios



Desarrollo e Implementación



SIMULACIÓN Y RESULTADOS



Análisis de los arreglos de gran apertura ULA, UPA y UCA

01



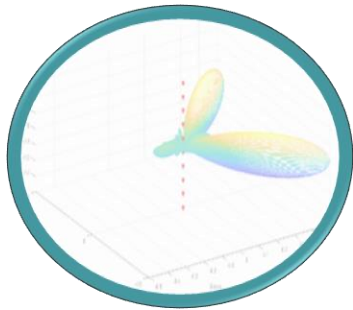
Propagación favorable de los arreglos para M-MIMO

02

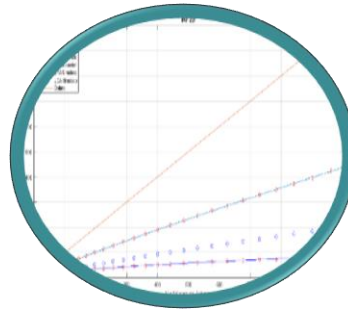


Implementación y análisis del IRF en escenarios prácticos

03



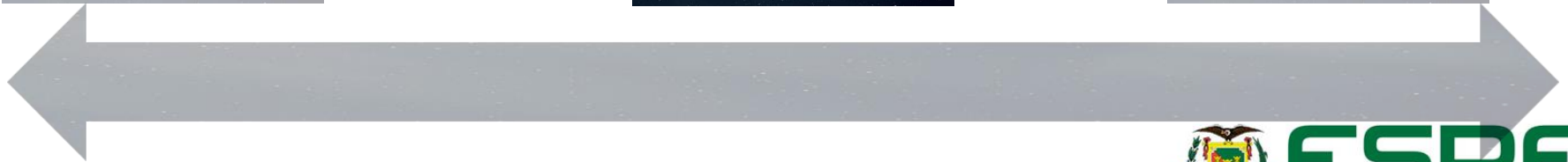
PATRÓN DE RADIACIÓN



IRF



IRF ELAA

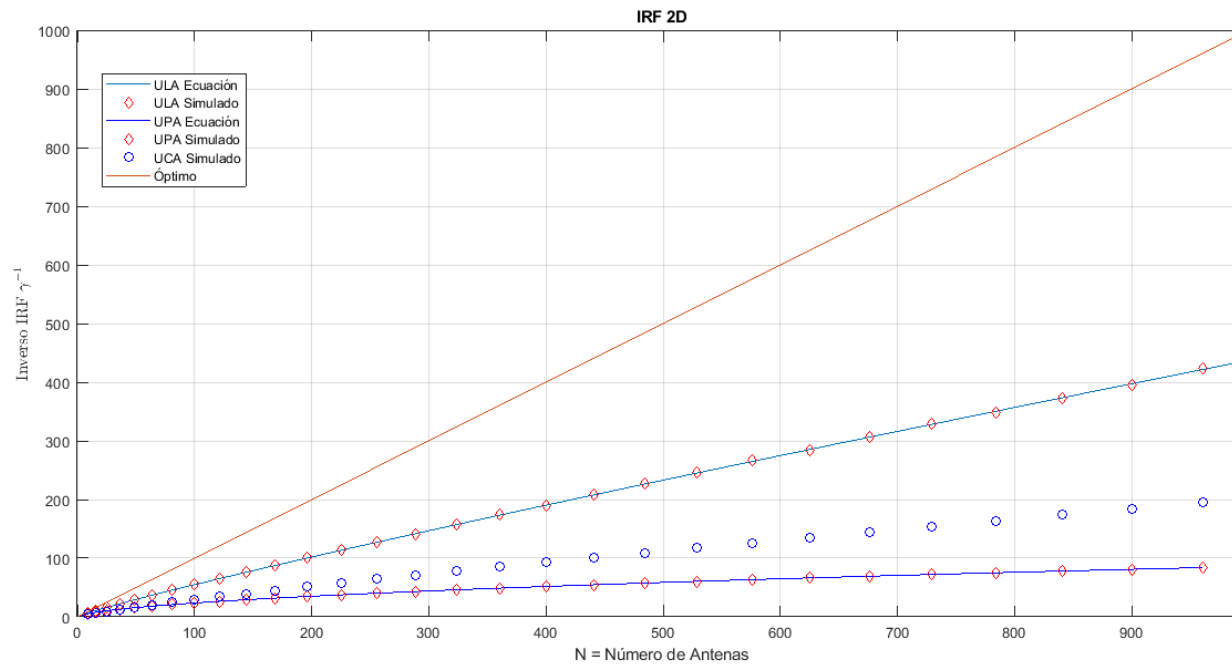


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



2. PROPAGACIÓN FAVORABLE M-MIMO

DIST. ANTENAS	NRO. DE ANTENAS	FRECUENCIA
$d = \frac{\lambda}{2}$	N = 0 a 1000	1,9 GHz





2. PROPAGACIÓN FAVORABLE M-MIMO

RESULTADOS



Desarrollo e Implementación



SIMULACIÓN Y RESULTADOS



Análisis de los arreglos de gran apertura ULA, UPA y UCA

01



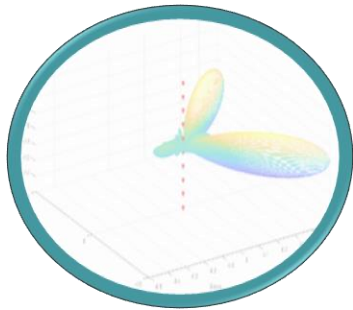
Propagación favorable de los arreglos para M-MIMO

02

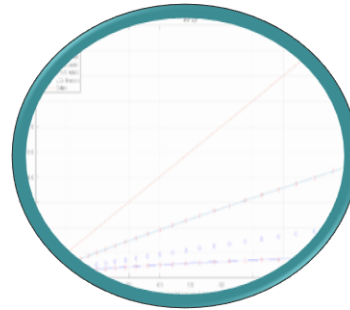


Implementación y análisis del IRF en escenarios prácticos

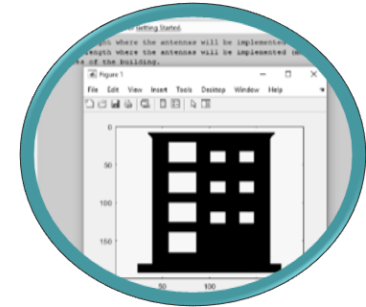
03



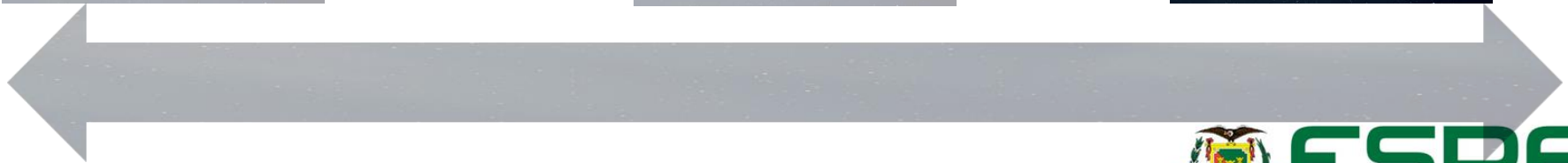
PATRÓN DE RADIACIÓN



IRF



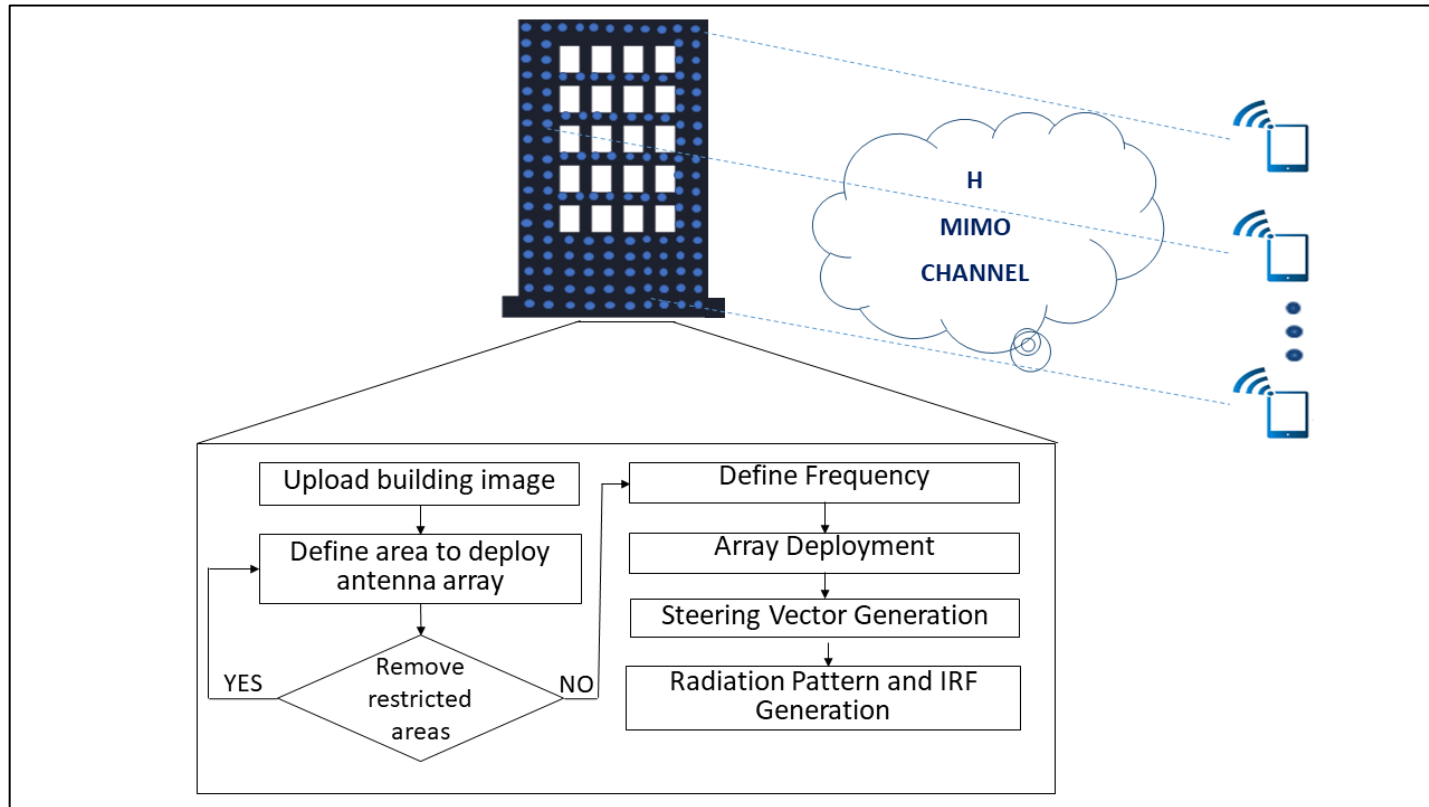
IRF ELAA



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS





3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS

Selección del edificio

Definición del área

Definición de la Fx.

Despliegue antenas

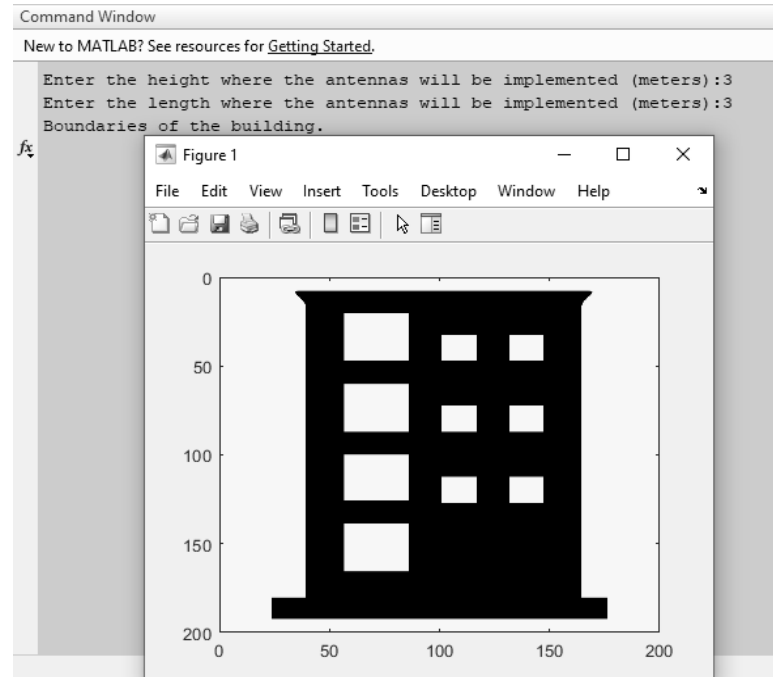
Generación steering vector

PR y IRF

Cargamos archivo .png o .jpeg

Ingresamos la altura y la longitud del edificio

Nueva ventana con el edificio





3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS

Selección del edificio

Definición del área

Definición de la Fx.

Despliegue de antenas

Generación de steering vector

PR y IRF

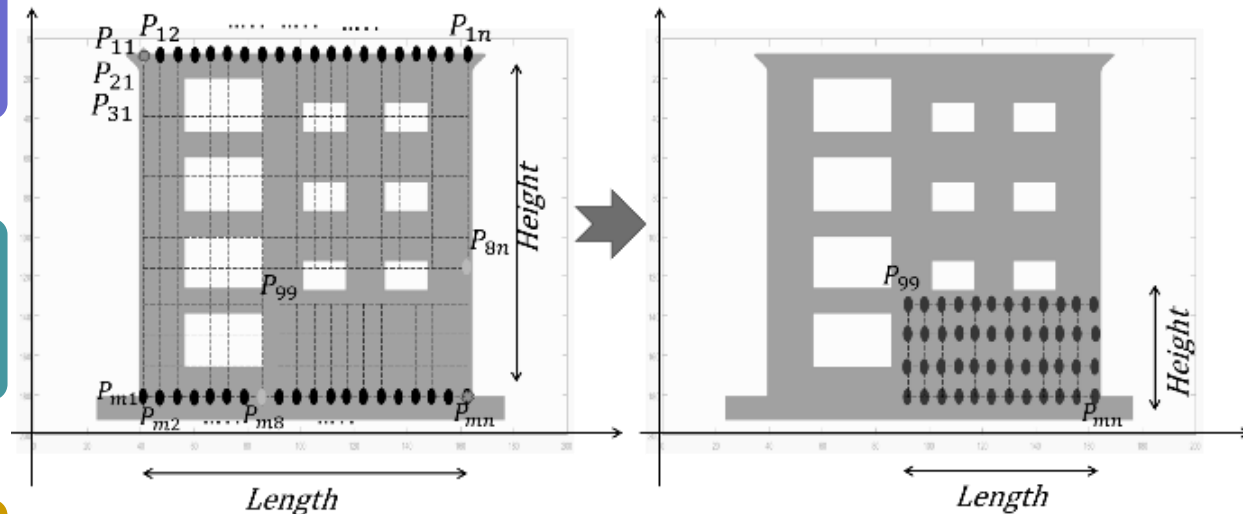
Seleccionamos punto superior e inferior



Condición de seguir eliminando o no



Nueva ventana con el área donde se desplegará las antenas





3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS



**Frecuencia utilizada
1,9 GHz**



**Distancia entre
antenas calculada
7,89 cm**

PARÁMETRO	VALORES
Frecuencia	1,9 GHz
λ_c	15,78 cm
Distancia entre antenas	$\frac{\lambda_c}{2}$
	7,89 cm





3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS

Selección del edificio

Definición del área

Definición de la Fx.

Despliegue antenas

Generación steering vector

PR y IRF

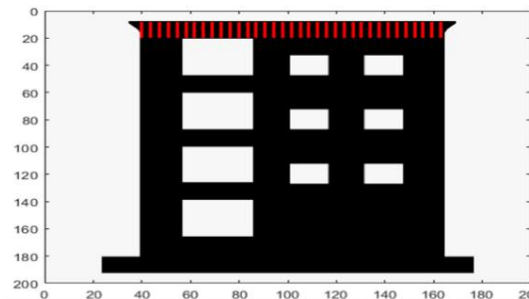
Seleccione el eje o plano, es decir: eje Y o Z, plano YZ o XY



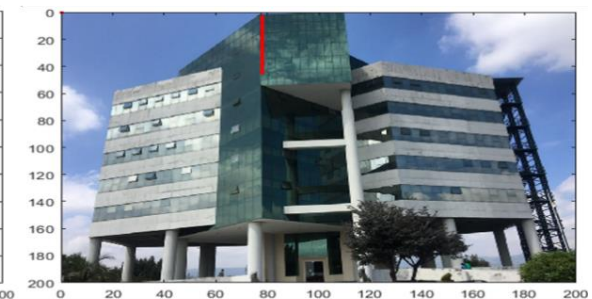
Cálculo automático del nro. de antenas a desplegarse



Nueva ventana con el despliegue de antenas



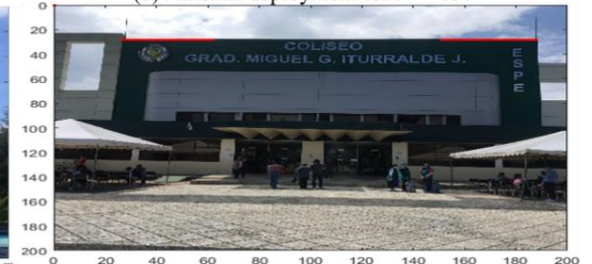
(a) Antenna deployment for $N = 136$



(b) Antenna deployment for $N = 150$



(c) Antenna deployment for $N = 225$



(d) Antenna deployment for $N = 200$





3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS



Se determina el steering vector



Tanto de los arreglos lineales como los arreglos planares

$$\mathbf{h}_{k,x} = [1 \exp[-i\Phi_{k,x}] \dots \exp[-i(N_x - 1)\Phi_{k,x}]]^T$$

$$\mathbf{h}_{k,y} = [1 \exp[-i\Phi_{k,y}] \dots \exp[-i(N_y - 1)\Phi_{k,y}]]^T$$

$$\mathbf{h}_{k,z} = [1 \exp[-i\Phi_{k,z}] \dots \exp[-i(N_z - 1)\Phi_{k,z}]]^T$$

$$\mathbf{h}_{k,xy} = \mathbf{h}_{k,x} \otimes \mathbf{h}_{k,y}$$

$$\mathbf{h}_{k,xz} = \mathbf{h}_{k,x} \otimes \mathbf{h}_{k,z}$$

$$\mathbf{h}_{k,yz} = \mathbf{h}_{k,y} \otimes \mathbf{h}_{k,z}$$





3. PROPUESTA ELAA EN ESCENARIOS PRÁCTICOS

Selección del edificio

Definición del área

Definición de la Fx.

Despliegue antenas

Generación steering vector

PR y IRF

Ante el uso de matrices no uniformes, se efectúa el producto elemento por elemento



IRF en el campo cercano



Se utilizaron expresiones cerradas para calcular el IRF permitiendo la comparación de los resultados

$$\mathbf{h}_{k,xy} = \mathbf{h}_{k,xy} \cdot \text{estado}$$

$$\mathbf{h}_{j,xy} = \mathbf{h}_{j,xy} \cdot \text{estado}$$

$$Y = \frac{1}{N^2} \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \sin^2(\theta_k) \sin^2(\theta_j) |\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_k|^2 \dots p(\phi_k) p(\theta_k) p(\phi_j) p(\theta_j) d(\theta_k) d(\phi_k) d(\theta_j) d(\phi_j)$$

$$\frac{\sin^2(\theta_k) \sin^2(\theta_j) |\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_k|^2}{N^2}$$

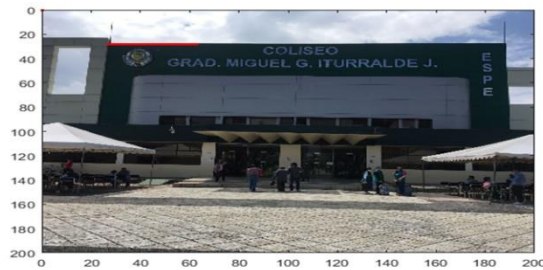




3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL EJE Y

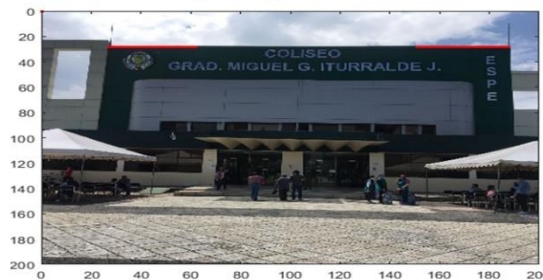
NRO. DE ANTENAS	DIST. ANTENAS	FRECUENCIA
N = 100 (ULA); 200 (ULA); 200 (NULA); 300 (ULA)	7,89 mts; 15,78 mts; 23,67 mts; 23,67 mts	1,9 GHz



(a) Antenna deployment for $N = 100$



(b) Antenna deployment for $N = 200$



(c) Antenna deployment for $N = 200$



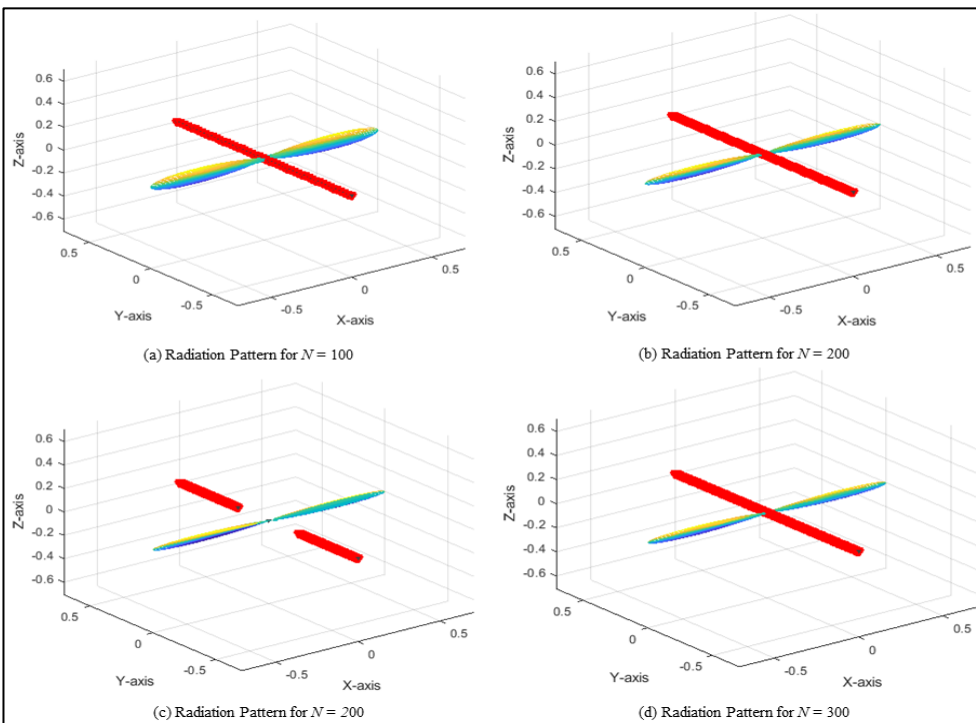
(d) Antenna deployment for $N = 300$





3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

RESULTADO DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL EJE Y



Número de antenas	Distancia total utilizada (metros)	IRF teórico	IRF simulado
(a) 100 (ULA)	7.89	214.399	214.390
(b) 200 (ULA)	15.78	428.684	428.681
(c) 200 (NULA)	23.67	428.684	428.679
(d) 300 (ULA)	23.67	642.970	642.967

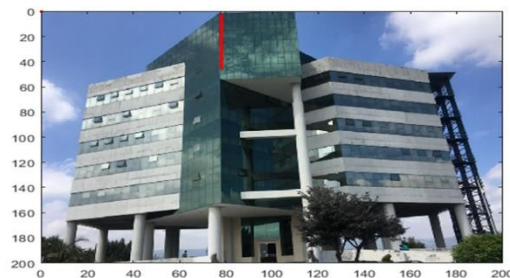




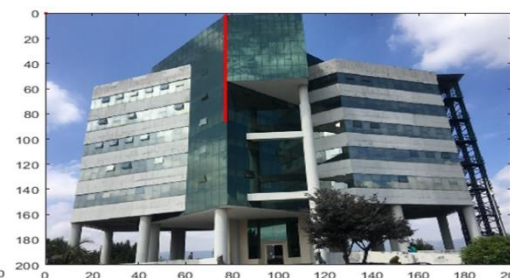
3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL EJE Z

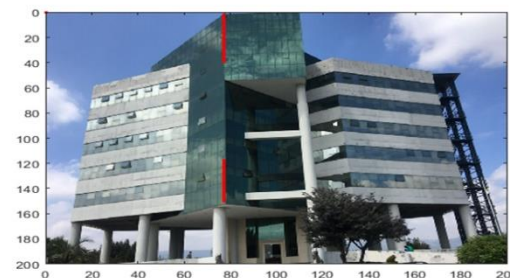
NRO. DE ANTENAS	DIST. ANTENAS	FRECUENCIA
N = 100 (ULA); 200 (ULA); 200 (NULA); 300 (ULA)	7,89 mts; 15,78 mts; 23,67 mts; 23,67 mts	1,9 GHz



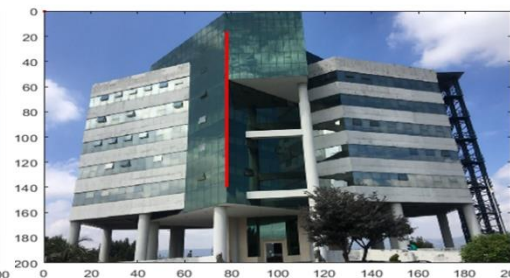
(a) Antenna deployment for $N = 100$



(b) Antenna deployment for $N = 200$



(c) Antenna deployment for $N = 200$



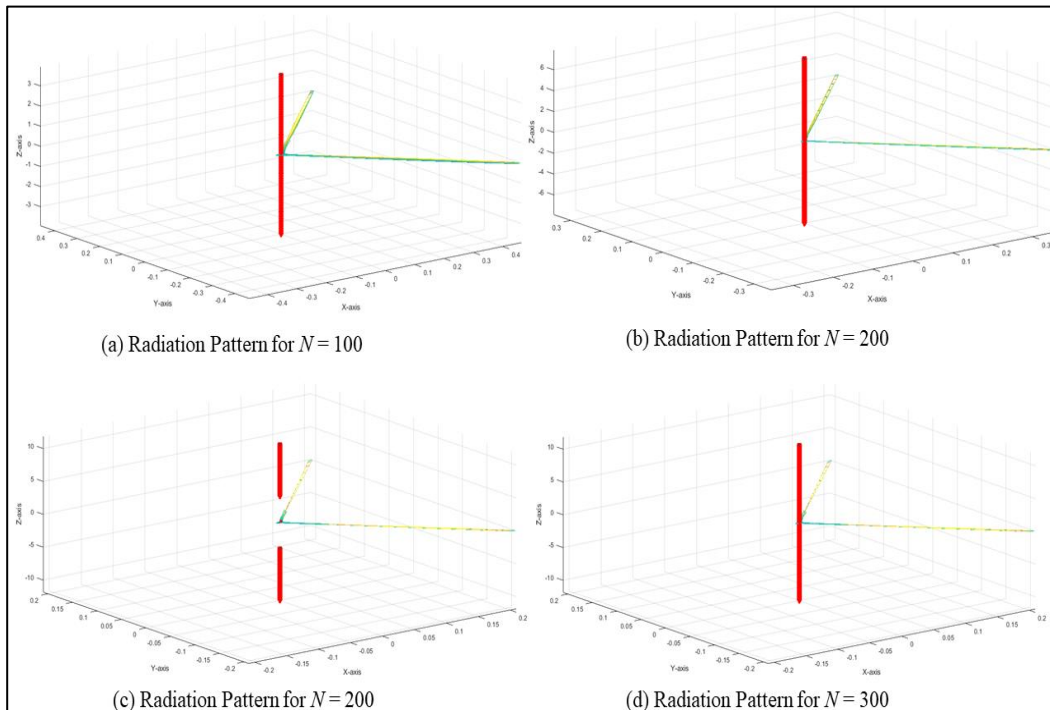
(d) Antenna deployment for $N = 300$





3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

RESULTADO DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL EJE Z



Número de antenas	Distancia total utilizada (metros)	IRF teórico	IRF simulado
(a) 100 (ULA)	7.89	95.139	95.129
(b) 200 (ULA)	15.78	189.004	189.002
(c) 200 (NULA)	23.67	189.004	189.000
(d) 300 (ULA)	23.67	282.823	282.820





3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL PLANO YZ

NRO. DE ANTENAS	DIST. ANTENAS	FRECUENCIA
N = 400 (UPA); 400 (NUPA); 900 (UPA); 900 (NUPA)	2,49 m ² ; 2,49 m ² ; 3,89 m ² ; 3,89 m ²	1,9 GHz



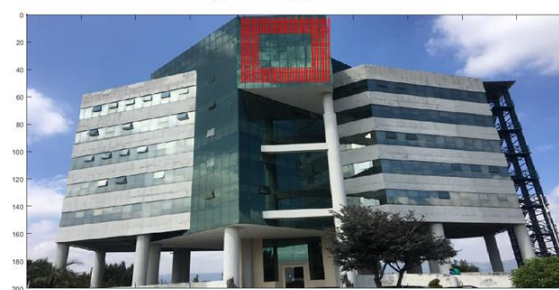
(a) Antenna deployment for $N = 400$



(b) Antenna deployment for $N = 400$



(c) Antenna deployment for $N = 900$



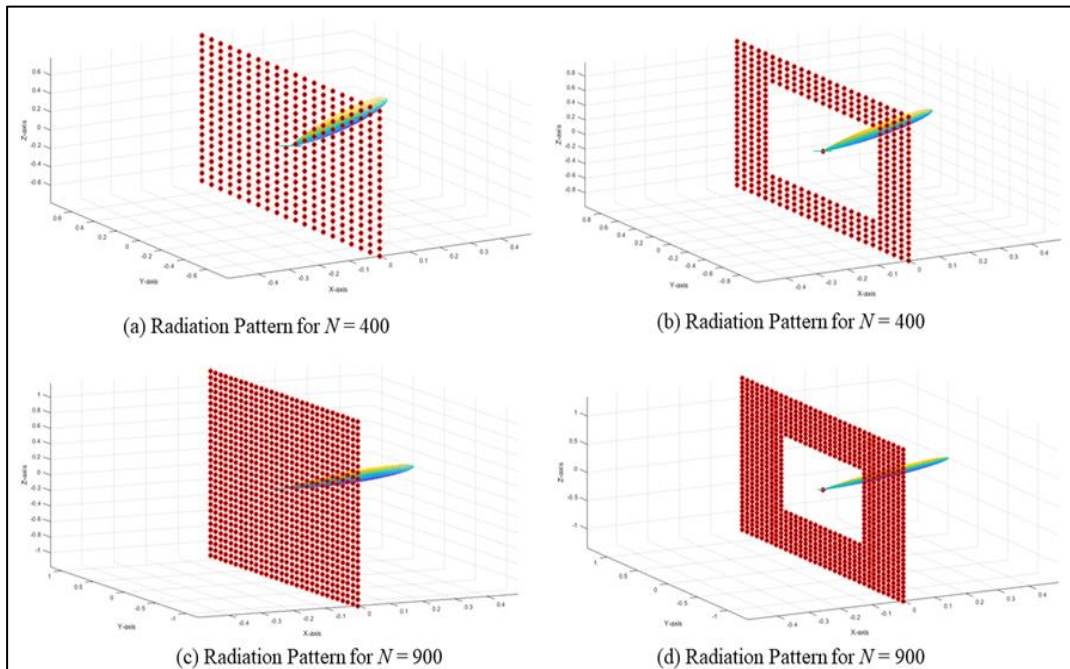
(d) Antenna deployment for $N = 900$





3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

RESULTADO DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL PLANO YZ



Número de antenas	Total área utilizada (m^2)	IRF teórico	IRF simulado
(a) 400 (UPA)	2.49	296.353	296.351
(b) 400 (NUPA)	3.89	296.353	302.623
(c) 900 (UPA)	5.602	616.805	616.804
(d) 900 (NUPA)	7.196	616.805	622.893





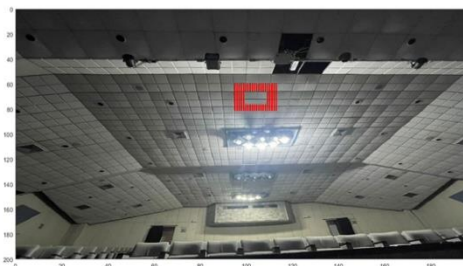
3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL PLANO XY

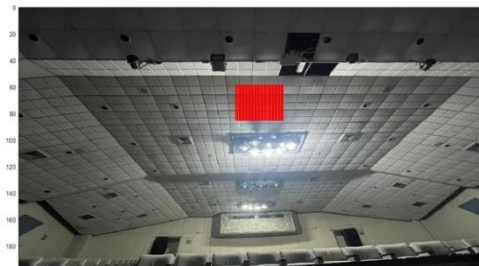
NRO. DE ANTENAS	DIST. ANTENAS	FRECUENCIA
N = 400 (UPA); 400 (NUPA); 900 (UPA); 900 (NUPA)	2,49 m ² ; 2,49 m ² ; 3,89 m ² ; 3,89 m ²	1,9 GHz



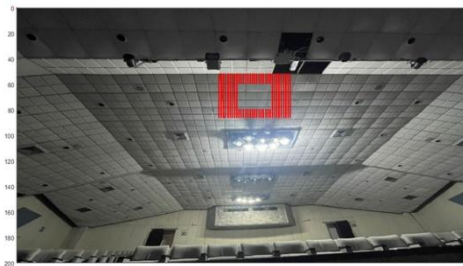
(a) Antenna deployment for N = 400



(b) Antenna deployment for N = 400



(c) Antenna deployment for N = 900



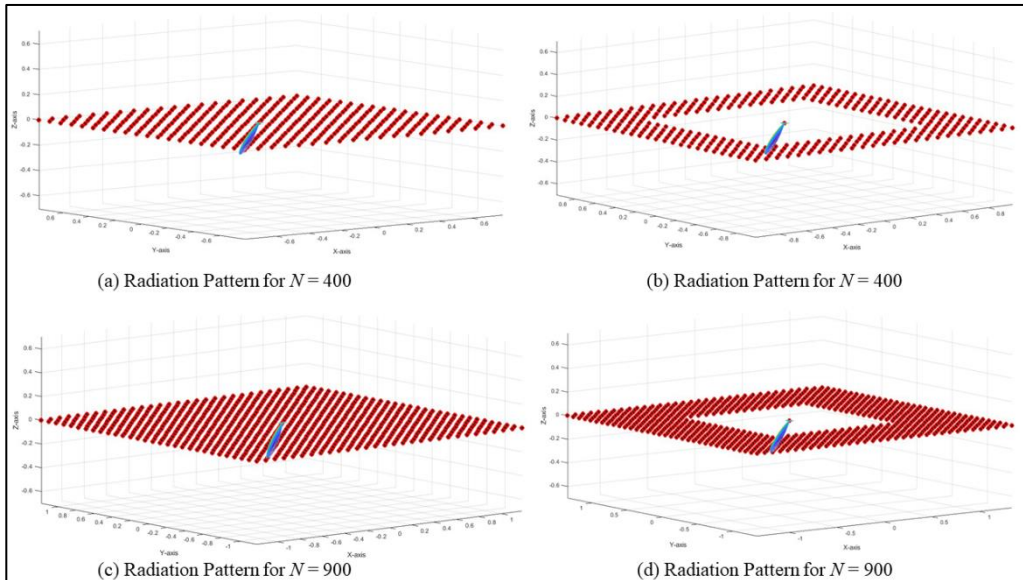
(d) Antenna deployment for N = 900





3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS PRÁCTICOS

RESULTADO DESPLIEGUE ANTENAS SOBRE EL PLANO XY



Número de antenas	Total área utilizada (m^2)	IRF teórico	IRF simulado
(a) 400 (UPA)	2.49	395.338	395.337
(b) 400 (NUPA)	3.89	393.338	399.187
(c) 900 (UPA)	5.602	803.754	803.753
(d) 900 (NUPA)	7.196	803.754	807.987

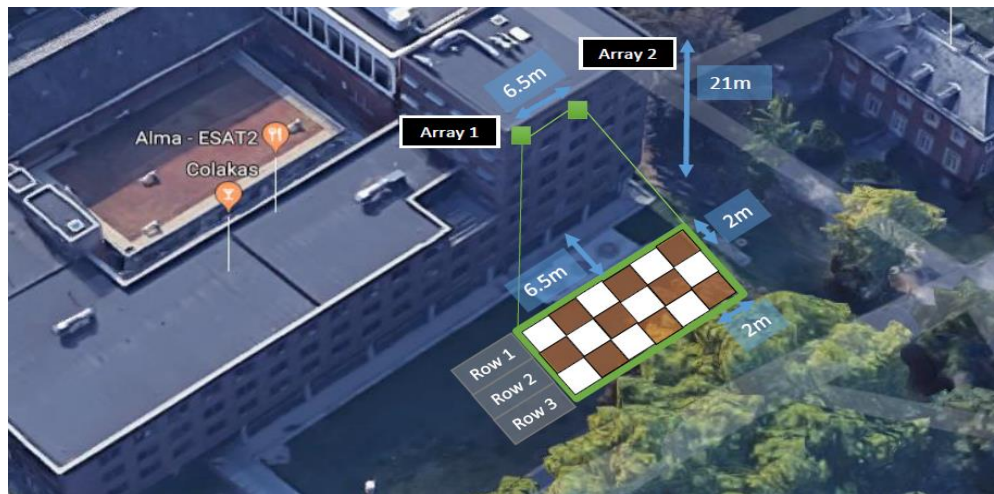




3. SIMULACIÓN M-MIMO ESCENARIOS REAL

DESPLIEGUE 02 ESTACIONES BASE

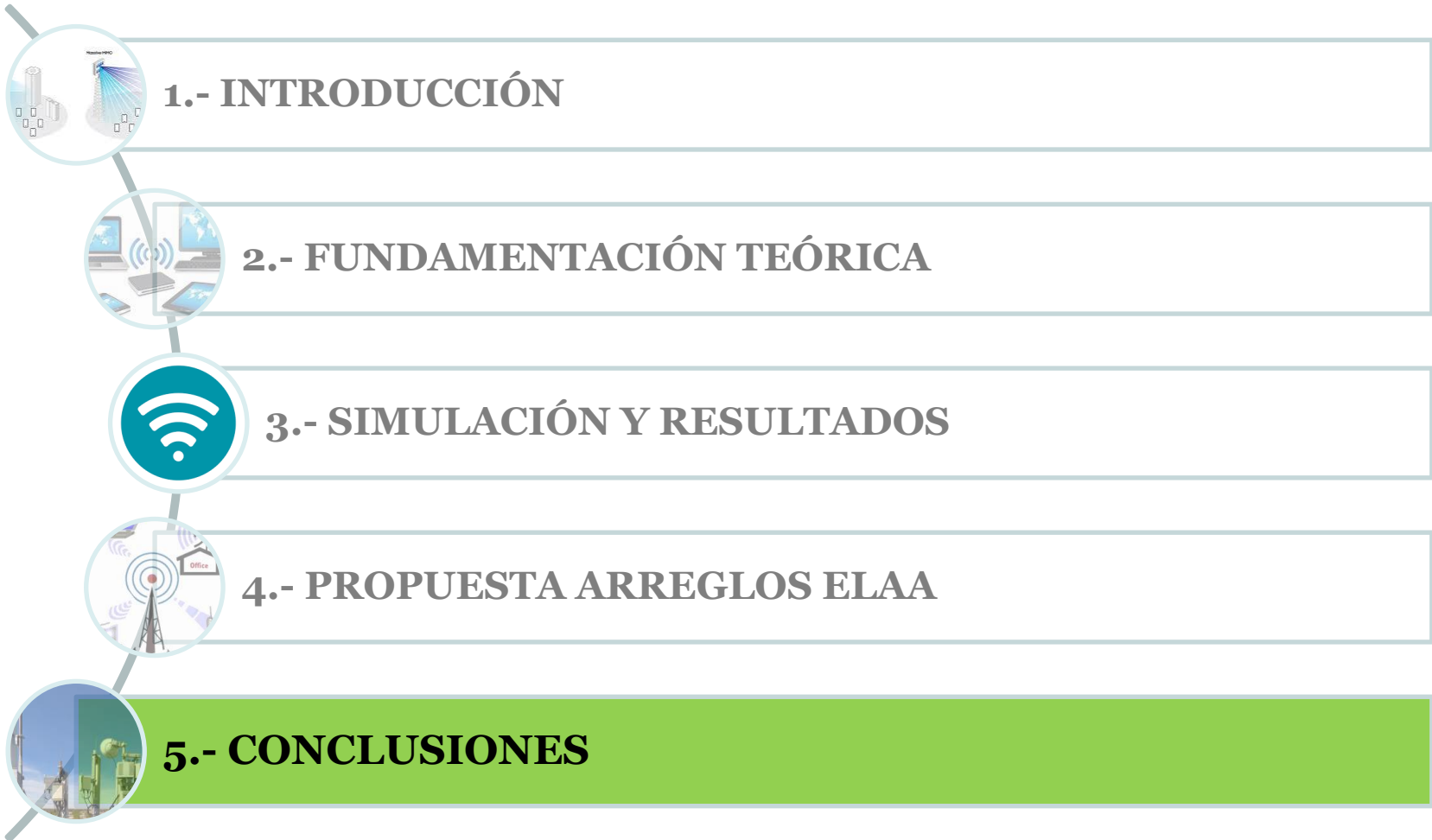
ESTACIONES BASES	EQUIPO DE USUARIO	FRECUENCIA
32 antenas en cada estación base	Antena dipolo conectado a un amplificador de 13 dBm. 36 UE	2,6 GHz



Número de antenas	IRF teórico (UPA)	IRF Óptimo	IRF calculado
64	55.523	64	86.531

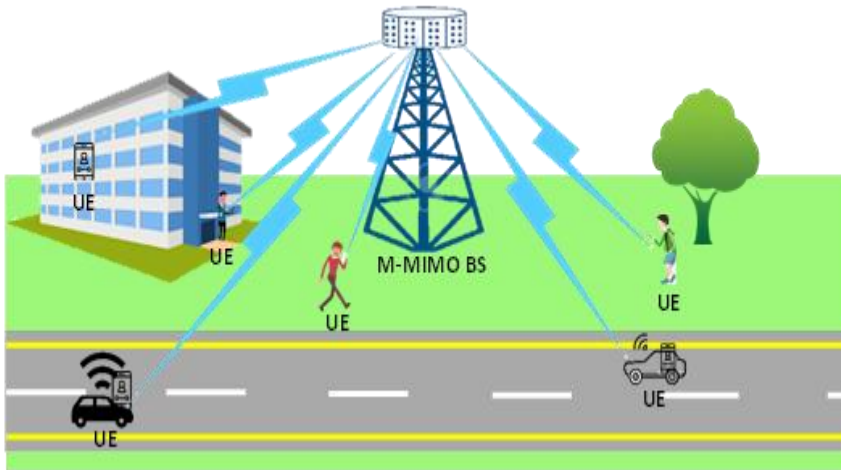


AGENDA



Conclusiones y Recomendaciones

ULA, UPA Y UCA



ULA, presenta una desventaja la cual es la generación de un lóbulo reflejado.

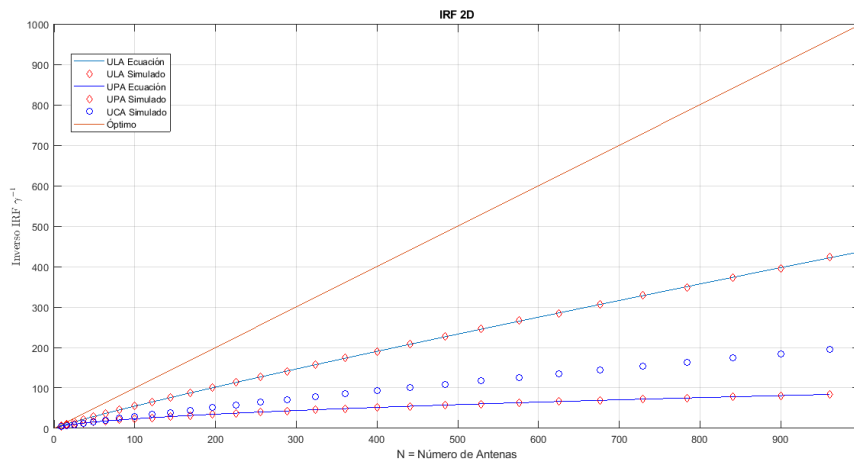
UPA es menos estrecho ante un despliegue de antenas similar a la de su contraparte ULA.

UCA presenta una diversidad de lóbulos secundarios hacia la dirección deseada que podrían afectar al desempeño del sistema



Conclusiones y Recomendaciones

IRF ULA, UPA Y UCA



La, el IRF aumenta cada vez que se incrementa el número de antenas.

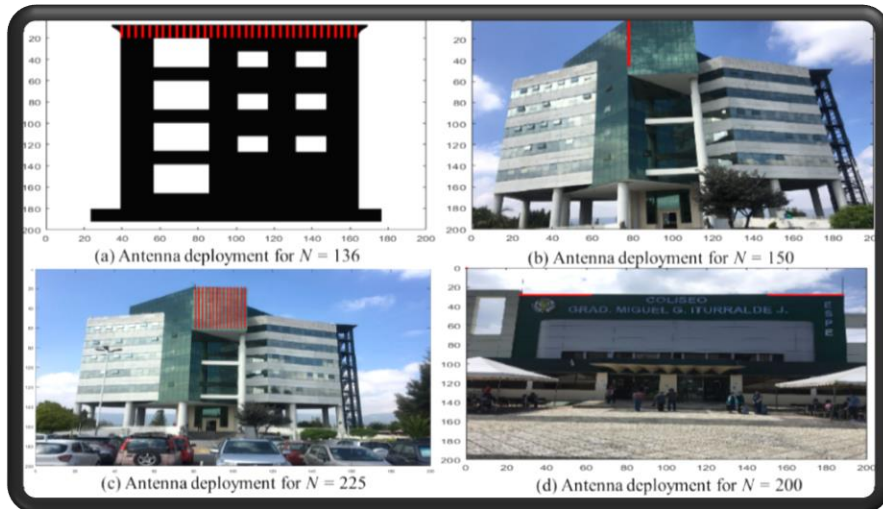
UPA, la energía se dispersa en un margen de dirección más amplio dado al comportamiento del patrón de radiación.

UCA, se tiene una mayor reducción de interferencia que UPA y menor que ULA



Conclusiones y Recomendaciones

SIMULADOR ELAA



Implementó simulador de sistema M-MIMO que considere escenarios prácticos mediante el despliegue de un gran número de antenas en la fachada de los edificios.

El simulador integra los conceptos de una matriz geométrica como lineal y plana uniforme y no uniforme



Conclusiones y Recomendaciones

El despliegue de antenas en edificios se optimiza mediante el uso de un arreglo planar, especialmente, en un arreglo planar no uniforme.

UPA permiten acomodar un mayor número de antenas que ULA en fachadas de edificios

SIMULADOR ELAA

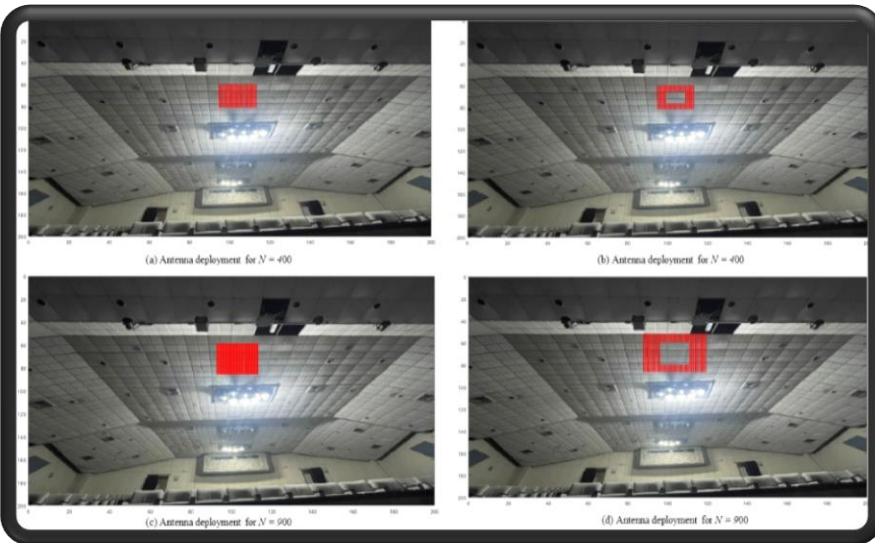


Conclusiones y Recomendaciones

SIMULADOR ELAA

Desplegar la misma cantidad de antenas en un conjunto uniforme y no uniforme producirá un IRF mejor en no uniforme.

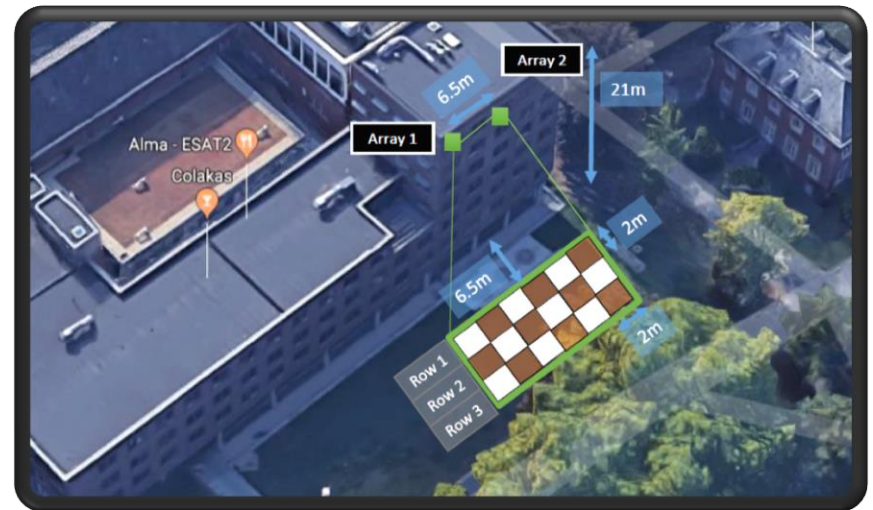
El patrón de radiación de un arreglo no uniforme tiene mayor alcance debido a la variación en el espaciamiento entre los elementos radiantes



Conclusiones y Recomendaciones

A partir del experimento de campo de M-MIMO distribuido con el banco de pruebas de la Universidad de KU Leuven de M-MIMO, se obtuvo un IRF experimental mayor que el arreglo planar analizado anteriormente.

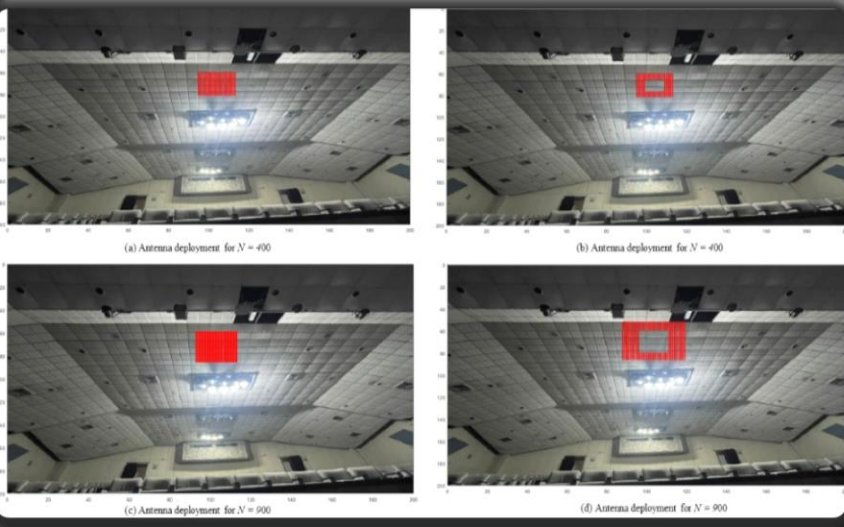
SIMULADOR ESCENARIO REAL



Conclusiones y Recomendaciones

TRABAJOS FUTUROS

Considerar los efectos del campo cercano u otros modelos de canal que son significativos y que no formaron parte de la presente investigación: el desvanecimiento espacial en la amplitud y fase de la señal recibida



GRACIAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA