

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS MIMO MASIVO MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS DETECTORES ZF Y MMSE

Jorge Luis Blanco Orta¹, María del Carmen Guerra Martínez²

¹Emisora Municipal Radio Mariel, Artemisa, Cuba; ²Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114 #11901/Ciclovia y Rotonda CP 19390 Marianao, La Habana, Cuba.

²e-mail: mariagm@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

En el presente artículo se hace un análisis de los sistemas masivos para múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Se estudia su influencia en lograr una mayor capacidad de transmisión de datos, flexibilidad y confiabilidad para el despliegue de la quinta generación (5G, por las siglas del término en inglés, *Fifth-generation*). Esta es una tecnología emergente en la comunicación inalámbrica que aumenta la eficiencia espectral en una comparación con los sistemas MIMO. Sin embargo, uno de los desafíos es lograr algoritmos eficientes con baja complejidad y posibilitar su implementación real. El estudio aborda el comportamiento y rendimiento de los detectores de Cero Forzado (ZF) y de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE) en diferentes escenarios de ruido y error de estimación. Esto se hace con el objetivo de reducir la interferencia entre usuarios en un sistema celular multi-usuario coordinado donde se emplean múltiples antenas.

PALABRAS CLAVES: mMIMO, 5G, ZF, MMSE.

ANALYSIS OF MASSIVE MIMO SYSTEMS BY COMPARISON OF ZF AND MMSE DETECTORS

ABSTRACT

This paper discusses massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems. Its influence on achieving higher data throughput, flexibility, and reliability for the fifth-generation (5G) deployment is studied. This is an emerging technology in wireless communication that increases spectral efficiency in comparison with MIMO systems. However, one of the challenges is to achieve efficient algorithms with low complexity and enable their actual implementation. The study addresses the behavior and performance of Zero Forced Zero (ZF) and Minimum Mean Squared Error (MMSE) detectors in different noise and estimation error scenarios. This is done to reduce user interference in a coordinated multi-user cellular system where multiple antennas are employed.

INDEX TERMS: MIMO, 5G, ZF, MMSE.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de las telecomunicaciones se encuentra en una constante evolución ante la necesidad de buscar nuevos escenarios, con la creciente demanda por parte de los usuarios. Para obtener una mejor calidad en los servicios multimedia y una mayor capacidad del canal de transmisión, que permita la interconexión de dispositivos, aplicaciones, datos y personas. Las redes actuales han sido desarrolladas sobre un marco que busca disminuir el consumo de recursos elementales como son: el ancho de banda y la potencia de transmisión.

Es por ello que para las futuras redes móviles 5G las aplicaciones requerirán mejores características en su rendimiento, en la tasa de transmisión de datos, en el retardo y en el uso eficiente del espectro. Esto contrastando con las redes móviles de generaciones anteriores; razón por la cual se ha estado buscando en todo momento nuevas formas y estructuras para dar solución a las nuevas demandas. El diseño permitirá cambiar por completo el panorama y la industria de los servicios en la nube, aprovechando la propagación multirayecto, teniendo como objetivo disminuir la tasa de error e incrementar la tasa de transmisión [1,2].

La tecnología conocida como sistema MIMO ha ganado notoria atención en comunicaciones inalámbricas, ya que son múltiples antenas del orden de decenas a centenas que se ubican especialmente en la estación base (BS). Por factores de escala de grandes arreglos de antenas, lo cual proporciona beneficios en relación con los sistemas MIMO convencionales, lo cual permite aumentar la tasa de datos, la confiabilidad, y una mejor relación en la eficiencia

espectral. Por otro lado, la transmisión de energía se puede optimizar mediante la explotación de los muchos grados de libertad que ofrece una mayor cantidad de antenas, mientras que factores aleatorios como el ruido y la interferencia pueden disminuir notoriamente sus efectos [2,3].

El sistema MIMO tiene un papel muy importante en el desarrollo de las estructuras para la 5G, ya que permite transmitir altas tasas de datos, y además deberá tener una elevada capacidad para facilitar el aprovechamiento e implementar más dispositivos móviles conectados en la red. Dichos sistemas emplean arquitecturas con múltiples antenas en transmisión y recepción, donde realizando una explotación eficiente de la diversidad y la multiplexación espacial se puede incrementar la capacidad del sistema. Sin embargo, estas prestaciones incrementan notoriamente el procesamiento requerido en el receptor, lo cual depende fuertemente del algoritmo de detección empleado. Por su definición, se está explotando un gran arreglo espacial, por ser un proceso que se vuelve bastante extenso al ser necesario operar sobre una elevadísima cantidad de permutaciones de símbolos posibles [1,3].

Precisamente en esta dirección se analizarán dos tipos de señal de algoritmos o técnicas, que permiten la detección de las señales enviadas por el transmisor: el ZF que es una técnica subóptima, que se centra en la idea de la inversión del canal. Las señales son transmitidas de tal forma que cada usuario recibe solo la señal cuya información va dirigida a él, y el detector MMSE; porque se puede obtener un mejor rendimiento minimizando el error cuadrático medio [4,5]. A pesar de que existen otros detectores, como el detector óptimo de máxima verosimilitud (ML, por las siglas del término en inglés, *Maximum likelihood*). Pero que por su elevada complejidad en cuanto crece el número de antenas de transmisión, no es una alternativa muy favorable para ser utilizada en sistema de MIMO y se debe recurrir a alternativas subóptima con una menor complejidad.

En este artículo se realiza un estudio, con el empleo de una metodología mixta para la búsqueda y recuperación de información relevante sobre la tecnología MIMO en las redes inalámbricas, en aras de profundizar sobre sus características distintivas. Comparando las diferentes técnicas de detección presentadas anteriormente, mediante la elaboración de un programa que permitirá la visualización del funcionamiento de cada una; en función de parámetros determinantes. Se analizarán las prestaciones para una posible implementación en sistemas de comunicaciones para poder alcanzar los niveles deseados, logrando mejorar la calidad y alcance de la señal, dentro de un entorno con movilidad.

1. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este artículo se han tenido en cuenta los conceptos: evolución y despliegue de los sistemas MIMO, se estableció el siguiente orden de etapas: parámetros de la investigación, conceptos básicos, desempeño y simulación, donde cada una de las mismas comprende varias fases, como se resume en la Fig. 1. Mediante este procedimiento se representa la principal contribución de este artículo, con el objetivo de desarrollar una investigación y posible desarrollo de esta tecnología. Para más adelante centrarse en la precodificación lineal más idónea en la búsqueda de la técnica que permita un mejor aprovechamiento del ancho de banda utilizable, asegurando una transmisión con un error muy bajo y que se ajuste a las necesidades de cada usuario.

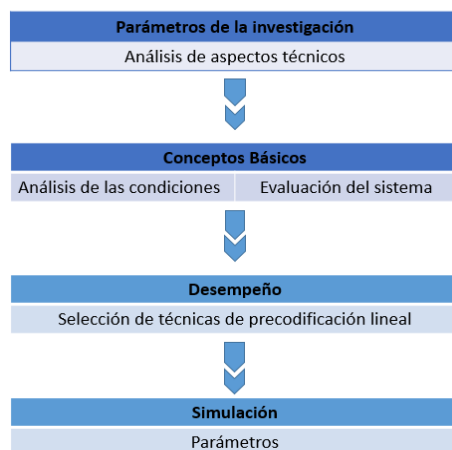


Figura 1: Procedimiento para el desarrollo de la investigación.

2. ETAPA I: PARÁMETROS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta etapa se desarrolló: el análisis de aspectos técnicos, donde se tuvieron en cuenta las principales problemáticas referente a las limitantes existentes para enfrentar los nuevos escenarios de la 5G, determinando las necesidades y posibles soluciones. Una estrategia que se presenta en esta fase, es el uso de sistemas MIMO para ver su comportamiento ante la complejidad de un sistema 5G. Se debe tener en cuenta el número antenas, ancho de banda, densidad de usuarios y la precisión de la estimación del canal. Para poder determinar la tecnología más idónea en el diseño de la nueva generación de telefonía móvil.

La 5G lanzará nuevas aplicaciones y servicios, que proporcionarán a los consumidores experiencias multimedia nunca antes posibles en las generaciones anteriores. Pero esto no se ha podido concretar del todo en la realidad, ya que se han encontrado limitaciones en algunas áreas, como es el caso de estas aplicaciones; la comunicación masiva de todo tipo de máquinas (mMTC), la comunicación ultra confiable de baja latencia (uRLLC) y la banda ancha móvil mejorada (eMBB). Las cuales necesitan ser transmitidas en la banda de ondas milimétricas, siendo esto uno de los problemas, ya que estas bandas tienen muy corto alcance, convirtiéndose esto en uno de sus desafíos a tener en cuenta, al no poder cubrir zonas con geografía irregular [2,3,6].

La tecnología MIMO es identificada como una tecnología candidata para el desarrollo de la 5G, al ofrecer la posibilidad de alcanzar mejoras esenciales en los parámetros de comunicación inalámbrica. Sin embargo, el rendimiento de estos sistemas MIMO se puede ver degradado debido a la interferencia multiusuario que puede causar el elevado flujo información de manera simultánea entre la BS y los equipos de usuarios (UE), ejemplificada en la Fig.2. Para sobrellevar esta posible interferencia multiusuario, se han propuesto técnicas de detección ZF y MMSE utilizadas como referencia para este trabajo, que son métodos lineales basados en ecualización. Aunque tienen un menor desempeño logran reducirse la complejidad, dándole solución a muchos de los problemas que se puede presentar en el despliegue de esta nueva generación de la telefonía móvil.

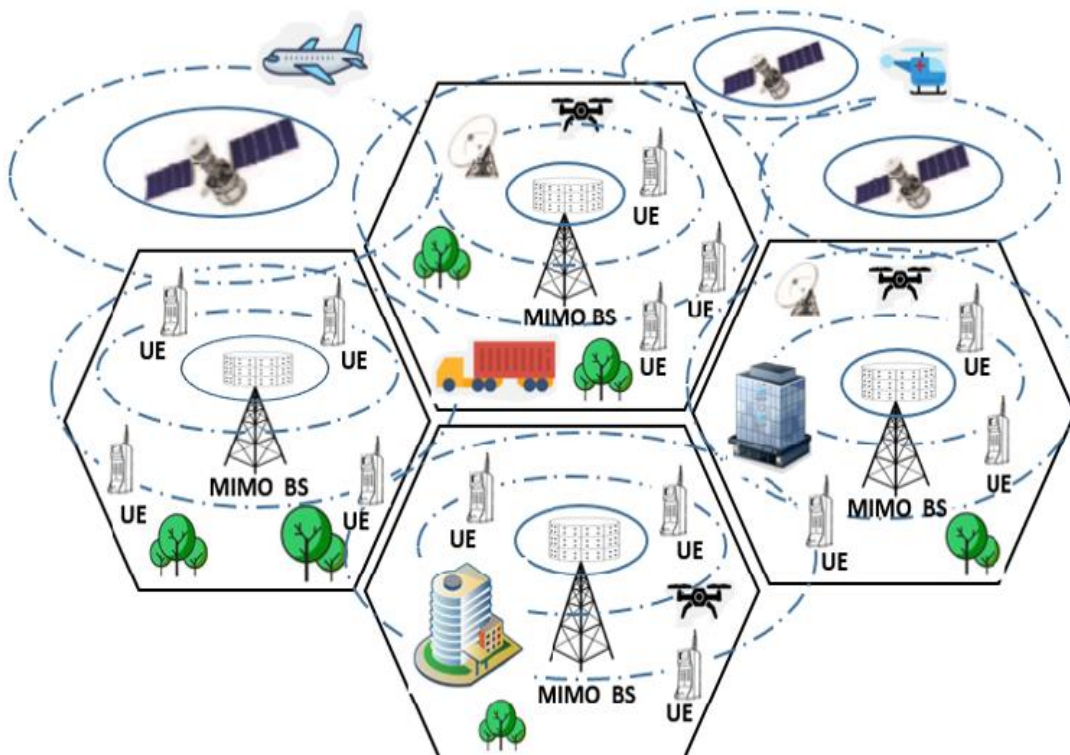


Figura 2: Representa las comunicaciones inalámbricas con tecnología MIMO con un número elevado de antenas en la BS y varios UE.

Ante necesidad de hacerle frente al agotamiento de los recursos físicos que están adquiriendo las redes actuales, la escasez de espectro es un problema que deben afrontar los sistemas inalámbricos debido al avance tecnológico. Por ello, se ha explorado una tecnología alternativa que trata de aprovechar también la propagación multitrayecto. Con ellos se crean trayectos simultáneos desacoplados (independientes) con los que puedan enviarse señales diferentes, compartiendo los mismos recursos físicos de tiempo y frecuencia.

3. ETAPA II: CONCEPTOS BÁSICOS

Para una mejor comprensión de esta segunda etapa se dividió en dos fases: análisis de condiciones y evaluación del sistema. Al realizar un profundo estudio de los conceptos de un sistema MIMO, así como su desempeño y desarrollo, describiendo la utilización de una cantidad de antenas en la BS para atender a múltiples UE en el mismo intervalo de tiempo-frecuencia.

El canal inalámbrico, al igual que otros tipos de medios de transmisión, se ve afectado por ruido, interferencia y otras clases de efectos nocivos. Sin embargo, la característica principal que lo diferencia del resto de los medios de transmisión es su comportamiento multitrayecto variable en el tiempo. En un escenario inalámbrico, la señal resultante en recepción se compone de la superposición simultánea de varias ondas electromagnéticas provenientes desde diferentes direcciones de arribo en distintos instantes de tiempo, donde cada una de estas señales aporta una porción de energía y posee una fase instantánea diferente. Las réplicas de señal provenientes de los distintos trayectos del medio inalámbrico se combinan de forma constructiva o destructiva de acuerdo a los valores de retardo. En base a este comportamiento, como se muestra en la siguiente ecuación, el modelo de respuesta impulsiva del canal inalámbrico (en el dominio del tiempo) para una frecuencia de portadora f_c está constituido por N_c coeficientes del canal en distintos retardos de tiempo τ_k [7,8,9].

$$h(t, \tau) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k(t, \tau) e^{j2\pi f_c \tau_k(t) + \phi_k(t, \tau)} \delta[\tau - \tau_k(t)] \quad (1)$$

donde δ representa la función delta de Dirac, mientras que a_k y ϕ_k representan la amplitud y fase aleatoria del k -ésimo coeficientes del modelo de canal inalámbrico, respectivamente, como se refleja en la Fig. 3.

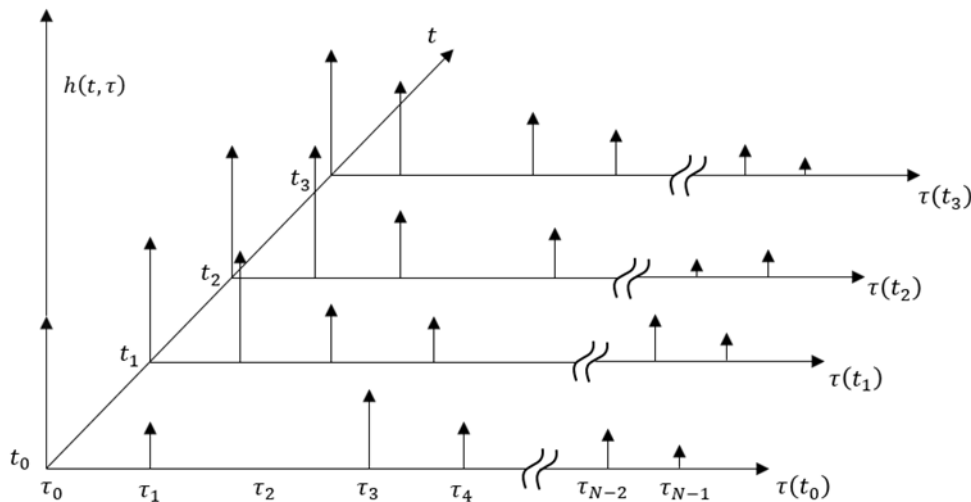


Figura 3. El canal inalámbrico multitrayecto variable en el tiempo, caracterizado a partir de la respuesta impulsiva en el dominio del tiempo [8].

Uno de los principales inconvenientes de la propagación multitrayecto, es que la antena receptora no capta una sola señal limpia. La antena recibe múltiples réplicas que se combinan en el receptor para dar una señal resultante que puede variar ampliamente en amplitud y fase. Dependiendo de la distribución de la intensidad y el tiempo de propagación relativa de las ondas dentro del ancho de banda de la señal transmitida, lo cual produce un fenómeno conocido como desvanecimiento.

La tecnología MIMO aprovecha el problema de la propagación multirrayecto para mejorar las transmisiones gracias a la ganancia por diversidad, mejorando la calidad y velocidad de las comunicaciones inalámbricas. Afortunadamente, con estos sistemas se mejora la eficiencia espectral de las redes inalámbricas mediante multiplexación espacial de una elevada cantidad de UE por celda. Lo más importante, se logra sin aumento en el ancho de banda o la potencia transmitida, que son recursos escasos; más bien, a partir de la complejidad en el sistema que se muestra en la Fig. 4. Sistema MIMO con γ_t antenas en el transmisor y γ_r antenas en el receptor [3,10,11].

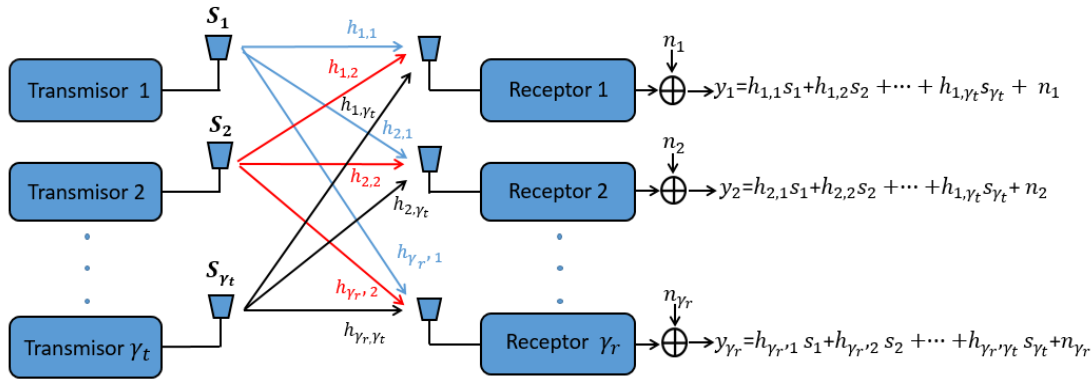


Figura 4: Diagrama de un sistema MIMO.

Las entradas múltiples se pueden denotar como un vector $\mathbf{s}$, que se extrae aleatoriamente del conjunto A^{γ_t} compuesto por γ_t vectores de elementos, cuyos componentes provienen de un conjunto finito $A = a_m | m = 1, \dots, M$ y la probabilidad de cada vector seleccionado de A^{γ_t} es idéntica. El conjunto A se conoce generalmente como el alfabeto de la constelación, cuyos elementos pueden tener valores reales o complejos. Además, $\mathbf{s}_n$ con $n = 1, \dots, M^{\gamma_t}$, representa las realizaciones de $\mathbf{s}$, por lo tanto, también contienen los elementos de A^{γ_t} .

Entonces, la relación entre las entradas y las salidas de este sistema lineal se puede caracterizar por la siguiente ecuación (2), donde $\mathbf{y} \in F^{\gamma_r}$ es el vector de señal recibido, para $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{\gamma_r}]^T$ teniendo en cuenta que el vector de dimensión $\gamma_r \times 1$ contiene las señales recibidas. La función de transferencia/matriz de canal del sistema está determinada por $\mathbf{H} \in F^{\gamma_r \times \gamma_t}$ y $\mathbf{n} \in F^{\gamma_r}$ que representa el vector de ruido aditivo. F puede ser real o compleja dependiendo de la aplicación espiada [7].

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

La matriz del canal $\mathbf{H} = [h_1 \dots h_k] \in C^{M \times K}$, donde $h_k \in C^M$, es el canal del K usuario con la estación base, $\mathbf{s} = [s_1 \dots s_k]^T$. Se asume que los vectores de símbolos en $\mathbf{s}$ son aleatorios no correlacionados con media cero y matriz de covarianza $\sigma_s^2 \mathbf{I}$, en el cual $\mathbf{I}$ es la matriz identidad, $x_k \sim CN(0, I_k)$ es el vector de símbolos transmitidos por los K usuarios a la BS y los vectores de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) donde $\mathbf{n} \sim CN(0, I_M)$ son independientes e idénticamente distribuidos con media cero y matriz de covarianza $\sigma_n^2 \mathbf{I}$. La respuesta impulsiva del canal entre el j -ésimo transmisor y i -ésimo receptor se denota como $h_{ij}(\tau, t)$. El canal MIMO puede ser descrito entonces por la matriz $\gamma_t \times \gamma_r$ que contiene las ganancias del canal y queda representada de la siguiente manera:

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \dots & h_{1,\gamma_t}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \dots & h_{2,\gamma_t}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{\gamma_r,1}(\tau, t) & h_{\gamma_r,2}(\tau, t) & \dots & h_{\gamma_r,\gamma_t}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matriz del canal de valores complejos tiene entradas gaussianas con media cero y varianza unitaria. Los elementos de la matriz son números complejos que corresponden a la atenuación y al desplazamiento de fase que el canal inalámbrico introduce a la señal y se asume que es perfectamente conocida en el receptor con retardo τ [3,6,7].

4. ETAPA III: DESEMPEÑO

Para esta etapa, se tuvo en consideración: selección de técnicas de precodificación lineal, para describir bien en detalle las condiciones que llevaron a cabo la selección de este tipo de tecnología de detección. Por ser algunas de las técnicas empleadas para la tecnología MIMO, teniendo en cuenta la primera y segunda etapa de la investigación.

En las etapas anteriores se realiza un estudio en profundidad del enorme potencial que caracteriza la tecnología MIMO y de los beneficios que ofrece la misma para lograr una eficiencia espectral dentro de un escenario propicio. Al aplicar el procesamiento de señales a las comunicaciones inalámbricas, donde típicamente una BS con múltiples antenas sirve simultáneamente a un conjunto de usuarios en el que la ganancia de multiplexación puede ser compartida por todos los usuarios. Sin embargo, el rendimiento de estos sistemas se puede degradar debido a la interferencia multiusuario ya que la BS se comunica con múltiples usuarios de manera simultánea. Para sobrellevar la interferencia multiusuario, se han propuesto técnicas de detección como ZF y MMSE que pueden ofrecer el rendimiento que se requiere, como se muestra en la Fig. 5.

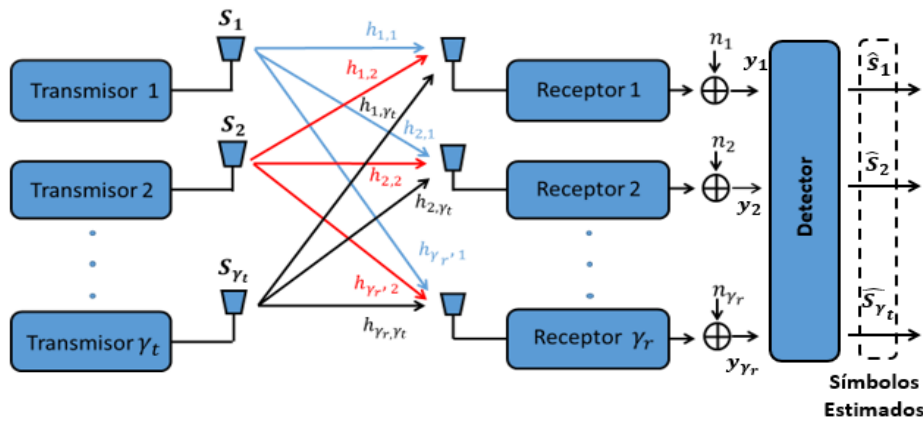


Figura 5: Diagrama en bloques de sistema MIMO con técnica de detección.

En el receptor la estimación del vector transmitido s_k se toma mediante una transformación lineal del vector recibido y_k de símbolos enviados correspondiente al usuario k-ésimo. La señal recibida pasa a través de un filtro lineal para suprimir la interferencia y cada símbolo de datos se detecta individualmente. La detección lineal matemáticamente está representada en la siguiente ecuación 4 [4,12,13]

$$\hat{s}_k = W_k y_k, \quad (4)$$

donde W_k corresponde con la matriz de pesos o matriz de precodificación lineal correspondiente al usuario k-ésimo que se establece en el detector ZF para eliminar toda la interferencia. Independientemente del incremento del ruido, combinado con un cuantificador Q. El cual se encarga de mapear los símbolos al punto de constelación más próximo de manera que el tiempo computacional haga viable su implementación en los sistemas de comunicaciones inalámbricos.

La técnica de ZF consiste en la transmisión ortogonal de múltiples señales a cada usuario. Las señales son transmitidas en haces ponderados por medio de pesos que se añaden a las fases y las amplitudes de las señales enviadas. Permitiendo una máxima radiación de la señal deseada hacia el usuario (lóbulo principal), y eliminando casi por completo la señal en las direcciones de los usuarios interferentes. De forma que a un cierto usuario le llegue únicamente la información que va dirigida a él.

La matriz W_k ha de ser diseñada para que cumpla que los datos del usuario k-ésimo no interfiera con los de ningún otro cumpliendo la siguiente condición [9,12,13]:

$$H_i W_k = 0, i \neq k \quad (5)$$

Y, además:

$$H_k W_k = I_r \quad (6)$$

Donde I_r es la matriz identidad de dimensión $r \times r$.

La ecualización ZF se deriva de la pseudo-inversa de Moore-Penrouse de H . Para lograr que W_k caiga en el espacio nulo de los canales del resto de los usuarios:

$$W_k = (H^H H)^{-1} H^H = H^+ \quad (7)$$

Donde $(-)^{-1}$ y $(-)^H$ corresponden a la matriz inversa y a la hermitiana respectivamente. Por tanto, el vector estimado de símbolo $\hat{s}$ por un detector ZF es:

$$\hat{s} = H^+ y = s + \hat{n} \quad (8)$$

Con la expresión $\hat{n} = (H^H H)^{-1} H^H n$ se mueve la perturbación de S generada por el canal H en el vector y que se recibe, como si se invirtiera el efecto del canal. De esta manera, el receptor intenta forzar la correlación cruzada entre el error de estimación y el vector S a cero. Este es un método de procesamiento de señal espacial mediante el cual el transmisor puede anular las señales de interferencia multiusuario y también puede suprimir la interferencia entre celdas teniendo que reducir la ganancia de la matriz [4,9,12,13].

Por otro lado, se tiene el detector lineal MMSE que minimiza conjuntamente tanto la interferencia como el ruido, mientras que ZF solo remueve los de la interferencia. Es por eso que este detector requiere el conocimiento de estadísticos de segundo orden y además posee operaciones más complejas para el sistema receptor. Específicamente, se supone el conocimiento de σ^2 del ruido y la autocorrelación de la respuesta impulso del canal, al minimizar el error cuadrático medio entre los datos reales transmitidos y los datos de salida del canal $E[\|s - W^H y\|^2]$, donde $E(\cdot)$ denota la esperanza de la variable aleatoria, después de usar la matriz de transformación lineal W_{MMSE} que se obtiene de resolver la siguiente ecuación [5,12,14,15].

$$W_{MMSE} = \underset{W}{\operatorname{argmin}} E[\|s - W y\|^2] \quad (9)$$

Y se presenta en la ecuación (10) que considera la varianza del ruido y reduce su realce usando una matriz de ecualización de error cuadrático medio mínimo. Para despejar se necesita encontrar una matriz de ponderación que satisfaga, la cual viene dada por:

$$W_{MMSE} = \left(H^H H + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} I \right)^{-1} H^H = H^- \quad (10)$$

El vector estimado de símbolos transmitidos $\hat{x}_{MMSE}$ en la detección MMSE es:

$$\hat{x}_{MMSE} = W_{MMSE} y = \left(H^H H + \left(\frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \right) I \right)^{-1} H^H y \quad (11)$$

Lo cual se puede expresar también como se hizo en ZF de acuerdo a la ecuación siguiente [5,12,14,15,16]:

$$\hat{s}_{MMSE} = H^- y = \tilde{s} + \hat{n}_{MMSE} \quad (12)$$

A pesar de la complejidad computacional que presenta este último detector, lo que sería una limitante ante el aumento del flujo de datos por las antenas, y podría degradar el rendimiento del sistema MIMO. Este método permite minimizar conjuntamente el error total impuesto tanto por la interferencia multiusuario, como por el ruido. Teniendo en cuenta este factor, el análisis se centrará en estos dos modelos de detección porque como se podrá comprobar en esta etapa, con estas técnicas se pueden alcanzar mejores resultados de eficiencia espectral y energética para un sistema MIMO. Lo que hace muy atractiva la implementación de este tipo detectores en los futuros sistemas inalámbricos.

5. ETAPA IV: SIMULACIÓN

En esta última etapa de la investigación se tuvo en cuenta todo lo relacionado con el estudio que se realizó en las etapas anteriores. Por esta razón, se desarrollaron con la utilización del software MATLAB varias simulaciones, con el objetivo de analizar el rendimiento de las diferentes técnicas de detección presentadas anteriormente. Dado que el interés de este trabajo fue comparar el desempeño de algoritmos de diversas técnicas de detección en sistemas MIMO. Es por ello que el número de antenas y usuarios se han ido variando hasta llegar a un alto número de antenas que se corresponde con un sistema de mMIMO. Así como la utilización de las diferentes modulaciones: QPSK, 16QAM y 64QAM, para lo cual fue necesario entenderla, realizar su abstracción y aprender cómo llevarla a una implementación en un programa computacional. Esto permite hacer la comparación con las técnicas de detectores referentes por medio de simulación, obtener los resultados y poder realizar el análisis, para finalmente calcular los errores y la realización de las gráficas.

El programa con un tiempo computacional para la simulación de 30 minutos, permite generar gráficas comparativas de los distintos algoritmos de detección. Comparando su rendimiento en los distintos detectores ZF y MMSE para una elevada cantidad de antenas dentro de un sistema mMIMO, con canal Rayleigh y ruido AWGN, como se explica en el diagrama de flujo en la Fig. 6.

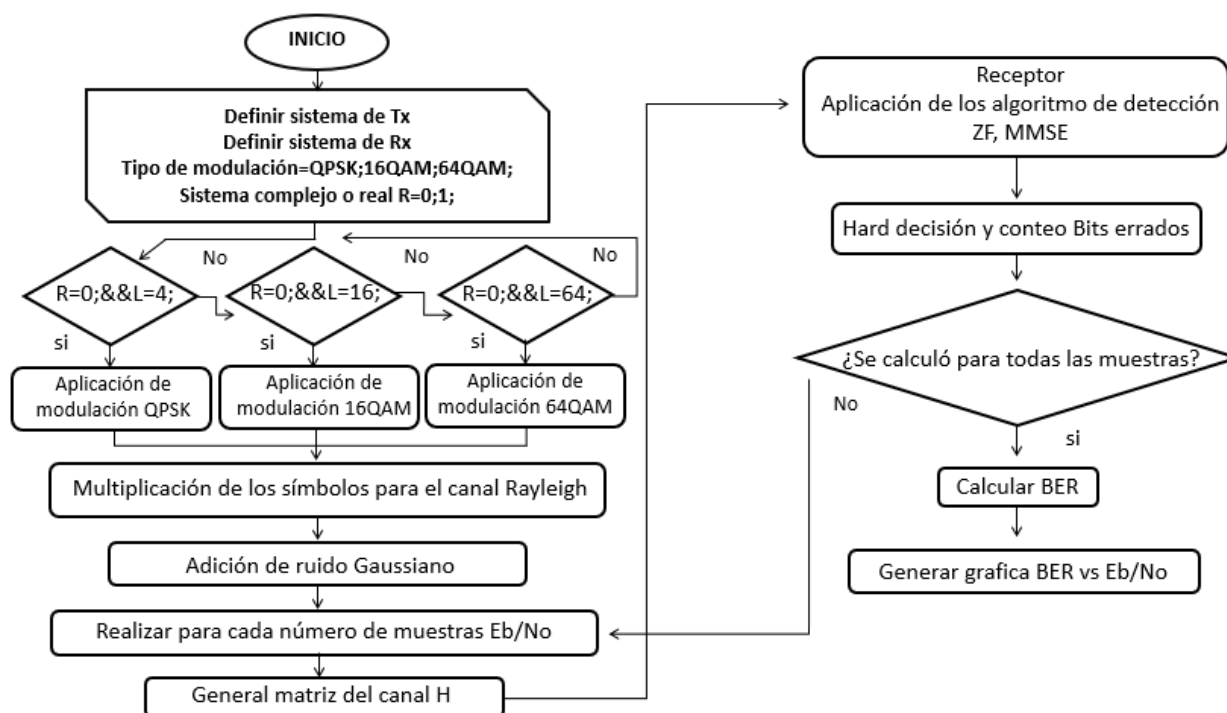


Figura 6: Diagrama de flujo de la simulación del sistema.

Como se puede observar en la Fig. 7, se presentan las curvas de desempeño en términos del BER para los diferentes detectores. Para un sistema 2x2MIMO con la modulación QPSK, el detector MMSE tiene un mejor desempeño en relación al detector con el mismo sistema de modulación, alcanzando una probabilidad de error de aproximadamente 10^{-2} con una $E_b/N_0 > 15$ dB. Mientras que a medida que aumenta el número de antenas mejora el desempeño del detector ZF en relación al detector MMSE, debido al aumento de la cantidad de bits transmitidos que se corresponde con el orden de las modulaciones utilizadas.

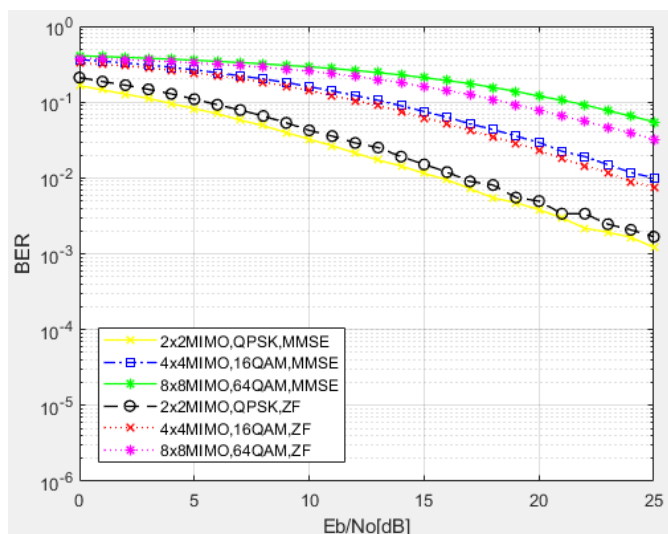


Figura 7: Comparación de desempeño de detectores en 2x2, 4x4 y 8x8 para un sistema MIMO.

En la Fig. 8 al aumentar el número de antenas el comportamiento del detector MMSE que corresponde con la modulación QPSK, para una probabilidad de error por bit de aproximadamente de 10^{-2} con una $E_b/N_0 > 10\text{dB}$, es mejor que en el detector ZF que lo alcanza, para un $E_b/N_0 > 15\text{dB}$. Con este resultado, se mantiene con un mejor comportamiento el detector ZF en relación al detector MMSE, ante el aumento de la cantidad de antenas del sistema MIMO y la complejidad de la modulación.

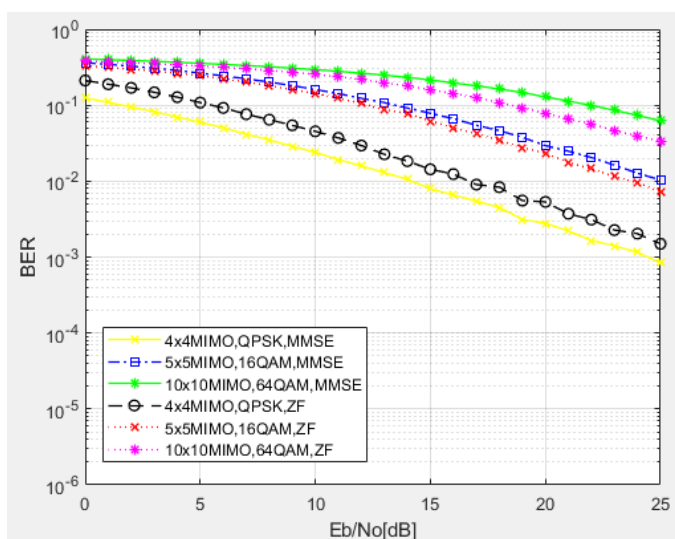


Figura 8: Comparación de desempeño de detectores en 4x4, 5x5 y 10x10 para un sistema MIMO.

En esta última Fig. 9, ya se puede apreciar un mejor comportamiento de la probabilidad de error por bit de aproximadamente de 10^{-3} en relación a las figuras anteriores. Ante el aumento de las antenas de transmisión y de recepción, se favorece el desempeño del detector MMSE en relación al detector ZF, de acuerdo a la modulación QPSK que lo alcanza. Para el caso de MMSE con un E_b/N_0 de alrededor de 20dB , mientras que para ZF con un $E_b/N_0 > 25\text{dB}$ (aproximadamente 5dB s de diferencia en comparación con MMSE). En los otros sistemas MIMO con la modulación 16QAM la probabilidad de error de aproximadamente de 10^{-2} el detector ZF alcanza un mejor desempeño en relación a MMSE al utilizar una modulación más compleja. Lo que ocurre de manera similar al utilizar el sistema de $64 \times 64\text{MIMO}$ en una modulación de 64QAM. Donde se puede apreciar con una probabilidad de error por bit de aproximadamente 10^{-1} que el detector ZF logra un mejor comportamiento para una E_b/N_0 aproximadamente de 20dB en relación a MMSE, que lo alcanza con una $E_b/N_0 = 25\text{dB}$ (aproximadamente 5dB s de

diferencia en comparación con MMSE). Este tipo de análisis demuestra el buen rendimiento del detector ZF en los sistemas MIMO ante el aumento de la complejidad del sistema.

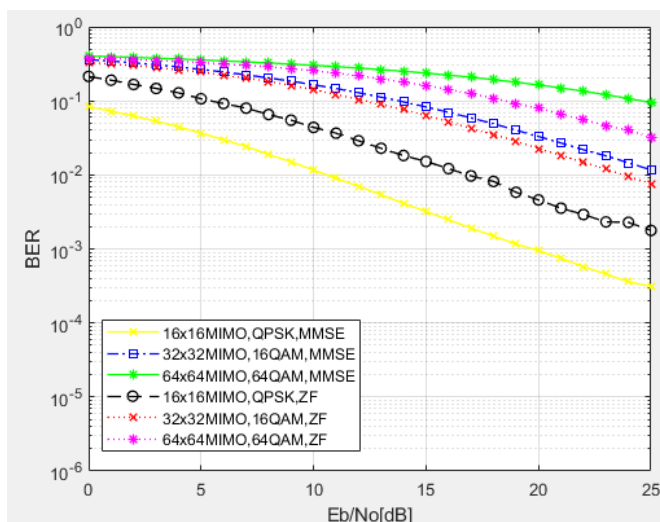


Figura 9: Comparación de desempeño de detectores en 16x16, 32x32 y 64x64 para un sistema MIMO.

6. CONCLUSIONES

La contribución principal de este artículo es el estudio de las características de los sistemas MIMO, así como el análisis de los detectores ZF y MMSE. Realizando una comparación del comportamiento de un modelo de transmisión-recepción sobre el canal AWGN usando los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM, desarrollado analíticamente y mediante la ayuda del software MATLAB. Resultan interesantes los resultados que reflejan las simulaciones, el buen rendimiento que presenta el detector ZF en relación al detector MMSE ante el aumento de la complejidad de la modulación. Lo que deja en evidencia, que la utilización de este tipo de técnica podría ser una tecnología clave para abordar problemas que se puedan presentar en futuras estructuras como la 5G. El detector ZF es menos complejo de implementar, debido a que con el ZF solo se necesita conocimiento del canal, garantizando una mayor facilidad para la implementación de este tipo de técnica en sistema MIMO, permitiendo la eliminación de las interferencias, ya que a medida que el ruido disminuye, el BER va mejorando. En cambio, para el detector MMSE se necesita conocer la matriz de covarianza y la señal de referencia. Sin embargo, los resultados que se obtuvieron de las simulaciones relacionadas con la modulación QPSK demuestran que el detector MMSE también presenta un buen rendimiento en relación al detector ZF, como se muestra en la Fig. 9. Ya que la misma mejora de manera exponencial a medida que aumenta el número de antenas que se utiliza en el sistema MIMO. El propósito de dicha comparación es útil para realizar una valoración más objetiva por reflejar el impacto que puede significar la utilización de este tipo de detectores. Combinando otras tecnologías con un nuevo esquema de comunicación en los canales multitrayecto, siendo esta una tecnología clave para abordar problemas que se puedan presentar en la estructura de la 5G, y así satisfacer la creciente demanda de los usuarios.

REFERENCIAS

- [1] T. Hossain, M. Y. Ali and M. Munjure Mowla, "Energy Efficient Massive MIMO 5G System with ZF Receiver," 2019 3rd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE), 2019, pp. 133-136, doi: 10.1109/ICECTE48615.2019.9303583.
- [2] F. A. Dicandia and S. Genovesi, «Exploitation of Triangular Lattice Arrays for Improved Spectral Efficiency in Massive MIMO 5G Systems», IEEE Access, vol. 9, pp. 17530-17543, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053091.
- [3] W. Li, N. Wang, L. Jiao and K. Zeng, «Physical Layer Spoofing Attack Detection in MmWave Massive MIMO 5 G Networks», in IEEE Access, vol. 9, pp. 60419-60432, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3073115.

- [4] K. Zhi, C. Pan, H. Ren and K. Wang, «Ergodic Rate Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Massive MIMO Systems with ZF Detectors», *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 264-268, Feb. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3128904.
- [5] A. M. Ammar, A. Y. Ellafi and A. R. Zerek, «Studying and Investigation of Energy Efficiency in massive MIMO Using MMSE, ZF and MRT Algorithms», 2022 IEEE 21st international Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2022, pp. 705-709, doi: 10.1109/STA56120.2022.10019103.
- [6] J. L. Blanco Orta, M. C. Guerra Martínez y F. R. Marante Rizo, «Análisis del desempeño de la OTFS para mejorar la flexibilidad de la arquitectura para la 6G», vol. 42, no. 3, pp. 18-30, 2021.
- [7] S. Mohanty, A. Agarwal, S. Mali, G. Misra and K. Agarwal, «Design and BER Performance Analysis of MIMO and Massive MIMO Networks under Perfect and Imperfect CSI», 2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), 2020, pp. 307-312, doi: 10.1109/I-SMAC49090.2020.9243359.
- [8] E. G. Arévalo and M. A. Rodríguez, «Sistema de comunicaciones con antenas MIMO», Tesis, Bárbula, 2016.
- [9] E. F. Badran, A. Y. Alamri, M. A. Mokhtar and E. A. El-Badawy, «A space wavelet block codes MIMO SC-WDMA systems», *Physical Communication*, vol. 36, no. 100804, pp. 1-10, 2019, doi: 10.1016/j.phycom.2019.100804.
- [10] F. Kasem, K. Rambabu, A. K. Iyer and W. A. Krzymień, «A Reduced-Complexity Load-Modulated MIMO Transmitter Readily Scalable in 5G Massive MIMO Transmitters», *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, doi: 10.1109/TCSII.2023.3250665.
- [11] M. Kirik and J. M. Hamamreh, «Multiple MIMO with Antenna Number Modulation», 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/UCET51115.2020.9205485.
- [12] G. L. Agredo Méndez, «Diseño de un esquema de detección L-MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricas», PhD, Universidad del Cauca, Popayán, 2018.
- [13] K. He, Z. Wang, D. Li, F. Zhu and L. Fan, «Ultra-reliable MU-MIMO detector based on deep learning for 5G/B5G-enabled IoT», *Physical Communication*, vol. 43, no. 101181, pp. 1-7, 2020, doi: 10.1016/j.phycom.2020.101181.
- [14] S. Tarboush, H. Sameddeen, M. -S. Alouini and T. Y. Al-Naffouri, «Single- Versus Multicarrier Terahertz-Band Communications: A Comparative Study», *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 1466-1486, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3201038.
- [15] A. E. Zorkun, M. A. Salas-Natera and R. Martínez Rodríguez-Osorio, «Improved Iterative Inverse Matrix Approximation Algorithm for Zero Forcing Precoding in Large Antenna Arrays», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 100964-100975, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208155.
- [16] Z. Zeng, L. Jia and M. Shao, «CA Low Complexity MMSE Hybrid Precoding Algorithm», 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), 2020, pp. 837-839, doi: 10.1109/ICITBS49701.2020.00184.

SOBRE LOS AUTORES

Jorge Luis Blanco Orta. Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Actualmente labora como Ingeniero en la Emisora Municipal de Radio Mariel, Artemisa, Cuba. ORCID: 0000-0001-9592-7818.

María del Carmen Guerra Martínez. Ingeniera en Telecomunicaciones, Master en Ciencias. Trabaja en la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, se desempeña como Profesora, es Asistente, y pertenece al Grupo de Comunicaciones Inalámbricas. ORCID: 0000-0003-1989-4414.

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses de los autores o de las instituciones a las cuales pertenecen en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Autor 1:** Conceptualización, preparación, creación, desarrollo del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo, organización y sugerencias acertadas para la conformación de la versión final.
- **Autor 2:** Conceptualización, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo, contribución a la idea y organización, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final y aprobación de la versión final a publicar.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

