

Evaluación de una red de Sensores Inalámbrica para detección de Incendios Forestales.

Arellano Aucancela Alberto, Avila-Pesántez Diego, Erazo Peña Jennyfer,
Hervas Parra Carlos
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)
Facultad de Informática y Electrónica
Escuela de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes.
Riobamba - Ecuador
{aarellano, davila, jerazo, hervasc}@epoch.edu.ec

Abstract— For a system to detect forest fires it has evaluated a Wireless Sensor Network (WSN) by propagation analysis and computer simulations of three different standards that use IEEE 802.15.4: Xbee Series 2, Xbee Pro 2.4 GHz and Xbee Pro 900 MHz. The study was conducted based on the measurement of variables such as package delivery rate, yield, low energy consumption and coverage parameters describing a forest environment. The so-called Weissberger Model, which allows to find losses produced by foliage and coverage values, was used to perform the analysis of propagation. The values obtained by the analysis were used to carry out computer simulations using the software NS-2. With the results of the study and statistical analysis determined that the Xbee Pro 2.4GHz version is most suitable for implementing such a system. Finally, the WSN was designed in a real forest environment in which it was able to locate a node for coordinator as well as a sensor node for testing the network operation.

Resumen— Para un sistema de detección de incendios forestales se ha evaluado una Red de Sensores Inalámbrica (WSN) mediante el análisis de propagación y simulaciones computacionales de tres tipos de versiones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, Xbee Series 2, Xbee Pro 2,4 GHz y Xbee Pro de 900 MHz. El estudio se realizó en base a la medición de variables como: tasa de entrega de paquetes, rendimiento, consumo energético y cobertura bajo parámetros que describen un entorno forestal. Para el análisis de propagación se utilizó el Modelo de Weissberger que permite hallar las pérdidas por follaje y valores de cobertura, con estos valores obtenidos se efectuó las simulaciones computacionales utilizando el software NS-2. Con los resultados obtenidos del estudio y el análisis estadístico se determinó que la versión Xbee Pro 2.4GHz es la más adecuada para la implementación de este tipo de sistema. Finalmente, se diseñó la WSN en un ambiente forestal real, en el cual se pudo ubicar un nodo coordinador así como un nodo sensorial para la realización de pruebas de operación de la red.

Palabras Clave—*Wireless Sensor Network, Forest fire, Weissberger model, nodes.*

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en el Ecuador y el mundo, uno de los mayores impactos de los

incendios forestales son los efectos sobre el cambio climático [1]. Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos de Ecuador, en el año 2012, se perdieron 17.600 hectáreas de bosques, páramos y cultivos, [2] afectando significativamente al Estado, a la población, los ecosistemas y dentro de éstos la flora y la fauna. Las causas de los incendios forestales en nuestro país son en tan solo un 5% provocado por factores ambientales apropiados para desatar un incendio, mientras que en un 95 % son de origen antrópico; debido a negligencias y desconocimiento del ser humano.

Cabe resaltar que los efectos de un incendio forestal se dan a grandes proporciones debido a que no existe un componente preventivo para atender este tipo de catástrofes [3], en el país actualmente solo existen mecanismos que tratan este problema cuando un incendio forestal ya ha causado un impacto ambiental significativo, es así que las labores para tratar de apagar un incendio forestal se dificultan mucho más cuando ya se encuentra en una fase avanzada y se han maximizado las pérdidas del área forestal [4].

Actualmente el avance tecnológico y la creación de nuevos estándares hacen que problemas ambientales, como un incendios forestales tengan nuevas y mejores alternativas de solución. La WSN consta de dispositivos de tamaño pequeño, que se integran a un sistema con capacidades de comunicación de radio[5]. Los elementos principales que sirven de base para el funcionamiento de una WSN son: *Nodos Sensoriales (Motas)* que se encargan de la recolección de información mediante sensores de algún evento o fenómeno físico; *Nodos Coordinadores* que reciben toda la información enviada por cada nodo sensorial dentro de la WSN; *Gateway*, que interconectan la red WSN con una red TCP/IP y *Estación Base*, que recibe toda la información de la red para su procesamiento. Véase figura 1.

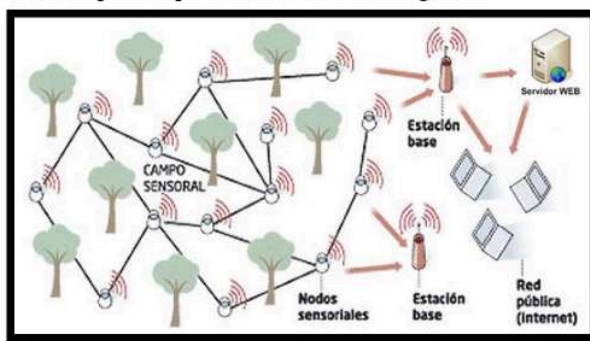


Figura 1. Elementos principales de una WSN.

En este caso la utilización del estándar IEEE 802.15.4 (Zigbee) mediante la implementación de una WSN permite generar un sistema de prevención, monitoreo y detección de incendios forestales. La WSN permite acoplar en el diseño características muy importantes como: flexibilidad de red, bajos costos, y bajo

consumo de energía [4], que complementado con la utilización de simulaciones computacionales permiten tener una idea aproximada del funcionamiento real de esta red, en este caso, se efectuarán simulaciones con las diferentes versiones de Zigbee, para hallar el módulo de transmisión de datos inalámbricos más adecuado para el sistema propuesto en este trabajo.

II. MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA WSN

Existen varios modelos de propagación que sirven para modelar el comportamiento de las señales que se transportan en una WSN en un área forestal. Los principales aspectos que se deben tomar en cuenta son: la densidad de los árboles, las difracciones que se dan debido a la presencia de obstáculos dentro del área y la irregular topografía que puede presentar el terreno. Los modelos empíricos como el de Weissberger [6], ITU- R [7] y COST235 [8], sirven para predecir valores como cobertura de la señal, potencia recibida y pérdidas que tiene un enlace inalámbrico. A continuación se describe cada uno de los modelos y sus aportes.

A. Modelo de Weissberger

Este modelo también conocido como el modelo de Decaimiento Exponencial Modificado [6, 9], se aplica en los entornos cuyo trayecto de la señal inalámbrica se encuentra obstaculizado por un conjunto de árboles. El modelo es aplicado en situaciones en las cuales es más probable que la propagación de la señal inalámbrica se origine en su interior de los árboles de un bosque, en lugar de que el fenómeno de difracción se origine sobre la parte superior de los árboles. Véase figura 2.

La fórmula de pérdidas en decibelios por la presencia de follaje en el área de transmisión está dada por las ecuaciones (1) y (2), según sea el requerimiento.

$$L_w(dB) = 1,33f^{0,284}d^{0,588} \quad 14m < d \leq 400m \quad (1)$$

$$L_w(dB) = 0,45f^{0,284}d^{0,588} \quad 0m < d \leq 14m \quad (2)$$

Donde la variable L_w representa la pérdida en decibelios por vegetación presente en el área de transmisión, la variable " f " es la frecuencia expresada en GHz y " d " es el valor de la distancia que existe desde que la señal ingresa al área forestal hasta donde se encuentra el dispositivo receptor. Otro parámetro de pérdidas es la presencia de follaje (densidad de las hojas), cuya pérdida por trayectoria de la señal está dado por un valor aproximado de 3 a 5 dB. Mientras que en la temporada en la

cual los árboles se encuentran sin hojas, este parámetro es despreciable[9].

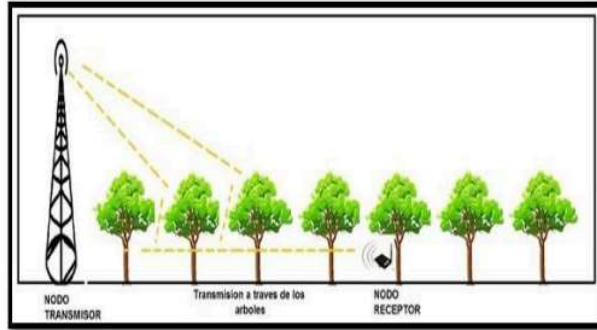


Figura 2. Propagación de la señal en el modelo Weissberger

B. Modelo de ITU Recomendación (ITU-R)

Este modelo fue desarrollado a partir de las mediciones efectuadas en la banda de UHF (Ultra High Frequency 300MHz – 3GHz), y fue planteado únicamente para los casos en los que la distancia entre el transmisor y el receptor de un enlace inalámbrico sea menor a 400m [9], para lograr que la mayoría de la señal se propague a través de los árboles, este modelo está diseñado para una agrupación de árboles pequeños (Véase figura 3), denotada por la siguiente ecuación:

$$L_{ITU-R}(dB) = 0,2f^{0,3}d^{0,2} \quad (3)$$

Donde el valor de la pérdidas dado en decibeles L_{ITU} , depende del valor de la frecuencia(f) en MHz y la distancia (d) en metros.

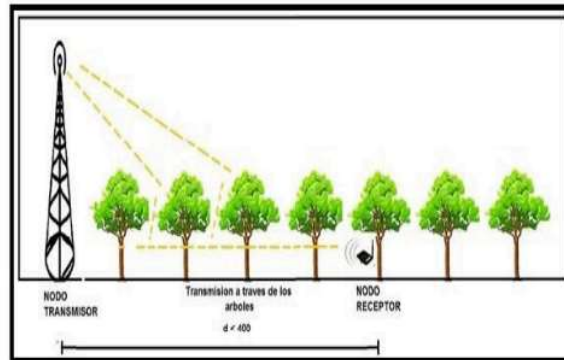


Figura 3. Propagación de señal en Modelo ITU-R

C. Modelo de COST 235(ITU-R)

El modelo COST235 [8,9], fue formulado en base a las mediciones realizadas en pequeñas áreas forestales de distancias menores a 200 metros, y para el rango de frecuencias dado desde los 9.6 GHz hasta los 57.6 GHz. Expresando las ecuaciones de la siguiente manera:

$$L_{COST}(\text{dB}) = 26,6f^{-0,2} d^{0,5} \text{ out-of-leaf} \quad (4)$$

$$L_{COST}(\text{dB}) = 15,6f^{-0,009} d^{0,26} \text{ in-leaf} \quad (5)$$

La pérdida en decibels L_{COST} se puede obtener en base a dos ecuaciones (4) y (5), la primera se obtiene en ambientes con árboles con follaje, y la segunda cuando existe un ambiente sin follaje. El valor de frecuencia (f) se debe expresar en MHz y la distancia (d) en metros [8]. A partir del estudio del modelo se puede determinar que la obtención de la pérdida en base a los parámetros de vegetación-trayectoria se expresa en la ecuación (6). Los tres parámetros A,B y C se pueden optimizar empíricamente en base a técnicas de regresión basadas en los datos de medición específica.

$$L_{\text{foliage}}(\text{dB}) = A f^B d^C \quad (6)$$

En la cuadro I., se visualiza una comparación de los modelos con sus características que permite seleccionar el modelo que cumple las necesidades que se propone en este estudio.

Cuadro I. Modelos de propagación para WSN con sus principales características.

Comparación de Modelos de propagación de la investigación			
	Weissberger	ITU-R	COST235
Cálculo de Pérdidas	En base a la frecuencia del enlace, altura de los árboles y densidad de hojas	En base a la frecuencia y distancia del enlace	En base a la frecuencia y distancia del enlace
Distancia máxima de cálculo	no se basa en la distancia	< 400 metros	< 200 metros
Frecuencias de operación	UHF 230 MHz hasta 95 GHz	UHF	de 9.6GHz hasta 57.6GHz

Características del área forestal	Áreas con bastante follaje	Agrupación pequeña de árboles	Áreas con poca o bastante follaje
-----------------------------------	----------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

III. EVALUACIÓN DE LA RED WSN

Para realizar la evaluación de la WSN, es importante tener en cuenta el escenario de aplicación que está ubicado en sector de Santa Lucia de Tembo, Parroquia de San Isidro del cantón de Guano de la provincia de Chimborazo (Véase Figura 4). Esta área tiene una superficie total de 17,67 hectáreas y se identifica por su densidad de flora, la presencia abundante de árboles, vegetación de mediano tamaño, y recurso energético limitado.

Para cada análisis se realiza el cálculo del enlace inalámbrico entre un Nodo Coordinador y un Nodo Sensorial con los siguientes parámetros. El Nodo Coordinador se encuentra en la estación base a una altura de 30 metros y el Nodo Sensorial se ubica dentro del área forestal localizado a una altura de 3 metros. La distancia entre estos nodos es de 100 metros que cubren varios kilómetros cuadrados a lo largo de su superficie. El tamaño de los árboles es variado y se define en base al rango entre 7 y 16 metros. La distancia que existe entre cada árbol plantado es de 5 metros, ya que es un bosque sembrado mediante una planificación específica. Con este escenario establecido se va a evaluar las siguientes versiones de Zigbee: Xbee Series 2 [10], Xbee Pro 2,4 GHz [11] y Xbee Pro 900 MHz [12], utilizando las variables de estudio como son: Cobertura, Eficiencia energética y Tráfico.



Figura 4. Vista satelital del área forestal de prueba. Fuente: Google Earth.

Los valores de cobertura serán evaluados en base a los niveles de pérdidas y señal recibida en el enlace inalámbrico a través del modelo de Weissberger, que resultó ser el mejor por las características del área forestal de estudio. Posteriormente mediante el uso de simulaciones computacionales se obtendrán los valores de consumo energético y tráfico. Todos estos resultados servirán finalmente para seleccionar cuál es la mejor versión de la tecnología Zigbee para ser utilizada en el diseño e implementación de una Red de Sensores Inalámbrica en áreas forestales para la detección de incendios forestales.

III- A Análisis de Cobertura de la señal

Con el escenario establecido, se aplica el modelo de Weissberger, para los parámetros definidos para calcular la potencia recibida en el nodo sensorial empleando Xbee Series 2 que trabaja a una frecuencia de 2,4 GHz.

Cálculo de Pérdidas (dB) por Follaje del área forestal

El valor de la profundidad (Pb) del bosque viene dado mediante la diferencia de la altura promedio de los árboles cuyo valor se estableció en 15 metros y la altura a la cual se ubicó el Nodo sensorial que es de 3 metros.

$$Pb = ha - hnRx \quad (7)$$

$$Pb = 12\text{metros} \quad (8)$$

La pérdida en la transmisión por el follaje del área forestal mediante Modelo de Weissberger es:

$$L_W(\text{dB}) = (1,33) * f^{0,284} * Pb^{0,588} \quad (9)$$

$$L_W(\text{dB}) = 7,352\text{dB}. \quad (10)$$

Las pérdidas por espacio libre está dada en base a la frecuencia de 2400 MHz y la distancia que se expresa así:

$$L_0(\text{dB}) = 32,4 + 20\text{Log}(Frecuencia) + 20\text{Log}(Distancia) \quad (11)$$

$$L_0(\text{dB}) = 32,4 + 20\text{Log}(2400) + 20\text{Log}(0,100) \quad (12)$$

$$L_0(\text{dB}) = 80\text{dB} \quad (13)$$

Cálculo total de las pérdidas en el enlace inalámbrico

Las pérdidas totales L_{total} se obtienen de la sumatoria de las pérdidas producidas por el enlace inalámbrico en el espacio libre L_o (dB), más las pérdidas obtenidas por el follaje de área forestal L_W (dB), más el valor de pérdidas por la presencia de hojas establecido en el modelo de Weissberger con un valor de 4 dB.

$$L_{total}(\text{dB}) = L_o(\text{dB}) + L_W(\text{dB}) + L_{hojas}(\text{dB}) \quad (14)$$

$$L_{total}(\text{dB}) = 80(\text{dB}) + 7,352(\text{dB}) + 4(\text{dB}) \quad (15)$$

$$L_{total}(\text{dB}) = 91,352\text{dB} \quad (16)$$

Cálculo de la Potencia Rx en el enlace inalámbrico

Para obtener la potencia recibida P_{Rx} en el Nodo Sensorial o Equipo Receptor se debe realizar un balance de potencias en base a los valores que tiene la Versión Xbee Serie 2: $P_{Tx} = 2\text{mW} = 3 \text{ dBm}$; $G_{Tx} = 2,1 \text{ dBi}$ y $G_{Rx} = 2,1 \text{ dBi}$.

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{total} \quad (17)$$

$$P_{Rx} = 3\text{dBm} + 2,1\text{dB} + 2,1\text{dB} - 91,352\text{dB} \quad (18)$$

$$P_{Rx} = -84,152\text{dBm} \quad (19)$$

Con estas fórmulas planteadas se determinó los resultados de cada versión de Zigbee, obtenidos a partir de los cálculos realizados en base a las diferentes alturas que puede tener un árbol del rango especificado. Los resultados para el análisis de propagación se pueden visualizar en el cuadro II. Se realizó un total de 10 observaciones por cada versión.

Cuadro II. Resultados de análisis de propagación.

Variable:	Cobertura-Potencia Recibida (dBm)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	-80,651	-65,651	-57,217
2	-81,192	-66,192	-57,625
3	-81,689	-66,689	-58,002
4	-82,153	-67,153	-58,353
5	-82,59	-67,59	-58,684
6	-83,006	-68,006	-58,999
7	-83,402	-68,402	-59,299
8	-83,783	-68,783	-59,587
9	-84,152	-69,152	-59,864
10	-84,504	-69,504	-60,133

III- B Análisis de consumo energético.

Para la evaluación de las variables de eficiencia energética de la WSN se ha decidido utilizar las simulaciones computacionales a través del Software Simulador NS-2 con licencia GNU (General Public License).[13], con el fin de entender la manera cómo funcionaría el sistema y la forma como interactúa con las variables del entorno forestal.[14]. Se tiene que generar un archivo de configuración, para lo cual se establece cada uno de los componentes que intervienen dentro de la estructura de simulación que se dividen de la siguiente manera: Parámetros de simulación, configuración de los nodos de la red, Configuración de los agentes de tráfico de la red.

Parámetros de simulación: La topología establece caminos entre los nodos de una red para transmitir la información hacia un nodo final o nodo concentrador. En nuestro escenario la topología seleccionada es la topología en árbol, que se caracteriza por el reenvío de datos hacia un nodo específico lo que permite que el consumo de energía sea utilizado de manera eficiente.

Configuración de los nodos de la red: Para ello es necesario definir parámetros como: potencia transmitida, potencia recibida, umbral de recepción (sensibilidad), frecuencia y canal de operación. Estos parámetros son establecidos por medio de la programación en dicho simulador. (Véase figura 5).

Configuración de los agentes de tráfico de la red: Existen varias variables para especificar la simulación de una WSN dentro del software NS-2 como son: tipo de canal, tipo de estándar, tipo de interfaz, tipo de antena para el nodo, características del protocolo, número de nodos, tipo de tráfico y distancia entre los nodos.(Véase Figura 6).

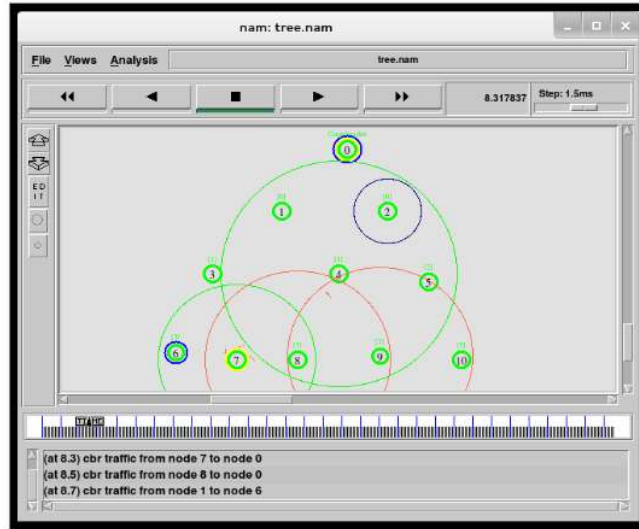


Figura 5. Simulación de 10 nodos para establecer parámetros de comparación del escenario.

En el transcurso de la simulación, el software se encarga de realizar el cálculo del consumo de energía que se da en cada evento o suceso de cada nodo debido a la transmisión y recepción de datos, y lo registra en una traza, estos valores van restando el valor de energía inicial del nodo, con lo cual al final de la simulación se obtiene el valor aproximado de energía consumida dentro de la red WSN.

```

set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# Tipo de canal
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4 ;# Tipo de Estandar capa física
set val(mac) Mac/802_15_4 ;# Tipo de Estandar capa MAC
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# Tipo de interfaz
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ;# Modelo de antena
set val(ifqlen) 150 ;# Máximo de paquetes en ifq
set val(nn) 11 ;# Número de nodos
set val(rp) AODV ;# Protocolo de enrutamiento
set val(x) 100 ;# Distancia entre nodos
set val(y) 100 ;# Distancia entre nodos
set val(traffic) cbr ;# Tráfico UDP/CBR

```

Figura 6. Variables establecidas en el agente de tráfico dentro de la programación para la simulación.

El valor final de consumo energético vendrá dado en Julios y será la sumatoria del consumo de todos los 11 nodos configurados en la simulación que se visualiza en el cuadro III.

Cuadro III. Valores calculados de consume energético (julios) para cada tecnología Zigbee.

Variable:	Consumo Energético (Julios)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	46649,3829	46791,10882	46768,47571
2	46648,3328	46792,10341	46768,43437
3	46648,3828	46791,14455	46767,88965
4	46647,3764	46791,88745	46768,49132
5	46649,0952	46791,23412	46768,67278
6	46649,3157	46790,90885	46768,54378
7	46647,3873	46792,00082	46767,57581
8	46649,3829	46791,34765	46768,24671
9	46649,3844	46792,14322	46767,97531
10	46648,0023	46791,10882	46768,49138

III- C Análisis de tráfico

Para el análisis de tráfico, los valores que se pueden obtener de la simulación mediante NS-2 son: la tasa de paquetes de datos enviados y recibidos; paquetes perdidos dentro de la red, y la tasa de transferencia (throughput) que tiene cada versión de Zigbee.

La tasa de entrega de paquetes es calculada mediante la relación que existe entre los paquetes enviados y los paquetes recibidos dentro de la red, es así, que se obtendrá el porcentaje de fiabilidad en la entrega de paquetes que tiene cada versión. (Véase Cuadro IV).

$$Tasa\ de\ entrega = (Paquetes\ Recibidos) / (Paquetes\ Enviados) * 100\% \quad (20)$$

El throughput se obtiene en base a la cantidad de datos que se puede enviar en un determinado tiempo, el simulador obtiene esta información en base a la cantidad de sucesos de transmisión o recepción de datos que ocurren en un intervalo de tiempo entre cada traza que se registra. En función de estas fórmulas se realizó el cálculo respectivo. (Véase en el cuadro V.)

$$Throughput = (Cantidad\ de\ datos) / (Tiempo\ de\ Simulación) \quad (21)$$

Cuadro IV. Valores medidos para la tasa de entrega de paquetes.

Variable:	Tasa de Entrega de Paquetes (%)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	90	96	87
2	90	96	87
3	92	97	88
4	91	96	86
5	89	95	84
6	90	97	86
7	89	96	84
8	89	97	87
9	90	96	86
10	91	97	85

Cuadro V. Valores medidos para el throughput.

Variable:	Throughput (Kb/s)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	3,8115	4,0440	3,7475
2	3,8235	4,3441	3,5678
3	3,8141	4,0562	3,902
4	3,6525	4,2647	3,7776
5	3,7892	4,0543	3,2515
6	3,6632	4,0445	3,2534
7	3,8173	4,3241	3,7567
8	3,7534	4,8481	3,586
9	3,7902	4,6078	3,6321
10	3,8224	4,0469	3,7473

IV. DISCUSION Y RESULTADOS

Para este análisis, se realizó el estudio estadístico de los resultados obtenidos sobre el tráfico (tasa de entrega de paquetes y throughput de la red), consumo energético y cobertura de las simulaciones efectuadas de cada versión Zigbee. Los resultados de cada variable se analizó mediante el método estadístico de Tukey, el cual es una distribución de probabilidad que nos permite estimar las diferencias significativas que existen entre las medias de una población de datos que se encuentran normalmente distribuidos.[15].(Véase cuadro VI.).

Cuadro VI. Análisis de las métricas aplicadas al estadístico de Tukey.

Observaciones	Xbee Serie 2 julios	Xbee Pro 2,4GHz julios	Xbee Pro 900MHz julios
1	46,649.38	46,791.11	46,768.48
2	46,648.33	46,792.10	46,768.43
3	46,648.38	46,791.14	46,767.89
4	46,647.38	46,791.89	46,768.49
5	46,649.10	46,791.23	46,768.67
6	46,649.32	46,790.91	46,768.54
7	46,647.39	46,792.00	46,767.58
8	46,649.38	46,791.35	46,768.25
9	46,649.38	46,792.14	46,767.98
10	46,648.00	46,791.11	46,768.49
n =	10	10	10
Sumatoria =	466,486.04	467,914.99	467,682.80
Media =	46,648.60	46,791.50	46,768.28
Desviación est=	0.82	0.48	0.35
Media General=	46,736.13		

Posteriormente mediante el análisis de varianza **ADEVA**, se realizó la comparación de las medias de cada variable para determinar el nivel de significancia y diferencia estadística que tiene cada media de cada variable de los tres tecnologías Zigbee analizadas. Para este estudio el valor de significancia que se tiene en el análisis de varianza es de 0.05 para un 95% de precisión y exactitud en la medición de los datos y 5% de error entendiéndose como significativo y un valor de 0.01 para un 99% de precisión y exactitud en la medición de los datos y 1% de error entendiéndose como altamente significativo. (Véase cuadro VII).

Cuadro VI. Análisis de varianza para determinar e grado de significancia.

ADEVA						
FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA CUADRADOS	grados de libertad	CUADRADO MEDIO	FISHER		
				cal	0.05	0.01
TOTAL	117609.78	29				
ENTRE MODELOS	117600.57	2	58800.28	172,304.40	3.35	5.49
ERROR EXP.	9.21	27	0.34			
CV=	0.0012 %			SIGNIFICANCIA =	*	**
Significativo => *						
Altamente Significativo => **						

Al considerar los valores obtenidos y sus mejores resultados de cada versión Zigbee, se comprobó que la evaluación de la Red WSN en condiciones de los parámetros planteados de tráfico, eficiencia energética y cobertura de las diferentes versiones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, estableció que la versión Zigbee Xbee Pro 2.4GHz, es la más adecuada para la implementación del sistema WSN para la detección de incendios forestales, ya que cuenta con una tasa de entrega de paquetes del 96,30 %, un rendimiento del tráfico de red de 4,26 Kbps, un eficiente consumo energético de 46,64 Julios, similar al resto de versiones analizadas. Finalmente, un parámetro de recepción promedio en su cobertura de -67.712 dBm. (Véase cuadro VIII).

Cuadro VIII. Valores comparativos para la selección de la mejor tecnología Zigbee.

Variable Parámetro	Unidad de medida	MODELO			Media General	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
		Xbee Serie 2	Xbee Pro 2.4	Xbee Pro 900			
Entrega Paquetes	%	90.10	96.30	86.00	90.80	5.19	1.14
Throughput	Kb/s	3.77	4.26	3.62	3.89	0.34	5.35
Consumo Energético	julios	46,791	46,649	46,768	46,736	76.68	0.0012
Cobertura	dBm	-82.712	-67.712	-58.776	-69.734	12.10	1.71

V. CONCLUSIONES

Existen varios modelos de propagación de señales inalámbricas que permiten diseñar escenarios en un área forestal, determinar el más adecuado se vuelve una tarea compleja debido a la gran variedad de obstáculos y la vegetación que existen en los terrenos y bosques, el poder tener una aproximación a través de la simulación computacional permite un análisis de programación, cobertura y consumo energético, permite seleccionar la mejor tecnología de Zigbee para su implementación. Además mediante el modelo de Weissberger se pudo obtener valores de las pérdidas muy cercana a los valores obtenidos en las pruebas prácticas realizadas.

La implementación de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) bajo el estándar 802.15.4 permitió generar soluciones en diversas áreas en donde dispositivos sensoriales (nodos) con un mínimo consumo de recursos y energía pueden actuar como agentes de obtención de datos importantes para la prevención, monitoreo y detección de posibles desastres ambientales. Este trabajo se efectuó mediante el método no experimental, basado en la medición sobre las variables específicas de desempeño en la red tales como: tasa de entrega de paquetes, tasa de transferencia, consumo energético y cobertura bajo parámetros que describen un entorno forestal. Mediante el apoyo del software Simulator NS-2 así como el Modelo de Weissberger se evaluó las variables mencionadas y con los resultados obtenidos se definió que la mejor versión es Xbee Pro 2.4GHz para la implementación de un sistema de monitoreo, prevención y detección de incendios forestales. Posteriormente se implementó el prototipo de la red para medir variables ambientales dentro de un área forestal, usando un sistema gestor de datos y plataforma Arduino y Xbee.

REFERENCIAS

- [1] VERA F., VERA J., Impacto Ambiental de la actividad Agraria. Revista Agricultura y Sociedad. 1994.
- [2]. Ministerio del Ambiente de Ecuador., [Web en línea]., < <http://www.ambiente.gob.ec/tag/incendios-forestales/> />., [Consulta 2014-09-06].
- [3] GALINDO G., Los incendios forestales en Ecuador. *Ministerio del Ambiente, Dirección nacional Forestal. Quito, Ecuador.* 2005.
- [4] CASTILLO M., PEDERNERA P., PEÑA E., Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. Revista ambiente y desarrollo de CIPMA, 2003.
- [5] BAHREPOUR M., MERATNIA N., HAVINGA P., Automatic fire detection: a survey from Wireless sensor network perspective, 2008.
- [6] WEISSBERGER, M. A., An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage, ESD-TR-81-101, Electromagnetic Compatibility Analysis Center, Annapolis, Maryland, 1981
- [7] COMITÉ CONSULTIVO INTERNACIONAL DE RADIOCOMUNICACIONES,

- SUIZA., Influences of Terrain Irregularities and Vegetation on Troposphere Propagation., 1ra ed., Ginebra-Suiza., Ed. CCIR., 1986.
- [8] COST235, Radio propagation effects on next generation. Service terrestrial telecommunication systems," Final Rep., Luxembourg, 1996.
- [9] SAIGUA, S., VILLAFUERTE, M., Evaluación de las Topologías Físicas de WSN mediante la Implementación de un Prototipo de Medición de Variables Ambientales para el G.E.A.A.- ESPOCH. Tesis Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes., Riobamba-Ecuador., 2014.
- [10] DIGI INTERNATIONAL, EEUU., Xbee Series 2 OEM RF Modules, Product Manual v1.x.1x - ZigBee Protocol., 1ra ed., Minnesota-EEUU., Ed. Digi., 2007.
- [11] DIGI INTERNATIONAL, EEUU., XBee/XBee-PRO RF Modules, Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol., 1ra ed., Minnesota-EEUU., Ed. Digi., 2009.
- [12] DIGI INTERNATIONAL, EEUU., XBee-PRO 900/DigiMesh 900 OEM RF Modules Product Manual., 1ra ed., Minnesota-EEUU., Ed. Digi., 2008.
- [13] The Network Simulator - NS-2. [Web en línea], < <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> >., [Consulta 2014-10-16].
- [14] MURA, M., Modelización del Costo de la Energía de la Seguridad en Redes Inalámbricas de Sensores: el caso de 802.15.4., 1ra ed., San Petersburgo-Rusia, 2006.
- [15] García Pérez A., Métodos avanzados de estadística aplicada. Métodos robustos y de remuestreo., 2005.