

# Scalability in ad hoc networks under hierarchical architectures

Juan Pablo Ospina López  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Colombia  
jpospinalo@unal.edu.co

Henry Zárate Ceballos  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Colombia  
hzaratec@unal.edu.co

Jorge Eduardo Ortiz Triviño  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Colombia  
jeortizt@unal.edu.co

**Resumen**—In this paper, it is proposed a model based on the truncated geometric distribution, which allows to characterize the available resources in an ad hoc network under a hierarchical architecture and then, estimate a growth factor which represents the appropriate relation between the available resources on two successive layers of the network, that guarantee an established quality level of communications. There were designed three simulation scenarios on ns-3 software for hierarchical architectures of two layers and it was shown that the growth of resources between the layers of an ad hoc network can be expressed using a linear model.

**Index Terms**—Ad hoc Networks, Scalability, Stochastic Model, Geometric Distribution, Network Architecture.

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes ad hoc son un paradigma totalmente distinto a las redes tradicionales, carecen por completo de una infraestructura fija dando completa autonomía a los nodos para configurar su participación en la red. Esta naturaleza descentralizada trae consigo la aparición de propiedades emergentes y genera la necesidad de incorporar en los nodos ciertas características que les permitan configurarse e integrarse como parte de la red sin afectar su rendimiento.

Una de las propiedades esperadas en las redes ad hoc, es la capacidad de aumentar de tamaño recibiendo nuevos nodos, y configurando nuevas aplicaciones sin afectar la calidad en los servicios ofrecidos. Esta propiedad denominada escalabilidad, está directamente relacionada con el enrutamiento, la arquitectura de red y con la naturaleza heterogénea de los nodos. Tomando como punto de partida los problemas de escalabilidad que presentan las redes ad hoc bajo arquitecturas planas, el objetivo de esta investigación se centra en evaluar la escalabilidad en arquitecturas jerárquicas, en las cuales los nodos de las capas superiores son los encargados de servir como intermediarios en las comunicaciones de la red.

En este artículo se propone un modelo basado en la distribución geométrica truncada el cual permite caracterizar los recursos disponibles en una red ad hoc bajo una arquitectura jerárquica, y posteriormente estimar un factor de crecimiento que permitirá encontrar una relación adecuada

entre el nivel de recursos disponibles de dos capas sucesivas en la red.

El documento está organizado de la siguiente forma: primero se hará una breve revisión sobre las características generales de las redes ad hoc; luego se describe el modelo de caracterización basado en la distribución geométrica truncada, la naturaleza del factor de crecimiento, así como su estimación para arquitecturas jerárquicas de dos niveles. Finalmente se presentan los resultados y conclusiones.

## II. REDES AD HOC - GENERALIDADES

Las redes ad hoc son sistemas computacionales auto-organizados formados por un conjunto de nodos que se comunican entre sí a través de enlaces inalámbricos, los cuales no dependen de una infraestructura preexistente para funcionar. Cada nodo actúa de manera independiente y posee completa autonomía para configurar su participación en la red. Este funcionamiento autónomo las diferencia de las redes tradicionales y surge por la libre interacción entre los nodos al intentar alcanzar dinámicamente una organización espontánea, que les permita configurar las comunicaciones y los servicios si ningún tipo de control externo.

### II-A. Arquitecturas de Red

En una red inalámbrica, la arquitectura de red describe las posibles configuraciones de los nodos especificando su diseño, su organización funcional así como el conjunto de protocolos necesarios para su funcionamiento. Generalmente las redes ad hoc presentan dos tipos de arquitecturas [1]:

**Arquitecturas Planas:** En una arquitecturas plana los nodos de la red realizan el enrutamiento y el envío de paquetes de forma independiente y sin ningún tipo de control externo. La falta de un enrutador por defecto hace necesario utilizar nodos intermedios para lograr las comunicaciones. Vale la pena mencionar que las arquitecturas planas presentan problemas de escalabilidad debido a que el tamaño de las tablas de enrutamiento es proporcional al número de nodos en la red, sin embargo, funcionan adecuadamente en redes pequeñas, donde el enrutamiento y consumo de energía es bajo [2].

**Arquitecturas Jerárquicas:** Esta arquitectura surge a partir de algoritmos de agrupamiento, creando grupos de nodos geográficamente adyacentes y conectados entre si llamados cluster, estos grupos se forman dinámicamente y pueden ser adaptados para mejorar el enrutamiento, disminuir el consumo de energía o mejorar la cooperación entre los nodos. Vale la pena mencionar, que las arquitecturas jerárquicas surgen como una respuesta vertical a la existencia de redes heterogéneas y a los problemas de escalabilidad presentados en arquitecturas planas, al mejorar la calidad en las comunicaciones, el enrutamiento y el control de la topología [3].

### III. TRABAJO RELACIONADO

La necesidad de lograr redes ad hoc con la capacidad de reaccionar adecuadamente al aumento en el número de nodos sin perder calidad en los servicios ofrecidos, ha generado que se preste especial atención a la relación que existe entre la arquitectura red, el nivel de recursos disponibles por los nodos y la asignación de tareas en la red [4]. A continuación se mencionan algunos de los trabajos que evidencian la relación directa entre estas propiedades con la capacidad de escalabilidad de una red ad hoc.

En el caso de las arquitecturas planas se han realizado trabajos que intentan mejorar los resultados obtenidos por Gupta y Kumar [5], donde se evidencia que en una red con  $n$  nodos, la escalabilidad de los nodos disminuye en  $\Theta(\frac{1}{\sqrt{n}})$  cuando el número de nodos aumenta. En [6] se contempla la movilidad y la cooperación entre nodos como una forma de mejorar la escalabilidad de la red pero sin establecer límites para los retrasos en las comunicaciones. En [7] se estudia la escalabilidad en redes militares basados en patrones de tráfico bajo la ley de las potencias y donde se observa un incremento en la capacidad de la red desde un punto de vista práctico. En [8], [9] se estudia el impacto de la arquitectura de red sobre redes vehiculares, así como la influencia de la topología y la capacidad de autorganización de los nodos en la escalabilidad de la red.

En el caso de las arquitecturas jerárquicas existen variedad de estudios que buscan indentificar los principales elementos que influyen en el funcionamiento de un cluster, desde el enrutamiento [10], [11], la distribución de los recursos [12], hasta la correcta elección del clusterhead [13].

### IV. MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN CLUSTER Y SUS RECURSOS

Cuando se genera una arquitectura jerárquica, el nivel de recursos en la capas superiores debe ser lo suficientemente grande para soportar la carga de trabajo adicional que implica administrar las comunicaciones de la red, y lo suficientemente pequeño para optimizar la utilización de los recursos. A continuación se presenta un modelo basado en la distribución geométrica truncada el cual permite realizar una caracterización de los recursos disponibles en los nodos así como su distribución en la red.

#### IV-A. Familia geométrica

Sea  $X \sim G(p)$  una variable aleatoria con distribución geométrica y función de densidad de probabilidad determinada por la ecuación (1) con parámetro  $p \in (0, 1)$  y dominio  $x \in \mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ .

$$f_X(x) = p(1-p)^{x-1} \quad (1)$$

Vale la pena mencionar, que esta distribución es al mundo discreto lo que la distribución exponencial es al mundo continuo, esto derivado del hecho de ser la única distribución discreta con la propiedad de perdida de la memoria.

#### IV-B. Familia geométrica truncada

Como se dijo anteriormente, el dominio de una variable aleatoria geométrica es el conjunto  $\mathbb{N}$ . Sin embargo, para los propósitos de esta investigación es necesario restringir, por razones, que se mencionarán más adelante, su dominio a un subconjunto  $A \subseteq \mathbb{N}$ . En consecuencia, es necesario ajustar la estructura probabilística de la variable aleatoria a ese subconjunto. Ahora, si  $Y$  representa una variable aleatoria con una forma funcional geométrica, con parámetro  $p$ , pero truncada a un subconjunto  $A$  entonces:

$$f_Y(y) = \frac{f_X(y)I_A(y)}{P(A)} \quad (2)$$

Donde  $I_A$  se define como la función indicadora del conjunto  $A$  y donde  $P(A)$  puede calcularse como  $P(A) = \sum_{x \in A} f_X(x)$ . Ahora, desarrollando la ecuación (2) obtenemos la función de densidad de la distribución geométrica truncada:

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{pq^{y-1}}{1-q^N} & y = \{1, 2, \dots, N\} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

#### IV-C. Caracterización de un cluster y sus recursos a partir de la distribución geométrica truncada

Tradicionalmente la familia geométrica ha servido como un modelo para representar el número de ensayos de Bernoulli antes del primer éxito. Sin embargo, en este estudio se propone como modelo para describir el porcentaje de recursos con los que cuenta un nodo en relación con el total de los recursos disponibles en el cluster [12]. Por ejemplo, si el 100% de los recursos en un cluster  $X$  se supone bajo una forma funcional geométrica  $X \sim G(p)$  entonces el porcentaje de recursos con los que cuenta el  $x$ -ésimo nodo estará determinado por la ecuación (2).

Ahora, partiendo del hecho en el cual una red ad hoc puede estar formada por más de un cluster, es necesario definir un conjunto de variables aleatorias que pertenezcan a la familia geométrica y que permitan modelar el total de clusters en la red. Con este propósito se define  $\{X_i\}$  con  $i \in \mathbb{N}$ , como un conjunto de variables aleatorias discretas con función de

densidad determinada por la ecuación (4), con parámetro  $p_i \in (0, 1)$  y un dominio  $x_i \in \mathbb{N}$ .

$$f_{X_i}(x_i) = p_i(1 - p_i)^{x_i-1} \quad (4)$$

Luego, teniendo en cuenta que un cluster está formado por un número posiblemente grande pero finito de nodos, es conveniente modelar el porcentaje de recursos de un nodo a través de un conjunto de variables aleatorias que pertenezcan a la familia geométrica truncada. Con este propósito se define  $\{Y_i\}$  con  $i \in \mathbb{N}$  como un conjunto de variables aleatorias discretas con función de densidad determinada por la ecuación (5) con parámetro  $p_i \in (0, 1)$  y truncada a un subconjunto  $A_i \subseteq \mathbb{N}$  el cual representa el total de nodos en el cluster.

$$f_{Y_i}(y_i) = \begin{cases} \frac{p_i q_i^{y_i-1}}{1 - q_i^{N_i}} & y = \{1, 2, \dots, N_i\} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Para realizar una correcta caracterización de un cluster a partir de la distribución geométrica truncada es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cada cluster  $Y_i$  tendrá asociado un valor  $p_i$  y una función de densidad  $f_{Y_i}(y_i)$ .
- Los nodos en el cluster estarán representados por el valor  $y_i$  en  $f_{Y_i}(y_i)$ .
- Los nodos miembro en un cluster  $Y_i$  están representados por el conjunto  $A_i$ , luego  $||A_i|| = N_i$  representa el total de nodos en el cluster.
- El valor de probabilidad obtenido al evaluar  $f_{Y_i}(y_i)$  para un nodo  $y_i$  representa el porcentaje de recursos del nodo en comparación con el 100 % de recursos en el cluster.
- Cada cluster  $Y_i$  tendrá asociado un valor constante  $p_i$  que representa el grado de heterogeneidad en la distribución de recursos en los nodos en el cluster. Valores de  $p_i$  cercanos a uno servirán para modelar cluster donde los nodos presentan una alta variación en su nivel de recursos y valores de  $p_i$  cercanos a cero servirán para modelar cluster donde los nodos tienen aproximadamente los mismos recursos.

En las figuras 1 y 2 es posible observar la caracterización de los cluster  $Y_1$  y  $Y_2$  a partir de la distribución geométrica truncada. Para el cluster  $Y_1$  se tendrá un valor  $N_1 = 5$ , y para el cluster  $Y_2$  se tendrá un valor  $N_2 = 3$ . Vale la pena mencionar que el nivel de heterogeneidad en los cluster estará determinado por el valor del parámetro  $p$ ; cluster similares a  $Y_1$  donde existe una variación significativa entre los recursos disponibles por los nodos estarán representados por valores de  $p$  serán cercanos a 1; por el contrario, cluster similares a  $Y_2$  donde observa una variación mínima entre los recursos disponibles por los nodos estarán representados por valores de  $p$  cercanos a 0.

#### IV-D. Nivel de recursos esperado en un nodo

Teniendo en cuenta que los valores de  $y_i$  en  $f_{Y_i}(y_i)$  representan los nodos en un cluster, es necesario utilizar una

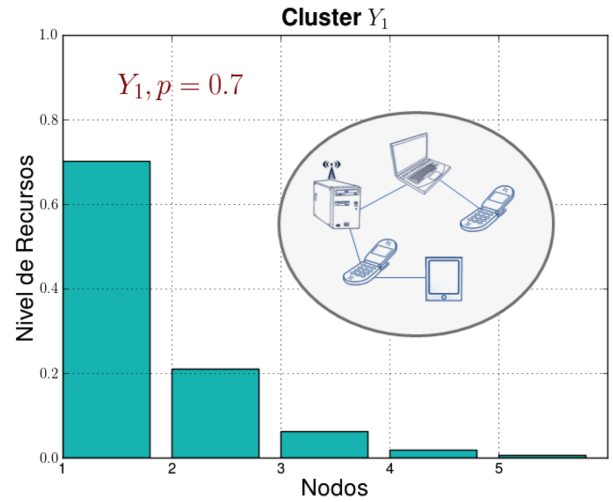


Figura 1. Cluster  $Y_1, p = 0,7$

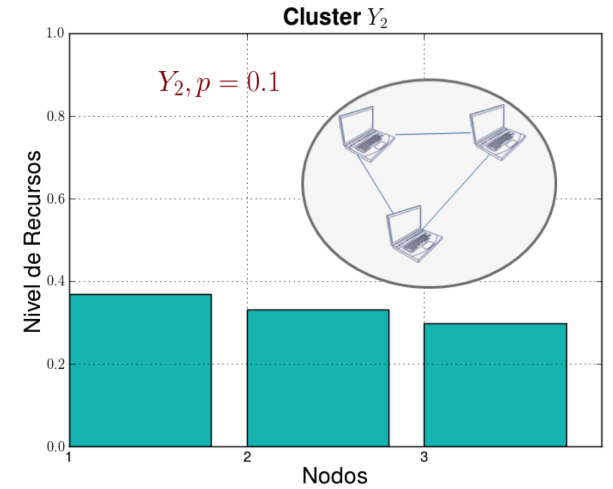


Figura 2. Cluster  $Y_2, p = 0,1$

función  $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$  que permita estimar una ponderación de los recursos computacionales más significativos en el funcionamiento de un nodo. Varias posibilidades pueden ser exploradas para la construcción de  $h(\cdot)$ , sin embargo en esta investigación se plantea un modelo basado en algoritmos de agrupamiento bajo combinación de métricas como los descritos en [3].

Para calcular un ponderado de los recursos computacionales disponibles por un nodo se proponen los siguientes pasos:

1. Definir el valor  $n$  como el número de parámetros a evaluar.
2. Obtener los valores  $m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{in}$  que representan el valor de cada uno de los recursos en el  $i$ -ésimo nodo de la red.

$$\begin{array}{lcl}
\text{Recurso 1} & \rightarrow & m_{i1} \\
\text{Recurso 2} & \rightarrow & m_{i2} \\
& \vdots & \vdots \\
& \vdots & \vdots \\
\text{Recurso } n & \rightarrow & m_{in}
\end{array}$$

3. Calcular el valor de esperado de recursos en el  $i$ -ésimo nodo utilizando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
h(\vec{m}_{ij}) &= \alpha_1 m_{i1} + \alpha_2 m_{i2} + \dots + \alpha_n m_{in} \\
h(\vec{m}_{ij}) &= \sum_{j=1}^n \alpha_j m_{ij}
\end{aligned} \tag{6}$$

Los valores de  $\alpha_i$  pueden ser interpretados como constantes de normalización con  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ , las cuales permiten dar más peso a uno de los recursos según el contexto de operación de la red.

4. El valor esperado de recursos computacionales esperados en el nodo  $i$  estará representado por  $h(\vec{m}_{ij})$

#### IV-E. Nivel de recursos esperado en un cluster

Partiendo del hecho en cual una variable aleatoria  $Y_i$  con una distribución geométrica truncada modela la distribución de recursos disponibles en los nodos de la red y utilizando la función  $h(\cdot)$  como la forma para calcular el nivel esperado de recursos sobre un nodo, se propone la ecuación (7) como la forma de estimar el nivel esperado de recursos en el cluster  $Y_i$ .

$$W_{Y_i} = \sum_{i=1}^N h(y_i) \tag{7}$$

Donde  $W_{Y_i}$  representa una ponderación del total de recursos disponibles en el cluster  $Y_i$ . Vale la pena aclarar que el nivel esperado de recursos en un cluster no es el mismo que el valor esperado de la variable aleatoria  $Y_i$ , y se realiza de esta forma debido a la naturaleza del modelo propuesto. En caso tal, que se deseara calcular  $E[h(Y_i)]$ , este valor representaría el nivel esperado de recursos disponibles en cualquiera de los nodos en el cluster  $Y_i$ .

#### IV-F. Ejemplo de caracterización

Inicialmente, para el desarrollo de esta investigación se evaluará un solo parámetro por nodo con el fin de determinar su nivel de recursos disponible. Este parámetro será definido como el tráfico promedio generado por el nodo  $y_i$  y será calculado como :

$$B_{y_i} = D_{y_i} A_{y_i} \tag{8}$$

Donde  $A_{y_i}$  se definirá como la proporción del tiempo en la cual el nodo  $y_i$  se encuentra enviando datos durante las comunicaciones; en este sentido, si el nodo  $y_i$  envía datos 30 segundos en un minuto el valor de  $A_{y_i}$  será igual a 0,5. De igual forma definiremos la variable  $D_{y_i}$  como la tasa promedio de información enviada por el nodo. Ahora, si tenemos un nodo  $y_i$  con una tasa de transmisión de  $D_{y_i} = 512$  Kbps y un valor de  $A_{y_i} = 0,5$ , su tráfico promedio

generado será  $B_{y_i} = 512 \text{ Kbps} \cdot 0,5 = 256 \text{ Kbps}$ . Para efectos de la simulación este tráfico puede ser implementado a través del modelo on/off [14] el cual permite describir el comportamiento del tráfico agregado por uno o más nodos de la red.

Con el fin de realizar un ejemplo sobre el proceso de caracterización basado en el modelo geométrico, se tomará como referente cluster  $Y_1$  el cual se presenta en la figura 1 y se seguirán los pasos propuestos en la sección anterior para encontrar el nivel de recursos disponibles en los nodos:

1. *Definir el número de parámetros a evaluar:* Como se mencionó anteriormente, para esta caracterización se utilizará el tráfico promedio generado por los nodos como único parámetro para la función  $h(\cdot)$  por lo que el valor de  $n = 1$ .
2. *Obtener los valores que representan los recursos en los nodos:* Para obtener el tráfico promedio generado por los nodos se utilizarán los valores presentados en la tabla I.

Nodo	$D_{y_i}$	$A_{y_i}$	$h(y_i) = B_{y_i}$	Porcentaje en $Y_1$
$y_1$	4200	0,75	3150	0.7
$y_2$	1890	0,5	945	0.21
$y_3$	585	0,5	292,5	0.065
$y_4$	108	0,75	81	0.018
$y_5$	63	0,5	31,5	0.007
<b>Total</b>			$W_{Y_1} = 4500$	1.0

Tabla I  
RECURSOS DISPONIBLES EN  $Y_1$

3. *Calcular el valor de esperado de recursos en los nodos:* Partiendo de la definición del tráfico promedio generado por un nodo la cual se presenta en la ecuación 8, y teniendo en cuenta que solo se utilizará este parámetro en el proceso de caracterización, se procede a calcular el valor esperado de recursos en el cluster  $Y_1$  teniendo en cuenta que para este caso particular  $h(y_i) = B_{y_i}$ . En la tabla I es posible observar los resultados obtenidos para cada nodo, así como el nivel esperado de recursos en el cluster  $W_{Y_1}$ .

Luego de tener el valor esperado de recursos en los nodos de  $Y_1$  es necesario utilizar el método de los momentos para estimar el parámetro  $p$  que corresponde a la distribución geométrica truncada que modela la distribución de recursos sobre este cluster; para realizar esta estimación, es posible utilizar los métodos presentados en [15], [16] consiguiendo como resultado final un valor de  $p = 0,7$  como parámetro de la distribución de probabilidad.

#### IV-G. Factor de crecimiento

Es razonable suponer que a medida que se agregan nuevas capas a la red, los recursos necesarios para mantener un nivel en la calidad de los servicios ofrecidos por el sistema

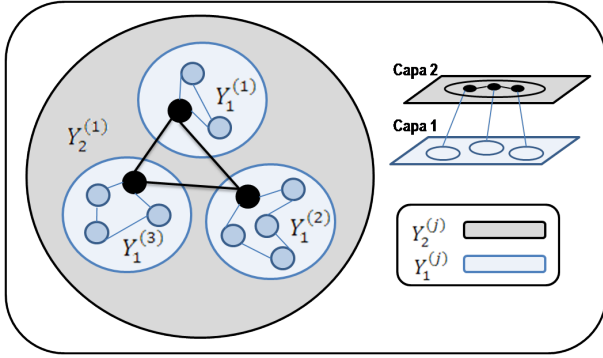


Figura 3. Arquitectura jerárquica de dos capas

deben aumentar, formalmente si  $\mu_i$  representa el 100% de los recursos del nivel  $i$  de la red, entonces en el siguiente nivel debe ocurrir que:

$$\mu_{i+1} = g(\mu_i) \quad (9)$$

Donde  $g : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$  es una función creciente que permite estimar en que medida deben aumentar los recursos en la capa  $i+1$  para mantener un nivel mínimo en la calidad de los servicios. Varias posibilidades para  $g(\cdot)$  pueden explorarse; sin embargo, en este artículo se supondrá un crecimiento proporcional tal como se muestra en la ecuación (10)

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible observar que la relación adecuada entre los recursos disponibles de dos capas sucesivas de la red debe ser un valor intermedio a estos dos escenarios; lograr que nodos ubicados en las capas  $i$  e  $i+1$  de la red puedan mantener un nivel mínimo en la calidad del servicio, implica que el nivel de recursos esperado en la capa  $i+1$  deba ser un valor que relaciona los recursos disponibles en la capa  $i$  con un factor de crecimiento que indicará en que medida los recursos de la capa  $i+1$  deben ser mayores en comparación con la capa  $i$ . Para encontrar esta relación se propone la ecuación (10) donde  $\mu_i$  representa la cantidad esperada de recursos en la capa  $i$  de la red y  $\phi$  será el factor de crecimiento que representa la relación adecuada entre los recursos disponibles en las capas  $i$  e  $i+1$ .

$$\mu_{i+1} = \phi \mu_i \quad (10)$$

Ahora, con el fin de encontrar un método para estimar el valor de  $\phi$  y partiendo del hecho en el cual una capa de la red puede estar formada por más de un cluster, se utilizará la siguiente notación:

Sea  $Y_i^{(j)}$  el  $j$ -ésimo cluster en la capa  $i$  de la red. Cada cluster  $Y_i^{(j)}$  tiene asociada una función de densidad  $f_{Y_i^{(j)}}(y_i^{(j)})$  que pertenece a la familia geométrica truncada y que caracteriza la distribución de recursos disponibles en ese cluster. En la figura 3 es posible observar una arquitectura jerárquica de dos capas, en este caso:

- La primera capa de la red, es decir,  $i = 1$  está formada por los clusters  $Y_1^{(j)}$  con  $j \in \{1, 2, 3\}$ .
- La segunda capa de la red, es decir,  $i = 2$  está formada por el clusters  $Y_2^{(1)}$

Teniendo en cuenta la notación mencionada y partiendo de la topología de red presentada en la figura 3 es razonable suponer que el nivel mínimo de recursos disponible en la segunda capa de a red, puede calcularse de la siguiente forma:

1. Se debe calcular  $W_{Y_1}, W_{Y_2}$  y  $W_{Y_3}$  donde estos valores representan el valor esperado de recursos en los cluster  $Y_1^{(1)}, Y_1^{(2)}$  y  $Y_1^{(3)}$ .
2. El total de recursos esperado en la primera capa de la red puede determinarse por  $\mu_1 = W_{Y_1} + W_{Y_2} + W_{Y_3}$ .
3. El nivel mínimo de recursos en la segunda capa de la red puede ser estimado a través de simulación definiendo unos niveles para la calidad del servicio y utilizando la ecuación 9 para calcular el valor de  $\phi$ .

#### V. ESTIMACIÓN DE LA CONSTANTE $\phi$ A TRAVÉS DE SIMULACIÓN

Los escenarios de simulación propuestos en esta sección son implementados en el software de simulación para redes ns-3 [17] y tienen como objetivo encontrar un valor estimado de  $\phi$  en arquitecturas jerárquicas de dos niveles. En todos los escenarios de simulación propuestos se tienen en cuenta los siguientes parámetros de configuración:

1. Se establece como medida de rendimiento una pérdida de paquetes inferior o igual al 1% del total de paquetes enviados en las comunicaciones.
2. Para los escenarios de simulación propuestos, el funcionamiento de los cluster se considera estable durante las comunicaciones; esto implica que durante la simulación no se consideran relevos de los clusterhead, reorganización de los cluster o comportamientos egoístas en los nodos que puedan afectar el rendimiento de la red.
4. Luego de encontrar un nivel de recursos que cumpla las condiciones establecidas para la pérdida de paquetes se procede a calcular el factor de crecimiento como  $\phi = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ .
5. Al final de cada escenario de simulación se calcula el valor de  $\phi$  promedio, la desviación estándar y un intervalo de confianza con un nivel de significancia del 5% mediante la distribución t-Student debido a la naturaleza de la muestra [16].

#### V-A. Estimación de la constante $\phi$ en una arquitectura de dos capas

En los siguientes escenarios de simulación se estimó el factor de crecimiento  $\phi$  para una arquitectura jerárquica de dos niveles. Los escenarios de simulación consisten en un espacio geográfico de  $500m \times 500m$ , bajo un modelo de tráfico Poisson [18] un enrutamiento bajo el protocolo de enrutamiento OLSR [19], el protocolo de transporte UDP y el modelo de movilidad random waypoint utilizando una velocidad uniformemente distribuida entre 0-1 m/s y donde

los nodos nunca se detienen durante su recorrido. En la tabla II es posible observar un resumen de los parámetros utilizados en su configuración.

Tabla II  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

	Parámetros de simulación
<b>Espacio Geográfico</b>	500m x 500m
<b>Número de Nodos</b>	6 Cluster (6 nodos por cluster)
<b>Modelo de Propagación</b>	ns3-friss
<b>Modelo de Pérdida</b>	ns3-constante
<b>Patron de Tráfico</b>	Modelo Poisson
<b>Movilidad</b>	Radom Waypoint

Para realizar una estimación de  $\phi$  es necesario caracterizar los recursos disponibles en los cluster de la primera capa de la red, para esto se utilizará el modelo basado en la distribución geométrica truncada presentado en la sección IV-F y los pasos presentados al final de la sección IV-G.

Los escenarios de simulación están configurados de forma similar a la arquitectura presentada en la figura 3, se diferencian en que existe una variación en el número de nodos por cluster así como en el total de cluster en la red. Las arquitecturas utilizadas se describen en la tabla III

Tabla III  
ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

	Nodos por cluster	Cluster en la red
<b>Escenario I</b>	6	6
<b>Escenario II</b>	10	4
<b>Escenario III</b>	4	9

### V-B. Resultados de $\phi$ en arquitecturas de dos capas

En la tabla IV es posible observar los resultados obtenidos para la estimación de  $\phi$ , así como los intervalos de confianza para cada uno de los escenarios.

Tabla IV  
RESULTADOS DE  $\phi$  PARA ARQUITECTURAS DE 2 NIVELES

	$\phi$ - Estimado	Int. Confianza 95%
<b>Escenario I</b>	1,5075	[1.3988 ; 1.6162]
<b>Escenario II</b>	1,5865	[1.4733 ; 1.6997]
<b>Escenario III</b>	1,4295	[1.3147 ; 1.5442]

## VI. CONCLUSIONES

Debido al uso masivo de dispositivos inalámbricos, es necesario generar en las redes de comunicaciones la capacidad de reaccionar adecuadamente al crecimiento de la red sin perder calidad en los servicios ofrecidos. Lograr escalabilidad en las redes ad hoc es uno de los grandes retos en el diseño de protocolos y una de las propiedades necesarias para lograr redes ad hoc con una alta capacidad de despliegue, siendo esta una de las principales razones para desarrollar el modelo acá propuesto.

Es necesario ampliar la definición de los parámetros que forman la función  $h(\cdot)$ , esto con el objetivo de incluir en el modelo características adicionales en el funcionamiento de los nodos como son la movilidad, la energía disponible y todos los recursos que puedan influir de forma significativa en el rendimiento de la red.

El modelo de caracterización aquí propuesto puede ser utilizado inicialmente en el proceso generación de una arquitectura jerárquica; estimar la cantidad de recursos necesaria en las capas superiores para mantener la calidad en los servicios, puede evitar problemas con el rendimiento de la red después de que la configuración inicial haya sido generada.

## REFERENCIAS

- [1] S. Zhao and S. Jain, "Ad hoc and mesh network protocols and their integration with the internet," *Emerging Wireless Technologies and the Future Mobile Internet*, p. 54.
- [2] M. G. D. Raychaudhuri, *Emerging Wireless Technologies and the Future Mobile Internet*. CAMBRIDGE University Press, 2011.
- [3] J. Y. Yu and P. H. Chong, "A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 7, no. 1, pp. 32–48, 2005.
- [4] J. Ospina López and J. Ortiz Triviño, "Scalability in ad hoc networks: The effects of its complex nature," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 315–321, 2014.
- [5] P. Gupta and P. Kumar, "The capacity of wireless networks," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, 2000.
- [6] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks," in *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3. IEEE, 2001, pp. 1360–1369.
- [7] R. Ramanathan, R. Allan, P. Basu, J. Feinberg, G. Jakllari, V. Kawadia, S. Loos, J. Redi, C. Santivanez, and J. Freebersyser, "Scalability of mobile ad hoc networks: Theory vs practice," in *Military Communications Conference, 2010-MILCOM 2010*. IEEE, 2010, pp. 493–498.
- [8] W. Zhu, D. Gao, A. Fong, and F. Tian, "An analysis of performance in a hierarchical structured vehicular ad hoc network," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, 2014.
- [9] D. Palma and M. Curado, "Scalability and routing performance of future autonomous networks," *International Journal of Internet Protocol Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 137–147, 2013.
- [10] A. Boukerche, B. Turgut, N. Aydın, M. Z. Ahmad, L. Bölöni, and D. Turgut, "Routing protocols in ad hoc networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 55, no. 13, pp. 3032–3080, 2011.
- [11] N. Chauhan, L. K. Awasthi, N. Chand, and A. Chugh, "A distributed weighted cluster based routing protocol for manets," pp. 147–151, 2011.
- [12] J. Ospina López and J. Ortiz Triviño, "Stochastic model for the characterization of a cluster and its resources in an ad-hoc network," in *Communications and Computing (COLCOM), 2014 IEEE Colombian Conference on*. IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [13] M. Chatterjee, S. Das, and D. Turgut, "Wca: A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks," *Cluster Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 193–204, 2002.
- [14] A. Parra León, E. Piedrahita, and O. Salcedo, "Aplicaciones del modelo on/of al tráfico agregado en las redes de comunicaciones," *Revista Tecnura*, vol. 15, no. 30, pp. 129–147, 2012.
- [15] C. Kapadia and R. Thomasson, "On estimating the parameter of a truncated geometric distribution by the method of moments," *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, vol. 27, no. 1, pp. 269–272, 1975.
- [16] D. C. Boes, F. Graybill, and A. Mood, "Introduction to the theory of statistics," *Series in probabili*, 1974.
- [17] G. Carneiro, "Ns-3: Network simulator 3," in *UTM Lab Meeting April*, vol. 20, 2010.
- [18] V. Iversen, "Teletraffic engineering handbook," *ITU-D SG*, vol. 2, p. 16, 2005.
- [19] T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, L. Viennot *et al.*, "Optimized link state routing protocol (olsr)," 2003.