

# 20. Mapa de Radiación no Ionizante Basado en Sistemas de Información Geográfica

J. J. Huiza y O. A. Valencia, Departamento de Electrónica e Informática-UCA

## Resumen

El presente artículo muestra una síntesis de los resultados obtenidos por dos trabajos de graduación [14, 15] que lograron implementar tanto procedimientos como herramientas de software que muestran mapas tridimensionales digitalizados con información pertinente a la intensidad de radiación no ionizante en las vecindades de una o más antenas tipo dipolo de media onda. Dichos trabajos de graduación fueron auspiciados por el Departamento de Electrónica e Informática de la UCA y la SIGET. Particularmente, se muestra la forma de crear un Modelo Digital de Terreno (MDT), georeferenciado, por medio de la herramienta ArcGIS; también se explica la manera de importar este archivo desde GiD, con la ayuda de su herramienta Iber, para poder utilizarlo en una simulación que muestre la propagación de la radiación no ionizante.

Adicionalmente, se presenta el desarrollo e implementación de un modelo robusto para el cálculo de variables de propagación de ondas de radio, basado en Ray-Tracing (trazado de rayos), siendo éste último un método óptico de carácter asintótico, el cual está especializado en el tratamiento de campos de alta frecuencia. Finalmente, se presenta una serie de conclusiones y recomendaciones.

## Palabras claves

Manual, Modelo Digital de Terreno, MDT, TIN, ArcGis, radiación no ionizante, RNI, modelaje de propagación de ondas electromagnéticas, Intensidad de campo eléctrico, Mallas triangulares, Ray-Tracing, Óptica geométrica, Teoría geométrica de la difracción.

Se reconoce que las siguientes egresadas y egresados que realizaron los dos trabajos de graduación mencionados en el Resumen son co-autores del presente artículo: A. A. Torres ; R. A. Fernández; A. E. Ramos; O. R. Barraza; P. E. Beltrán; G. A. Rivas; A. Sánchez.

## I. INTRODUCCIÓN

En El Salvador y distintos países del mundo, el creciente desarrollo tecnológico y aumento en la demanda de servicios móviles de telecomunicación, ha obligado a las compañías de telefonía móvil a incrementar la infraestructura necesaria para brindar calidad en sus servicios. La ejecución de esta labor está provocando que la población en general, manifieste cierta intranquilidad por los posibles efectos

nocivos a la salud que podría propiciar la presencia de una gran cantidad de unidades radiantes.

En respuesta, la *Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones* (SIGET) ha implementado, conjuntamente con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y la *Comisión Técnica Regional de Telecomunicaciones* (COMTELCA), el *Proyecto de Radiaciones no Ionizantes*, el cual pretende no solamente informar



a la población acerca del tema, sino también llevar a cabo mediciones de intensidad de campo eléctrico en todo el país para verificar que no se excedan los valores de campo establecidos por las normas del *Comisión Internacional sobre Protección frente a Radiaciones no Ionizantes* (ICNIRP) el que a su vez indica los niveles máximos seguros de radiación no ionizante a la que los seres humanos pueden estar expuestos, dependiendo de las bandas de frecuencias.

Uno de los objetivos principales del proyecto SIGET-COMTELCA-UIT es informar a la población si se encuentra o no expuesta a niveles que sobrepasan los establecidos por el ICNIRP. El proyecto es importante, puesto que con información adecuada y permanente, se aumentará la confianza de la población en el funcionamiento apropiado de los nodos de telecomunicaciones.

A la fecha, la SIGET ha realizado el levantamiento de Cartas de Radiación de algunos municipios del país, en particular San Salvador. Las mediciones contenidas en dichas cartas son realizadas, por lo general, mediante un equipo receptor especializado, ubicado en un automóvil que se desplaza mientras que el equipo receptor toma datos de la intensidad de campo eléctrico en diferentes puntos de la zona de interés. En general, dichas mediciones se limitan al interior, y a lo largo, de las calles donde se desplaza la unidad receptora, por lo que puede decirse muy poco acerca de los valores de campo eléctrico donde no se han tomado los datos. Por ejemplo, no existe información de zonas inaccesibles por el alto índice de delincuencia. Tampoco la hay de áreas restringidas por el estado, interior de viviendas particulares y otras propiedades privadas; se suma a esto, la labor de mantener actualizados los datos al momento de instalar nuevas unidades radiantes.

Dentro de este escenario, el presente artículo muestra la contribución de dos trabajos de graduación [14, 15]<sup>1</sup>, auspiciados por el Departamento de Electrónica e Informática y la SIGET, en la implementación de herramientas computacionales capaces de presentar, en mapas digitales, resultados de predicción de intensidades de radiación no

ionizante, expresada en términos de valores de magnitud de campo eléctrico. Estas capacidades de cómputo posibilitarían estudios de pre-factibilidad de proyectos con relación al cumplimiento de normativas del COMTELCA-ICNIRP, o bien la predicción de intensidades de campo en zonas inaccesibles, donde no sea posible la realización de mediciones directas.

## II. MODELOS DE MAPAS DIGITALES

Para lograr la modelización de una superficie y llegar a la generación de un MDT se debe realizar la obtención de datos para su posterior almacenamiento. Es importante que los datos sean fáciles de manejar y ofrezcan una descripción realista del relieve a representar. Luego, la información adquirida debe pasar a organizarse en estructuras para conseguir una gestión más eficaz de la misma.

A continuación se describen los tipos de archivo utilizados para generar el MDT.

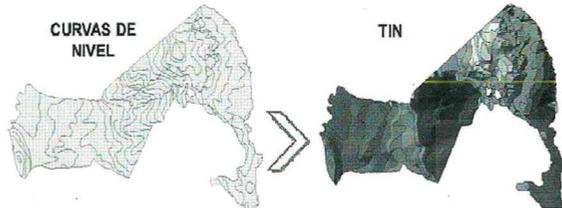
### A. Redes irregulares de triángulos TIN

Son un medio digital para representar superficies, estas estructuras se basan en la formación de una red de triángulos irregulares donde los vértices de los triángulos son los puntos originales obtenidos para la definición del terreno. Se puede crear una estructura TIN a partir de diversas fuentes, se menciona a continuación algunas de ellas:

- Compilaciones realizadas con instrumentos fotogramétricos.
- Datos medidos del terreno.
- Curvas de nivel digitalizadas. (Fig. 1)

<sup>1</sup> Las referencias de este artículo fueron, a su vez, tomadas de ambos trabajos de graduación.

Fig. 1. TIN creado a partir de curvas de nivel, San Ignacio, Chalatenango.



Fuente: Elaboración propia.

### B. Matrices regulares

Las matrices regulares son también un medio digital para la representación de superficies, estas estructuras se basan en la superposición de una retícula sobre el terreno y la extracción del valor que le corresponde en la superficie.

En esta estructura de tipo *raster*, el elemento básico para la representación de la ubicación espacial y referencia de los datos es la celda, que son análogas a los píxeles en el proceso de una imagen. [16] (Fig. 2).

Fig. 2. Estructura raster, San Ignacio, Chalatenango.



Fuente: Elaboración propia.

Para la creación del MDT se genera un TIN para aprovechar la triangulación en el modelado de las zonas de interés logrando así una representación con mayor precisión de las irregularidades del relieve; luego se realiza la transformación a modelo raster mediante matrices regulares, aprovechando así las facilidades que estos ofrecen para su posterior análisis (Fig. 3) y además permitiendo exportar este formato a otras herramientas que se especializan en simulaciones numéricas y ofrecen la posibilidad de manipular los datos de los MDT

Fig. 3. Generación de un M.D.T combinando estructuras de datos vectoriales y raster.



Fuente: [www2.montes.upm.es](http://www2.montes.upm.es)

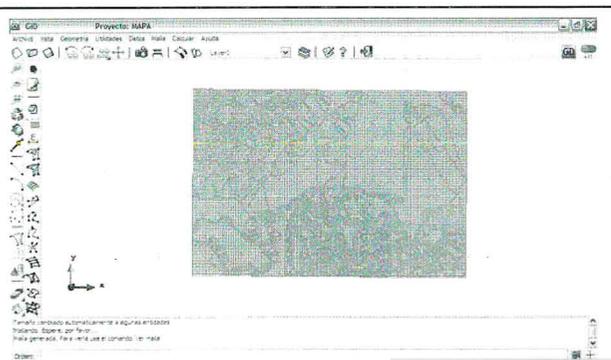
Para poder hacer una simulación del método *Two Ray simplificado* en GID, primero debe construirse un *problem type* en el cual se implementa dicho método.

Se denomina *problem type* al conjunto de archivos utilizados para la configuración del modelo numérico; define las variables y parámetros específicos que deben ser analizados y la definición del cálculo a realizar, esto significa que el *problem type* define (o limita) los posibles materiales y condiciones que se deben aplicar a la geometría y la forma en que los resultados podrán mostrarse, todo esto es definido en archivos planos. [17]

Finalmente se puede visualizar la malla creada antes de ser procesada por el *problem type* de GID (Fig. 4)



Fig. 4. Malla creada.

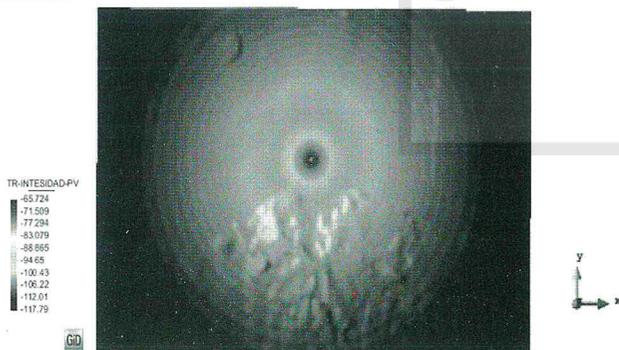


Una vez se ha creado la malla se puede cargar el *problem type* en GID y pasar a la etapa de cálculo.

### C. Análisis de resultados del post-proceso

Después de aplicar los cálculos se pasa a la fase de post-proceso de GID, en la cual se pueden apreciar los resultados en forma de una simulación.

Fig. 5. Simulación en GID.



Mapa de Radiación no Ionizante Basado en Sistemas de Información Geográfica

En la fig. 5 se puede apreciar una representación visual de las intensidades de campo eléctrico, obtenidas luego de realizar los cálculos, utilizando un *problem type* en el cual se ha implementado el método *Two Ray simplificado*. Los resultados se muestran sobre el MDT que fue importado, por medio de áreas coloreadas.

Este procedimiento se ha implementado para un método sencillo y simplificado, sin embargo, es posible emplear esta misma metodología en la implementación de un método más complejo.

De igual manera, el procedimiento empleado para la creación del MDT puede usarse en la creación de otros MDT de mayor tamaño y de otras zonas del país.

Una vez comprendida la dinámica de importación de los MDT desde GID, es posible importar otros archivos de este tipo, para utilizarlos en futuras investigaciones.

Gracias a que el MDT está georeferenciado y a la exactitud de los datos del terreno que este guarda, los resultados obtenidos poseen un mínimo margen de error.

El método implementado para el presente trabajo es una simplificación de un método más robusto, abordado en las siguientes secciones, brinda resultados alejados de la realidad. Pero con la información brindada en el presente estudio, es posible implementar un método más preciso y que aproveche de mejor forma las características del terreno, mejorando así la calidad de los resultados.

## III. MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS BASADO EN EL MÉTODO "RAY-TRACING".

### A. El método "Ray-Tracing"

Debido a las características del problema (frecuencia de operación en las bandas VHF y UHF, propagación tipo *indoor* y *outdoor*, simulación con

efectos de radiación cercana-lejana, reflexión, difracción, refracción y atenuación, entre otras) y luego de realizar un análisis exhaustivo de una serie de métodos con la posibilidad de ser implementados, se seleccionó un método óptico conocido como **Ray-Tracing**, el cual es un método considerado de alta frecuencia (No existe un límite inferior definido para la mínima frecuencia a la cual el método es aplicable, ya que depende del tamaño de los objetos del entorno de propagación comparados con la longitud de onda de la señal, sin embargo se recomienda utilizarlo a partir de frecuencias mayores a 100MHz [1]).

Este método obtiene sus principios fundamentales de la **Óptica Geométrica y la Teoría Geométrica de la Difracción**, ambas son teorías las cuales tienen su raíz en la generalización de las propiedades ópticas de la luz; las cuales, pueden ser extrapoladas a las ondas electromagnéticas de radio de alta frecuencia con las limitaciones y aproximaciones requeridas para el problema en cuestión. Las características principales del método [2] se pueden resumir en las siguientes:

- a) Es un método de alta frecuencia fundamentado en la teoría geométrica de la difracción. Su principio se basa en que si la frecuencia de la onda de radio es lo suficientemente alta, se puede considerar a la misma como si se propagara como un rayo de luz, perpendicular a los frentes de onda de la misma (Teorema de Malus-Dupin).
- b) Predice el valor de intensidad de campo eléctrico en un punto dado por medio de la suma de todos los rayos (Directo, Reflejado y Difractado) que llegan al mismo punto de interés. Ello hace que el método brinde una predicción directa del valor de campo; es decir, la precisión del método depende por completo de la aproximaciones del entorno y de la onda, por lo tanto carece de correcciones iterativas que mejoren el valor estimado.
- c) Es capaz de modelar de manera sumamente precisa el entorno de propagación por medio de la simulación, discretización y procesamiento de mapas tridimensionales. Estos mapas pueden manejar no solamente la información del terreno sino que además pueden modelar objetos de

gran importancia como edificios, casas, accidentes geográficos entre otros. Tiene gran relevancia el poder modelar las propiedades eléctricas de los objetos antes mencionados.

Entre las capacidades técnicas del método, se pueden mencionar:

- a) Puede simular cualquier entorno de propagación ya sea rural o urbano.
- b) Puede manejar cualquier potencia de radiación y polarización si se modela de manera adecuada el patrón de radiación de la antena.
- c) No tiene limitaciones en el rango de frecuencias siempre y cuando la misma sea lo suficientemente alta para mantener las propiedades ópticas del entorno.

Debido a la banda de frecuencias estudiada y al tipo de enlace no existe mayor efecto de las condiciones atmosféricas en la propagación.

1) *Campos Electromagnéticos desde la Óptica Geométrica*: La Teoría Geométrica de la Difracción es [5]: **“Una aproximación para la solución de problemas de ingeniería”** de lo que se conoce como *Óptica electromagnética*. Su aplicación se especializa en el análisis de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Cuando se menciona el término “De alta frecuencia”, se refiere a los campos que se propagan en un medio cuyas propiedades y el tamaño de los elementos difusores (Scatterers), varían muy poco en un intervalo del tamaño de la longitud de onda de la señal.

Las técnicas matemáticas utilizadas para el análisis de fenómenos de alta frecuencia se conocen como **Métodos Asintóticos**. Se han desarrollado una gran cantidad de estos métodos para la resolución de las ecuaciones de Maxwell. En nuestro caso el método de la óptica geométrica utiliza una forma directa de solución, reduciendo las ecuaciones de Maxwell a una forma aproximada, la cual puede aplicarse de manera más sencilla a la resolución del problema.

En el presente caso de estudio, los valores de frecuencia utilizados para la telefonía celular se encuentran contenidos en las bandas VHF y UHF, además de ser casi en su totalidad enlaces con un entorno de propagación



de tipo troposférico. Por tanto, se pueden hacer las consideraciones y simplificaciones apropiadas para caracterizar el medio de propagación [6], como sigue:

El medio de propagación puede asumirse no magnético. Por tanto, su permeabilidad relativa es igual a la unidad.

La variación en la permitividad relativa de la tropósfera, cuyo valor es aproximadamente uno en condiciones atmosféricas normales, se puede considerar como un parámetro que varía muy lentamente con el aumento de la altura de la misma, menos del 1% para una altura de 2 Km, por lo cual puede asumirse constante y homogénea en el entorno de propagación.

El índice de refracción de la atmosfera es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la permitividad relativa de la misma, por tanto, con base en el párrafo anterior, se puede asumir un medio con índice de refracción constante y homogéneo.

Las bandas VHF y UHF se caracterizan por ser inmunes a la atenuación ocasionada por la lluvia, niebla y nieve, entre otros fenómenos climáticos; por tanto es aceptable considerar un medio de propagación sin pérdidas.

El aire es una sustancia cuya permitividad y permeabilidad pueden ser consideradas como iguales a las del vacío, es decir independientes de la frecuencia, magnitud del campo eléctrico y magnitud del campo magnético, por lo cual puede asumirse como un medio completamente lineal.

Con base en las justificaciones anteriores, se puede simplificar el conjunto de ecuaciones de Maxwell para una onda monocromática, a la forma: expresada por el sistema de ecuaciones (1):

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) + j\omega\mu\vec{H}(\vec{r}, \omega) &= 0 \\ \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) - j\omega\varepsilon\vec{E}(\vec{r}, \omega) &= 0 \\ \nabla(\vec{E}(\vec{r}, \omega)) &= 0 \\ \nabla(\vec{H}(\vec{r}, \omega)) &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

2) *La expansión de Lunenberg-Kline*: El siguiente desarrollo matemático y argumentos teóricos fueron tomados de [5]. Para un campo electromagnético de alta frecuencia se puede asumir una solución a las ecuaciones de Maxwell, en forma de serie asintótica como fue mencionado previamente. La cual es desarrollada de manera más extensiva por [7] y cuyas expresiones vienen dadas en la forma:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, \omega) &\sim e^{-jk_{\nu}r(\vec{r})} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{E}_n}{(j\omega)^n} \\ \vec{H}(\vec{r}, \omega) &\sim e^{-jk_{\nu}r(\vec{r})} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{H}_n}{(j\omega)^n}\end{aligned}\quad (2)$$

Donde el símbolo “ $\sim$ ” significa “Igual de manera asintótica”. La función  $r = r$  es conocida como la función de fase, la cual depende de la forma del frente de la onda. La validez de (2) está basada en las observaciones físicas de la óptica geométrica clásica respecto a campos de alta frecuencia lo suficientemente alejados de la fuente.

Esto se conoce como la expansión de Lunenberg-Kline para los campos eléctrico y magnético comúnmente conocida como Ansatz (Solución anticipada).

Como toda expansión en serie asintótica se espera que los términos que den la mayor contribución a la solución aproximada por la misma, sean las potencias más pequeñas. En el límite, cuando la frecuencia se vuelve infinita el único término necesario será el primero, es decir cuando  $n=0$ . Esto es lo que se conoce como *campo de óptica geométrica*. La solución

matemática derivada anteriormente tiene lugar bajo un fundamento empírico y cuantitativo, no solamente basado en el comportamiento característico de los campos de alta frecuencia, sino también en la experimentación y comprobación de resultados [8]. Sin embargo puede ser extremadamente difícil, aún en circunstancias óptimas, el demostrar de manera formal la validez de las expresiones anteriores.

3) *Modelo del campo eléctrico y consideraciones de reflexión y refracción:* Se ha utilizado para la implementación del método, un modelo de antena del tipo dipolo de media onda. La selección de este tipo de antena responde a su facilidad aplicativa, debido a que el estudio de los diversos modelos de antenas es una rama bastante amplia que requiere de un mayor tiempo de análisis. Además, se puede afirmar con seguridad que su *campo lejano* pertenece a los campos de óptica geométrica debido a que puede ser considerado como una expansión dada por (2), para valores de  $z = c..$  El campo ha sido modelado como una serie de rayos los cuales parten de la fuente e interactúan con el terreno del mapa de estudio.

$$E_{\theta} = \frac{jI\eta e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{2\pi r} \quad (3)$$

### B. Implementación del método "Ray Tracing"

En esta sección se describe, en términos generales, al conjunto de pasos seguidos en la implementación del método. El método desarrollado puede resumirse en las siguientes etapas principales:

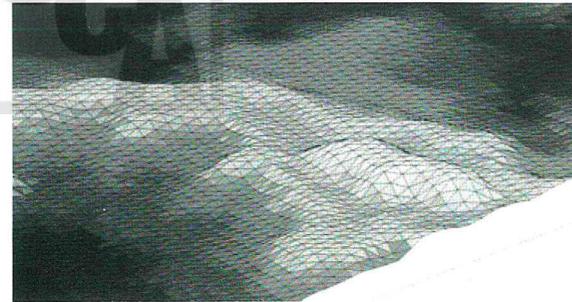
1) *Descripción de la geometría del medio:* En esta etapa es necesario describir al objeto a manipular. Para el caso que concierne a esta investigación, se representará al medio de propagación como un objeto en 3-D del cual se estudiará únicamente su relieve imitando la geografía del terreno, sin incluir los espacios urbanos en donde la acción de las estructuras hechas por el hombre juega un papel importante en la determinación del campo.

La forma en cómo se generaron estas superficies fue cargando mapas reales del relieve del terreno, a través de un archivo de texto que contiene información de las coordenadas UTM de un área específica, previamente georeferenciada, de la región salvadoreña.

Posterior a la importación de estos datos, se procede a generar la superficie del objeto, como una malla compuesta por elementos triangulares. El uso de esta geometría se justifica por varias razones: muchas aplicaciones informáticas funcionan más eficientemente haciendo uso de triángulos, dado que en la mayoría de los casos deben hacer operaciones sobre los vértices. En un sistema de triángulos, los algoritmos tienen que funcionar a partir de tres vértices, no a partir de cuatro o más vértices como en el caso de un rectángulo u otras figuras geométricas; esto se traduce en un uso de menor espacio de almacenamiento necesario para describir un objeto.

En una malla pueden existir muchos triángulos reunidos en un único vértice, por lo que si se procesa a un vértice una sola vez, es posible obtener un resultado idéntico en una fracción del tiempo, lo cual también representa una ventaja. Además, los elementos triangulares tienden a describir de mejor manera una superficie, debido a que es la única figura geométrica que puede construirse haciendo uso de la menor cantidad de aristas, obteniendo de ellas mucho más detallismo.

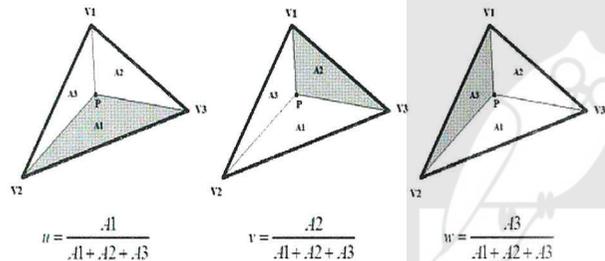
Fig. 6: Ejemplo de malla resultante después de la triangulación.



Dado que el elemento principal a utilizar es el triángulo, es necesario recurrir a un sistema eficiente y práctico para describir ciertas características de los puntos internos de dicha figura, como lo es el sistema de coordenadas baricéntricas.

Las coordenadas en este sistema también son conocidas como coordenadas de área, debido a que las coordenadas de un punto P respecto al triángulo, son proporcionales a las áreas de los subtriángulos formados a partir de las tres líneas que unen el punto P con cada vértice del mismo.

Fig. 7: Representación de las coordenadas baricéntricas (u,v,w) como una razón de áreas.



2) *Determinación de la zona de visibilidad directa:* Existen zonas específicas en donde se manifestarán los diferentes mecanismos de propagación. La zona con visibilidad directa, es aquella región de la superficie que tiene línea de vista con el observador (antena). En otras palabras, si el espectador se colocara de pie en este territorio y apuntara sus ojos en dirección a la antena, podría alcanzar a verla sin ningún problema; sin obstáculo alguno de por medio que le impida la visión. A esta zona también se le conoce como “zona con línea de vista” o “zona iluminada”. Esta es una región de gran interés, gracias a que tiene el

potencial para que el campo sea mucho más intenso, además de ser la única con la capacidad de dar directamente inicio a las reflexiones.

Ray-Tracing sería infructuoso sin la ayuda de los métodos de intersección; a partir de ellos es posible establecer ciertas características de “visualización” respecto a un punto de referencia denominado “observador”. Para determinarla se hace uso del algoritmo de intersecciones de Möller y Trumbore [12]. En este, una transformación es construida y aplicada al origen del rayo que apunta en dirección al triángulo definido por sus vértices  $p_0, p_1$  y  $p_2$ . De ella se obtiene la distancia que existe de al punto de intersección, además de las coordenadas baricéntricas de la intersección. El algoritmo se reduce al cálculo del siguiente sistema de ecuaciones:

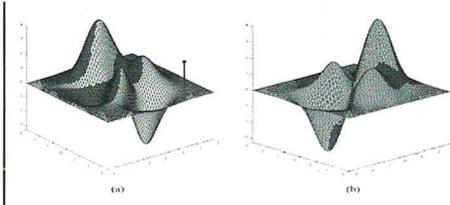
$$\begin{bmatrix} -D_x & p_{1x} - p_{0x} & p_{2x} - p_{0x} \\ -D_y & p_{1y} - p_{0y} & p_{2y} - p_{0y} \\ -D_z & p_{1z} - p_{0z} & p_{2z} - p_{0z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_x - p_{0x} \\ O_y - p_{0y} \\ O_z - p_{0z} \end{bmatrix}$$

Si el triángulo es intersectado, las siguientes desigualdades deben satisfacerse:

$$u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1; \quad t \geq 0 \quad (5)$$

Si dichas condiciones no se satisfacen simultáneamente, se concluye que no existe intersección dentro del triángulo en la dirección del rayo. A partir de la información que se obtiene del método de intersecciones, es posible establecer cuáles elementos tienen línea de vista con la antena por la proximidad que existe entre el punto de intersección y la antena.

Fig. 8  
(a) Determinando zonas con visibilidad directa. (b) vista desde otro ángulo.

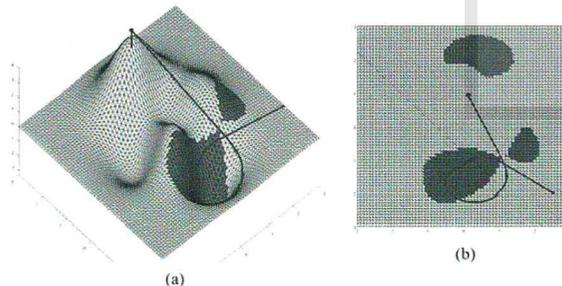


3) *Determinación de los trayectos seguidos por los rayos:* Un rayo emitido por la antena describirá una trayectoria particular dependiendo de las reflexiones, las cuales obedecerán a la geometría de la superficie, hasta que se pierdan en el espacio.

Para lograrlo es necesario realizar lo siguiente:

- Determinar la dirección del primer rayo reflejado.
- Corroborar si este rayo reflejado intersecta a alguna cara de la malla.
- Si existe intersección, se continua con una nueva reflexión y se repite el paso anterior cuantas veces sea necesario hasta que el rayo ya no exista intersección alguna.
- Para finalizar, se enlaza el conjunto de subtrayectos para reconstruir al trayecto total.

Fig. 9 (a) Trayecto seguido por un rayo después de múltiples reflexiones. (b) vista superior.



4) *Calculo del campo:* El cálculo del campo inicia con la ecuación que define a un dipolo de media onda en donde la contribución de campo por parte de los rayos directos, se puede determinar fácilmente con la expresión dada en (3) Es de observar que dicha expresión es dependiente de la distancia, en donde dicha variable afecta tanto en amplitud como en fase a la onda.

En lo que concierne a los rayos reflejados, su campo asociado puede determinarse a partir de las ecuaciones de Fresnel, en donde (7) corresponde al cálculo del coeficiente de reflexión complejo para una onda que incide con polarización paralela y (8) para una onda que incide con polarización perpendicular.

$$\rho_{par} = \frac{(\epsilon_r - j\chi) \cos \theta - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \text{sen}^2 \theta}}{(\epsilon_r - j\chi) \cos \theta + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \text{sen}^2 \theta}} \quad (7)$$

$$\rho_{perp} = \frac{\cos \theta - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \text{sen}^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \text{sen}^2 \theta}} \quad (8)$$

Donde:

$\theta$  es el ángulo medido entre la normal y el rayo incidente.

$\epsilon_r$  es la permitividad relativa del material reflectivo

$\sigma$  es la conductividad del material reflectivo en S/m

$f$  es la frecuencia de operación

$\chi$  está definida en (9)

$$\chi = \frac{18 \times 10^9 \sigma}{f} \quad (9)$$

Dado que la polarización de la onda, en un caso más general, difícilmente coincidirá puramente con las polarizaciones planteadas anteriormente; el campo incidente deberá descomponerse en sus respectivas componentes paralela y perpendicular antes de ser reflejado y así manejarlas por separado como se muestra en (10) y (11).



$$\vec{E}_{i\perp} = \left( \frac{\vec{i} \times \vec{n}}{|\vec{i} \times \vec{n}|} \cdot \vec{E}_i \right) \frac{\vec{i} \times \vec{n}}{|\vec{i} \times \vec{n}|} \quad (10)$$

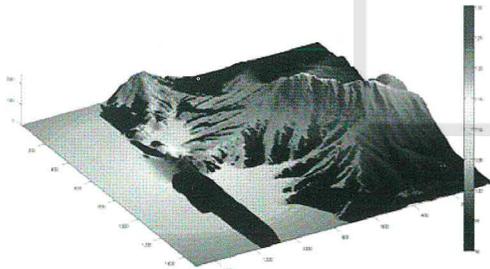
$$\vec{E}_{i\parallel} = \vec{E}_i - \vec{E}_{i\perp} \quad (11)$$

Finalizando con el cálculo, el campo reflejado puede determinarse a partir de (12).

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{r\perp} + \vec{E}_{r\parallel} = \vec{E}_{i\perp} \rho_{\text{perp}} + \vec{E}_{i\parallel} \rho_{\text{par}} \quad (12)$$

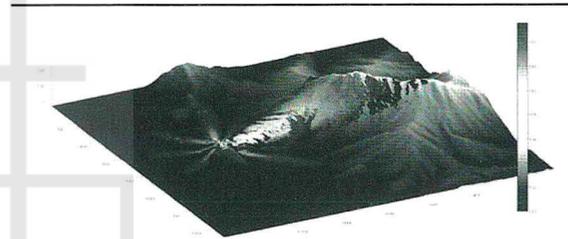
El campo total que recibe cada elemento triangular de la malla, se determina a partir de la sumatoria de todas las contribuciones que arribaron a ese elemento en particular. Esta sumatoria es válida, siempre y cuando los rayos que convergen en dicho elemento, tengan la misma frecuencia. En Fig. 8 se muestra un ejemplo que resulta después de seguir todos los pasos citados anteriormente.

Fig. 10: Campo total recibido en dBuV/m en una montaña por causa de una antena del tipo dipolo de media onda de 100W a 800MHz.



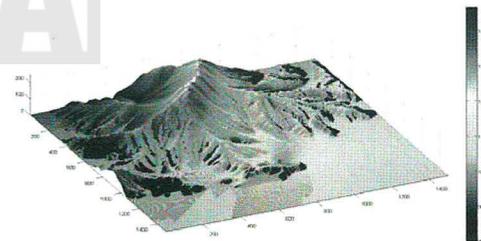
El método es aplicable aún para antenas con patrones de radiación mucho más generales; siempre y cuando se conozca la expresión matemática que la describe. Por ejemplo, en Fig. 9 se muestra el campo radiado por una antena directiva.

Fig. 11: Campo radiado en dBuV/m por una antena directiva trabajando a 100W y 800MHz.



Para el caso de varias antenas radiando a distintas frecuencias, el análisis en el dominio de la frecuencia no es permitido. Es por ello necesario migrar al dominio del tiempo para realizar la sumatoria correspondiente; lo que implica expresar a los fasores de campo producto de cada antena, con su correspondiente expresión equivalente en el tiempo (esto es válido siempre y cuando el medio sea considerado como homogéneo, ya que para este caso todas las ondas se propagan a la misma velocidad).

Fig. 12: Campo RMS en dBuV/m producido por tres antenas directivas con potencia igual a 100W y frecuencias de 800, 900 y 1900MHz.



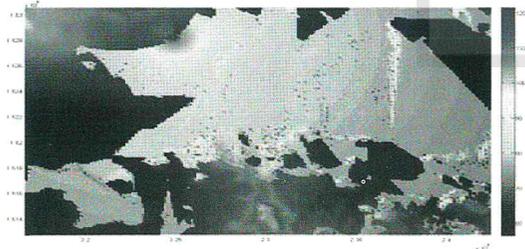
El proceso de cálculo culmina al determinar el valor RMS de la señal resultante de la suma en el tiempo. En Fig. 10 se muestra un ejemplo que involucra a tres antenas directivas radiando a distintas frecuencias.

### III. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

La simulación utilizada para la validación del modelo, se realizó en un sitio cercano al Cerro Verde, en el occidente de El Salvador. Se utilizó un dipolo de media onda con potencia igual a 100W, una frecuencia de operación de 800 MHz y con 30 mt de altura por encima del perfil del terreno. Dicha antena fue ubicada en las coordenadas: latitud=13.81286, longitud = -89.54453. Ver Fig. 11. Los datos de conductividad y permitividad relativa para suelo moderadamente seco a 800MHz son  $2.7e-2$  S/m y 15 respectivamente [13].

Para establecer un parámetro de validación de los resultados obtenidos aplicando Ray-Tracing, se utilizaron como referencia los valores de campo determinados por el software "Radio Mobile", que es un software gratuito muy utilizado por la academia para cálculo de variables de propagación electromagnéticas generadas por sistemas de comunicaciones. Con dicha herramienta se utilizaron las mismas condiciones y parámetros de frecuencia, altura de antena, ubicación geográfica, etc. que fueron usadas en el caso del software propio.

Fig. 13: Mapa de la distribución de campo eléctrico en dBuV/m para un dipolo de media onda a 800MHz y 100W en zona aledaña al Cerro Verde obtenido con Ray Tracing.



Antes de comparar los valores de campo calculados por ambos modelos, fue necesario realizar una valoración de las distintas fuentes de error presentes.

La Tabla I presenta una pequeña muestra de los datos obtenidos con Ray-Tracing, acompañados de los datos calculados en Radio Mobile que geográficamente mejor se aproximan entre sí. Como ejemplo, para el caso de los datos resaltados en rojo, se observa que Ray-Tracing determinó un valor de campo igual a 87.3 dBuV/m en el punto cuyas coordenadas son X=226256.91 Y=1520041.42, mientras que el dato de campo disponible en Radio Mobile más próximo a esta coordenada, se encuentra en el punto X=226220.43 Y=1520046.11 el cual es 86.0 dBuV/m; es decir, a una distancia de 36.48 mt en X y 4.69 mt en Y.

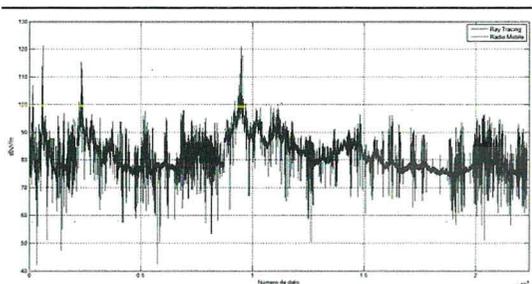
Tabla I. Pequeña muestra de los datos geográficamente más próximos de ray-tracing con radio mobile.

Ray Tracing			Radio Mobile		
X	Y	dBuV/m	X	Y	dBuV/m
223026.15	1514729.49	77.3	223022.15	1514703.01	78.2
221949.23	1517570.76	79.9	222002.89	1517489.18	76.3
226256.91	1520041.42	87.3	226220.43	1520046.11	86.0
222427.86	1515058.91	77.5	222499.83	1515056.15	78.8
227692.80	1519300.22	85.7	227609.04	1519337.48	81.8

Se ha dispuesto la totalidad de los resultados obtenidos por ambos métodos en la gráfica mostrada en Fig. 13.



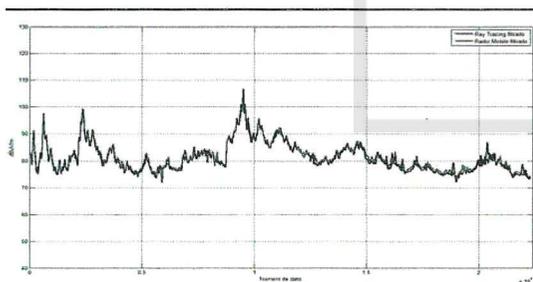
Fig. 14: Comparación de resultados obtenidos. En azul Ray-Tracing y en rojo Radio Mobile.



Para este caso en particular, se han comparado 22,531 muestras. El valor promedio del error obtenido fue igual a 1.82dB mientras que su desviación estándar fue a 2.72 dB.

Después de aplicar un filtro de promedio móvil, se puede apreciar en Fig. 14 la tendencia entre ambos resultados.

Fig. 15: Gráfica que muestra la tendencia de los resultados obtenidos por ambos modelos, después de aplicar un filtro de promedio móvil. En azul Ray-Tracing y en rojo Radio Mobile.



A pesar de las fuentes de error citadas anteriormente, los resultados obtenidos al comparar el modelo implementado con el software fueron bastante buenos, ya que existe una buena similitud entre los datos. Se evidencia la sensibilidad de los resultados con el tipo de mapas empleados. Una variación en la geometría del terreno, puede dar cabida al apareamiento de datos poco confiables, por lo que este aspecto es de gran importancia y debe de tomarse en cuenta al momento de escoger la calidad del mapa, además de conocer que tan bien georeferenciado se encuentra.

También se debe tomar en cuenta la diferencia entre los métodos de cálculo. Cuando se hacen comparaciones entre distintos métodos debe tenerse presente, las distintas simplificaciones que estos hacen con el objetivo de determinar el campo. Lo más adecuado para la validación del método bien podría ser, realizar un estudio con valores reales obtenidos producto de una medición con equipo adecuado; esto con el objetivo de evitar hacer comparaciones incluyendo las inexactitudes propias de las simplificaciones de cada método. A pesar de lo dicho anteriormente, al comparar los datos en las distintas zonas del terreno, existe una buena correspondencia entre los valores de los datos que predijo el modelo y los valores obtenidos con el software. Esto se comprueba al comparar el error promedio y la desviación estándar, lo cual indican que los datos del error son poco dispersos y por tanto más significativos.

Por lo tanto, preliminarmente se podría decir que los resultados obtenidos son bastante aceptables como para que el modelo tenga una validez significativa, considerable importancia y, sobretodo, esperanza de poder ser mejorado al incluir los aspectos relacionados a la difracción.

#### IV. CONCLUSIONES

Una descripción precisa y detallada del medio de propagación producirá una mejor aproximación de los resultados en detrimento del tiempo de cálculo. Deberán valorarse estos dos aspectos, previo a la ejecución del método.

Los mecanismos de propagación tales como la reflexión, refracción y difracción, dependen enormemente de la frecuencia o la longitud de onda. La topografía por sí sola no determina en qué direcciones se propagará la onda ya que es necesario conocer las propiedades electromagnéticas del entorno de propagación.

El método "Ray-Tracing" fue seleccionado dentro una amplia gama de métodos debido a las características particulares del problema, la distancia de la antena al receptor y el rango de frecuencias utilizado; los cuales llevaron a la selección de un método con la suficiente versatilidad para ser aplicado en una gran variedad de entornos de propagación además de poder solucionar el problema en cuestión que es la intensidad de campo que puede experimentar una persona que se encuentre a una distancia relativamente cercana de la antena.

El método fue capaz de predecir de manera bastante precisa los valores de intensidad de campo en las zonas de visibilidad directa y zonas sujetas a reflexiones del campo, dando un error promedio de 1.82 dB lo cual es bastante aceptable. Sin embargo el valor de campo en las zonas no visibles cae de manera abrupta debido a que no fueron incluidos los efectos de difracción, lo cual presenta una limitación del algoritmo implementado en el presente trabajo.

Debido a la extensión del terreno, que es de varios kilómetros, el mapa fue lo suficientemente preciso como para obtener buenos resultados en la predicción de los valores de intensidad de campo eléctrico, sin embargo para llevar a cabo un estudio de propagación en un ambiente de interiores, o de una extensión más pequeña, se requiere una base de datos tridimensional mucho más detallada y capaz de modelar fielmente los objetos del entorno de propagación para la obtención de datos mucho más confiables.

En cuanto a los modelos de mapas digitales, El formato MDT proporciona información más completa de las características del terreno estudiado, por lo cual brinda una mayor precisión en los resultados obtenidos durante la simulación en GID.

Se eligió la herramienta de pre y post-procesamiento GID, ya que se comprobó anteriormente que permite el uso de mapas basados en Sistemas de Información Geográfica y complementado con el desarrollo de una solución del problema en el lenguaje de programación seleccionado, se pueden presentar los resultados deseados de forma fácil de comprender.

ArcGIS 10.0 es un producto potente en la creación de mapas, debido a que proporciona herramientas de cartografía de alta calidad, administración de una gran base de datos, conversión de datos vectorial a raster a través de interfaces amigables. De igual manera, permite la generación de diferentes archivos en formato CAD, permitiendo la importación en herramientas de procesamiento numérico, además de brindar herramientas para posibilitar la generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT).

## V. RECOMENDACIONES

En futuras investigaciones se sugiere considerar el uso de procesamiento en paralelo u otra técnica de optimización de la carga computacional debido a que el método puede llegar a demandar un tiempo excesivo de cálculo lo cual es necesario para llevar a cabo estudios de varias antenas o también de ondas poli-cromáticas. También se debería formular, con el método desarrollado, las bases para modelar patrones de antenas arbitrarias a partir del método de los diferenciales de corriente; de manera que permita implementar antenas con características más convencionales en la industria. Además, se debería profundizar en métodos similares al implementado, que permitan un cálculo más eficiente y más preciso de la intensidad de campo eléctrico. Entre estos métodos se encuentran, el método del rastro dominante (DominantPath). También se recomienda analizar la posibilidad de utilizar algoritmo genético para la mejora de la convergencia del método, plantear las bases para utilizar el método en tiempo real, compararlo con métodos clásicos en el dominio del tiempo y desarrollar un método híbrido óptico y clásico. Se propone asimismo explorar las posibilidades que ofrece el método para la solución y análisis



de problemas distintos al cálculo de la intensidad de campo como lo son: Análisis de multi-trayecto, creación de patrones de radiación de geometrías arbitrarias, optimización de la red celular, simulación de varias unidades a distintas frecuencias, simulaciones de coherencia de canal en tiempo real, entre otras aplicaciones. Por otra parte, se recomienda investigar acerca de cómo exportar los resultados obtenidos en GID hacia herramientas especializadas en sistemas de información geográfica.

Se recomienda realizar la gestión para la obtención de mapas con mayor precisión en el Ministerio de Medio Ambiente, o caso contrario, el Centro Nacional de Registros, para la obtención de resultados de mayor exactitud

## VI. REFERENCIAS

- [1] J. Saiz, "Análisis de Sistemas Radiantes sobre Geometrías Arbitrarias Definidas por Superficies Paramétricas", Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España, 1995.
- [2] D. Laurenson, "Indoor Radio Chanel Propagation Modelling by Ray tracing Techniques "Doctoral Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland,1994.
- [3] G. Duree, *Optics For Dummies*. Indianapolis: Wiley, 2011, Chapter 3: Reviewing Light Basics, pp. 31-35.
- [4] J. Strong, *Concepts of Classical Optics*. San Francisco and London: Freeman and Company, 1958.
- [5] D. Mcnamara, C. Pistorious, J. Malherbe, *Introduction to The Uniform Geometrical Theory Of Diffraction*. Norwood: Artech House, 1990,Chapter 2, 3, 4, pp. 7-233.
- [6] A. Ghasemi, A. Abedi, F. Ghasemi, *Propagation Engineering in Wireless Communications*. New York: Springer, 2012. Chapter 3: Radiowave Propagation in Troposphere, pp. 57-120.
- [7] M. Kline, "Electromagnetic theory and geometrical optics", *Research Report*, New York, 1965, 31, 1-31.
- [8] J. Keller, *Geometrical Theory of Diffraction*, *Journal of The Optical Society Of America*, New York, vol. 52, number 2, 1962.
- [9] J. Saiz, "Análisis de Sistemas Radiantes sobre Geometrías Arbitrarias Definidas por Superficies Paramétricas", Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España, pp. 41.
- [10] B. Saleh, M. Teich, *Fundamentals of Photonics*. Michigan: Wiley, 1991.
- [11] V. Borovikov, B. Kinver (1994). *Geometrical Theory of diffraction*, IEE Electromagnetic Waves Series: London.
- [12] T. Möllery B. Trumbore, "Fast minimum storage ray-triangle intersection", 1997.
- [13] UIT, P.527-3, *Recomendación P.527-3: Características eléctricas de la superficie de la tierra*, 1992.
- [14] Fernández Méndez R. A., Ramos Cortez, A. E., Torres Urrutia, A. E. [2013]. "Modelo Tridimensional de Propagación de Ondas Electromagnéticas, basado en Ray-Tracing y Mallas Triangulares, para Visualización Gráfica de Niveles de Radiación no Ionizante", Trabajo de graduación para optar al grado de Ingeniero Electricista en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- [15] Barraza Martínez, O. R., Beltrán Martínez, P. E., Rivas Argueta, G. A., Sánchez Pérez, A. [2013]. "Mapa interactivo de intensidad de radiación no ionizante basado en elementos finitos y sistemas de información geográfica". Trabajo de graduación para optar al grado de Licenciado(a) en Ciencias de la Computación en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- [16] Felicísimo, A.M. Curso MDT. Soporte digital en Internet: [http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema\\_2.pdf](http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf), junio, 2013.
- [17] Panameño, A.M. Quijano, Z.C. Rodríguez, R.L. y Valencia, J.E. (2012). Solución de problemas de ingeniería utilizando GID. Trabajo de graduación para optar al grado de licenciado en ciencias de la computación en la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. Antiguo Cuscatlán, El Salvador

## VII. BIOGRAFÍAS

**Juan José Andrés Huiza.** Nació en San Salvador, el 5 de diciembre de 1979. Es Licenciado en Ciencias de la Computación graduado de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". Áreas de trabajo: Redes de computadoras, Servicios en internet, Programación de computadoras, Simulaciones con el método de elementos finitos.

**Oscar Antonio Valencia.** Nació en San Salvador el 11 de diciembre de 1965. Es Ingeniero Electricista graduado de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", en 1990. Obtuvo el Master of Science in Electrical Engineering en The University of Texas at Arlington, en 1996. Áreas de trabajo: Comunicaciones Eléctricas Digitales y Analógicas; Propagación de Ondas Electromagnéticas; Programación en LabVIEW y Matlab. Miembro del proyecto de sonda aeroespacial "Colibrí", El Salvador.

