

# **UNIVERSIDAD DE LAS CIENCIAS INFORMÁTICAS**

## **Facultad 9**

**Algoritmos para el Módulo de Análisis del Terreno de la  
plataforma GeneSIG: Modelos de Perfiles de Visibilidad y  
Altura.**

**TRABAJO DE DIPLOMA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN CIENCIAS INFORMÁTICAS**

AUTOR: Mariem Ruiz Leyva

TUTOR: Ing. Antonio Membrides Espinosa

Ciudad de la Habana, 2 de julio del 2010

“Año 52 de la Revolución”

A mi madre, la persona más importante de mi vida. Ella me ha mostrado el verdadero camino a seguir, siempre ha estado ahí en todos los momentos. A ti va dedicado este trabajo, para que te sientas orgullosa de tu hija que te ama mucho. Para que hagas realidad tu sueño.

Especialmente a mi familia, por criarme y educarme como lo hicieron. Por formar a la mujer que soy. Por siempre guiarme por el camino correcto y enseñarme que en la vida las cosas hay que ganárselas con trabajo y sudor. Por todo el amor, comprensión, ayuda y apoyo que me han dado durante toda mi vida. Por estar siempre ahí, por ser sencillamente la mejor familia que se puede desear. Para ustedes mi respeto, gratitud e infinito amor y agradecimiento.

A mi tío Nelson por ser mi padre y un ejemplo a seguir.

A mi tía Magda por ser mi segunda madre y apoyarme en todo.

A mi abuela Elda por su cariño y protección.

A mi tío Elvis y a mis primas Brenda, Yaima y Yira que las adoro.

A mis amigos que siempre estaban presentes en los momentos en que más los necesité, en especial a Yeny, Kati, Erielis, Greisy, Yanita, Lisandra, Sunamy y la China por su amistad incondicional.

A mi novio Hermes por estar siempre a mi lado, apoyarme en todo y ayudarme a pasar por este momento.

A mi tutor Antonio Membrides por su ayuda para la realización de esta tesis, su apoyo y amistad.

A la Revolución, a Fidel y a la UCI por darme la oportunidad de formarme como profesional.

A todos, Gracias.

# DECLARACIÓN DE AUTORÍA

---

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy la única autora de este trabajo y autorizo a la Universidad de las Ciencias Informáticas a hacer uso del mismo en su beneficio.

Para que así conste firmo la presente a los \_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del año \_\_\_\_\_.

Mariem Ruiz Leyva

Ing. Antonio Membrides Espinosa

\_\_\_\_\_

Firma del autor

\_\_\_\_\_

Firma del tutor

## RESUMEN

En la actualidad los Sistemas de Información Geográfica han tenido un elevado auge y desarrollo. En nuestro país se hace evidente la utilización de los mismos para solucionar problemas en importantes esferas de la sociedad. A raíz de esto muchas empresas han desarrollado sus propias soluciones de software para facilitar el manejo de la información geoespacial, cada una de ellas con características específicas que las hacen más o menos convenientes para quienes las utilizan.

Debido a la necesidad del almacenamiento y la manipulación de la información geográfica nacional, en la Universidad de las Ciencias Informáticas se está desarrollando una plataforma en software libre que trabaje con tecnologías web. GeneSIG se encuentra actualmente en desarrollo y muchas de las funcionalidades que brindan sus diferentes módulos no están implementadas o totalmente perfeccionadas, limitando de esta forma el número de análisis que se podrían realizar sobre la misma.

El objetivo fundamental del presente trabajo está centrado en crear una propuesta de técnicas eficientes para la representación de modelos de Perfiles de Visibilidad y Altura sobre la plataforma GeneSIG. Como solución se propone un algoritmo para la construcción de cuencas visuales, para la obtención de la visibilidad existente entre dos puntos y la obtención de un perfil de altura, este último hace uso de los métodos de interpolación espacial.

## PALABRAS CLAVES

SIG, MDT, MDE, Ráster, Vectorial, Visibilidad, Cuenca Visual, Altura, Interpolación, IDW, Kriging

# Índice

Introducción .....	1
Capítulo 1. Fundamentación Teórica .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Conceptos asociados al dominio del problema .....	7
1.2.1 Sistemas de Información Geográfica .....	7
1.2.1.1 Historia de los SIG .....	8
1.2.1.2 Funcionamiento de los SIG.....	10
1.2.2 Modelo Digital del Terreno .....	10
1.2.2.1 Origen de los MDT .....	10
1.2.2.2 Definición de los MDT .....	11
1.2.2.3 Aplicaciones de los MDT .....	12
1.2.3 Modelo Digital de Elevación .....	14
1.2.3.1 Definición de los MDE .....	14
1.2.3.2 Estructura de los MDE .....	15
1.2.4 Modelo Ráster.....	15
1.2.4.1 Fundamentos de los SIG Ráster .....	17
1.2.4.2 Superposición Ráster .....	18
1.2.4.3 Estructura de Datos Ráster.....	18
1.2.5 Modelo Vectorial .....	19
1.2.5.1 Fundamentos de los SIG Vectoriales .....	21
1.2.5.2 Estructura de Datos Vectoriales .....	22
1.3 Objeto de Estudio .....	23
1.3.1 Descripción General .....	23
1.3.2 Situación Problemática.....	27
1.4 Conclusiones parciales.....	29
2. Tendencias y Tecnologías .....	30
2.1 Introducción .....	30
2.2 Estado del Arte .....	30
2.2.1 Modelos Matemáticos.....	30

2.2.1.1	Introducción al concepto y al cálculo de Visibilidad .....	30
2.2.1.2	Estructuras de Visibilidad en el Terreno .....	31
2.2.1.3	Visibilidad a partir de un punto .....	32
2.2.1.4	Intervisibilidad entre dos puntos .....	33
2.2.1.5	Interpolación espacial .....	35
2.2.1.6	Método de Interpolación: IDW .....	35
2.2.1.7	Método de Interpolación: Spline .....	37
2.2.1.8	Método de Interpolación: Bi-lineal .....	38
2.2.1.9	Método de Interpolación: Superficies de tendencia .....	39
2.2.1.10	Método de Interpolación: Kriging .....	41
2.2.2	Algoritmos Informáticos .....	44
2.2.2.1	Algoritmo del método de interpolación Bi-lineal .....	44
2.2.3	Herramientas SIG .....	44
2.2.3.1	ArcGIS Desktop .....	44
2.2.3.2	IDRISI .....	46
2.2.3.3	GvSIG .....	46
2.2.3.4	SEXTANTE .....	48
2.2.3.5	GRASS .....	49
2.2.3.6	SAGA .....	50
2.3	Conclusiones Parciales .....	51
3.	Descripción de la Solución Propuesta .....	52
3.1	Introducción .....	52
3.2	Justificación de la Solución Propuesta .....	52
3.3	Solución para el Perfil de Visibilidad .....	54
3.3.1	Algoritmo del cálculo de visibilidad entre dos puntos .....	54
3.3.2	Algoritmo de construcción de Cuencas Visuales .....	55
3.4	Solución para el Perfil de Altura .....	58
3.4.1	Algoritmo del Perfil de Altura .....	58
3.5	Descripción y análisis de los datos .....	59
3.6	Análisis y discusión de los resultados .....	60
3.7	Conclusiones Parciales .....	64

Conclusiones .....	65
Recomendaciones .....	66
Referencias Bibliográficas .....	67
Bibliografías .....	72
Glosario de términos.....	73

## Índice de Tablas

---

Tabla 1. Datos estadísticos descriptivos de la variable. ....	60
Tabla 2. Fórmula para la obtención de los valores de los puntos de muestreo.....	61
Tabla 3. Datos correspondientes al Modelo Esférico. ....	61
Tabla 4. Datos correspondientes al Modelo Exponencial. ....	61
Tabla 5. Datos correspondientes al Modelo Circular.....	62
Tabla 6. Tabla de medidas aplicadas al IDW .....	63

## Introducción

El avance de los SIG<sup>1</sup> está muy vinculado a las TIC<sup>2</sup>, pues estos sistemas se han ido perfeccionando de manera sofisticada hasta el entorno de nuestros días. También el uso de Internet como fuente de información cartográfica ha sido fundamental para el progreso de estas aplicaciones en la sociedad. Con toda la evolución de la digitalización que rodea el mundo, los SIG han ascendido en concepto de aplicaciones pues han desarrollado gran potencial tecnológico favoreciendo la mejora de algunas destrezas, difíciles de lograr de formas manuales.

Con toda la revolución de la tecnología informática hubo un rápido progreso en el manejo de información cartográfica avanzando de esta forma en una serie de sectores ligados, entre ellos la edafología, la topografía y la fotogrametría; permitiendo la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de información espacial, reuniéndolos en verdaderos SIG para fines generales.

Los SIG se aplican en los más variados proyectos de investigación, particularmente sobre aquellos fenómenos que poseen un claro componente espacial. Pueden ser utilizados para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la geografía histórica, el marketing, la logística, entre otros, pues su utilización en diferentes campos es muy amplia.

Miles de empresas e industrias utilizan esta tecnología con la intención de resolver complicados problemas y mejorar su calidad de vida, pues es considerada una importante herramienta para la preservación del medio ambiente. Son utilizados en esfuerzos para controlar la contaminación mundial, así como en otros muchos aspectos del hábitat de la naturaleza. Industrias privadas y agencias gubernamentales también hacen uso de estas herramientas para aprovechar los recursos naturales con mayor prudencia y habilidad.

---

<sup>1</sup> Acrónimo de Sistemas de Información Geográfica.

<sup>2</sup> Acrónimo de Tecnologías de la Información y la Comunicación.

Cuba siempre ha estado muy actualizada en cuanto a las aplicaciones de los SIG desde que surgió esta tecnología. El desarrollo de la misma a nivel mundial con el paso del tiempo es cada vez más amplio. Con el trabajo de especialistas y técnicos cubanos, el país ha incrementado el uso de estos sistemas y sus aplicaciones benefician a toda la sociedad cubana. Por todas las características que poseen, las variadas funcionalidades que brindan y su utilidad, es que los mismos se aplican en diferentes sectores del país: la medicina, el transporte, la agricultura, la educación.

Los usuarios cubanos que trabajan con estos sistemas no son solo los cibernéticos o especialistas informáticos, también geólogos, cartógrafos, geógrafos, desarrolladores, arquitectos e ingenieros manejan los SIG en sus investigaciones, proyectos, trabajo diario; siendo utilizados en organizaciones oficiales del Gobierno, tales como GEOCUBA, Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, Instituto de Planificación Física, FAR<sup>3</sup> y Universidades, entre otros. [1]

En Cuba el uso de los SIG ha estado restringido por causa del bloqueo impuesto por los Estados Unidos, que la afecta directamente. Esto imposibilita la comercialización y exportación de estos sistemas con otros países. Como consecuencia de esto muchos de los SIG utilizados en el país tienen propiedades ilícitas, además de no contar con todas las particularidades nacionales.

El manejo y localización de la información geográfica de la extensión territorial cubana se torna complejo en ciertos puntos, por lo que se vienen realizando estudios sobre la creación de un sistema que se encargue de gestionar toda esta información. Actualmente se encuentra en funcionamiento una aplicación que permite la realización de localizaciones y ofrece la información que haya disponible sobre la búsqueda del sitio localizado por el usuario, aunque no está totalmente finalizado.

La UCI<sup>4</sup> no ha estado excluida de este desarrollo tan útil y ventajoso. Esta universidad ha obtenido destreza y práctica en el desarrollo de numerosos proyectos ayudando de diferentes vías a los profesionales de la misma en su formación con grandes conocimientos en áreas de la informática.

---

<sup>3</sup> Acrónimo de Ministerio de las Fuerzas Armadas.

<sup>4</sup> Acrónimo de Universidad de la Ciencias Informáticas.

Para ello ha puesto todo su empeño en la creación de un Departamento Productivo dirigido y organizado por la dirección de la Facultad 9. El Departamento Geoinformática se dedica a resolver problemas geográficos creando o utilizando programas informáticos y modelos matemáticos trabajando como componente principal con información geográfica.

Geoinformática cuenta con diferentes grupos de proyectos. Uno de estos grupos en conjunto con especialistas de GEOCUBA y las FAR desarrolló la plataforma **GeneSIG**. Esta herramienta informática surge por la necesidad de poseer un producto que sirviera como soporte de los SIG para desarrollar aplicaciones con tecnologías libres en entornos Web.

GeneSIG tiene como misión principal la creación de un sistema que se apropie de las metodologías necesarias permitiendo la gestión de datos espaciales y sirva como plataforma para futuras implementaciones, permitiendo estandarizar todas las entidades que requieran de variadas formas de un SIG.

Su objetivo fundamental consiste en realizar la representación geoespacial de la información asociada a negocios específicos, además debe permitir realizar análisis sobre dicha información. Así como el desarrollo de aplicaciones para el tratamiento de información geoespaciales.

Esta plataforma se encuentra actualmente en desarrollo y cuenta con diferentes módulos, entre los que se encuentra el de Análisis del Terreno. El objetivo principal de este módulo es brindar servicios tales como cálculo de áreas, distancia, azimut, rutas, perfiles de visibilidad y altura. Todos esos servicios son muy importantes por la gran cantidad de aplicaciones que tienen en la sociedad particularmente los servicios de visibilidad y altura.

En sentido general la visibilidad se define como la cualidad perceptible que permite ver objetos a una determinada distancia. También es la mayor distancia a la cual un cuerpo negro de dimensiones adecuadas, puede ser visto y reconocido. Son muchas las aplicaciones que tiene la visibilidad en diferentes ámbitos. Su utilización es amplia pudiéndose mencionar: en la informática, la geografía, la navegación aérea, el transporte y el deporte.

La altura se define como la distancia vertical de un cuerpo respecto al suelo u otra superficie tomada como referencia. También es la medida de un cuerpo o una figura según la consideración vertical desde su base hasta un punto más elevado. Las aplicaciones que brinda son muy variadas. Es muy utilizada por ejemplo: en la geometría, la astronomía, la música, la geografía y la navegación marítima.

Los servicios de visibilidad y altura que son brindados por el módulo Análisis del Terreno de la plataforma GeneSIG son muy incipientes.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente se formula como **problema científico** la limitación del número de análisis sobre el modelo digital del terreno y las personalizaciones futuras sobre la plataforma GeneSIG.

Para dar solución al problema planteado, se define como **objetivo general** la obtención de una propuesta de técnicas para la representación de modelos de Perfiles de Visibilidad y Altura sobre la plataforma GeneSIG.

Analizando los aspectos señalados anteriormente, para el desarrollo de este trabajo se ha definido como **objeto de estudio** el proceso de obtención de modelos de Perfiles de Altura y Visibilidad.

Este proceso aplicado a la Plataforma GeneSIG representa como **campo de acción** la identificación de los modelos matemáticos, algoritmos y herramientas que permitan la representación de modelos de Perfiles de Altura y Visibilidad.

## **Tareas de la investigación:**

- Describir los conceptos asociados a los Sistemas de Información Geográfica, así como sus principales características.
- Caracterizar los modelos matemáticos asociados a los Modelos Digitales del Terreno, en específico el Modelo Digital de Elevaciones.
- Caracterizar los modelos de datos asociados a los MDE.
- Describir los modelos matemáticos dirigidos a la obtención de modelos de Perfiles de Visibilidad y Altura.
- Caracterizar los algoritmos de interpolación espacial como complementos de los algoritmos de visibilidad y perfiles de altura.

- Caracterizar los algoritmos informáticos dirigidos a la obtención de dichos modelos.
- Caracterizar las herramientas que permiten la obtención de modelos de Perfiles de Visibilidad y Altura.
- Identificar propuestas de algoritmos sobre los estudiados para el módulo de Análisis del Terreno de la plataforma.
- Documentar la investigación con vistas a su socialización.

Apoyados en lo expuesto anteriormente se define la siguiente **idea a defender** con la propuesta a presentar, se perfecciona el proceso de representación de modelos de Perfiles de Altura y Visibilidad, complementando de esta forma el módulo de análisis del terreno de la plataforma GeneSIG.

Los **métodos científicos** empleados para la realización de este trabajo son:

### **Métodos Teóricos**

**Analítico-Sintético:** Analiza las teorías planteadas y documentos facilitando la investigación de las características de las herramientas, modelos matemáticos y algoritmos para la representación de perfiles de visibilidad y altura, para luego extraer los elementos más importantes que se relacionan con el objeto de estudio y adaptarlo a la situación.

**Análisis Histórico-Lógico:** Este método se utiliza para estudiar de forma analítica la trayectoria histórica real y desarrollo que han tenido los perfiles de visibilidad y altura en la plataforma GeneSIG. Especifica el conocimiento de los antecedentes específicos de los mismos, permitiendo el análisis de su evolución. La trayectoria concreta de la teoría permitirá un estudio de las etapas principales de su progreso y su condicionamiento a los diferentes períodos de la historia.

**Inductivo-Deductivo:** Este método se aplica en inducción y deducción de los algoritmos matemáticos que se van a escoger. Se hace uso de deducciones para llegar a tener una visión clara de lo que se quiere hacer y adquirir así nuevos conocimientos.

Para facilitar su comprensión, este documento está estructurado en 3 capítulos:

**Capítulo 1. Fundamentación Teórica:** En este capítulo se profundizan conceptos asociados al dominio del problema que sustentan la investigación. Se exponen puntos importantes, que tienen repercusión directa en la creación de la propuesta.

**Capítulo 2. Tendencias y Tecnologías:** Se realiza un análisis del estado del arte acerca de los SIG. Se fundamenta la solución propuesta describiendo los modelos matemáticos dirigidos a la obtención de Perfiles de Altura y Visibilidad, caracterizando los algoritmos informáticos. Además se realiza la selección de las herramientas a utilizar en la plataforma, que permitan la obtención de dichos modelos.

**Capítulo 3. Descripción de la Solución Propuesta:** Se seleccionan los algoritmos a utilizar para la representación de los modelos de Perfiles de Altura y Visibilidad. Se identifican posibles mejoras para las herramientas, complementándolas con los

## Capítulo 1. Fundamentación Teórica

### 1.1 Introducción

En este capítulo se esclarecen conceptos importantes que sustentan la investigación. Se realiza un análisis sobre los SIG, brindándose una visión general de los aspectos relacionados con los mismos. Se lleva a cabo un estudio de las principales características de estos sistemas, los conceptos fundamentales y las tecnologías. Se abordarán los principales elementos teóricos que conforman las diferentes técnicas en lo referente al módulo de análisis del terreno específicamente los perfiles de visibilidad y altura a través de sus tendencias actuales. También se mostrará la descripción de los conceptos asociados al objeto de estudio, que son necesarios para entender los próximos capítulos.

### 1.2 Conceptos asociados al dominio del problema

#### 1.2.1 Sistemas de Información Geográfica

En los últimos años el tratamiento geográfico de la información ha cobrado un auge vertiginoso a escala mundial, cada día son mayores las posibilidades de su aplicación gracias al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica.

Estos sistemas actualmente tienen sinfines de definiciones. Permiten integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. Es creado en hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos especialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión. [6]

Son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones. Es muy utilizada en muchos ámbitos, debido a que permite elaborar cartografía temática sobre cualquier aspecto ambiental, socioeconómico y políticos de la superficie terrestre.

Los SIG operan con información espacial georeferenciada. Tienen la capacidad de relacionar capas de datos para un mismo punto del espacio, combinando y cartografiando los resultados. Es un producto informático en pleno rendimiento. Un conjunto de elementos tales como: programas, conjunto de datos, personal especializado y equipos informáticos, que coordinados permiten acceder con mucha eficacia a la base de datos georeferenciados. [4]

Funcionan como una base de datos con información geográfica que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. Señalando un objeto se conocen sus atributos e inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos.

### **1.2.1.1 Historia de los SIG**

Los SIG tienen como origen la necesidad de la sociedad para poder manipular grandes volúmenes de datos e información que el desarrollo mismo de dicha sociedad genera diariamente. En sus inicios, las sociedades humanas hacían magros para poder almacenar y manipular parte del conocimiento que acerca de la realidad geográfica se poseía para el momento. Así nacen los primeros elementos que guían los pasos de lo que tras años de avances es hoy en día un SIG moderno. [2]

En siglo XX donde ya existía la cartografía topográfica y temática, con la utilización de métodos cartográficos se logró que los mapas fueran separados en capas. A fines de 1960 surgieron sistemas que permitían constituir las bases de datos con las figuras.

Como los SIG están fundamentados en la informática, han evolucionado por las fases típicas de este tipo de tecnología:

**Fase 1:** Período de conceptualización. 1975-1985

El enfoque era netamente cartográfico y de naturaleza geográfica. El objetivo era determinar cómo llevar la creación de mapas al medio digital. En los años 70 y 80 estos sistemas trabajaban con datos geográficos. Se le incorporan información espacial y atributos estructurados en bases de datos.

## **Fase 2:** Período de implementación. 1985-1995

Surge la necesidad de integrar el aspecto sistemas de información con el aspecto geográfico. Los años 80 y 90 fueron de fuerte aumento de las empresas que comercializaban estos sistemas, debido el crecimiento de los mismos en estaciones de trabajo UNIX y ordenadores personales.

## **Fase 3:** Período de maduración. 1995-1998

Más aplicaciones. Mejoramiento de software, trabajos abiertos, interdisciplinarios más expansivos. Enfoque informático-céntrico. Se inicia una etapa comercial donde los SIG empezaron a difundirse al nivel del usuario doméstico debido a la generalización de los ordenadores personales.

## **Fase 4:** Período de apertura. 1998

Estos sistemas llegan a un punto de apertura y expansión sin precedentes gracias al mundo del Internet y su WWW<sup>5</sup>, que debido a las fuerzas de la tecnología informática requieren sistemas abiertos, maniobrables y de integración. Los usuarios comenzaron a exportar el concepto de visualización de datos SIG a Internet.

## **Fase 5:** Los SIG del siglo XXI

Surge una expansión en el número de desarrollos de software SIG de código libre, los cuales, a diferencia del software comercial, suelen abarcar una gama más amplia de sistemas operativos, permitiendo ser modificados para llevar a cabo tareas específicas. Esta tecnología crece en sobremana debido a la gran avalancha de productos que hicieron generalizarla.

---

<sup>5</sup> Acrónimo de World Wide Web.

## 1.2.1.2 Funcionamiento de los SIG

Los datos de los SIG representan los objetos del mundo real. Estos se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos y continuos. La información espacial contiene una referencia geográfica explícita como latitud y longitud o una referencia implícita que pueden ser derivadas de referencias explícitas mediante geocodificación. Los SIG funcionan con dos tipos diferentes de información geográfica: el modelo ráster y el modelo vectorial.

## 1.2.2 Modelo Digital del Terreno

### 1.2.2.1 Origen de los MDT

En la década de los años 50 tienen origen los Modelos Digitales del Terreno y se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares. El objetivo de su creación fue agilizar mediante el tratamiento digital de datos del terreno adquiridos por fotogrametría el diseño de carreteras, planteándose una serie de algoritmos para la obtención de pendientes y áreas.

Los programas de uso más general para el tratamiento de los MDT<sup>6</sup> se desarrollaron algunos años después. En 1967 surge y es presentado el SYMAP<sup>7</sup> que constituyó una de las primeras demostraciones de la posibilidad de manejo de la información espacial por medios informáticos. Este es un conjunto de programas de manejo de cartografía digital que incorporaba algoritmos de interpolación que permitían la generación de mapas de isolíneas a partir de puntos de altitud distribuidos irregularmente, entre otros.

Posteriormente surgieron programas como el SYMVU<sup>8</sup> que de los datos procedentes del SYMAP generaba simulaciones 3D, el GRID<sup>9</sup> que manejaba información en

---

<sup>6</sup> Acrónimo de Modelo Digital del Terreno.

<sup>7</sup> Acrónimo de Synteny Mapping and Analysis Program.

<sup>8</sup> Programa para dibujar perspectivas y vistas de datos en tres dimensiones.

<sup>9</sup> Conjunto de líneas de referencia sobre la superficie terrestre.

formato matricial. En la década de los años 80 se estandariza la información de un Modelo Digital de Elevaciones en formato matricial: el USGS-DEM. De forma general podía garantizar cierta convergencia en los métodos de trabajo con los MDT utilizando topográfica global.

En los últimos años han surgido ya multitud de aplicaciones informáticas capaces de manejar eficazmente los MDE<sup>10</sup>, en distintas áreas como la industria, el comercio y otros. Los programas de manejo de modelos digitales están en la actualidad en pleno desarrollo, aunque aún intentando resolver satisfactoriamente problemas básicos como: la estructuración idónea de los datos, la compatibilización de diferentes estructuras entre sí y la búsqueda de algoritmos eficientes para generar nueva información y el intercambio de esta entre sistemas diferentes. [6]

### 1.2.2.2 Definición de los MDT

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno. Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diversos tipos. Pueden ser contruidos directamente a partir de la realidad a representar, pero es muy habitual que exista un modelo analógico intermedio a partir del cual se realiza la codificación.

En su definición existen dos condiciones suplementarias. Debe existir una estructura interna que represente las relaciones espaciales entre los datos y la variable representada en el modelo debe ser cuantitativa y de distribución continua. Se puede definir un MDT como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. [6]

Es la representación simplificada de la topografía del terreno. Para ello se considera que las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones se refieren a los ejes de un espacio octogonal plano (X e Y), y la tercera

---

<sup>10</sup> Acrónimo de Modelo Digital de Elevaciones.

mide la "altura" (Z). Por ello, se suele hablar de representaciones gráficas con dos dimensiones topológicas y media. [5]

Son modelos simbólicos, ya que las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto real tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. Forman una estructura de datos, lo que significa que no son sólo una acumulación o lista de cifras, sino que guardan relaciones entre ellos.

El trabajo con un MDT incluye las siguientes fases que no son necesariamente consecutivas en el tiempo:

- Generación del MDE.
- Manipulación del MDE para obtener otras capas del MDT.
- Análisis del MDT.
- Visualización en dos dimensiones o mediante levantamientos 3D de todas las capas para localizar errores.
- Aplicación del MDT.

Los MDT presentan algunas ventajas sobre los diferentes tipos de modelos existentes:

- **Repetibilidad:** Los resultados no se someten a factores aleatorios o incontrolados a menos que estén expresamente diseñados. Así como pueden estar comprobados y replicados las veces que se desee.
- **No ambigüedad:** Cada elemento del modelo tiene propiedades, valores específicos y explícitos.
- **Verificabilidad:** Los resultados pueden ser analizados uno a uno y comprobados en todas las fases. Estos se construyen mediante pasos explícitos y concretos.

### 1.2.2.3 Aplicaciones de los MDT [8]

**Apoyo en análisis estadísticos:** Las variables incluidas en un MDT son factores de gran importancia en un gran número de procesos ambientales como: precipitación, insolación-temperatura, flujos hídricos, erosión y distribución de hábitats; por tanto van

a ser un elemento clave a la hora de estimar otras variables mediante procedimientos de interpolación global por regresión.

**Cálculo de magnitudes geométricas:** Se puede obtener los cálculos del volumen bajo la superficie tridimensional que constituye el MDT, cálculo del volumen entre dos superficies onduladas, una por ejemplo la del MDT real y la otra la que existiría en caso de llevar a cabo una obra, la construcción de una carretera; de este modo, es posible conocer el volumen de tierras que es preciso mover, tanto para vaciar porciones del terreno como para rellenar otras, en la realización de las diferentes alternativas de construcción existentes.

**Modelos climáticos:** La topografía es el principal factor local que limita la energía solar incidente sobre la superficie terrestre. La variedad de altitudes, pendientes y orientaciones crean fuertes contrastes locales que afectan directa e indirectamente a procesos biológicos y físicos.

Algunos de estos factores son modelizables con los MDT. El ángulo solar resulta de utilidad en aplicaciones relacionadas con la teledetección (corrección por iluminación y cálculo de reflectividades). En cuanto a la radiación recibida se utiliza en:

1. Modelos de estimación de variables climáticas como: temperatura y evapotranspiración.
2. Modelos de distribución potencial de especies animales o vegetales.

**Modelos hidrológicos:** La superficie terrestre constituye la base sobre la que tienen lugar, y que por tanto condiciona, gran parte de los procesos de transferencia de materia y energía que tienen lugar sobre la superficie terrestre. La disponibilidad de un modelo de dicha superficie permite simular estos procesos, con lo que se consigue experimentar independientemente del sistema real.

La simulación permite obviar los riesgos inherentes a la experimentación, alcanzar una completa independencia temporal y repetir el experimento un número de veces arbitrario. La modelización hidrológica basada en modelos digitales de terreno pretende estimar los caudales generados en una cuenca a partir de sus características topográficas así como las áreas inundables en función de la altura esperable de las láminas de agua.

**Modelos de visibilidad:** Los modelos de visibilidad establecen el área que se puede ver desde un punto y, por tanto, el área desde la que puede verse ese punto. Puede ser útil para el diseño de redes de control, por ejemplo: de incendios forestales. También como criterio a la hora de ubicar infraestructuras desagradables como vertederos, etc. El análisis de cuencas visuales puede utilizarse para la evaluación del impacto visual de actuaciones con efectos negativos sobre el paisaje.

Es posible construir un modelo de visibilidad, donde cada punto tiene asignado un valor proporcional a la extensión de su cuenca visual. Un modelo de este tipo puede servir de base objetiva para la toma de decisiones ya que permite conocer y comparar con fiabilidad la incidencia visual de las alternativas existentes.

## 1.2.3 Modelo Digital de Elevación

### 1.2.3.1 Definición de los MDE

Un Modelo Digital de Elevaciones se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas o referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación.

Un terreno puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua  $z=Z(x, y)$  donde  $z$  representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas  $(x, y)$  y  $Z$  es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. La función anterior se aplica sobre un dominio espacial concreto  $D$ . En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como  $MDE = (D, Z)$ . [7]

Por este motivo, se han ensayado numerosas opciones en la búsqueda de una forma de representar y almacenar la altitud, donde se equilibre la pérdida de información y algunos efectos secundarios indeseables, como son el excesivo tamaño de los archivos o la dificultad de manejo. [7]

Mientras que los mapas convencionales usan casi exclusivamente una única convención (las curvas de nivel) para la representación de la superficie del terreno, los

MDE disponen de alternativas más variadas, desde una transposición casi directa de las isohipsas hasta otras menos habituales en la cartografía impresa pero más adaptada al proceso digital. [6]

Los valores de elevación pueden ser manipulados digitalmente y desplegados en un monitor como una malla o como un conjunto de celdas, a la que se asocian los valores de altura a cada una de las intersecciones de líneas de la malla. Para este caso, la presentación visual es una vista isométrica.

Para el caso de que a las celdas de una cuadrícula ráster se le asignen los valores correspondientes a los intervalos de alturas diferenciados por gamas, ya sea de tonos de gris o de colores, la presentación gráfica puede ser en dos o tres dimensiones.

### **1.2.3.2 Estructura de los MDE**

Las estructuras de datos en los SIG y por extensión, en los MDT a través de la historia, se han dividido en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: el modelo de datos vectorial y el modelo de datos ráster. Cada modelo de datos puede expresarse mediante diferentes estructuras de datos, dentro de los dos modelos básicos.

### **1.2.4 Modelo Ráster**

El espacio geográfico y los fenómenos asociados son representados utilizando una malla o cuadrícula regular conformada por celdas, las cuales son conocidas también como píxeles. El píxel constituye una unidad mínima de representación que posee una imagen. Estas celdas mantienen las relaciones de vecindad entre los objetos representados utilizando para ello un valor numérico representativo. [3]

El valor de cada celda o píxel es constante y su tamaño está estrechamente ligado a la resolución de la imagen. Cada uno de los píxeles dispone de un valor numérico que codifica un determinado elemento del mundo real. Resoluciones cercanas a la unidad

indican una mejor calidad de la imagen. Los formatos ráster tienden a sufrir alteraciones si son ampliados o reducidos en extremo.

La representación de los elementos del mundo real se realiza de la siguiente manera:

- Un elemento puntual = Un píxel
- Un elemento lineal = Una secuencia de píxeles
- Un elemento poligonal = Una agrupación de píxeles

La exactitud posicional de los elementos representados será mayor cuanto menor sea la superficie que representa cada píxel. La superficie representada por cada píxel se denomina resolución. Así, un incremento de la resolución supone un incremento de la exactitud en la localización de los elementos representados. [36]

La localización de los elementos en el modelo ráster puede ser de dos tipos:

**Localización absoluta:** Viene definida por el sistema de coordenadas.

**Localización relativa:** Se define a partir de la localización del píxel en relación al número de fila y columna.

Los modelos lógicos menos complejos son los basados en el modelo conceptual ráster, en buena medida porque la geo-referenciación y la topología son implícitas a la posición<sup>11</sup> del píxel en la malla. La separación entre datos cartográficos y datos temáticos no existe, pues cada capa representa un único tema y cada celda contiene un único dato numérico. La malla de píxeles puede ser regular o irregular.

El modelo ráster se obtiene cuando se digitaliza un mapa, una fotografía o cuando se obtienen imágenes digitales capturadas por satélites. En ambos casos se obtiene un archivo digital de esa información. La captura de la información en este formato se hace mediante los siguientes medios: scanner, imágenes de satélite, fotografía aérea, cámaras de video, entre otros. [3]

El modelo ráster es muy utilizado en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; también en estudios

---

<sup>11</sup> Referencia a columna y fila.

medioambientales donde no se requiere una excesiva precisión espacial como: contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas, análisis geológicos, etc.

## 1.2.4.1 Fundamentos de los SIG Ráster

La entrada de datos de un SIG ráster se puede realizar a partir de diferentes opciones; imágenes de satélite, imágenes escaneadas e importación de ficheros ráster obtenidos, por ejemplo: mediante un satélite o escáner, que se importan para convertirlos a un formato ráster determinado con el que pueda trabajar el SIG ráster en cuestión y rasterización o conversión a formato ráster de cartografía digital en formato vectorial. La presentación de los datos se pueden realizar a partir de mapas ráster convencionales, de mapas tridimensionales, así como de tablas y gráficos.

Entre los análisis de datos más característicos en los SIG ráster se pueden mencionar los siguientes:

- Reclasificación de datos.
- Reagrupación de píxeles.
- Superposición de datos.
- Filtrado de mapas.
- Cálculo de superficie, perímetro y forma.
- Cálculo de distancias euclidianas.
- Análisis de proximidad.
- Cálculo de pendientes.
- Cálculo de orientaciones.
- Análisis de sombras.
- Cálculo de cuencas visuales.
- Cálculo de cuencas de drenajes.
- Interpolación de valores.
- Cálculo de caminos mínimos.
- Cálculo de residuales.
- Cálculo de la pendiente real del relieve.

- Obtención de perfiles sobre el relieve y la cobertura.
- Cálculo de visibilidad entre dos puntos.

## 1.2.4.2 Superposición Ráster

En la superposición ráster se genera una nueva capa donde a cada celda se le asigna el valor resultante de operaciones entre ellas y su equivalente en las otras capas involucradas. Son muy diversas las operaciones o funciones que se pueden aplicar entre valores de celdas. Entre estas superposiciones están las lógicas de condición AND<sup>12</sup> y la superposición lógica OR<sup>13</sup>.

- **Superposición lógica (AND):** Permite encontrar las áreas donde se cumple un mismo valor en todas las capas involucradas<sup>14</sup>. Si los rangos son binarios, en las capas es frecuente emplear una multiplicación.
- **Superposición lógica (OR):** En este caso, solamente se necesita encontrar áreas que cumplan un valor dado en alguna de las capas dadas<sup>15</sup>. Con frecuencia se usa una sumatoria simple o binaria.

## 1.2.4.3 Estructura de Datos Ráster

### Modelo ráster: Matrices Regulares

La estructura matricial propone ya métodos de análisis topográfico basado en matrices regulares. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas.

---

<sup>12</sup> Cúmplase en todas las capas.

<sup>13</sup> Cúmplase en una "o" en otra capa.

<sup>14</sup> De allí el termino - cúmplase en capa 1 "Y" capa 2.

<sup>15</sup> De allí el término cúmplase en la capa 1 "O" en la capa 2.

La retícula puede adoptar formas variadas pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos su origen y el intervalo entre filas y columnas. [6].

## **Modelo ráster: Matrices Jerárquicas (Quadrees)**

El interés de las matrices de resolución variable reside en la posibilidad de solucionar el principal problema de las matrices. En este tipo de matrices los elementos pueden ser datos elementales, submatrices con un nivel de resolución diferente. La estructura final es un árbol jerárquico y dinámico de submatrices con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel. Se trata de una estructura análoga a los Quadrees, utilizados ocasionalmente en el tratamiento de variables categoriales. [7]

### **1.2.5 Modelo Vectorial**

Consiste en la representación de objetos geográficos o datos espaciales, basados en pares de coordenadas, utilizando puntos, líneas y polígonos. El punto constituye una coordenada simple  $x$ , que representa elementos geográficos tan pequeños como para ser expresados como una línea o un área.

Con dos puntos consecutivos se puede generar una línea la cual posee orientación y sentido representado con ella aquellas características geográficas que conforman expresiones espaciales distintas a un área o punto. Los polígonos constituyen aquella agrupación de líneas que encierran una superficie, la cual no puede ser representada por vectores como el punto o una simple línea. Las imágenes vectoriales pueden ser reducidas o ampliadas de forma extrema sin que se afecte su calidad. [2]

En los formatos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar es de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. En el modelo vectorial, los

MDT se basan en la estructura TIN, un modelo de representación tridimensional propia de la estructura arco-nodo. [36]

Los elementos vectoriales pueden crearse respetando una integridad territorial a través de la aplicación de normas topológicas. Se pueden utilizar para representar variaciones continuas de fenómenos.

La información gráfica en este tipo de formatos se representa internamente por medio de segmentos orientados de rectas o vectores. De este modo un mapa queda reducido a una serie de pares ordenados de coordenadas, utilizados para representar puntos, líneas y superficies. La captura de la información en el formato vectorial se hace por medio de: mesas digitalizadoras, convertidores de formato ráster a formato vectorial, GPS<sup>16</sup>, entrada de datos alfanumérica, entre otros. [3]

En cuanto a los datos que se manejan existen dos tipos:

- **Datos alfanuméricos:** Son descripciones de las características de las entidades gráficas. Generalmente son almacenados en formatos convencionales para este tipo de información.
- **Datos gráficos:** Son descripciones digitales de las entidades del plano. Suelen incluir las coordenadas, reglas y símbolos que definen los elementos cartográficos en un mapa. El SIG utiliza esos datos para generar un mapa o representación gráfica en una pantalla de ordenador o bien sobre papel.

Para la representación de datos gráficos se utilizan tres tipos básicos de entidades:

**Puntos o Nodos:** Es un objeto sin dimensiones que se utilizan para las entidades geográficas que mejor pueden ser expresadas por un único punto de referencia.

**Líneas:** Son objetos de una dimensión definidos por un nodo inicio y un nodo fin.

**Polígonos:** Son objetos limitados y continuos de dos dimensiones.

---

<sup>16</sup> Acrónimo de Sistemas de Geoposicionamiento Global.

## 1.2.5.1 Fundamentos de los SIG Vectoriales

La entrada de datos en un SIG vectorial se puede realizar a partir de diferentes opciones: digitalización manual, GPS e importación de ficheros vectoriales obtenidos por ejemplo: mediante digitalización o generados por un GPS y que se importan para convertirlos a un formato vectorial determinado, en el que pueda trabajar el SIG vectorial en cuestión; vectorialización o conversión a formato vectorial de cartografía digital en formato ráster.

La presentación de los datos se puede realizar a partir de mapas vectoriales convencionales de puntos y/o líneas y/o polígonos, de mapas tridimensionales en formato TIN, también de tablas y gráficos. Entre los análisis de los datos más característicos en los SIG vectoriales se pueden mencionar los siguientes:

- Generalización cartográfica a partir de la agregación de valores.
- Mediciones espaciales en líneas<sup>17</sup> y polígonos<sup>18</sup>.
- Consulta de la base de datos<sup>19</sup>.
- Superposición de mapas.
- Análisis de proximidad.
- Análisis de redes.
- Hacer selecciones teniendo en cuenta las propiedades de los objetos geográficos representados en las capas.
- Hacer selecciones teniendo en cuenta los datos asociados a los diferentes objetos geográficos representados en las capas.
- Hacer selecciones combinando las propiedades espaciales y datos asociados de los objetos geográficos.
- Hacer operaciones de influencia o buffer de los objetos geográficos.
- Hacer ubicaciones de símbolos sobre el mapa, los cuales deben poder ser puntuales, lineales o de áreas.

---

<sup>17</sup> Longitud y Sinuosidad.

<sup>18</sup> Perímetro, Área y Centroides.

<sup>19</sup> Atributos y Espaciales.

## 1.2.5.2 Estructura de Datos Vectoriales

### Modelo vectorial: Contornos

El papel del modelo de contornos ha quedado reducido a ser una etapa intermedia en la captura de información, por ser poco útil para el manejo por medios informáticos. La estructura básica de un modelo de contornos es la polilínea definida como un vector de  $n$  pares de coordenadas  $(x, y)$  que describe la trayectoria de las curvas de nivel o isohipsas.

El número de elemento de cada vector es variable; la reducción de este a un único elemento  $n=1$ , permite incorporar elementos puntuales sin introducir incoherencias estructurales. La localización de cada elemento es explícita, conservando los valores individuales de coordenadas. [6]

### Modelo vectorial: Redes de Triángulos Irregulares

Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos. [6]

A partir de un conjunto de puntos, en los que se conoce la elevación, se traza un conjunto de triángulos, formados por tripletas de puntos cercanos no colineales, formando un mosaico. En ocasiones se parte de las curvas de nivel que, tras descomponerse en un conjunto de puntos, genera una red irregular de triángulos. La creación de un TIN<sup>20</sup> se compone de dos partes diferentes: la triangulación propiamente dicha y la selección de los puntos que deben usarse como vértices.

Los TIN pueden considerarse como una estructura derivada de otra anterior de puntos o líneas. Aunque la distribución original puede ser cualquiera incluso puntos distribuidos aleatoriamente, es frecuente partir de una base de isohipsas para generar la red de triángulos. Estos están internamente organizados en función de su vecindad

---

<sup>20</sup> Acrónimo en inglés de Redes de Triángulos Irregulares.

mediante un conjunto de información bastante compleja que hace posible un manejo relativamente ágil y eficaz frente a alternativas menos estructuradas. [6]

## **1.3 Objeto de Estudio**

### **1.3.1 Descripción General**

Las constantes transformaciones sociales y materiales que experimenta el mundo en la era postmoderna, han venido acelerando la expansión de las nuevas tecnologías de la información. El desarrollo tecnológico a nivel mundial con el paso de los años ha aumentado de forma vertiginosa. La sociedad es protagonista de esta gran evolución encontrándose inmersa en el gran progreso de la ciencia y técnica.

Las TIC han tenido un gran avance convirtiéndose en una fuente principal de información en conjunto con la Internet. Paralelo, los SIG se han desarrollado de manera notable, siendo innumerables las aplicaciones que estos ofrecen. Con todos estos adelantos tecnológicos y científicos son muchas las aplicaciones que se brindan. Aunque todos estos adelantos aportan grandes beneficios surgen como consecuencia gran número de necesidades sociales a la par.

Cuba aunque ha estado bloqueada económicamente desde hace 50 años por los EE.UU no ha estado exceptuada de todos los desarrollos y adelantos que giran en torno a ella. El país poco a poco ha ido creciendo en el desarrollo de los SIG junto a las investigaciones y los avances tecnológicos aplicados al campo de la geografía. Muchas empresas, universidades, grupos de investigación y de desarrollo están colaborando en pos de estos adelantos.

En la UCI, específicamente en la Facultad # 9, un grupo compuesto por especialistas de Geoinformática en conjunto con la FAR y GEOCUBA trabajan actualmente en la implementación de la plataforma GeneSIG para desarrollar una herramienta que sirva de apoyo en la creación de los SIG y que permita responder a las necesidades de estas entidades con sus proyecciones de comercialización y personalización.

La FAR tiene la misión de garantizar la defensa e integridad cubana, por lo que es complejo manipular la gran cantidad de información importante relacionada con

componentes espaciales. Por eso se hizo necesario una gestión más fuerte de los procesos y un apoyo irrefragable en la toma de decisiones, que habitualmente son complicadas sobre procesos manuales por la diversidad de variables a considerar.

El Departamento Productivo Geoinformática trabaja específicamente con 2 grupos: PNICG y GeneSIG dedicándose a la investigación de los SIG y a la informatización de la ONRM<sup>21</sup>, desarrollando aplicaciones que contribuyan a informatizar, conservar y administrar el conocimiento geológico y geográfico. Avanza en la producción de software para la comunidad geológica, con valor agregado sobre plataformas libres y con alto nivel de competitividad con empresas reconocidas internacionalmente.

GEOCUBA es un grupo empresarial que se dedica a la elaboración, producción y venta de planos, mapas con diversos fines. Trabaja en investigaciones científicas en ramas del campo de las geociencias, entregando a sus clientes, productos informativos terminados con una alta calidad y fiabilidad.

Con el trabajo en equipo de estas entidades las aplicaciones que se obtendrán de la implementación de la plataforma GeneSIG serán numerosas y variadas. Las FAR obtendrían repuesta rápida en la toma de decisiones en áreas económicas, políticas y sociales, siendo de gran ayuda para el manejo de información calificada y compleja.

Para Geoinformática será de gran beneficio lográndose personalizar este producto a diferentes negocios. En GEOCUBA el manejo de toda la información geográfica y geoespacial será mucho más sencillo y permitirá abrir un espacio sólido en el mercado de las aplicaciones de estas ramas. Esta plataforma será un elemento importante en la realización de estudios geográficos y permitirá un control adecuado del impacto ambiental.

De manera general con la terminación de este producto y puesta en marcha en buen funcionamiento, las diferentes entidades mencionadas anteriormente, podrán establecer ante determinadas situaciones, toma de decisiones más acertadas que exijan la georeferenciación de la información para cualquier base.

---

<sup>21</sup> Acrónimo de Oficina Nacional de Recursos Minerales.

La plataforma GeneSIG se define en diferentes módulos que en su conjunto forman una aplicación SIG que incorpora un sinnúmero importante de características y funcionalidades de estos sistemas que brinden las aplicaciones esperadas por los usuarios. Se pretende obtener servicios de acceso cómodo a la información geográfica para su visualización, análisis, consulta y que la misma pueda ser manejada e utilizada por usuarios no especializados en tecnología SIG.

Entre los diferentes módulos de GeneSIG se encuentra el módulo de Análisis del Terreno. Aquí se realizan operaciones de análisis de la información espacial, como el cálculo de distancias, áreas, acimut, entre otras funciones de mayor complejidad. Los Perfiles de Visibilidad y Altura también se encuentran en el módulo de AT<sup>22</sup>. Es muy importante por las diferentes aplicaciones que tienen estos perfiles dentro de la plataforma, su utilización e implementación.

La implementación de los modelos de Perfiles de Visibilidad y Altura en este módulo se obtiene mediante algoritmos y modelos matemáticos utilizando herramientas que permitan la representación de los mismos.

El perfil de Visibilidad asociado a este SIG tiene disímiles aplicaciones en diferentes sectores. La visibilidad es utilizada en el entorno, pues esta permite una visión clara de los objetos en el paisaje cotidiano. La posibilidad de ver objetos a niveles superiores depende, no solo del estado de la atmósfera, sino también de los objetos observados.

Tiene muchas utilidades pudiéndose mencionar: geografía, geología, botánica, criterios de pendientes, criterios de distancias de carreteras, hidrología, usos forestales, distancias de núcleos urbanos, aeronáutica y aviación, meteorología, etc.

En la aeronáutica y aviación deben tenerse en cuenta distintos elementos y la visibilidad es uno de los fundamentales. Un mal cálculo en la visibilidad de un vuelo aéreo puede traer desastres y pérdidas humanas, por lo que es necesario tener el alcance visual definido y claro para evitar accidentes. En estos aspectos una mala visibilidad conlleva a consecuencias terribles para la sociedad y la humanidad.

---

<sup>22</sup> Acrónimo de Análisis del Terreno.

Muchos factores meteorológicos influyen en la visibilidad de manera universal: las precipitaciones, la niebla, la neblina, el humo, el polvo, la arena, las ventiscas y la bruma. Estos factores son naturales en la atmósfera pero imposibilitan la visibilidad siendo dañinos. En la meteorología la visibilidad es muy utilizada en muchos aspectos por lo que para evitarle problemas a la sociedad basados en dificultades meteorológicas se deben controlar bien los aspectos que opacan la misma.

En la hidrología la visibilidad es muy importante en la planificación hidrológica a la hora de la fabricación de redes fluviales, zonificación en cuencas y subcuencas, embalses, estaciones de aforo, canales y conducciones de abastecimiento, pendientes, redes hidrográficas, zonas regables, comunidades de regantes, centrales hidroeléctricas y presas.

El perfil de Altura asociado a GeneSIG tiene una variedad de aplicaciones en diferentes sectores. La altura se utiliza de manera general en el contorno, pues trata de representar las posiciones relativas de los objetos en un plano en una tercera dimensión.

Tiene muchos beneficios sabiéndose: geografía, altimetría, mapas de relieve, hidrografía, navegación marítima, astronomía, geometría, meteorología, contaminación atmosférica, agricultura y demografía.

En la geografía la altura es muy importante pues tiene varias aplicaciones dentro de esta rama. Se utiliza para la representación de mapas de tres dimensiones que resultan muy expresivos a la hora de representar variables continuas. La combinación de todas estas posibilidades determina que un mapa tridimensional se pueda dibujar de muchas formas distintas, cada una de ellas mostrando un aspecto diferente de la topografía.

En la meteorología la utilización de la altura es significativa pues sus aplicaciones son variadas. Un ejemplo es que mediante el uso de los mapas de altura se obtienen diferentes resultados como el desplazamiento de los fenómenos, evolución de las depresiones, situación de los frentes fríos y la evolución de los anticiclones. En la instalación de radares meteorológicos, es puntual la altura a la cual deben estar ubicados los mismos pues entre otras aplicaciones permitirán estimar la dirección y velocidad del viento en las zonas bajas de la atmósfera.

En geometría la altura es una dimensión de un objeto plano o con volumen, normalmente vertical. Es la distancia entre un lado o cara de una figura plana y el vértice o punto en dirección perpendicular. El término también nombra a la recta o segmento sobre el cual se mide dicha distancia. Todos los problemas que se pueden resolver son muchos utilizando la matemática, especialmente la altura. Un ejemplo de su utilización sería para analizar si la orientación de los edificios es la adecuada en relación con la dirección predominante del viento calculando la orientación de los mismos.

### **1.3.2 Situación Problemática**

La plataforma GeneSIG es un proyecto muy reciente, solo tiene unos pocos años. La misma ha sido creada con la intención de aumentar el desarrollo de SIG cubanos con tecnología libre. Los desarrolladores que laboran esta plataforma aunque desempeñan un excelente trabajo están cortos de experiencia en el desarrollo de este tipo de sistema, lo que provoca algunas limitaciones en el progreso y alcance del proyecto.

Generalmente todos los SIG que se utilizan en el país son realizados en otros países y generalmente propietarios. Los elaborados nacionalmente no han sido muchos, algunos ya no están actualmente en funcionamiento. Por la situación económica actual que presenta el país y en medio de la crisis estructural que atraviesa el mundo no se pueden costear los altos precios y las restricciones que implican las licencias de los SIG extranjeros lo cual dificulta aún más su utilización.

A causas del bloqueo teniendo en cuenta que el mismo especifica que no se puede establecer convenios comerciales entre entidades o personal norteamericano con Cuba, no existe un mecanismo legal que permita obtener dichas licencias.

La mayoría los integrantes del equipo que desarrollan la plataforma GeneSIG poseen los conocimientos suficientes sobre cómo se implementa la misma. De los contenidos con se trabaja en un SIG, específicamente del tema de la geomática se necesita personal especializado que se dedique a tiempo completo a la orientación y capacitación del personal en temas afines, con el objetivo de dar soluciones

informáticas a procesos de esta rama que en la actualidad se hagan de forma manual o requieran de alguna optimización.

La plataforma está concebida para que se estandarice a nivel nacional como una herramienta hegemónica para el tratamiento de información geoespacial y datos cartográficos, implicando de esta forma el surgimiento de una etapa notable de formación de nuevos requerimientos.

La cantidad de personal disponible para el desarrollo de la plataforma a pesar de ser proyecto colaborativo entre 3 entidades, no está en correspondencia directa con la demanda de productos de la misma. Esto limita las investigaciones que se puedan realizar, así como la asimilación de tecnologías nuevas y renovadas. También se ve afectada la calidad en cuanto a genericidad y escalabilidad de las personalizaciones, así como soluciones desarrolladas hasta la fecha actual.

Es necesario identificar en GeneSIG nuevas áreas de investigación en las que el conocimiento actual sea carente o incipiente y así priorizarlas en dependencia de la demanda de las mismas, alguna de estas pueden ser:

- Representación y análisis sobre Modelos de Iluminación y Sombras.
- Análisis de rutas.
- Representación y análisis sobre MTD en 3D sobre tecnología Web.
- Análisis hidrológico y álgebra de mapas.
- Análisis de Perfiles de Visibilidad y Altura.

Entre los diferentes módulos que contiene GeneSIG se encuentran: Selección, Análisis de Terreno, Consulta, Edición, Capa, Navegación, Identificación, Herramienta y Ayuda. Específicamente el módulo Análisis del Terreno, las funcionalidades que están implementadas hasta la actualidad no se encuentran perfeccionadas, por lo que se hace necesaria la identificación de nuevos requerimientos en las que el conocimiento actual esté incipientes o carentes para priorizarlas en dependencia de las demandas de la misma.

El análisis de Perfiles de Visibilidad y Altura es uno de los casos puntuales con los que cuenta el módulo AT que están incipientes en su desarrollo. En este trabajo se definirán algoritmos o modelos matemáticos para estos perfiles. El Perfil de Visibilidad

dentro del desarrollo del módulo no posee ninguna implementación hasta la actualidad. El Perfil de Altura tiene adelantos en su desarrollo aunque necesita la posibilidad de crear análisis sobre los datos resultantes, pues es una simple gráfica en dos dimensiones con los valores de alturas correspondientes a cada coordenada geográfica.

### **1.4 Conclusiones parciales**

En el presente capítulo se han tratado temas relacionados con los SIG, abordando más específicamente el módulo de Análisis del Terreno, incluyendo los perfiles de visibilidad y altura. Se definieron diversos conceptos de gran importancia que ayudarán en parte a la comprensión de este trabajo, propiciando un mayor conocimiento para determinar cuáles son las mejores opciones para emplear en el desarrollo de esta investigación.

## 2. Tendencias y Tecnologías

### 2.1 Introducción

Después del estudio teórico realizado en el capítulo anterior, en el presente se describen modelos matemáticos y algoritmos informáticos para la obtención de los Perfiles de Visibilidad. También se tratan diferentes métodos de interpolación espacial para la obtención de Perfiles de Altura. Se investiga sobre las herramientas que permiten la representación de estos perfiles, conformando de esta forma el estado del arte de la investigación.

### 2.2 Estado del Arte

#### 2.2.1 Modelos Matemáticos

##### 2.2.1.1 Introducción al concepto y al cálculo de Visibilidad

La visibilidad puede ser entendida en el sentido empírico de accesibilidad sensorial de los ítems antrópicos y naturales del paisaje bajo determinadas condiciones de distancia, topografía y ambiente atmosférico. La variable visibilidad consiste en la cuenca visual accesible potencialmente desde un punto, que se registra a través de la distancia máxima visible sin interferencia de una altitud superior.

En el cálculo de la visibilidad desde un punto, que se realiza mediante la utilización de programas de SIG, intervienen una serie de factores: [35]

**Altitud** sobre la que está situado un determinado punto y su relación con el entorno que le rodea. Este factor se obtiene del modelado digital del terreno sobre el que se sitúa el punto.

**Azimut** que es el ángulo horizontal que limita la exploración.

**Ángulo vertical** que limita la exploración. El plano horizontal, 0 grados, se sitúa en la cota del punto.

**Radios mínimos y máximos** que limitan la búsqueda de áreas visibles.

**Altura del punto de observación.** Esta se encuentra referida a la altura sobre el terreno a la que se encuentra el punto de observación.

El resultado de los cálculos es una cobertura digital compuesta por polígonos en los que cada uno de ellos contiene información acerca de la superficie visible desde cada punto.

### 2.2.1.2 Estructuras de Visibilidad en el Terreno

La estructura básica para la visibilidad de un terreno es la cuenca visual. Teniendo en cuenta un punto  $V(x,y,z)$  sobre un terreno, la cuenca visual del punto  $V$  es el conjunto de los puntos  $P(x,y,z)$  de la superficie  $D$  que son visibles desde  $V$ . Es decir: [18]

$$\text{Cuenca visual } (V) = \{P \text{ en } D; P \text{ es visible desde } V\}$$

En ocasiones la cuenca visual se define dentro de una distancia  $r$  desde el punto  $V$ :

$$\text{Cuenca visual } (V, r) = \{P \text{ en } D; \text{ distancia } (V, P) < r, \text{ y } P \text{ es visible desde } V\}$$

Otras estructuras de visibilidad son los horizontes de un punto  $V(x,y,z)$ . Los horizontes locales son las localizaciones de puntos  $P(x,y,z)$  en el terreno que son visibles desde  $V$  y que bloquean la vista de los puntos  $Q(x,y,z)$  situados inmediatamente más allá de ellos.

$$\text{Horizontes locales } (V) = \{P \text{ en } D; P \text{ es visible desde } V \text{ y no hay } Q \text{ punto en } D, \text{ distinto de } P, \text{ tal que } P \text{ pertenece al segmento de } VQ \text{ y todos los puntos del segmento } PQ \text{ son visibles desde } V\}$$

El horizonte mundial, también llamado simplemente el horizonte, de  $V$  recoge para cada radial  $V$  la dirección y el punto más lejano en el terreno que es visible desde  $V$ . Intuitivamente, corresponde a los límites de la cuenca visual y es un subconjunto de los horizontes locales:

$$\text{Horizonte } (V) = \{P \text{ en } D; P \text{ es visible desde la } V \text{ y por cada punto } Q \text{ tal que } P \text{ pertenece al segmento de } VQ, Q \text{ no es visible desde } V\}$$

Las estructuras de visibilidad para varios puntos de vista pueden ser definidas por la combinación de la vista y cobertizos de estos puntos de acuerdo a algunos operadores. Combinación de los operadores más comunes son:

- ✚ Superposiciones.
- ✚ Operadores booleanos.
- ✚ Operadores matemáticos.

La superposición de cuencas visuales contiene más información que cualquier otra estructura. El conjunto de puntos de vista generalmente se limita a un subconjunto de los vértices del MDE. Cualquier estructura de visibilidad puede ser codificada ya sea en forma continua o discreta. Una representación permanente de las particiones de la cuenca visual de cada celda del MDE en sus partes visibles e invisibles.

### 2.2.1.3 Visibilidad a partir de un punto

Si a partir de un punto inicial  $P_0(x_p, y_p, z_p)$  se traza una recta en la dirección del vector de distancia  $\vec{L}$  recorriendo tramos de longitud  $\Delta S$  entonces, puede llegarse al punto  $\vec{r}$  de coordenadas  $(x, y, z)$ , existiendo entre los vectores de posición de ambos puntos la relación:

$$\Delta S \cdot \vec{L} = \vec{r} - \vec{r}_{p_0}$$

Donde  $\vec{r}$  será el punto de llegada;  $\Delta S$  es la longitud del segmento y  $\vec{r}_{p_0}$  es el punto inicial.

La dirección  $\vec{L}$  viene dada por los cosenos directores de la recta correspondiente, es decir:

$$\vec{L} = L_x \vec{i} + L_y \vec{j} + L_z \vec{k}$$

Como  $\vec{L}$  es unitario entonces:

$$|\vec{L}| = \sqrt{Lx^2 + Ly^2 + Lz^2} = 1$$

Estas relaciones son algunas de las básicas para hallar las coordenadas del punto de llegada en el espacio a partir de un punto  $P_0(x_p, y_p, z_p)$  y en una dirección cuyo vector unitario es  $\vec{L}$  sobre el cual se ha recorrido una longitud  $\Delta S$  que se ha dividido en  $k$  segmentos de longitud  $h$ .

La forma de encontrar los puntos encima de la recta puede simplificarse si se considera que los puntos en el plano  $(x, y)$  están organizados en la rejilla regular, de manera que en el plano horizontal se cumple que:

$$\begin{aligned} x &= \Delta x(x_n + 1) & x_p &= \Delta x(x_{nP} + j_p) \\ y &= \Delta y(y_n + i) & y_p &= \Delta y(y_{nP} + i) \end{aligned}$$

Donde  $i, j, i_p, j_p$  son las coordenadas enteras de las cuadrículas;  $x_n, y_n, x_{nP}, y_{nP}$  son las coordenadas normalizadas de los puntos y  $\Delta X, \Delta Y$  son los intervalos de la rejilla.

#### 2.2.1.4 Intervisibilidad entre dos puntos

La intervisibilidad entre dos puntos se decide de acuerdo con la definición siguiente: [28]

- ✚ Dos puntos  $P$  y  $Q$  son mutuamente visibles si el segmento rectilíneo que los une o línea visual tiene siempre una altitud superior a la del terreno sobre su proyección, excepto en los propios puntos inicial y final,  $P$  y  $Q$ .

Por tanto, para el cálculo de la intervisibilidad entre dos puntos se proyectará la línea visual sobre el plano  $XY$  y se construirá el perfil topográfico definido por la proyección. Posteriormente, se analizarán los puntos intermedios para comprobar si su altitud es suficiente para interceptar la línea visual

Formalmente se define una función de intervisibilidad  $v$ , entre dos puntos  $P, Q$  que puede tomar dos valores: [16]

$$v(P, Q) = \begin{cases} \text{cierto} & \text{si } P \text{ y } Q \text{ son mutuamente visibles} \\ \text{falso} & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La intervisibilidad se decide de acuerdo con la definición siguiente:

La intercepción de la línea visual por un punto depende de la altitud de dicho punto y de la correspondiente a la línea visual en el mismo lugar. El análisis puede realizarse de varias formas, entre las que se propone la siguiente:

- ❖ Se calcula la pendiente de la línea visual (ángulo con respecto a la horizontal) desde el punto de inicio  $P(0)$  al final  $P(n)$ :  $\text{tg}\psi$ , que depende de la diferencia de altitudes y la distancia entre los puntos:

$$\text{tg}\psi = (z_0 - z_n)/d_n$$

- ❖ Para comprobar si un punto intercepta la visual, se calcula la pendiente entre el punto inicial y el punto  $P(k)$ :

$$\text{tg}\psi_k = (z_0 - z_k)/d_k$$

- ❖ Se comparan las pendientes: si  $\text{tg}\psi > \text{tg}\psi_k$  no existe intercepción, en caso contrario el punto problema intercepta la línea visual y no existe intervisibilidad.

El proceso anterior debe repetirse para cada uno de los  $P(k)$  de la línea visual entre el inicial y el final:  $0 < k < n$ .

### 2.2.1.5 Interpolación espacial

**Interpolación espacial** es un procedimiento matemático que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio. [17]

Es un procedimiento utilizado para predecir el valor de un atributo en una localidad precisa a partir de valores obtenidos de puntos vecinos, ubicados al interior de la misma área de estudio. La interpolación se utiliza para transformar un número finito de observaciones, por ejemplo: cotas de terreno, en un espacio continuo de manera que su patrón espacial sea comparable con aquel presentado por las observaciones puntuales de base. [14]

La interpolación espacial puede ser utilizada en los SIG entre otras cosas para proporcionar los contornos, para mostrar gráficamente los datos, para calcular algunas propiedades de la superficie en un punto dado y para cambiar la unidad de comparación utilizando diferentes estructuras de datos en diferentes capas o con frecuencia se utiliza como una ayuda en el proceso de toma de decisiones espaciales, tanto en la geografía, física o en disciplinas relacionadas.

### 2.2.1.6 Método de Interpolación: IDW

El método Ponderación en función inversa de la distancia o IDW<sup>23</sup> realiza la interpolación asignando pesos a los datos en función inversa de la distancia que los separa del punto problema. Este método es un algoritmo de interpolación de tipo local, aproximado y determinístico. La fórmula general es la siguiente: [6]

$$\hat{z}_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot d_i^k}{\sum_{i=1}^n d_i^k}$$

---

<sup>23</sup> Acrónimo en inglés de Inverse Distance Weighting.

En la expresión anterior,  $\hat{z}_{x,y}$  representa la altitud estimada para el punto de coordenadas  $(x, y)$  a partir de los  $n$  puntos seleccionados en el entorno. La variable  $k$  permite variar la ponderación de la distancia para los datos.

Este método tiene a su favor la sencillez y rapidez de cálculo pero, al tratarse esencialmente de una media ponderada, el resultado se encuentra siempre incluido dentro del rango de variación de los datos. Por este motivo, el correcto tratamiento de las formas cóncavas y convexas depende estrechamente de la distribución de los puntos originales.

Las diferencias entre los diversos métodos estriban en la forma de calcular los pesos de cada dato. Los métodos de distancia inversa calculan la distancia euclidiana<sup>24</sup> entre cada dato y el punto problema, al establecer una función de proporcionalidad entre el peso y la distancia.

La variable  $k$  es un exponente de ponderación. Este parámetro controla la forma en la que el peso disminuye con la distancia. En el caso de valer 0, el valor estimado será la media aritmética de los datos; en el caso de valer 1, el peso disminuye linealmente con la distancia; para valores superiores, la influencia de los puntos cercanos se hace mucho mayor que la de los lejanos. Por ejemplo, cuando  $k=2$ , la interpolación se realiza en función inversa del cuadrado de la distancia. [6]

Cuando se aplican estos métodos aparece frecuentemente un problema derivado del desigual reparto espacial de los puntos a lo largo de las líneas y entre ellas, tal como se ha señalado en el apartado anterior. Se trata del aterrazamiento del terreno debido a la ausencia de datos entre curvas de nivel sucesivas.

Esta familia de métodos permite la generación del MDE de una forma rápida y simple. Sin embargo, se trata esencialmente de una media ponderada por tanto, el resultado se encuentra siempre incluido dentro del rango de variación de los datos.

---

<sup>24</sup> **Distancia euclidiana** o **Métrico euclidiano** es la distancia entre dos puntos que se mediría con una regla y que se puede probar por el uso del Teorema Pythagorean. Usando esta fórmula como distancia, el espacio euclidiano se convierte en un espacio métrico.

### 2.2.1.7 Método de Interpolación: Spline

En el campo matemático de análisis numérico el método de interpolación Spline es una forma de interpolación donde es un tipo especial de polinomio a trozos llamado Spline. Es un interpolador local, exacto y determinístico. Son populares en los paquetes de interpolación de superficie, pero en general no son comunes en SIG. Puede ser aproximada porque suaviza los contornos dibujados a través de un modelo TIN.

El método Spline ajusta funciones polinómicas en las que las variables independientes son  $X$  e  $Y$ . Es similar a una interpolación global mediante regresión, pero ahora esta interpolación se lleva a cabo localmente. En general producen resultados muy buenos con la ventaja de poder modificar una serie de parámetros en función del tipo de distribución espacial de la variable.

La ventaja fundamental del método Spline respecto a los basados en medias ponderadas es que con estos últimos, los valores interpolados nunca pueden ser ni mayores ni menores que los valores de los puntos utilizados para interpolar. Por tanto resulta imposible interpolar correctamente máximos y mínimos. [14]

Una función Spline está formada por varios polinomios, cada uno definido sobre un subintervalo, que se unen entre sí obedeciendo a ciertas condiciones de continuidad.

Si se dispone de  $n+1$  puntos, a los que se les denomina nudos, tales que:

$$t_0 < t_1 < \dots < t_n$$

Y además que se ha fijado un entero:  $k \geq 0$ .

Se plantea entonces que una función **Spline de grado  $k$**  con nudos en  $t_0, t_1, \dots, t_n$  es una función  $S$  que satisface las condiciones: [30]

- I. En cada intervalo  $[t_{i-1}, t_i)$ ,  $S$  es un polinomio de grado menor o igual a  $k$ .
- II.  $S$  tiene una derivada de orden  $(k-1)$  continua en  $[t_0, t_n]$ .

El Spline de grado 0 es una función constante por zonas. Una forma explícita de presentarlo es la siguiente:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = c_0 & x \in [t_0, t_1) \\ S_1(x) = c_1 & x \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) = c_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n) \end{cases}$$

Los intervalos  $[t_{i-1}, t_i)$  no se interceptan entre sí, por lo que no hay ambigüedad en la definición de la función en los nudos. Un Spline de grado 1 se puede definir por:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = a_0x + b_0 & x \in [t_0, t_1) \\ S_1(x) = a_1x + b_1 & x \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) = a_{n-1}x + b_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n) \end{cases}$$

### 2.2.1.8 Método de Interpolación: Bi-lineal

La interpolación Bi-lineal también conocida como de primer orden, con solo un poco más de complejidad en el algoritmo y un poco más de tiempo de cómputo, produce mejores resultados que la interpolación de orden cero. En matemáticas, la interpolación Bi-lineal es una extensión de la interpolación lineal para funciones de dos variables en una cuadrícula regular. La idea clave es llevar a cabo la interpolación lineal en una dirección y luego en la otra dirección. [6]

Sea  $f(x, y)$  una función, que es conocida en los vértices de un cuadrado unitario. Se supone que se desea conocer el valor de  $f(x, y)$  en cualquier punto dentro del cuadrado. En la deducción de estas ecuaciones, se usa la convención de la geometría analítica, recordar que el orden y dirección de los ejes en el caso de imágenes digitales es diferente.

La interpolación Bi-lineal produce un resultado suavizado debido a que se trata esencialmente de un filtro de media donde el peso de los 4 datos depende directamente de la distancia de cada uno de ellos al punto problema.

Representando la función de truncamiento<sup>25</sup> mediante la expresión  $[k]$  y dado un punto de coordenadas reales  $(x,y)$ , se definen los puntos del modelo más próximos:  $(i,j)$ ,  $(i,j+1)$ ,  $(i+1,j)$ ,  $(i+1, j+1)$ , donde  $i=INT(y)$  y  $j=INT(x)$ . [6]

Las distancias del punto problema al punto  $(i,j)$  en los ejes  $X$  e  $Y$  serán las siguientes:

$$d_x = x - [x]$$

$$d_y = y - [y]$$

Y el valor interpolado para el punto  $(x,y)$  es:

$$\hat{z}_{x,y} = (1 - d_x) \cdot (1 - d_y) \cdot z_{i,j} + d_x \cdot (1 - d_y) \cdot z_{i,j+1} + (1 - d_x) \cdot d_y \cdot z_{i+1,j} + d_x \cdot d_y \cdot z_{i+1,j+1}$$

### 2.2.1.9 Método de Interpolación: Superficies de tendencia

Una opción alternativa, que puede reflejar más adecuadamente formas no recogidas explícitamente por los datos de entrada es la estimación de superficies de tendencia. Es un método de interpolación determinista o estocástica, aproximada y global. Puede aplicarse de forma local, aunque esto resulta menos habitual. Su cálculo, a partir del conjunto de datos, suele hacerse mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

La ecuación polinómica resultante puede reducirse, en el caso más simple, a un plano de ajuste cuya expresión es:

$$\hat{z}_{x,y} = a_{00} + a_{10} \cdot X + a_{01} \cdot Y$$

Lo más habitual es obviamente el uso de superficies de grado superior, cuya mayor complejidad les permite describir con más exactitud la superficie topográfica. La expresión general para una superficie de orden  $k$ , es la siguiente:

<sup>25</sup> Parte entera de un número  $k$ .

$$\hat{z}_{x,y} = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-i} a_{i,j} \cdot x^i \cdot y^j$$

La elección del valor de  $k$  depende del equilibrio que se desee entre la complejidad de las operaciones y el mejor o peor ajuste a los datos originales. Algunos autores recomiendan el uso de ecuaciones de grado que, a pesar del elevado coste informático de su cálculo, poseen algunas propiedades de interés. [9]

Aunque la realización de pruebas es relativamente costosa, la opción de mínima complejidad implicaría elegir el menor valor de  $k$  para el cual la suma de desviaciones o de sus cuadrados entre los datos estimados y los reales sea menor que un valor de error aceptable y prefijado:

$$\sum_{x,y} (\hat{z}_{x,y} - z_{x,y})^2 < E_{max}$$

Es conveniente destacar algunos factores que pueden afectar negativamente al uso de superficies de tendencia que ocasionalmente, pueden no ser completamente obvios. El primer factor afecta al número de datos que muy recomendablemente debe ser suficiente para llevar a cabo un análisis estadísticamente significativo. El problema radica en que el número de datos determina los grados de libertad del análisis por lo que si se acerca al número de coeficientes de la ecuación, esta pierde significado estadístico.

Un segundo factor afecta a los análisis efectuados en la periferia del modelo: si se fuerza a realizar extrapolaciones<sup>26</sup>, los valores marginales pueden adoptar dimensiones absurdas, problema que se agrava notablemente cuando el grado de la ecuación es elevado.

Por este motivo es muy recomendable que el modelo vectorial previo sea más extenso que el matricial, aportando una banda suplementaria en los bordes que permita que

<sup>26</sup> Cuando el punto problema no está rodeado por los datos, sino que estos se sitúan lateralmente.

todos los puntos del modelo matricial tengan datos de apoyo a su alrededor. Otro factor de interés se refiere a la distribución de los datos originales: si los datos no representan un área similar, la superficie de tendencia se alargará paralelamente a su patrón de distribución.

Las distribuciones regulares y aleatorias darán habitualmente buenos resultados, mientras que la tendencia a agrupar los datos será perjudicial. Este problema se manifestará, por ejemplo: si los modelos vectoriales se construyen agrupando los datos a lo largo de las curvas de nivel con excesiva densidad.

Aunque pueda no ser intuitivamente obvio, los mejores resultados se obtendrán cuando la distancia entre puntos de una línea sea similar a la distancia entre líneas, lo que exige una mayor densidad en las zonas de fuerte pendiente y una mayor separación en áreas llanas.

### 2.2.1.10 Método de Interpolación: Kriging

El método para la interpolación Kriging tiene una expresión general similar al IDW. La diferencia básica es que asume la altitud como variable regionalizada. Este método de interpolación es exacto, estocástico, aplicable tanto de forma global como local. Resuelve un conjunto de ecuaciones utilizando la información procedente del **variograma**, las distancias relativas entre los datos y la posición del punto donde el valor interpolado es solicitado. Estas ecuaciones contienen la **covarianza** entre el punto a ser estimado, los datos y las covarianzas entre los datos en sí mismos. [15]

El procedimiento seguido en la interpolación utilizando el método Kriging se basa en las siguientes etapas: [20]

I.) Se obtiene primeramente el variograma que es un gráfico de dispersión que relaciona dos conceptos. En el eje **X**, la distancia **h**, entre puntos muestrales en una dirección concreta del plano y en el eje **Y**, una medida de la variabilidad:  $\gamma(h)$  de la altura **Z** en el conjunto de puntos muestrales que están separados un valor concreto **h** de la distancia.

La expresión más usual para representar el variograma es:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{p_i} - z_{p_i+h})^2$$

Donde  $n_h$  es el número de pares de valores separados por una distancia  $h$ . Cambiando este último valor, es posible elaborar el variograma empírico para el modelo. El variograma puede construirse sin tener en cuenta la orientación de los pares de datos o bien para diferentes orientaciones, en el caso de que se sospechen anisotropías en la correlación. [10]

II.) Una vez hallado el variograma empírico de la variable a interpolar, se calcula una función que ajusta de modo adecuado ese variograma:  $\gamma(h)$  que puede ser esférica, exponencial, lineal, logarítmica, circular, gaussiana, entre otros.

El Kriging estima esta dependencia en función de la distancia mediante la medida de la covarianza entre los datos separados por distancias diferentes. Para ello utiliza la semivarianza de las diferencias cuyo valor se calcula mediante la expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \text{var}(z_p - z_{p+h})$$

Donde **var** representa la varianza;  $z_p$  el valor de la variable en un punto  $p$  y  $z_{p+h}$  el valor en un punto situado a una distancia  $h$  del anterior.

III.) Con este variograma teórico se puede proceder a calcular las ponderaciones  $W_{ij}$ .

IV.) Las ponderaciones así obtenidas, son diferentes para cada punto calculado y por tanto, en cada uno de ellos es preciso resolver la ecuación matricial anterior y calcular la matriz de soluciones  $W$ , que es específica para cada punto interpolado. Esto supone que el uso del Kriging implica una laboriosa tarea de operaciones y cálculos.

V.) Una vez calculadas las ponderaciones de cada lugar, se puede obtener la interpolación en ese punto mediante la ecuación:

$$Z_x = \sum_j W_{xj} \cdot Z_j$$

Siendo  $W_{ij}$  la matriz de ponderaciones calculada para el punto de cálculo  $x$  y  $Z_j$  el valor de la altura en el punto de la muestra  $j$ .

Este método realiza una estimación del valor en el punto problema mediante una media ponderada en función de la distancia:

$$\hat{z}_{x,y} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot z_i$$

Donde se usa un conjunto de  $k$  datos situados en el entorno de punto problema y  $\lambda_i$  representa los pesos asignados a cada uno de ellos. La originalidad del método reside sobre todo en el criterio utilizado para asignar los valores de ponderación a cada dato y en que permite asignar un valor de error para cada punto problema.

La definición del área adecuada del entorno puede hacerse con criterios estadísticos lo que aumenta la robustez del método. De hecho, si se cumplen ciertas propiedades en la distribución de los valores de la variable, este método de interpolación es óptimo, es decir, la suma de cuadrados de las desviaciones es mínima.

El Kriging es un método de estimación óptimo desde el punto de vista estadístico siempre que se cumplan algunas condiciones. De ellas, la más importante es que el variograma sea de validez general para el modelo. Esto quiere decir que la interdependencia entre los datos debe ser función exclusivamente de la distancia entre ellos de su posición relativa y no de su localización espacial absoluta.

En la teoría elemental del Kriging como orientación de los datos y para medir la distancia  $h$  para el cálculo del variograma se asume que la estructura de los datos es isotrópica, de forma que la distancia entre dos puntos puede medirse independientemente de su situación relativa.

La mayor desventaja del Kriging es que se exige cálculos numéricos intensivos, por lo que su ejecución se hace notablemente lenta, al menos en términos comparativos. Sin embargo, entre sus ventajas cuando las condiciones previas se cumplen, lo convierten en el método más aconsejable para la interpolación en los MDT.

### **2.2.2 Algoritmos Informáticos**

#### **2.2.2.1 Algoritmo del método de interpolación Bi-lineal**

La estimación de la altitud de un punto de coordenadas arbitrarias es la primera cuestión planteable en la explotación de la información contenida en un MDE, siendo las soluciones muy diferentes en función de la estructura del modelo. Los algoritmos interpoladores son de uso general para muchas de las aplicaciones de los MDE, tales como el levantamiento de perfiles topográficos o el análisis de la intervisibilidad, por lo que deben incluirse como una rutina disponible para programas posteriores. Los métodos de interpolación estudiados en la investigación son un complemento importante para la representación del perfil de altura.

#### **2.2.3 Herramientas SIG**

El análisis de intervisibilidad permite determinar, a partir del MDE y de un segundo mapa que muestre puntos o líneas de observación, todos aquellos sitios visibles desde dichos puntos y líneas. Los diferentes programas de software ofrecen opciones para definir los parámetros que se muestran en la siguiente para generar un producto y obtener el resultado deseado por el usuario. El usuario puede utilizar la función de sobre posición de mapas para crear superficies que reflejen las obstrucciones reales del terreno. [22]

##### **2.2.3.1 ArcGIS Desktop**

El análisis de visibilidad, es la base para la determinación de la calidad y fragilidad visual del paisaje. La construcción de un modelo de visibilidad permite valorar de forma objetiva la visibilidad del territorio desde todos los puntos que puedan interesar.

**ArcGIS Desktop** es una herramienta útil para este fin. Desarrollada por la empresa estadounidense ESRI<sup>27</sup>, permite realizar análisis de visibilidad a través de la extensión Spatial Analyst y la orden Viewshed. Para ello, se necesita el MDT y los puntos del territorio para los que se quiere calcular la cuenca visual. [26]

ArcGIS Desktop proporciona herramientas e interfaces mejoradas, capacidad y soporte de diseño cartográfico avanzado, herramientas avanzadas de modelado para análisis y soporte mejorado de CAD<sup>28</sup>. En esta versión las extensiones de ArcGIS Desktop también se han modernizado con nuevas herramientas y mejoras. Las bases de datos geográficas admiten tipos de datos, funcionalidad y flujos de trabajo adicionales. [27].

**ArcView** permite la representación de datos georreferenciados, así como, analizar las características y patrones de distribución de esos datos y generar informes con los resultados de dichos análisis.

Es un programa diseñado de forma modular que permite añadir, según las necesidades de análisis, extensiones que van aumentando las capacidades de nuestro SIG, ofreciendo optimización de los recursos. Posee su propio lenguaje de programación orientado a objetos y eventos, que permite personalizar la herramienta a todos los niveles, desde el básico a la programación más avanzada. [23]

ArcView posee dos extensiones que permiten crear MDE; la primera se denomina 3D Analista y la segunda Spatial Analyst. Mediante la utilización de estas herramientas es posible la obtención de: [22]

1. Pendiente y aspecto del terreno.
2. Iluminación de terreno.
3. Análisis de Intervisibilidad.
4. Línea de Visibilidad.

---

<sup>27</sup> Acrónimo en inglés de *Environmental Systems Research Institute*: Empresa fundada en 1969 que desarrolla y comercializa software para los SIG. Su producto más conocido es ArcGIS.

<sup>28</sup> Acrónimo en inglés de *Computer Aided Design*. En español es Diseño Asistido por Computador. Sistema informático destinado a asistir al diseñador en su tarea específica permitiendo ordenar y procesar la información relativa a las características de un objeto material.

5. Perfiles.
6. Visualización en 2.5 dimensiones o en perspectiva.
7. Calculo de área y volumen.

### 2.2.3.2 IDRISI

**IDRISI** es un SIG y un procesador de imágenes diseñado para proporcionar herramientas de un nivel profesional para la investigación geográfica a un bajo costo. Es el líder en la industria del análisis funcional ráster, cubriendo el espectro completo de SIG y teledetección, incluyendo facilidades especiales para el control ambiental y la gestión de recursos ambientales. [32]

La mayor parte de los estudios encaminados al análisis visual del paisaje conceden gran importancia a la determinación de las áreas de visibilidad desde los distintos puntos de observación. Para obtener mapas finales de visibilidad se realizan análisis de las cuencas visuales utilizando el comando VIEWSHED implementado en el software IDRISI, que permite obtener el territorio que es visto desde unos determinados puntos de observación situados en una superficie topográfica. [33]

### 2.2.3.3 GvSIG

**GvSIG** es una herramienta orientada al manejo de información geográfica. Es un proyecto de desarrollo de SIG, multiplataforma y desarrollado en software libre. Se caracteriza por tener una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más usuales de forma ágil, tanto ráster como vectorial. En bases de datos cartográficas o en servidores remotos que cumplen los estándares del OGC<sup>29</sup>. Incluye principalmente las aplicaciones GvSIG Desktop y GvSIG Mobile.

Es una herramienta de escritorio SIG/IDE que junto con la integración de otros productos open-source<sup>30</sup> como son las bases de datos espaciales, servicios web

---

<sup>29</sup> Acrónimo en inglés de Open Geospatial Consortium: Es la definición de estándares abiertos e interoperables dentro de los SIG y de la WWW. Estándares: WMS, WFS, WCS, GML, KML, catálogo, nomenclátor.

<sup>30</sup> Código Abierto: Es el término con el que se conoce al software distribuido y desarrollado libremente.

remotos y servicios de catálogo. Permite mejorar de forma progresiva sus capacidades como open-source SIG, capacidad de edición de datos y metadatos así como la publicación en servidores OGC es de gran valor para las IDEs<sup>31</sup>.

Debido a la existencia de un amplio grupo de técnicos que trabajan en campo y que desean poder trabajar con datos geográficos, tanto de origen local como de origen remoto, se decidió portar GvSIG a una amplia gama de dispositivos móviles, especialmente PDAs<sup>32</sup>, por lo que nació el proyecto GvSIG Mobile, con la intención de ser un completo SIG y cliente de IDEs con capacidades de visualización, edición y toma de datos.

Este SIG va más allá de los proyectos desarrollados hasta la actualidad, convirtiéndose en una potente herramienta de gestión de información geográfica, desarrollado bajo los estándares internacionales y que garantiza su interoperabilidad.  
[31]

GvSIG permite entre otros que se realicen:

- Cuencas.
- Asimetría.
- Localización óptima.
- Visibilidad.
- Perfil longitudinal.
- Correlación entre campos.
- Línea de visión.
- Relieve sombreado.
- Perfil según línea de flujo.
- Secciones transversales.
- Volúmenes entre dos capas.
- Ajustar a extensión con datos válidos.

---

<sup>31</sup> Acrónimo en inglés de Integrated Development Environment: Entorno de Desarrollo Integrado, programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación, que puede dedicarse a un solo lenguaje de programación o utilizarse en varios.

<sup>32</sup> Acrónimo en inglés de Personal Digital Assistant: Computador de mano originalmente diseñado como agenda electrónica.

- Cálculo de volúmenes.

### 2.2.3.4 SEXTANTE

**SEXTANTE**<sup>33</sup> es una biblioteca de algoritmos de análisis espacial de código libre disponible para varios software de SIG. Su objetivo principal es crear una plataforma que facilite tanto el uso, como la implementación de estos algoritmos. Es un entorno para desarrollar geoprocesos. Actualmente SEXTANTE contiene más de 240 herramientas de análisis geográfico, centrándose principalmente en el modelado y análisis de la información mediante imágenes tanto ráster como vectorial.

Tras el desarrollo de una gran colección de algoritmos de análisis geoespacial desarrollados para GvSIG, los desarrolladores entendieron que muchos otros proyectos requerían de análisis geoespacial, pero no existía una biblioteca que pudiera proporcionarles los algoritmos correspondientes.

Para resolver este problema decidieron independizar SEXTANTE de cualquier software SIG, creando una biblioteca de tal manera que otros programas diferentes de procesamiento de información geográfica pudieran hacer uso de sus algoritmos de forma igual de sencilla que se venía haciendo hasta ahora.

SEXTANTE está programado en Java y desarrollado por la UNEX<sup>34</sup> y cumplen con los cuatro principios necesarios para clasificarlo como software libre. El SEXTANTE aporta herramientas de análisis ráster y vectorial a GvSIG a través de un conjunto de más de 200 extensiones.

Algunas de las utilidades que brinda son:

- Análisis hidrológico básico.
- Iluminación y visibilidad.
- Perfiles.

---

<sup>33</sup> Sistema Extremeño de Análisis Territorial.

<sup>34</sup> Universidad de Extremadura.

- Costes, distancias y rutas.
- Geomorfometría y análisis del relieve.
- Herramientas básicas para capas ráster.
- Localización óptima de elementos.
- Lógica difusa.
- Métodos estadísticos.
- Rasterización e interpolación.
- Tratamiento y análisis de imágenes.
- Vectorización.
- Índices y otros parámetros hidrológicos.

### 2.2.3.5 GRASS

**GRASS**<sup>35</sup> es un SIG desarrollado en software libre. Puede soportar información tanto raster como vectorial y posee herramientas de procesado digital de imágenes. El número de herramientas y utilidades que presenta es muy elevado, permitiendo el análisis de imágenes de satélite, el enlace a bases de datos y paquetes estadísticos SIG, así como para la producción de gráficos. Es un programa completamente modular, pues se basa en más de 350 módulos y herramientas que ejecutan tareas concretas y simples.

Originalmente estaba muy orientado al aspecto matricial de la información, aunque contaba con un potente editor de topología vectorial, sin embargo en las últimas versiones el aspecto vectorial y sobre todo la conexión a bases de datos externas ha ido aumentando. En cuanto a la interfaz de usuario también ha experimentado una gran evolución pues en la actualidad se han producido mejoras considerables en la misma. [34]

GRASS es el programa ideal para usar en aplicaciones ingenieriles y de planificación territorial. Al igual que otros paquetes de SIG, puede visualizar y manipular datos espaciales funcionando como un entorno de modelización espacial. La potencia de GRASS reside en:

---

<sup>35</sup> Acrónimo en inglés de *Geographic Resources Analysis Support System*.

- Contener más de 100 comandos para la gestión y el análisis de datos ráster.
- Contiene un amplio conjunto de herramientas para el análisis y modelización hidrológica.
- Permitir la realización del análisis de cuencas visuales, obtención de número de curva, análisis de avenidas, características de los cauces y redes de drenaje.
- Permitir la incorporación de la tercera dimensión además de la perspectiva convencional en 2 dimensiones. Los mapas ráster, vectoriales y puntuales pueden utilizarse para la visualización.

La ventaja del trabajo y uso de este SIG es que los diferentes módulos con que cuenta pueden integrarse permitiendo a los usuarios y programadores crear nuevas aplicaciones y enlazar GRASS con otros paquetes de software. Uno de los inconvenientes principales de GRASS es que está diseñado para entornos UNIX. Esto le ha dado gran difusión en centros universitarios y de investigación, pero ha frenado su expansión hacia el público general. Actualmente existen versiones de GRASS que se pueden instalar en entornos Windows a través de emulación de Cygwin [34].

### 2.2.3.6 SAGA

**SAGA**<sup>36</sup> es un SIG desarrollado en software libre. Tiene como objetivo brindar una plataforma eficaz y fácil para la puesta en práctica de métodos geocientíficos accesibles de una manera fácil mediante su interfaz de programación. Esto se consigue principalmente mediante su interfaz gráfica de usuario. Juntos, API<sup>37</sup> Y GUI<sup>38</sup> son el verdadero potencial de SAGA: un sistema cada vez mayor y rápido de métodos geocientíficos. Se podría decir que SAGA es la alternativa a programas como IDRISI o el módulo Spatial Analyst de ESRI.

---

<sup>36</sup> Acrónimo en inglés de System for Automated Geoscientific Analyses. En español: Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos.

<sup>37</sup> Acrónimo en inglés de Application Programming Interface. En español: Interfaz de Programación de Aplicaciones.

<sup>38</sup> Acrónimo en inglés de Graphical User Interface. En español: Interfaz Gráfica de Usuario.

Se basa en una filosofía modular para la ampliación de funcionalidades y formatos soportados. Actualmente existen unos 120 módulos disponibles clasificados en distintas categorías: formatos de datos, análisis matricial, hidrología, clasificación de imágenes y representación de cuencas visuales.

Entre sus diferentes módulos se pueden obtener:

- Desarrollar módulos propios o modificar su API en función de las necesidades.
- Herramientas para crear nuevas capas ráster.
- Herramientas para tablas.
- Simulación de procesos dinámicos.
- Localización óptima de elementos.
- Métodos estadísticos.
- Rasterización e interpolación.
- Tratamiento y análisis de imágenes.
- Vectorización.
- Índices y otros parámetros hidrológicos.

### **2.3 Conclusiones Parciales**

En este capítulo se presentan los modelos matemáticos que permiten describir las estructuras de visibilidad. También se investigan algunos métodos de interpolación como complementos del análisis de perfiles de altura. Por último se describen diferentes herramientas propietarias y libres que contienen funcionalidades afines a la investigación así como su posible utilidad en la plataforma. Con el conocimiento de todo lo estudiado se dará paso a la próxima fase de este trabajo tomando como guía lo investigado para definir la solución propuesta a presentar en el próximo capítulo.

## **3. Descripción de la Solución Propuesta**

### **3.1 Introducción**

En el presente capítulo se expondrá la propuesta de solución al problema planteado. Se proponen algoritmos de interpolación espacial como complementos para cálculo de perfiles de altura, así como para el cálculo de visibilidad empleando los modelos matemáticos estudiados, en este capítulo se exponen y comparan los algoritmos a utilizar. De esta manera, se plasman los beneficios y mejoras que se obtienen de dichos algoritmos.

### **3.2 Justificación de la Solución Propuesta**

Para dar solución al problema planteado en la investigación, es preciso complementar las soluciones de los perfiles de altura mediante métodos de interpolación que aumenten la precisión de estos, así como la precisión en la generación de cuencas visuales y los algoritmos de intervisibilidad entre puntos. Teniendo en cuenta algunos de los métodos existentes ya estudiados en el capítulo anterior se proponen los algoritmos IDW y el Kriging.

El algoritmo de orden local propuesto tiene a favor la sencillez y rapidez de cálculo pero, el resultado se encuentra siempre incluido dentro del rango de variación de los datos más cercanos. Por este motivo, el correcto tratamiento de las formas cóncavas y convexas depende estrechamente de la distribución de los puntos originales.

Una opción alternativa, que puede reflejar más adecuadamente formas no recogidas explícitamente por los datos de entrada, es la estimación de superficies de tendencia, pero su cálculo a partir del conjunto de datos, donde la cantidad debe ser suficiente para obtener un análisis estadísticamente significativo es costoso computacionalmente. El problema radica en que el número de datos determina los grados de libertad del análisis por lo que, si se acerca al número de coeficientes de la ecuación para ganar en costo computacional, esta pierde significado estadístico.

Así, el Kriging es un método de estimación óptimo desde el punto de vista estadístico basado en el análisis de la correlación espacial entre los datos, asumiendo que su valor es dependiente de la distancia entre los mismos. En efecto, en el caso de los MDE, es razonable suponer que el valor de altitud en un punto está relacionado de alguna manera con el valor de los puntos vecinos.

De modo que la propuesta esta sujeta a algunas condiciones importantes, una de ellas es que el variograma sea de validez general para el modelo. Asimismo, en el estudio realizado en el capítulo anterior, no se hace ninguna referencia sobre la orientación de los datos. En la teoría elemental del Kriging se asume que la estructura de los datos es isotrópica, de forma que la distancia entre dos puntos puede medirse independientemente de su situación relativa.

La mayor desventaja del Kriging es que exige cálculos numéricos intensivos, por lo que su ejecución es costosa en tiempo y recursos computacionales. Sin embargo, sus ventajas, cuando las condiciones previas se cumplen, lo convierten en el método más aconsejable para la interpolación en los MDT.

En la construcción de cuencas visuales a partir de un punto, por los numerosos análisis de intervisibilidad entre dos puntos implica una labor de cálculo intensivo. El método más simple para la construcción de la cuenca visual de un punto es la realización del análisis para cada punto del modelo(algoritmo de fuerza bruta), donde se consigue la máxima precisión, pero el tiempo de ejecución puede ser muy elevado y gran parte del análisis es redundante.

La conveniencia de reducir la complejidad de las operaciones recomienda acotar el problema mediante limitaciones bien en el área o en la precisión de la búsqueda. El área puede reducirse mediante la definición de un radio de búsqueda de dimensiones limitadas. La rutina que se presenta a en este trabajo realiza los cálculos de la cuenca visual de un punto del MDE analizando punto a punto la totalidad del modelo. Se trata del método más costoso en tiempo de ejecución pero garantiza una refinada solución como resultado, retornando una matriz donde los puntos de la cuenca visual tienen un valor uno mientras que a los que no pertenecen a ella se les asigna el valor cero.

### 3.3 Solución para el Perfil de Visibilidad

#### 3.3.1 Algoritmo del cálculo de visibilidad entre dos puntos

El cálculo de la visibilidad entre dos puntos es una aplicación que utiliza el método de levantamiento de perfiles como base para una etapa posterior de análisis. Esencialmente, la solución al problema de si dos puntos están conectados por una línea visual consiste en la construcción del perfil topográfico que los une y el análisis posterior de los puntos intermedios para comprobar si su altitud intercepta la línea visual. El proceso sigue los pasos siguientes: [6]

1. Se fijan los puntos a analizar  $P(i)$ ,  $P(j)$ .
2. Se realiza el perfil topográfico entre ambos, que consta de  $n$  puntos.
3. Se toma un punto  $P(k)$  del perfil (comenzando por el más próximo a  $P(i)$ ) y se comprueba si intercepta la línea visual entre  $P(i)$  y  $P(j)$ . Pueden ocurrir tres casos:
  - 3.1  $P(k)$  intercepta la línea visual: no existe intervisibilidad; fin del análisis.
  - 3.2  $P(k)$  no intercepta la línea visual y  $k=n-1$  (es el inmediato anterior a  $P(j)$ ): existe intervisibilidad entre  $P(i)$  y  $P(j)$ ; fin del análisis.
  - 3.3  $P(k)$  no intercepta la línea visual y  $k < n-1$  (no es el inmediato anterior a  $P(j)$ ): se toma el punto siguiente,  $P(k+1)$  y se repite el análisis desde el punto 1.

El cálculo de intervisibilidad entre dos puntos puede realizarse mediante la rutina, que se muestra a continuación. Si se comprueba que los dos puntos están visualmente conectados, la variable lógica OCULTA toma el valor falso. Obsérvese que los puntos problema se introducen como un SEGMENTO2D, inicialmente sólo se conocen las coordenadas en el plano  $XY$ . Los valores de altitud se calculan en la rutina PERFIL, donde se construye el perfil topográfico entre ambos puntos. [6]

La rutina siguiente muestra las fases del cálculo de la intervisibilidad entre dos puntos en pseudocódigo:

```

INTERVIS (S : Segmento2D; OCULTA : lógica)
Calcula si dos puntos están conectados visualmente.

```

---

```

ARGUMENTOS
  S : segmento con los puntos inicial y final de la línea vi-
    sual.

```

---

```

  OCULTA : señal que toma el valor cierto si no existe inter-
    visibilidad y falso en caso contrario

```

---

```

LOCALES
  DIST1, DIST2 : distancias entre puntos (real)

```

---

```

  TG1, TG2 : tangentes de los ángulos (real)

```

---

```

  V : perfil entre los puntos problema (Vector3D)

```

---

```

  NP : número de puntos del perfil (entero)

```

---

```

  I : auxiliar (entero)

```

---

```

GLOBALES
  Z : matriz con el MDE (MatrizMD)

```

---

```

BEGIN
DIST1 ← SQRT ((S[1].X-S[2].X)^2+(S[1].Y-S[2].Y)^2)

```

---

```

NP ← ROUND(DIST1)

```

---

```

IF DIST1>1 THEN
  BEGIN

```

---

```

    PERFIL (S,V,NP)

```

---

```

    TG1 ← (V[NP].Z-V[1].Z)/DIST1

```

---

```

    I ← 1

```

---

```

    OCULTA ← FALSE

```

---

```

    REPEAT

```

---

```

      I ← I+1

```

---

```

      IF (I=1 OR I=NP) THEN OCULTA ← FALSE ELSE

```

---

```

        BEGIN

```

---

```

          DIST2 ← SQRT ((V[1].X-V[I].X)^2+(V[1].Y-V[I].Y)^2)

```

---

```

          TG2 ← (V[I].Z-V[1].Z)/DIST2

```

---

```

          OCULTA ← TG1<TG2

```

---

```

        END

```

---

```

      UNTIL OCULTA OR I=NP

```

---

```

    END
  ELSE THEN OCULTA ← FALSE
END

```

### 3.3.2 Algoritmo de construcción de Cuencas Visuales

La generalización del análisis de intervisibilidad entre dos puntos expuesto en el apartado anterior permite la construcción de cuencas visuales. En el contexto de los

MDT, la cuenca visual de un punto base o foco se define como el conjunto de puntos de un modelo con los cuales este punto base está conectado visualmente. [6]

La construcción de cuencas visuales tiene gran interés en los estudios de impacto visual, ya que constituye un paso imprescindible para evaluar la influencia de una acción sobre su entorno desde el punto de vista paisajístico. Otra posible aplicación es la determinación de puntos idóneos para la instalación de estaciones emisoras, especialmente en zonas donde el relieve puede ser un factor limitante de importancia.

La construcción de la cuenca visual de un punto es una labor de cálculo intensivo ya que implica la realización de numerosos análisis de intervisibilidad entre dos puntos. El método más simple para la construcción de la cuenca visual de un punto es la realización del análisis para cada punto del modelo. [6]

Se toma como punto inicial,  $P(i)$ , el foco o punto problema y se barre el modelo tomando tantos  $P(j)$  como puntos tenga. En este caso se consigue la máxima precisión ya que existe un análisis específico para cada punto, pero el tiempo de ejecución puede ser muy elevado (en función del número de puntos del modelo y de la visibilidad del foco), y gran parte de los análisis son redundantes.

1. La conveniencia de reducir la complejidad de las operaciones recomienda acotar el problema mediante limitaciones bien en el área, bien en la precisión de la búsqueda.
2. El área puede reducirse mediante la definición de un radio de búsqueda de dimensiones limitadas.
3. Otra aproximación diferente es aquella en la que los perfiles se trazan radialmente a intervalos angulares predefinidos.

La rutina presentada realiza los cálculos de la cuenca visual de un punto del MDE analizando punto a punto la totalidad del modelo. Se trata del método más costoso en tiempo de ejecución pero garantiza una máscara sólida como resultado. Este queda almacenado en una matriz de la misma dimensión donde los puntos de la cuenca visual tienen un valor 1 mientras que a los que no pertenecen a ella se les asigna el valor 0.

El análisis de cuencas visuales puede utilizarse para la evaluación del impacto visual de actuaciones con efectos negativos sobre el paisaje. En este sentido, puede ser útil la creación de modelos de visibilidad, donde cada punto tiene asignado un valor proporcional a la extensión de su cuenca visual. Un modelo de este tipo puede servir de base objetiva para la toma de decisiones ya que permite conocer y comparar con fiabilidad la incidencia visual de las alternativas existentes. [6]

La rutina siguiente muestra las fases de la construcción de cuencas visuales en pseudocódigo:

```
ARGUMENTOS
  P : punto problema o foco
LOCALES
  S : puntos de la línea visual (Segmento2D)
  I, J: auxiliares (entero)
  OCULTA : auxiliar (lógica)
GLOBALES
  Z : matriz con el MDE (MatrizMD)
  ZC : matriz resultado (MatrizMD)
  NFIL, NCOL : filas y columnas del MDE (entero)

BEGIN
ZC ← 0
S[1].X ← P.C
S[1].Y ← P.F
FOR I=1 TO NFIL DO
  FOR J=1 TO NCOL DO
    BEGIN
      ZC[I,J] ← 1
      S[2].X ← J
      S[2].Y ← I
      INTERVIS (S, OCULTA)
      IF OCULTA THEN V[I,J] ← 0
    END
  END
END
```

### 3.4 Solución para el Perfil de Altura

#### 3.4.1 Algoritmo del Perfil de Altura

La estimación de la altitud de un punto de coordenadas arbitrarias es la primera cuestión planteable en la explotación de la información contenida en un MDE. Así la realización de perfiles topográficos es una aplicación del cálculo de valores puntuales de altitud. [6]

El problema se descompone habitualmente en los siguientes pasos: [6]

1. Se definen los puntos inicial y final del segmento rectilíneo sobre el que se levantará el perfil topográfico.
2. Se fija el número de puntos del perfil (su resolución en el plano  $XY$ ).
3. Se calculan las coordenadas  $(x,y)$  de cada punto del perfil.
4. Se estima por interpolación la altitud  $z$  de cada punto  $(x,y)$ .

La rutina en pseudocódigo presentada a continuación calcula exclusivamente perfiles definidos por un segmento rectilíneo. La generalización de este método permite el levantamiento de perfiles siguiendo líneas quebradas, como conjuntos de segmentos conectados y ejecutando la rutina iterativamente.

La rutina siguiente muestra las fases de levantamiento de perfiles de altura en pseudocódigo:

```

PERFIL (S : Segmento2D; V : Vector3D; NP : entero)
Realiza el levantamiento de un perfil sobre segmento S

```

---

```

ARGUMENTOS
  S : segmento con los puntos inicial y final del perfil
  V : vector resultado, con las coordenadas (x,y,z) de los
    puntos que definen el perfil
  NP : número de puntos del perfil

```

---

```

LOCALES
  I : índice (entero)
  DX, DY : auxiliares (real)
  INCRX, INCRY : incrementos de X e Y entre los puntos del
    perfil (real)
  P : variable intermedia (Punto3D)

```

---

```

GLOBALES
  Z : matriz con el MDE (MatrizMD)

```

---

```

BEGIN
DX ← S[1].X-S[2].X
DY ← S[1].Y-S[2].Y
INCRX ← DX/(NP-1)
INCRY ← DY/(NP-1)
FOR I=1 TO NP
  BEGIN
  P.X ← S[1].X-((I-1)*INCRX)
  P.Y ← S[1].Y-((I-1)*INCRY)
  Z_BILINEAL (P)
  V[I].X ← P.X
  V[I].Y ← P.Y
  V[I].Z ← P.Z
  END
END

```

### 3.5 Descripción y análisis de los datos

El Modelo Digital de Elevaciones es la fuente básica de información de la investigación. Por este motivo la utilidad y validez de los resultados derivados están estrechamente relacionadas con el modelo original. Los estadísticos básicos del modelo como: media, cuartiles, varianza y la distribución espacial de la altura están destinados a dar una información sintética del terreno y al mismo tiempo resumen sus características generales.

Para realizar el estudio de la variable altura se dispone de una matriz regular de dimensiones **99 x 99**. Dicha muestra tomada del modelo de elevaciones de la plataforma GENESIG con las coordenadas: (-80.99917, 22.9175) y (-80.9175, 22.99917).

Según los datos tomados del MDE, los estadísticos descriptivos de la variable se exponen en la **Tabla 1** siguiente:

**Tabla 1. Datos estadísticos descriptivos de la variable.**

<b>Min.</b>	<b>1stQu.</b>	<b>Median</b>	<b>Mean</b>	<b>3rd Qu.</b>	<b>Max.</b>	<b>SD</b>
0.00	0.00	8.00	57.38	117.00	195.00	65.29444

Según el histograma de la distribución de alturas se observa que los datos se encuentran mayormente distribuidos en valores pequeños, puesto que la matriz es dispersa.

### 3.6 Análisis y discusión de los resultados

Como se ha visto los métodos de interpolación constituyen la piedra angular de los algoritmos propuestos, de modo que la calidad y el costo computacional asociado a estos dependen en gran medida del método de interpolación que utilicen como rutina. Así, el rendimiento de los métodos de interpolación IDW y Kriging en cuanto a la exactitud de las estimaciones suele evaluarse mediante la comparación de las desviaciones respecto a los datos reales del modelo a través de métodos de validación cruzada. [37]

Este procedimiento produce una lista de pares donde se tiene el valor estimado y real de los puntos de muestreo respectivamente. Por lo tanto la comparación de la eficiencia de estas técnicas de interpolación se logran mediante el coeficiente de correlación entre los valores de altura del modelo y los estimados (**COP**), la correlación entre los valores estimados y el residuo (**CPR**), el error medio (**ME**), y la media del error cuadrático normalizado (**NRMSE**).

Tabla 2. Fórmula para la obtención de los valores de los puntos de muestreo.

ME	NRMSE
$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  \hat{Z}(x_i) - Z(x_i) $	$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{\max} - x_{\min}}$
RMSE	COP - CPR
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))^2}$	$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$
$\hat{Z}(x_i)$ = Valores estimados. $Z(x_i)$ = Valores reales. <b>n</b> = Total de valores estimados.	$\sigma_X, \sigma_Y$ = Varianza de la variables. $\sigma_{XY}$ = Covarianza de las variables.

Para el caso del método de interpolación Kriging Ordinario se escogen varios modelos teóricos como el Esférico, el Exponencial y el Circular para ajustar el variograma empírico. Se expone la tabla siguiente con los resultados asociados por cada modelo.

Tabla 3. Datos correspondientes al Modelo Esférico.

ME	NRMSE	COP	CPR
0.06165933	0.8905208	0.555558	0.1023241

Tabla 4. Datos correspondientes al Modelo Exponencial.

ME	NRMSE	COP	CPR
-0.04586255	0.7919592	0.6622205	0.1718777

**Tabla 5. Datos correspondientes al Modelo Circular.**

ME	NRMSE	COP	CPR
-0.03949475	0.917995	0.5263364	0.06851006

Como puede observarse los valores del error medio son pequeños para todos los modelos con menos del 10% de error, así el modelo circular ofrece el menor valor de error entre los valores reales y estimados.

El valor de la media del error cuadrático normalizado tiene un comportamiento similar en los diferentes modelos estudiados, el modelo circular presenta el mayor valor 0.92 aproximadamente, el valor más cercano a uno.

Además, tras el estudio del comportamiento de los valores observados y los estimados, estos deben presentar una fuerte relación de dependencia lineal, puesto que los valores idealmente deberían ser iguales y presentar asociación perfecta, lo cual indica un coeficiente de correlación con valor ideal uno.

Para los modelos presentados se observa un mayor valor de correlación en el modelo exponencial; sin embargo, el grado de asociación de sus valores reales y el residuo es el más elevado, idealmente debe ser próximo a cero, puesto que mientras los valores estimados se ajustan a los observados permanece invariable el valor del residuo.

Para el método de ponderación por el inverso de la distancia, variando el factor de ponderación se obtienen algunos resultados que validan el uso de este algoritmo de interpolación sobre el modelo de datos de la plataforma. Se miden los resultados para diferentes factores como cero, donde el valor estimado es el resultado del promedio de los valores observados de sus vecinos, así se incrementa el valor de ponderación y mediante una gráfica se percibe el comportamiento del ajuste de los valores estimados.

**Tabla 6. Tabla de medidas aplicadas al IDW para diferentes factores de ponderación.**

<b>Factor de Ponderación(k)</b>			
0	<b>ME</b>	<b>COP</b>	<b>CPR</b>
	0.05538408	0.5832858	0.2717697
0.4	<b>ME</b>	<b>COP</b>	<b>CPR</b>
	0.0476512	0.5849642	0.2729056
1	<b>ME</b>	<b>COP</b>	<b>CPR</b>
	0.1301291	0.5815019	0.2694208
2	<b>ME</b>	<b>COP</b>	<b>CPR</b>
	0.06473654	0.5818775	0.2697747
3	<b>ME</b>	<b>COP</b>	<b>CPR</b>
	-0.00659034	0.5861748	0.2745757

Según puede observarse el comportamiento de los coeficientes de correlación es similar para todos los factores de ponderación, así mismo para los valores del error medio pero se observa que hay una tendencia a disminuir los valores a medida que aumenta el valor de ponderación.

De modo general los resultados para ambos métodos de interpolación en términos de eficiencia en las estimaciones obtenidos mediante procedimientos de validación cruzada, son generalmente mejores para el método Kriging. De modo similar se observa que los valores estimados y los observados presentan mayor correlación cuando se utiliza el método Kriging.

Los resultados sugieren que la precisión de las estimaciones mediante el uso del Kriging tiene una ventaja adicional intrínseca sobre el método IDW y es que su estimación no es sesgada y con mínima varianza, de modo que se obtiene una medida del error en cada valor predicho: la varianza de estimación. [37]

Los resultados también revelaron que aunque el método IDW tiene la ventaja de la relativa simplicidad y menor complejidad temporal, este método es menos preciso en comparación con los procedimientos del Kriging. Otros estudios han reportado resultados similares, revelando que la estimación se mejora cuando se aplica Kriging.

También es importante señalar que además del buen desempeño de los procedimientos del Kriging, el análisis del variograma necesario para la interpolación proporciona valores interpretativos más allá de su papel en la estimación. Así, los modelos teóricos del variograma son capaces de explicar el carácter, la intensidad y el alcance de los patrones de distribución espacial de los valores de altura.

### **3.7 Conclusiones Parciales**

En el presente capítulo se proponen los algoritmos informáticos que permiten la representación de los perfiles de visibilidad y altura de la plataforma mediante tres algoritmos. También se proponen dos métodos de interpolación como complementos del análisis de perfiles de altura. Finaliza así este capítulo, quedando de esta forma conformada la solución propuesta de la investigación.

### Conclusiones

Con la realización de este trabajo se logró definir una propuesta conformada por tres algoritmos diseñados para la representación de Perfiles de Visibilidad y Altura de la Plataforma GeneSIG. El modelo propuesto surge luego de un estudio y análisis profundo a modelos matemáticos, algoritmos informáticos y herramientas SIG que de diferentes maneras relacionan o representan Perfiles de Visibilidad y Altura.

El algoritmo utilizado para la representación del Perfil de Visibilidad es el algoritmo de construcción de cuencas visuales y el de cálculo de visibilidad entre dos puntos. El usado para la representación del Perfil de Altura es el algoritmo de perfil de altura que se desarrolla utilizando los métodos de interpolación IDW y Kriging.

La solución propuesta constituye un aporte importante, debido a que es parte del procedimiento que marca un paso de avance en el desarrollo del Módulo Análisis del Terreno de la plataforma GeneSIG. De aquí la conclusión de que la investigación ha dado cumplimiento a los objetivos propuestos satisfactoriamente y se hacen además las recomendaciones para un trabajo futuro que mejore la calidad de la plataforma llevándose a cabo la implementación de los algoritmos propuestos.

### **Recomendaciones**

Integrar los algoritmos propuestos en el módulo Análisis de Terreno de la plataforma GeneSIG.

Realizar investigaciones futuras en busca de nuevos algoritmos y medidas de evaluación que contribuyan al mejoramiento de los resultados obtenidos con los algoritmos propuestos.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Batista Silva, José Luis. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN CUBA [Consultado en: noviembre 2009] Disponible en: [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1051](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1051)
- [2] Gómez, Heriberto; Linares, Rosalba. SIG: UN ARMA PARA LA FRONTERA [Consultado en: enero 2010] Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx>
- [3] Carmona, Álvaro; Monsalve, Jhon Jairo. Sistemas de Información Geográfica [Consultado en: enero 2010] Disponible en: [http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar\\_plan.php?id\\_catedra=234](http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar_plan.php?id_catedra=234)
- [4] Gutiérrez Puebla, Javier; Gould, Michael. Los Sistemas de Información Geográfica [Consultado en: enero 2010] Disponible en: [http://egal2009.easyplanners.info/.../3289\\_Zappettini\\_Maria\\_Cecilia.doc](http://egal2009.easyplanners.info/.../3289_Zappettini_Maria_Cecilia.doc)
- [5] Bosque Sendra, Joaquín. Modelo Digital del Terreno [Consultado en: enero 2010] Disponible en: [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1318](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318)
- [6] Felicísimo, Ángel M. Modelo Digital del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales [Consultado en: enero, marzo 2010] Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>
- [7] Felicísimo, Ángel M. Modelo Digital de Elevaciones [Consultado en: enero 2010] Disponible en: [http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema\\_2.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf)
- [8] Felicísimo, Ángel M. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico. [Consultado en: enero 2010] Disponible en: [http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE\\_150a.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE_150a.pdf)
- [9] Menéndez Díaz, Agustín. Caracterización de un sistema gráfico orientado a la ingeniería del terreno. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/sciguo.1/public/tesis/subsid.pdf>

- [10] Mulla, David J. Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, USA. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/24947405/Modelos-Digitales-de-Terrenos>
- [11] Royle A.G.; Clausen, F.L.; Frederiksen, P. Practical universal kriging and automatic contouring. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y4816e/y4816e0p.htm>
- [12] Oliver, M.A.; Webster, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a777927264>
- [13] Fisher, PF. Reconsideration of the viewshed functions in terrain modeling. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=594763>
- [14] BURROUGH, P., R. MCDONNEL. Principles of geographical information systems. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://www.ecosur.mx/Pos/Ofert\\_Cursos/2009/.../CH-1001\\_1352009.pdf](http://www.ecosur.mx/Pos/Ofert_Cursos/2009/.../CH-1001_1352009.pdf)
- [15] Reyes Peralta, Francisco J. Análisis con Datos Ráster en ArcGIS Desktop 9.2 [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://foro.grabieltortiz/An%C3%A1lisis\\_Espacial\\_con\\_Datos\\_Ráster\\_en\\_Spatial\\_Analyt.pdf](http://foro.grabieltortiz/An%C3%A1lisis_Espacial_con_Datos_Ráster_en_Spatial_Analyt.pdf)
- [16] Felicísimo, Ángel M. Simulación de procesos: cuencas hidrológicas y cuencas visuales [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>
- [17] Bosque Sendra, Joaquín. Modelo Digital del Terreno. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1318](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318)
- [18] De Floriani, Leila; Magillo, Paola. Algorithms for visibility computation on terrains: a survey. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://ftp.disi.unige.it/pub/person/MagilloP/TEMP/gisbook99.pdf>

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [19] Sircar, J.K; Cebrian, J.A. Creación de Modelos Topográficos Digitales a partir de curvas de nivel rásterizadas. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp>
- [20] Bosque Sendra, Joaquín. Sistemas de Información Geográfica [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.uca.es/dept/filosofia/TEMA%201.pdf>
- [21] Bosque Sendra, Joaquín; García, Rosa C. Métodos de interpolación para la elaboración de un modelo digital de elevaciones. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.geogra.uah.es/joaquin/pdf/MDT-interpolacion.pdf>
- [22] Fallas, Jorge. Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://www.mapealo.com/Costaricageodigital/Documentos/alfabetizacion/MDE\\_TEORIA\\_2007.pdf](http://www.mapealo.com/Costaricageodigital/Documentos/alfabetizacion/MDE_TEORIA_2007.pdf)
- [23] Marín, Santiago de Chile. Sistema de Información Geográfica. Sensores Remotos. Geofísica. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://www.cenpat.edu.ar/.../CV\\_Gagliardini\\_Castellano.htm](http://www.cenpat.edu.ar/.../CV_Gagliardini_Castellano.htm)
- [24] Lienlaf Lienlaf, Marcos. CAPITULO I: NOCIONES BÁSICAS DE CARTOGRAFÍA. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://foro.gabrielortiz.com/.../mlienlaf/Tutoria%20ARCVIEW%203.2.pdf>
- [25] Giles, Derek. MapInfo SOFTWARE Y DATOS PARA TRANSFORMAR LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA EN UNA VENTAJA EMPRESARIAL. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://resource.mapinfo.com/.../Informaci\\_General\\_sobre\\_MapInfo.pdf](http://resource.mapinfo.com/.../Informaci_General_sobre_MapInfo.pdf)
- [26] Otero I.; Varela E.; Mancebo S; Ezquerro A. El análisis de visibilidad en la evaluación de impacto ambiental de nuevas construcciones. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/.../informesdelaconstruccion/.../786>
- [27] Copyright © 2006 ESRI. ARCVIEW 9.2. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://www.esri-chile.com/biblioteca/ArcGIS\\_9-2-bro\\_104484\\_sp.pdf](http://www.esri-chile.com/biblioteca/ArcGIS_9-2-bro_104484_sp.pdf)

- [28] Felicísimo, Ángel M. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico. [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: [http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE\\_150a.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE_150a.pdf)
- [29] ESRI New York Street Redlands USA. ¿Qué es ARCVIEW? [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.geotecnologias.com/Documentos/what-is-arcgis-spanish.pdf>
- [30] Díaz Villanueva, Wladimiro. Interpolación de Splines [Consultado en: marzo 2010] Disponible en: <http://www.uv.es/~diaz/mn/node39.html>
- [31] Aguayo Canela, F.J. Módulo Didáctico I: Construyendo nuestro 'SIG de escritorio'. [Consultado en: abril 2010] Disponible en: <http://dev.cartografiaweb.net/cursos/gvsig/introduccion/tags/modulo-3-intro-gvsig-01r10-00o.pdf>
- [32] Pueyo Echevarría, Javier; García López, M<sup>a</sup> José; Larraz Duerto, Carlos. INTEGRACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DEL TERRENO EN UN S.I.G. PARA EL ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN Y DISMINUCIÓN DEL RUIDO GENERADO POR TRANSPORTES. [Consultado en: abril 2010] Disponible en: <http://departamentos.unican.es/digteg/ingegraf/cd/ponencias/168.pdf>
- [33] Montoya Ayala, R; Vía García, M; Serrano Garro, G; García Palomares, JC. SIG, PAISAJE Y VISIBILIDAD EN LA COMARCA NORDESTE DE SEGOVIA. [Consultado en: abril 2010] Disponible en: [http://www.ieg.csic.es/age/metodos/docs/doc2\\_18.pdf](http://www.ieg.csic.es/age/metodos/docs/doc2_18.pdf)
- [34] Jiménez Verni, JA; Aguilera Urena, Ma J; Merono de Larriva, JE; ALTERNATIVAS DE SOFTWARE LIBRE A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMERCIALES. [Consultado en: abril 2010] Disponible en: <http://www.cartesia.org/geodoc/ingegraf2005/gis10.pdf>
- [35] Aguiló, M. Guía para la elaboración de estudios del medio físico, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. [Consultado en: abril 2010] Disponible en: <http://www.ucm.es/info/ecologia/biblplan.htm>

[36] Vila, Jose; Varga, Diego. Capítulo 15. Los Sistemas de Información Geográfica. [Consultado en: abril 2010] Disponible en: <http://www.uclm.es/cief/Noticias/A02782-02839.pdf>

[37] BELLO PINEDA, JAVIER; HERNÁNDEZ STEFANONI, JOSE LUIS. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. [Consultado en: mayo 2010] Disponible en: [http://www.panamjas.org/Arquivos/PanamJAS\\_2\(3\)\\_247-254.pdf](http://www.panamjas.org/Arquivos/PanamJAS_2(3)_247-254.pdf)

[37] Oliver, M; Webster, R. How geostatistics can help you. Soil Use and Management. [Consultado en: mayo 2010] Disponible en: <http://www.geog.cam.ac.uk/people/haining/literaturereview.pdf>

[38] Oliver, M; Webster, R. How geostatistics can help you. Soil Use and Management. [Consultado en: mayo 2010] Disponible en: <http://www.geog.cam.ac.uk/people/haining/literaturereview.pdf>

## Bibliografías

- [http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id\\_noticia=234&lang\\_id=2](http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id_noticia=234&lang_id=2)
- <http://ocw.upm.es/proyectos-de-ingenieria/sistemas-de-informacion-geografica-tecnicas-cuantitativas-para-gestion-de-datos>
- [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1051](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1051)
- [http://www.google.com/cu/search?hl=es&q=sistemas+de+informaci%C3%B3n+geogr%C3%A1fica+gis&revid=116044845&ei=Kfb4SoysBISCnQfttoCFDQ&sa=X&oi=revisions\\_inline&resnum=0&ct=broad-revision&cd=1&ved=0CCYQ1QloAA](http://www.google.com/cu/search?hl=es&q=sistemas+de+informaci%C3%B3n+geogr%C3%A1fica+gis&revid=116044845&ei=Kfb4SoysBISCnQfttoCFDQ&sa=X&oi=revisions_inline&resnum=0&ct=broad-revision&cd=1&ved=0CCYQ1QloAA)
- <http://www.humboldt.org.co/humboldt/mostrarpagina.php?codpage=70001>
- [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1051](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1051)
- [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1512](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1512) .
- Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1318](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318)
- [http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema\\_2.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf)
- <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>
- [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1318](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318)
- <http://bart.ideam.gov.co/infgen/visibilidad.htm>
- <http://geografia.laguia2000.com/cartografia/la-altitud-en-los-mapas>
- <http://www.softwaregis.cl/arcgis.html>
- <http://www.esri.es/index.asp?pagina=18>
- <http://www.aplicacionesempresariales.com/mapinfo-professional-95.html>
- <http://sig-seu.blogspot.com/2010/02/grass-gis.html>

### Glosario de términos

**Geomorfología:** Es la rama de la geografía que estudia el relieve de la Tierra, el cual es el resultado de un balance dinámico entre procesos constructivos y destructivos, dinámica que se conoce de manera genérica como ciclo geográfico.

**Cartografiar:** Levantar y trazar la carta geográfica de una porción de superficie terrestre. Es la ciencia que se encarga del estudio y de la elaboración de los mapas geográficos, territoriales y de diferentes dimensiones lineales y demás.

**Edafología:** Ciencia que estudia las características de los suelos, su formación, su evolución, sus propiedades físicas, morfológicas, químicas, mineralógicas y su distribución. Comprende el estudio de las aptitudes de los suelos para la explotación agraria o forestal.

**Topografía:** Representación de los elementos naturales y humanos de la superficie terrestre. Esta ciencia determina los procedimientos que se siguen para poder representar esos elementos en los mapas y cartas geográficas.

**Fotogrametría:** Ciencia desarrollada para obtener medidas reales a partir de fotografías, tanto terrestres como aéreas, para la realización mapas topográficos, mediciones y otras aplicaciones geográficas.