

UNIVERSIDAD DE LAS CIENCIAS INFORMÁTICAS
Facultad 9



*Trabajo de Diploma para optar por el título de Ingeniero en
Ciencias Informáticas.*

*Título: Algoritmos para el módulo de análisis del terreno de GeneSIG:
Análisis hidrológico y álgebra de mapa.*

Autor: Mileidis Nieves Calzadilla

Tutor: Ing. Romanuel Ramón Antúnez

Co-tutor: Antonio Membrides Espinosa

La Habana, 2 de julio del 2010

“Año del 51 Aniversarios del Triunfo de la Revolución.”

“Un gran descubrimiento resuelve un gran problema, pero en la solución de cualquier problema hay una pizca de descubrimiento.

Tu problema puede ser modesto, pero si es un reto para tu curiosidad y hace que entren en juego tus facultades inventivas, y si lo resuelves con tus propios medios, experimentarás la tensión y gozarás del triunfo del descubrimiento.”

Gorge Polya

Declaración de autoría

Declaro que soy el único autor de este trabajo y autorizo al <nombre área> de 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 _____.

[Insertar nombre(s) de autor(es)] [Insertar nombre(s) de tutor(es)]

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten la ubicación y gestión de datos georreferenciados con el fin de hacer más factible y puntual la toma de decisiones, dado el nivel de exactitud en cuenta a la ubicación geográfica de los objetos en el espacio. Permiten la representación geográfica de modelos de mapas utilizados para el cálculo y modelación de fenómenos ambientales utilizando herramientas de análisis. La plataforma GeneSIG desarrollada por el Centro productivo de Geoinformática y Señales Digitales (GEySED) en la facultad 9 tiene como su principal objetivo la representación geoespacial de la información y realizar análisis sobre la misma. Esta tiene como necesidad prioritaria el desarrollo de herramientas como el álgebra de mapas y análisis hidrológico, ambas utilizadas para el cálculo entre los mapas y para la modelación de los diferentes procesos hidrológicos respectivamente. En el presente trabajo se presenta como solución al problema, la propuesta de algoritmos que permitirán la implementación de dichas herramientas en el módulo de análisis del terreno de la plataforma.

Para lograr el objetivo general se realiza el estudio de diferentes modelos matemáticos y se trabaja en la investigación de algoritmos eficientes para resolver los problemas con el álgebra de mapas y análisis hidrológico dentro del módulo de análisis del terreno; además se realiza un estudio de las tendencias y tecnologías actuales que pueden ser útiles para fundamentar y complementar la construcción de la solución propuesta.

Palabras claves

Sistemas de información geográfica (SIG), herramientas de análisis, álgebra de mapas, análisis hidrológico.

Índice

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1: Fundamentación Teórica.....	5
Introducción.....	5
1.1 Conceptos asociados al dominio del problema	5
1.2 Objeto de Estudio	12
1.2.1 Álgebra de mapas.....	12
1.2.1.1 Tipo de funciones.....	13
1.2.2 Análisis hidrológico	14
1.2.2.1 Aspectos de interés dentro de la modelación hidrológica	14
1.2.2.1.1 Direcciones de flujo	15
1.2.2.1.2 Extracción de redes de drenaje.....	16
1.2.2.2 Análisis de cuencas	17
1.3 Descripción de la herramienta.....	17
1.4 Situación problemática	18
Conclusiones.....	18
CAPÍTULO 2: Tendencias y Tecnologías.....	19
Introducción.....	19
2.1 Estado del arte.....	19
2.1.1 Descripción de modelos matemáticos.....	19
2.1.1.1 Álgebra de mapas.....	19
2.1.1.1.2 Función Focal o de vecindad	22
2.1.1.1.3 Funciones Zonal o regional	24
2.1.1.1.4 Función Global.....	25
2.1.1.1.5 Variables del álgebra de mapas	26
2.1.1.1.6 Remuestreo	26
2.1.1.2 Análisis hidrológico	27
2.1.1.2.1 Cálculo de flujo	27
2.1.1.2.3 Cálculo de la pendiente de una cuenca según el método de Horton.....	28
2.1.1.2.4 Reclasificación de pendiente.....	29
2.1.1.2.5 Características de las cuencas.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.3 Describir los tipos problemas.....	29
2.1.1.4 Herramientas y tecnologías existentes.....	32
ID+GIS	32
HEC-RAS	32
Hidro-SIG	33
ArcHydro	34
GRASS.....	34
GDAL.....	35
Quantum GIS (QGIS).....	36

2.1.1.5 Algoritmos informáticos.....	37
2.1.1.5.2 Cálculo de flujo utilizando una matriz de códigos de flujo.....	39
2.1.1.5.3 Problema de las concavidades.....	41
2.1.1.5.5 Método alternativo basado en la rutina de trazado de líneas de flujo.....	42
2.1.1.5.6.1 Generación de líneas de flujo.....	45
2.1.1.5.6.2 Definición de cuencas hidrológicas.....	48
2.1.1.5.6.1 Estimación del caudal máximo.....	50
2.1.1.5.7 Cálculo de variables topográficas.....	51
2.1.1.5.7.1 Gradiente.....	51
2.1.1.5.7.2 Pendiente.....	52
2.1.1.5.7.3 Orientación.....	53
2.1.1.5.7.4 Curvatura.....	54
2.1.1.5.7.5 Rugosidad.....	54
Conclusiones.....	55
 CAPÍTULO 3: Descripción de la solución propuesta.....	 56
Introducción.....	56
3.1 Solución para álgebra de mapas.....	56
3.1.1 Solución propuesta.....	57
3.2 Solución de algoritmos para análisis hidrológico.....	59
3.2.1 Solución propuesta.....	59
3.4 Validación.....	61
Conclusiones.....	64
Conclusiones generales.....	65
Recomendaciones.....	66
Referencias bibliográficas.....	67
Bibliografía consultada.....	71

Índice de Tablas y Figuras

Figura 1 Formato Ráster a. Simple, b. Multiespectral.....	11
Figura 2 Función Local.....	21
Figura 3 Función Focal	19
Figura 4 Función Zonal	21
Figura 5 Función Global	19
Figura 6 Representación de la función local con varias capas.....	20
Figura 7 Representación del cálculo por filtrado de capas	23
Figura 8 Formas de escoger las clases en la función zonal.....	25
Figura 9 Resultados de una función global.	25
Figura 10 Representación de una cuadrícula que forma parte de una rejilla. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 1 Comparación entre las funciones del álgebra de mapas.....	57
Tabla 2 Comparación entre algoritmos que resuelven el cálculo de parámetros hidrológicos.	59
Tabla 3 Tiempo estimado en el que los desarrolladores necesitan para el estudio de cada algoritmo.	62
Tabla 4 Parámetros para el cálculo del esfuerzo en los primeros algoritmos.....	63
Tabla 5 Parámetros para el cálculo del esfuerzo en el autómata celular.	63

Introducción

La complejidad diaria de la obtención de la información y los nuevos retos de la naturaleza contribuyen a que sea aun más necesaria la búsqueda de una solución más rápida y óptima para el proceso y gestión de diversos enigmas que surgen a partir de problemas planteados por las personas, o surgidos a raíz del constante cambio de la humanidad. La identificación, posesión y manipulación de los datos geográficos obedece a una necesidad ancestral de la humanidad; por lo que diferentes problemas existentes en la actualidad solo pueden ser resueltos por la geografía o nuevas tecnologías que permiten la obtención y uso de la información en diferentes campos de la sociedad.

Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)¹ tienden a tomar un lugar creciente en la vida humana y el funcionamiento de las sociedades, por lo que la presencia de números, fórmulas matemáticas, modelos, datos geográficos y la capacidad de manipular y almacenar estos datos se hacen imprescindibles para el entendimiento de una nueva sociedad inmersa en el desarrollo tecnológico. Su uso es extendido en la aplicación de nuevos SIG² que faciliten la ubicación de todos los elementos dentro del mundo actual.

Con la presencia de nuevas tecnologías y la necesidad del uso de estas en el manejo de la información geográfica en el mundo se fue desarrollando el ámbito perfecto para la aparición de los sistemas de información geográfica, los cuales tuvieron dos factores importantes para el surgimiento: La necesidad del uso, gestión y manejo de la información geográfica, y la aparición de las primeras computadoras en el mundo. Uno de los pilares que favorece que estos sistemas hayan experimentado una evolución hasta llegar a la situación actual es la cartografía tradicional y los procedimientos técnicos para el análisis de mapas.

Los SIG tienen su aparición a partir de los años 1950 cuando surgen los primeros elementos cartográficos, los que iniciarían el largo camino de un amplio desarrollo en los aspectos de tecnologías, técnicas y datos relacionados con la ubicación geográfica y el manejo de la misma. El incremento del desarrollo de estos aspectos dieron origen a diversas herramientas puntuales como: MIMO, CGIS, SyMAP, ESRI, Arcinfo, GRASS; que con el tiempo fueron perfeccionadas y enriquecidas con nuevos métodos y algoritmos que ofrecieron una nueva vía de implementación y uso a los nuevos SIG de la actualidad.

¹ **TIC** acrónimo de Tecnología de la Información y las Comunicaciones.

² **SIG** acrónimo de Sistemas de información geográfica.

Las opciones de intercambiar, integrar o analizar datos, facilitan, agilizan y favorecen el proceso para la toma de decisiones. Los usuarios pueden combinar datos e información real con datos locales, visualizarlos, hacer consultas y análisis pertinentes. En nuestros días la aplicación de estas herramientas han pasado del uso investigativo y profesional para tener una actividad más social e interactiva con los usuarios, ejemplo son *GoogleMap*, *GoogleEarth*, los que han propiciado la búsqueda y desarrollo de alternativas de programas geográficos de fuente abierta para usos Web.

En Cuba surge la necesidad de implementar un SIG que contribuya al desarrollo y reducción del costo en diferentes esferas de la sociedad, por lo que la plataforma GeneSIG³ surgió como un nuevo producto para satisfacer y aumentar la toma de decisiones en negocios en los cuales se aplique esta herramienta. La plataforma soberana GeneSIG fue desarrollada por el centro de desarrollo de GEySED⁴, perteneciente a la facultad 9 de la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI) en conjunto a equipos de desarrollo de GEOCUBA y UCIFAR centro que se encuentra dentro de la universidad, el cual está integrado por estudiantes graduados en la universidad y personal proveniente del ITM.⁵ Está implementada con herramientas y tecnologías libres, cumpliendo con la necesidad actual de migración a software libre. Su principal objetivo es la representación geoespacial de la información y realizar análisis sobre la misma.

Situación problemática:

La plataforma cuenta con múltiples funcionalidades todas en función del manejo y gestión de información geográfica, así como diversos módulos y herramientas que la complementan, cumpliendo con los requisitos que fueron tomados del cliente. Dentro del módulo de análisis del terreno se encuentra el álgebra de mapas y análisis hidrológico, funcionalidades no implementadas actualmente en la plataforma; para las cuales existen definidos diversos modelos para su desarrollo, pero se carece del conocimiento necesario y de una estrategia para ser aplicados por el equipo de desarrollo. Dada la explicación del por qué es necesario esta investigación surge el siguiente problema científico que es la esencia de lo expuesto anteriormente.

³ **GeneSIG** acrónimo de Plataforma Soberana para el Desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica.

⁴ **GEySED** acrónimo de Centro productivo de Geoinformática y Señales Digitales.

⁵ **ITM** acrónimo de Instituto Técnico Militar José Martí.

Problema a resolver: ¿Cómo optimizar el proceso de desarrollo del módulo de análisis del terreno, específicamente las funcionalidades referentes a análisis hidrológico y álgebra de mapas, en la plataforma GeneSIG?

Teniendo como **objeto de estudio** el álgebra de mapas y análisis hidrológico y como **campo de acción** la aplicación de los algoritmos de álgebra de mapas y análisis hidrológico en los Sistemas de Información Geográfica.

Para darle solución a este problema se tiene como **objetivo general:** Obtener una propuesta de algoritmos para la representación de modelos de álgebra de mapas y análisis hidrológico en la plataforma GeneSIG.

La **idea a defender** que se plantea es, obtenida una propuesta de algoritmos para álgebra de mapas y análisis hidrológico se haría más sencillo y rápido el trabajo de los programadores para el desarrollo de una primera versión del módulo de análisis del terreno de GeneSIG.

Para el cumplimiento de este objetivo se han trazado las siguientes tareas:

1. Definir Conceptos y Objeto de Estudio de la investigación.
2. Describir modelos y algoritmos que existen en el álgebra de mapas y análisis hidrológico.
3. Describir los tipos de problema que existen para el cálculo de álgebra de mapas y análisis hidrológico.
4. Caracterizar las herramientas y tecnologías actuales.
5. Definir modelos y métodos a emplear en la plataforma GeneSIG.
6. Definir herramientas a utilizar en el desarrollo de los módulos en la plataforma GeneSIG.
7. Identificar posibles mejoras para las herramientas, complementándolas con los algoritmos y modelos matemáticos seleccionados.
8. Documentar la investigación con vistas a su socialización.

Con este trabajo se pretende obtener algoritmos que resuelvan el problema en el módulo de análisis del terreno, en las herramientas álgebra de mapas y análisis hidrológico para ser implementados en la primera versión del módulo de la plataforma GeneSIG y la obtención de un documento que describa el desarrollo de este módulo para el conocimiento del público en general.

Para un mayor entendimiento del problema se pusieron en práctica los siguientes métodos científicos:

Método teórico:

Inductivo - Deductivo: En el estudio del álgebra de mapas y análisis hidrológico como tema general, se puede inferir un caso particular de forma lógica como la propuesta de un algoritmo para la representación de estos modelos.

Histórico - Lógico: Para conocer todos los antecedentes que existen sobre los algoritmos y herramientas para la representación del álgebra de mapas y análisis hidrológico, así poder arribar a una propuesta que de solución al problema planteado haciendo corresponder la lógica con su concepción histórica.

Analítico - Sintético: Se relacionan las diversas herramientas y métodos matemáticos del álgebra de mapas y análisis hidrológico con los tipos de problema presentados en la investigación, para obtener una propuesta final de un algoritmo.

Métodos empíricos:

Entrevistas: Realizadas al tutor, cotutor y especialistas en el tema de los SIG, así como los integrantes del proyecto GeneSIG.

Observaciones: Sitios relacionados con el tema.

La investigación está estructurada de la siguiente forma:

Capítulo 1: Fundamentación teórica

En este capítulo se tratan aspectos fundamentales para la comprensión del problema planteado, los conceptos más importantes, así como la descripción de la herramienta y una amplia explicación del objeto de estudio en la que está enmarcada esta investigación y la necesidad del desarrollo de la misma.

Capítulo 2: Tendencias y Tecnologías.

En este capítulo se realiza el estado del arte del objeto de estudio. Se describen y analizan los problemas actuales en el álgebra de mapas y análisis hidrológico, con los modelos matemáticos existentes para la solución de los mismos. Se exponen algunas de las herramientas existentes en el mundo de los SIG y sus principales características y uso. Se explican diferentes algoritmos informáticos que le dan solución a las principales características del análisis hidrológico.

Capítulo 3: Descripción de la solución propuesta

Se realiza una comparación entre los modelos y algoritmos existentes para lograr proponer una solución que permita al módulo de análisis del terreno contar con las herramientas, álgebra de mapas y análisis hidrológico; además de brindar una solución óptima para el conocimiento de los desarrolladores para la implementación de la primera versión del módulo y la plataforma en general.

CAPÍTULO 1: Fundamentación Teórica.

Introducción

En este capítulo se abordan conceptos y aspectos fundamentales del problema planteado. Se trata de forma independiente el álgebra de mapas y análisis hidrológico dando una explicación del tema que se va a tratar y una descripción de la herramienta. Se explica el problema existente y el objeto de estudio en el cual se enmarca la investigación.

1.1 Conceptos asociados al dominio del problema

Definiciones de SIG

Partiendo de una definición global ⁶ un SIG es:

Según Bracken y Webster: “Un sistema de información geográfica puede ser concebido como una especialización de un sistema de bases de datos, caracterizado por su capacidad de manejar datos geográficos, que están georreferenciados y los cuales pueden ser visualizados como mapas”.

Definición funcional ⁷ de un SIG:

“Un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la operación, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión”, citado por la NCGIA⁸.

Definición tecnológica ⁹ de un SIG:

Según Tomlinson es un “Sistema digital para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos a fin de aportar información útil para las decisiones territoriales”.

Coppock y Anderson en su revisión editorial expresaron:

⁶ **Definiciones globales** son aquellas donde predomina la idea global, se enfoca en los objetivos generales de los SIG, sin especificar las funciones que realizan y los métodos que utilizan. Son funciones que se interesan más por el qué.

⁷ **Definiciones funcionales** atienden a las tareas que puede realizar.

⁸ **NCGIA** acrónimo de Centro Nacional para el Análisis de la Información Geográfica.

⁹ **Definiciones tecnológicas** serían aquellas que reflejan un interés especial por la técnica utilizada, es decir destacan el uso de la informática como medio para la comprensión de los datos espaciales.

"Los Sistemas de Información Geográfica representan un campo de desarrollo, donde se interceptan muchas disciplinas, entre ellas, la cartografía, la computación, la fotogrametría, la teledetección, la estadística y otras disciplinas relacionadas con el manejo y análisis de datos territorialmente codificados".

Según las definiciones expresadas anteriormente se puede decir que los Sistemas de Información Geográfica son sistemas que permiten la ubicación y gestión de datos georreferenciados con el fin de hacer más factible y puntual la toma de decisiones, dado el nivel de exactitud en cuanto a la ubicación geográfica de los objetos en el espacio, así como la representación geográfica de modelos de mapas utilizados para el cálculo y modelación de fenómenos ambientales. Los SIG vienen desarrollándose en escalas que van desde catastrales hasta globales por su aplicación tanto en las ciencias ambientales como en las ingeniarías de diversos tipos.

Algunos autores como Chorley han afirmado que "los Sistemas de Información Geográfica son el paso adelante más importante desde la invención del mapa". Las propiedades expuestas en las definiciones anteriores no sólo definen a los SIG, sino también existen otros aspectos que le añaden ciertos matices a lo expuesto hasta ahora y que lo caracterizan:

1. La capacidad de visualizar la información geográfica a través de mapas.
2. La función como base de datos sofisticada en la que se guardan y relaciona información espacial al igual que temática.
3. La diferencia con las bases de datos convencionales, puesto que toda la información contenida en un SIG está unida con entidades geográficamente localizadas.
4. Su origen a partir de la unión e innovación tecnológica en campos especializados de la geografía y otras ciencias, propicio un sistema más potente que la suma de las partes.
5. Permite agrupar la información en estructuras coherentes y aplicar a la misma una armadura variada de funciones: análisis, visualización, edición, etc.
6. El carácter integrador y abierto hace que sea uno de los más importantes entre variados tipos de aplicaciones informáticas, destinadas al manejo de información. **(1)**

Algoritmo

Método susceptible de ser aplicado por una computadora para la resolución de un determinado problema. Cada algoritmo está compuesto de un número finito y determinado de pasos que a su vez pueden

contener múltiples operaciones. Un algoritmo es la etapa intermedia entre la concepción abstracta y compleja del pensamiento humano y la forma de operar numérica de los ordenadores. **(25)**

Modelos

Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real. Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utilizan para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica. **(4)**

Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes, distingue tres tipos básicos:

- Modelos icónicos: La relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas: una maqueta es un modelo del objeto representado donde la relación establecida es fundamentalmente una reducción de escala.
- Modelos análogos: Poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos: un mapa es un modelo de la realidad establecido mediante un conjunto de convenciones relativamente complejo que conduce a un resultado final claramente distinto del objeto representado.
- Modelos simbólicos: Se llega a un nivel superior de abstracción debido a que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática, geométrica, estadística. **(21)**

Modelo en la geografía

Resultado del proceso para definir los fenómenos del mundo real o las características geográficas de interés en términos de sus atributos y sus relaciones. **(5)**

Modelo matemático

Es un tipo de modelo que se utiliza alguna fórmula matemática para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y /o entidades u operaciones. **(7)**

Modelo digital de terreno

Los MDT se incluyen en la categoría de modelos simbólicos y, consecuentemente, las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. En este caso, los MDT presentan algunas ventajas sobre el resto de tipos de modelos, derivadas de su

naturaleza numérica: no ambigüedad, posibilidad de modelización de procesos con una deducción estricta, verificabilidad y repetibilidad de los resultados. **(21)**

Un MDT¹⁰ es la representación de la topografía del terreno, aunque en realidad cualquier hecho que cumpla con la característica de la continuidad espacial de la variación (distribución espacial de una variable cuantitativa y continua), puede ser representado mediante este modelo: las precipitaciones, las temperaturas o la humedad de un punto dado.

Un MDT se puede representar mediante dos modelos de datos:

1. La matriz de alturas (ráster).
2. La estructura TIN (red de triángulos irregulares). **(2)**

Modelo digital de elevaciones

Un MDE¹¹ es la clave del análisis geomorfológico, el semejante de la cartografía clásica de las elevaciones tradicionalmente representadas mediante curvas. Generalmente se entienden como entidades ráster e incluso para los autores como Burrough, que expresó: "Es una representación matricial regular de la variación continua del relieve en el espacio." Aunque no necesariamente deben estar recogidas en formato ráster. **(3)**

Un MDE es un arreglo continuo de valores numéricos que corresponden con los valores estimados de elevación de puntos en la superficie del terreno. Se consideran valores estimados ya que los valores registrados en el modelo se obtienen generalmente a través de un proceso de interpolación o medición indirecta.

Estructura de datos de los MDE:

Estructura ráster: Estas se basan en la representación del terreno por medio de una rejilla regular o de matrices regulares y constantes (fila y columnas). En este tipo encontramos mallas regulares y modelos híbridos.

¹⁰ **MDT** acrónimo de Modelos Digitales de Terreno.

¹¹ **MDE** acrónimo de Modelos Digitales de Elevaciones.

Estructura vectorial: Se basa en entidades geométricas u objetos geométricos¹² que se definen por sus coordenadas puntuales o unidas para formar una línea. Las dos estructuras más usadas son la curva de nivel o estructuras de contorno y la red irregular de triángulos (TIN). **(4)**

Para lograr una completa descripción y caracterización del relieve se debe tener en cuenta que los MDE contienen a grandes rasgos dos tipos de información, una explícita mediante los propios datos que se encuentran en el modelo. La implícita es la que se deriva de las relaciones espaciales entre los datos y objetos. Ambas informaciones nos permiten obtener información de diferente carácter.

El primer tipo de información se utiliza con los descriptores de carácter global para obtener parámetros como la varianza, media, valores mínimo y máximo, rango. Estos descriptores están destinados a dar una información sintética sobre el terreno. El segundo tipo de información se utiliza sobre todo para construir modelos derivados que dan cuenta de nuevas variables topográficas como pendiente, rugosidad. Para ello se utiliza la información estructural implícita en el modelo digital y, por tanto, en las relaciones topológicas de los datos. En este caso las operaciones implicadas suelen ser de ámbito local, es decir, se usan los datos de un entorno limitado de cada punto. **(21)**

Variables topográficas

A partir de los MDE es posible construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía (datos y relaciones topológicas entre los mismos), sin intervención de datos auxiliares o información externa.

De las principales variables implicadas en estas aplicaciones, la de uso más general es probablemente la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura. También se mencionan cinco parámetros básicos en este contexto: elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve. El relieve, definido en este caso como la variabilidad de la superficie, es lo que otros autores denominan rugosidad.

✓ *Gradiente topográfico*

Los coeficientes a_{10} y a_{01} representan la tasa de cambio de la altitud respecto a los ejes X (filas) y Y (columnas), respectivamente, es decir, los componentes de la pendiente sobre los ejes X, Y.

El par de valores (a_{10} , a_{01}) se denominan gradiente de z en el punto(x, y) y se utilizan en el cálculo de los

¹² Se refiere a puntos, líneas y polígonos.

modelos digitales derivados. **(41)**

Se deduce directamente que los coeficientes a_{10} y a_{01} representan las derivadas de la altitud con respecto a los ejes X y Y:

$$a_{10} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2*d} \quad a_{01} = \frac{z_{i-1,j} - z_{i,j}}{2*d}$$

✓ **Pendiente**

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. Su estimación es sencilla a partir del MDE, aunque existen diferentes procedimientos que dan lugar a diferentes resultados¹³, entre los métodos habituales están:

1. Pendiente máxima de la celda central con respecto a los valores vecinos, adecuado para evaluación de la erosión.
2. Pendiente media de la celda central con respecto a cada uno de los valores vecinos.
3. Pendiente en el sentido del flujo descendente, adecuado en celdas correspondientes a cauces en aplicaciones de tipo hidrológico.
4. Ajuste de una superficie a los 9 valores de elevación correspondiente a la celda central y sus 8 celdas vecinas.

✓ **Orientación**

En un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto.

✓ **Curvatura del relieve**

En un punto puede definirse como la tasa de cambio en la pendiente y depende, por tanto, de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto. Es la información sobre la convexidad o concavidad de la superficie en un punto dado. **(3)**

✓ **Rugosidad**

Al contrario de las demás variables no existen criterios uniformes para llevar a cabo la medida de la rugosidad. Existen diversos métodos aplicados por diferentes autores para su evaluación. Pero dado el método de Hobson dado un punto del terreno se calculan los vectores unitarios perpendiculares a la superficie en él y en los puntos de su entorno. Si el terreno es uniforme la suma vectorial será elevada y la

¹³ Cuando se trabaja con un programa es importante conocer cuál es el algoritmo que utiliza para calcular pendientes.

dispersión baja: en el caso de terrenos rugosos, en cambios en orientación y pendientes, la suma vectorial será pequeña y la dispersión elevada. **(41)**

Interpolación

Un método de interpolación permite el cálculo de valores en puntos no muestreados, a partir de los valores recogidos en otra serie de puntos. **(3)**

Para el ajuste de curvas, los splines se utilizan para aproximar formas complicadas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los splines los hacen populares para la representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por ordenador. **(40)**

Análisis morfométrico

Estudia el relieve y la orografía de la superficie por esta definida, caracterizándolo a través de parámetros adicionales, los cuales se basan en un análisis focal.

Orografía

Parte de la geografía física que describe y clasifica las formas de la superficie terrestre y las sistematiza según sus rasgos externos, con independencia de su origen. **(6)**

Capas ráster

Se trata de un Modelo de datos en el cual las entidades geográficas son representadas usando celdas, generalmente cuadrados¹⁴, ordenados conformando una grilla regular.

Un ráster es esencialmente como una matriz multidimensional cuyo origen se sitúa en el extremo superior izquierdo.



Figura 1 Formato Ráster a. Simple, b. Multiespectral.

Existen diversas clasificaciones de los datos ráster que tienden a diferenciarlos utilizando criterios:

1. Según el valor del pixel.

¹⁴ Aunque algunos sistemas utilizan otras figuras geométricas como triángulos o hexágonos.

- Continuos: Se refiere a datos que se encuentran distribuidos de forma continua como su nombre indica en cualquier lugar de la superficie terrestre por ejemplo: temperatura, precipitación, altitud, presión atmosférica y por tanto cualquier pixel tendrá un valor de dicha variable. **(9)**
- Discretos o temáticos: Los ráster discretos que proceden de una discretización de acuerdo a un criterio, o se trata de representaciones de fenómenos cuyos límites quedan perfectamente establecidos como es el caso de un ráster de usos del suelo, tipología de suelos, todos relacionados con una misma variable. El proceso de discretización de una variable continua pasa por la agrupación de los píxeles que componen el ráster en determinadas unidades y la posterior asignación de un valor común a todos los píxeles que componen cada clase o intervalo, lo que se ha venido a denominar reclasificación de un ráster continuo para la obtención del un ráster discreto.**(9)**

Definición de mapa

Modelo gráfico de la superficie terrestre donde se representan objetos espaciales y sus propiedades métricas, topológicas y atributivas, un mapa puede ser analógico (impreso sobre papel, por ejemplo) o digital (codificado en cifras, almacenado en un ordenador y presentado en una pantalla), existen mapas métricos, diseñados para representar distancias, superficies o ángulos y mapa topológicos, diseñados para representar vecindad, inclusión, conectividad y orden en el contexto de los SIG, un mapa es la presentación de cualquier estructura de datos usada para reflejar cartográficamente una variable espacial, nominal o cuantitativa, independientemente del modelo de datos utilizado que puede ser vectorial o ráster. **(31)**

1.2 Objeto de Estudio

1.2.1 Álgebra de mapas

La utilización del álgebra de mapas no es un proceso de análisis nuevo, sino desde la aparición de la cartografía la comparación entre mapas fue el primer paso para la obtención de nueva información para construir mapas derivados. Luego del surgimiento de los SIG y hacerse el proceso de una forma informatizada, toman un carácter más formal las herramientas de análisis.

Al analizar los mapas obtenemos información que son utilizadas para la obtención de nuevos mapas referentes al mismo espacio geográfico pero con diferente información. El álgebra de mapas no es más

que los procedimientos y métodos utilizados para obtener nuevos valores a partir de uno o varios mapas analizados.

Estos procedimientos y técnicas nos permiten a partir de una o varias capas en formato ráster obtener información derivada en nuevas capas de datos. Estas operaciones se hacen mejor en capas ráster por su estructura regular, permitiendo mayor facilidad en la aplicación de algoritmos y formulaciones, lo que no implica que no se pueda aplicar álgebra de mapas en capas vectoriales.

El álgebra de mapas no es sólo de una capa o la unión de varias capas ráster para obtener una nueva a través de modelos matemáticos, sino es la base de muchas funcionalidades de los SIG. Las operaciones entre capas es sólo un subconjunto de lo que podíamos denominar una aritmética de mapas, la cual le da un concepto más definido del álgebra de mapas y es el completo trabajo en el manejo y análisis de las capas ráster para la obtención de nuevos resultados.

Como tal, al álgebra de mapas le forman un conjunto de variables (los mapas), expresiones y funciones, los cuales, a través de una sintaxis adecuada, permiten la obtención de nuevos resultados geográficos. **(3)**

1.2.1.1 Tipo de funciones

Dentro del álgebra de mapas se encuentran cuatro tipos de funciones definidas por como toman la información de las celdas de la capa inicial necesaria para su cálculo:

1. Local: Como el nombre lo indica, el resultado de la información de la nueva celda es en función de la celda inicial, es decir, la capa resultante va a tener en cada celda el valor en función del valor de la celda en la capa inicial.
2. Focal: La información de las celdas en la capa resultante van a ser en función de la celda correspondiente en la capa inicial y de las situadas en un entorno definido alrededor de la misma.
3. Zonal o Regional: El valor de cada una de las celdas de la capa resultante es función del valor de todas las celdas que están conectadas con ellas que tengan un mismo valor para una de las capas de entrada. ¹⁵(pertenecen a la misma clase que esta).
4. Global: El valor final de la función se obtiene a partir de todas las celdas de la capa inicial.

¹⁵ Las celdas cuyo valor pertenezcan a la misma clase que la celda problema.

La unión de las funciones y enfoques dan un conjunto de operaciones de análisis dentro del álgebra de mapas, proporcionándole a los SIG la propiedad fundamental de analizar el medio y extraer todos los datos geográficos a partir de capas ráster. **(3)**

El álgebra de mapas brinda las herramientas necesarias para analizar capas ráster y hacer con ellas diversas combinaciones utilizando las diferentes funciones que permiten obtener información resultante derivada de la capa inicial o de varias capas en general. Esta herramienta define los procesos con los cuales desarrollar diversos análisis. Es la base de la aplicación de algoritmos a los análisis de las capas ráster, por lo que se tiene que tener bien definido las variables entrada (mapas) y las operaciones que se realizan en las diferentes celdas que son objeto de análisis.

1.2.2 Análisis hidrológico

Un modelo hidrológico es una representación simplificada del sistema real cuyo objetivo es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Sus entradas y salidas son variables hidrológicas y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas con las salidas, las cuales pueden expresarse como función del tiempo. Abarcan una gran diversidad de problemas y funcionalidades tales como modelado de ríos y cuencas, calidad de aguas, predicción de crecidas y riesgos hidrológicos. **(15)**

La actividad fluvial incluye un conjunto de procesos de gran importancia en el modelado de la superficie de la tierra cuya unidad geomorfológica básica es la cuenca hidrográfica. El tratamiento en los modelos digitales de terreno puede aportar resultados de interés en este campo basándose principalmente en la modelización de los procesos hidrológicos. **(5)**

La asignación de direcciones de flujo se lleva a cabo mediante la función focal, estas direcciones implican una conectividad entre las celdas, aspecto que se utiliza en la definición de regiones de celdas hidrológicamente relacionadas entre sí y realizar un análisis regional.

1.2.2.1 Aspectos de interés dentro de la modelación hidrológica

Líneas de flujo: Se denomina al trayecto que, a partir de un punto inicial, seguiría la escorrentía superficial sobre el terreno, es decir, sigue la línea de máxima pendiente. **(6)**

A partir del trazado de las líneas de flujo es posible definir la red hidrológica, el área subsidiaria de una celda y, por extensión, las cuencas hidrológicas:

Área subsidiaria: Es el conjunto de elementos del cual cuyas líneas de flujo convergen en un punto único.

Cuenca hidrológica: Está formada por el área subsidiaria de una celda singular, que actúa como sumidero, tiene algunas características singulares, el área subsidiaria puede establecerse para cualquier punto del territorio, mientras que no todos los puntos son sumidero de una cuenca hidrológica. **(5)**

Sumidero: Un punto del modelo se definirá como sumidero de una cuenca cuando cumpla con las tres condiciones:

1. Se trate del punto de menor altitud de una concavidad (implica un posterior drenaje subterráneo o el relleno de la concavidad en caso de lluvia si es un terreno impermeable).
2. Se encuentre en el borde del modelo y todos sus vecinos drenen hacia él.
3. Este situado en la línea de costa y drene al mar. **(25)**

1.2.2.1.1 Direcciones de flujo

Las direcciones del flujo definen el comportamiento hidrológico de cada una de las celdas como unidad aislada, dado que la misma se obtiene a partir de la relación entre las celdas circundantes con la celda central mediante el parámetro altura.

Dicha dirección está dada por el recorrido del agua, que en su movimiento siempre va hacia el menor potencial posible, es decir, hacia la dirección de máxima pendiente.

El modelo más sencillo de asignación de direcciones de flujo es el denominado D8¹⁶. Esta formulación es la implementada en la gran mayoría de los SIG con capacidades de análisis hidrológico, debido principalmente a su sencillez operativa y facilidad de comprensión.

Dada una celda problema, el flujo puede abandonar esta únicamente en ocho direcciones posibles, esto es, las ocho que resultan de unir el centro de la celda inicial con los de las ocho circundantes en la ventana de análisis 3x3. El ángulo de desplazamiento del flujo queda así discretizado en intervalos de 45 grados, 360 grados entre ocho posibles direcciones.

El proceso de cálculo de la dirección de flujo es sencillo y requiere únicamente el cálculo de una pendiente media entre la celda central y las 8 circundantes, la cual se evalúa mediante la expresión:

$$P = \frac{z_5 - z_i}{L} ; z = 1, \dots, 9; i \neq 5$$

¹⁶ **D8** acrónimo derivado de su denominación en lengua inglesa *Determinist 8*.

Donde L representa la distancia entre los centros de las celdas entre las que se calcula la pendiente. No se emplea aquí directamente la variable S de tamaño de celda, puesto que la distancia a aplicar no es igual en las celdas situadas en la vertical o en la horizontal de la celda central ($L = S$), que en las celdas situadas en diagonal a la misma ($L = \sqrt{2}S$). La dirección de flujo viene definida por la celda que marca la mayor de las pendientes.

La principal ventaja del método, su simplicidad, es también su principal defecto. La discretización de las direcciones en múltiplos de 45 grados hace que flujos que presenten rutas ciertamente distintas, con diferencias en orientación tan importante como esos mismos 45 grados, puede quedar englobadas dentro de una misma dirección, porque la dirección real resulta truncada para encajar dentro de uno de los intervalos y en tan sólo ocho posibles direcciones. **(3)**

1.2.2.1.2 Extracción de redes de drenaje

La extracción de redes de drenaje es una de las tareas principales del análisis hidrológico. El objetivo de este proceso es definir, de entre las celdas del MDE, cuales forman parte de los cauces y cuáles no.

Para llevar a cabo este análisis se utiliza el propio MDE y una capa de información adicional, sobre la cual se establece una condición que permite el trazado de los cauces. El procedimiento para llevar esto a cabo implica los siguientes pasos:

1. Selección de celdas de cabecera, en las cuales se da el inicio de los cauces.
2. Delineación de los cauces analizando las celdas aguas abajo que se encuentran debajo de las de cabecera.

Las celdas de cabecera son aquellas para las cuales se cumple la condición de existencia de cauce, no cumpliéndose para ninguna de las circundantes situadas aguas arriba. Respecto a la delineación de los cauces hacia aguas abajo, se utiliza el método D8, con él se señalan las celdas situadas aguas abajo a partir de las de cabecera.

Como capa de apoyo debemos emplear cualquiera que pueda aportar información relevante sobre la presencia de cauces. El proceso de formación de un cauce depende de numerosos factores tales como la precipitación, o las características del suelo y la litología, pero en última instancia es el relieve quien condiciona la definición de la red de drenaje. Por tanto, es lógico que la capa de información adicional sea una de las derivadas del MDE. **(3)**

La localización de las celdas cóncavas que son las que concentran el flujo de agua, se lleva a cabo por un algoritmo que aplica una matriz de 2x2 sobre la malla, recorriendo la misma y escogiendo de las 4 celdas correspondientes a la matriz la celda de mayor elevación. Una vez desplazada la matriz de 2x2 a lo largo de todo el MDT, las celdas que no han sido señaladas representan las celdas valle y las seleccionadas las cóncavas.

1.2.2.2 Análisis de cuencas

Cueca: Es toda el área por la que drenan las aguas pertenecientes a un sólo sistema fluvial; sus límites están formados por las divisorias de agua que la separan de zonas adyacentes pertenecientes a otras cuencas fluviales. El tamaño y forma de una cuenca viene dado por las condiciones geológicas del terreno. Las cuencas pueden considerarse como sistemas abiertos en los que se pueden estudiar los procesos hidrológicos. Representa la unidad fundamental empleada en la hidrología, ciencia que se ocupa del estudio de las diferentes aguas en el medioambiente natural. **(22)**

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. Evidentemente, es necesario compaginar los resultados obtenidos a partir de los modelos de elevaciones con estimaciones de la capacidad de infiltración de los suelos o la estimación de precipitaciones máximas esperables. **(24)**

1.3 Descripción de la herramienta.

La plataforma soberana GeneSIG es un Sistema de Información Geográfica Web basado en estándares OpenGIS que incluye funcionalidades operativas de las aplicaciones de esta tecnología. El producto GeneSIG está desarrollado sobre las siguientes tecnologías y herramientas: lenguajes de desarrollo PHP 5, sistema Gestor de Base de Datos PostgreSQL con una extensión Postgis que le permite el soporte de datos espaciales, entornos integrados de desarrollo el Zend Studio y Aptana, herramienta de modelado el Visual Paradigm 3.4 y en Sistemas Operativos Ubuntu 9.04 y Windows XP. Utilizó el servidor de mapas MapServer y el servidor web Apache 2.5.6. Algunos de los componentes de la plataforma son la base de datos geoespacial, visor web interactivo de acceso a los datos, servicio de catálogo, módulo de análisis.

1.4 Situación problemática

La plataforma cuenta con ciertas funcionalidades que le permiten cumplir con todas las características de un SIG, por lo que es de vital importancia el total cumplimiento e implementación de las herramientas de cada módulo para la modelación y representación de la información geográfica recogida en la base de datos de la misma. El álgebra de mapas y análisis hidrológico son herramientas dentro del módulo de análisis del terreno que no están implementados en la plataforma, debido al desconocimiento por parte de los desarrolladores y por la inexistencia de un algoritmo que permita la modelación y desarrollo de los cálculos en los mapas. Como resultado no se pueden realizar diversas funcionalidades que convierten a la herramienta en un SIG, lo que dificultaría:

- Las funcionalidades matemáticas con los modelos, como es el ejemplo de la suma de un modelo con otro, aplicarle una función matemática a uno u otro modelo.
- El cálculo de las líneas de flujo y delimitación de cuencas.
- La manipulación de los modelos digitales de algún formato ráster permitiendo hacer las transformaciones para obtener un nuevo modelo.
- La obtención y cálculo de la pendiente real del relieve y la curvatura del relieve lo que refleja la variación del cambio de dirección de la pendiente, indicando la divergencia y convergencia del flujo de agua sobre la superficie.

Lo que imposibilita una plataforma de desarrollo de sistemas de información geográfica que permita con sus funcionalidades reutilizar su desarrollo para la personalización de un SIG para negocios específicos.

Conclusiones

En este capítulo se abordaron conceptos que le dan al lector una mayor familiarización con el tema, como es la importancia del uso del álgebra de mapas para la obtención de nuevos valores partiendo de uno o varios mapas. Así como diferentes aspectos de interés dentro de los modelos hidrológicos y características de diferentes conceptos dentro del tema. Desarrollándose el objeto de estudio para el planteamiento e importancia del uso de estas herramientas en el proceso de análisis. Se describe la herramienta y se explica la situación problemática de la investigación para el desarrollo sentando las bases para el posterior desarrollo de una propuesta de un algoritmo para el módulo de análisis del terreno en la plataforma GeneSIG.

CAPÍTULO 2: Tendencias y Tecnologías.

Introducción

En este capítulo se realiza un estudio de todos los problemas actuales en el álgebra de mapas y análisis hidrológico, realizando la explicación de los diferentes modelos matemáticos existentes para darle solución. Se definen los modelos matemáticos que se utilizarán para darle solución a los problemas existentes en las diferentes funcionalidades y se hacen corresponder con una posible solución para la plataforma GeneSIG.

2.1 Estado del arte.

2.1.1 Descripción de modelos matemáticos.

2.1.1.1 Álgebra de mapas

Dentro del álgebra de mapas se encuentran cuatro funciones, las cuales son utilizadas según la entrada de los datos y el cálculo que se va a realizar, estas son clasificadas en: locales, focales, zonales o regionales y las globales.

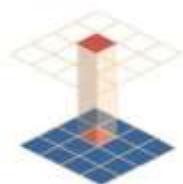


Figura 2 Función Local

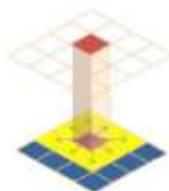


Figura 3 Función Focal

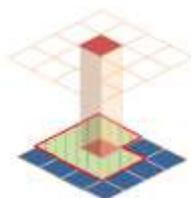


Figura 4 Función Zonal

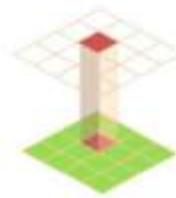


Figura 5 Función Global

2.1.1.1.1 Función local:

En las funciones locales se pueden operar de diversas formas, por ejemplo si se tiene varias capas para aplicarle la función local esta función se realiza dando valor a una de las celdas de la base inicial y otros

valores a las celdas de las demás capas que se entran todas con la misma localización que la primera. Entonces el resultado de la capa final está proporcionado por diferentes operaciones que se realizan con estos valores y exclusivamente por estas operaciones realizadas en esta localización y no por otras localizaciones (otras celdas).

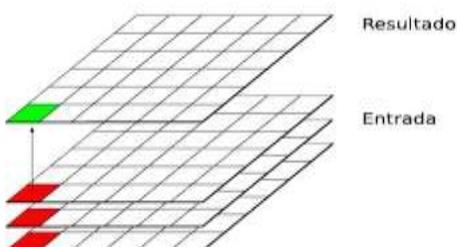


Figura 6 Representación de la función local con varias capas.

También esta función se puede utilizar para una sola capa, por ejemplo cuando se tiene una capa de valores de elevación expresados en una unidad de medida determinada y queremos llevarla a otra mayor o menor, se está realizando una función local. Al igual cuando se realiza la operación de normalización, que no es más que homogeneizar los valores para que todos se encuentren en un mismo rango de valores para poder realizar operaciones sobre ellos.

Cuando la función local se aplica en varias capas se pueden dividir en grupos que especifican diferentes operaciones para combinar las capas, ejemplo:

Operadores trigonométricos: Los valores trigonométricos como seno, coseno, tangente.

Operadores lógicos y relacionales: Se pueden hacer operaciones de tipo de comparación (And, OR, XOR, NOT), relacionales como ($>$, $>=$, $<$, $<=$, $=$,) o de pertenece a, así como llevar los valores a expresiones booleanas de 0 y 1.

Operadores aritméticos: Par hacer expresiones de suma, multiplicación, división, raíz cuadrada, potencia con los valores de las capas como es el caso de la ecuación USLE.

Definición de USLE

USLE¹⁷ es una función sumamente sencilla que multiplica las diferentes capas de partida, pero que también puede realizar operaciones más complejas, utilizando todos los operadores disponibles. Según Wischmeier tenía que ser “fácil de resolver e incluir solo factores cuyo valor en un lugar particular se

¹⁷ USLE acrónimo de Ecuación de Pérdida de Suelo.

pueda determinar a partir de los datos disponibles. Algunos detalles y perfeccionamientos posibles se sacrificarán en aras de la utilidad.”

Esta ecuación viene dada por la siguiente expresión:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde las variables son:

- ✓ **A** es la media de la pérdida anual de suelo en toneladas por hectáreas.
- ✓ **R** es una medida de las fuerzas erosivas de las precipitaciones y la escorrentía.
- ✓ **K** es el factor de erosionabilidad del suelo, es decir, una cifra que refleja la susceptibilidad de un tipo de suelo a la erosión o sea la recíproca de la resistencia del suelo a la erosión.
- ✓ **L** es el factor de longitud, una relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo de una longitud específica de 22,6 metros.
- ✓ **S** es el factor de manejo, relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo de pendiente específica del 9%.
- ✓ **C** es un factor de manejo de los cultivos, relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo sometido a un tratamiento estándar de barbecho.
- ✓ **P** es factor de la práctica de conservación, una relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo al que no se le aplica ninguna práctica de conservación, es decir, el tipo de arado y el sentido de la pendiente.

Tras el cálculo de todas las partes de la ecuación de USLE, esta se resuelve con una sencilla álgebra de mapas que multiplica todos los factores hasta aquí descritos. La USLE es un modelo sencillo que combina cinco variables (las variables L y S se pueden definir de forma conjunta dando así la topografía), todas ellas susceptibles de ser recogidas en los correspondientes mapas. Si extendemos el cálculo puntual de la variable A a todos los puntos del mapa, obtendremos un nuevo mapa de dicha variable, para realizar esta cartografía, después de aplicar el modelo USLE se hace una reclasificación. **(10)**

Parámetros estadísticos: La búsqueda del mayor de todos los valores de las capas, así como el valor más frecuente y la cantidad existente de un número dada la entrada del mismo.

Otro uso muy importante de las funciones locales de tipo aritmético es las expresiones sin datos que no es más que la intercepción de capas que no tienen valores en la celda y al realizar la operación aritmética sobre otra capa el resultado final de la capa resultante es una celda sin dato, esto tiene un común uso en

las máscaras, las cuales son utilizadas para eliminar alguna información de la capa que se quiere mostrar al final o resaltar algún tipo de información específica en la capa resultante.

2.1.1.1.2 Función Focal o de vecindad

La función focal se efectúa en una sola capa de datos asignándoles a las celdas el valor de la celda correspondiente en la capa inicial y de las celdas que se encuentran en su alrededor. Esta función queda definida por las dimensiones y forma del entorno a considerar, así como por la función a aplicar sobre los valores recogidos en este. **(3)**

Las funciones focales normalmente emplean un entorno de 3x3 centrado en la celda, que se está analizando, luego se va desplazando por la capa de tal modo que todas las celdas van siendo designadas a ser celdas centrales, y un nuevo valor es calculado para ellas, este entorno de celdas a considerar se denomina ventana de análisis. **(3)**

También se pueden usar entornos de $n \times n$, siendo menos comunes pero al realizarlo debe ser n un número impar para que la celda a calcular quede en el medio de la ventana de análisis, ventana que no solo debe ser cuadrada sino también puede tomar otras formas siempre cumpliendo con que la celda a calcular quede en el centro.

Con las celdas que se encuentran en la ventana se pueden realizar diversas operaciones, los ejemplos más habituales de operador de vecindad son el filtrado de capas, los operadores estadísticos, así como los matemáticos.

Filtrados de capas

El filtrado de capas actúa moviendo una ventana, generalmente de 3x3 celdas, por toda la capa que recorre la capa entera. Esta ventana adjudica a la celda central la media ponderada de los valores en las 9 celdillas que abarca la ventana. A partir de diferentes coeficientes de ponderación se consiguen diferentes resultados.

La siguiente ecuación calcularía la media aritmética.

$$Z_{m, x, y} = Z_{x-1, y-1} + Z_{x-1, y} + Z_{x-1, y+1} + Z_{x, y-1} + Z_{x, y} + Z_{x, y+1} + Z_{x+1, y-1} + Z_{x+1, y} + Z_{x+1, y+1} / 9$$

Utilizando diferentes coeficientes de ponderación podemos obtener filtros de distinto tipo. Este tipo de operadores se utiliza especialmente en el análisis de imágenes de satélite. **(11)**

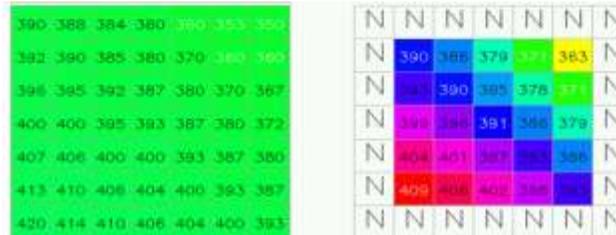


Figura 7 Representación del cálculo por filtrado de capas.¹⁸

El filtrado en los Modelos Digitales de Elevación sirve a dos propósitos: suavizar o realzar los modelos, así como para reducir datos. El suavizado se utiliza para eliminar detalles, o hacer en general la superficie más suave. El realce, en cambio, resalta las discontinuidades, y elimina las zonas suaves.

Los procesos también sirven para reducir volumen de datos. Una reducción de datos de este tipo puede ayudar a eliminar datos redundantes dentro de una tolerancia de digitalización y ahorrar espacio en disco y tiempo de proceso, o reducir la resolución del modelo. Puede usarse también como preproceso en la generalización de Modelos Digitales de Elevación, o para convertir un modelo de rejilla en una red irregular de triángulos. **(4)**

Cálculo de descriptores estadísticos: Es el caso de la media, mediana, valores extremos o el rango de valores, valores discretos, los cuales son comunes y tienen como parámetro el número de clases, que no es más que el número de las celdas con valores distintos dentro de la ventana de análisis.

Operaciones matemáticas: No solo combinaciones lineales, sino usan también operadores más complejos.

Clasificación: En función de la configuración de los valores de la ventana se clasifican las celdas en posibles grupos, de acuerdo con reglas definidas. El resultado de esta operación es en una capa discreta mientras que las demás son capas continuas. El objetivo de estas técnicas es realizar el agrupamiento de los elementos en grupos o clases con propiedades significativamente diferentes entre sí. **(3)**

Se tiene que tener en cuenta que a la hora de escoger el tamaño de la ventana de análisis, por un lado si aumentamos el tamaño de la ventana sería más costoso el análisis de un número mayor de celdas, la otra

¹⁸ A la izquierda la matriz a calcular la media aritmética y a la derecha el resultado después de aplicar la fórmula matemática.

opción nos elimina este problema pero tenemos que tener en cuenta que el cálculo que queremos realizar es con cifras lo más cercanas a la realidad, no por números de celdas.

Otro problema que se presenta a la hora de escoger las ventanas es que algunas celdas no entraran en la ventana de análisis mayormente son la de los bordes, por lo que se tiene que definir si se toman en cuenta sin ningún valor definido o trabajar únicamente con las que se encuentran dentro de la capa. Se puede crear una formulación para las celdas del borde, trabajar con las celdas de la capa o definir en la capa resultante un valor sin dato para estas celdas, todo obedeciendo si los valores resultantes dependen de los entrados. Por lo que más recomendado es escoger la ventana de forma tal que englobe estas celdas de los bordes para que se haga más exacto a la hora del cálculo.

2.1.1.1.3 Funciones Zonal o regional

La utilidad de este tipo de operadores es que permiten superar los análisis celda a celda, característica de los operadores locales o de vecindad para llevar a cabo el análisis sobre agrupaciones homogéneas de celdas. El valor de cada una de las celdas de la capa resultante es función del valor de todas las celdas que están conectadas con ellas que tengan un mismo valor para una de las capas de entrada.¹⁹

Es decir, asocian valores relativos no ha dicha celda, ni a un entorno fijo, a diferencia de la focal esta función escoge los valores a calcular dependiendo de la clase que tenga esta celda.

La definición de las clases se puede realizar de dos formas:

- Todos los valores de las celdas con el mismo valor que la celda problema conectadas con esta, es decir, todas las celdas continuas a esta.
- Todos los valores de las celdas con el mismo valor que la celda problema que se encuentran en toda la capa.

En la figura se observa en la figura a) los valores continuos a la celda problema y en la b) los valores iguales a la celda problema.

¹⁹ Celdas que pertenecen a la misma clase que la celda problema.

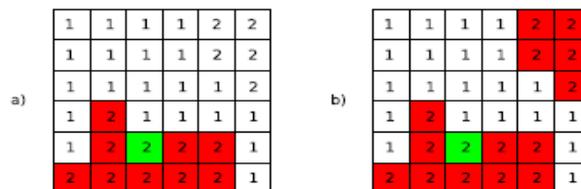


Figura 8 Formas de escoger las clases en la función zonal.

La celda en verde es la de análisis y las rojas son las que se van a emplear en el cálculo.

Al igual que en las otras funciones se pueden realizar diferentes tipos de operaciones como las aritméticas, estadísticas y lógicas. **(3)**

2.1.1.1.4 Función Global

Estas funciones son las que utilizan todos los valores de la capa para obtener el resultado final. Por su forma de operar esta función no devuelve una capa sino que el resultado es un objeto geográfico o un valor específico.

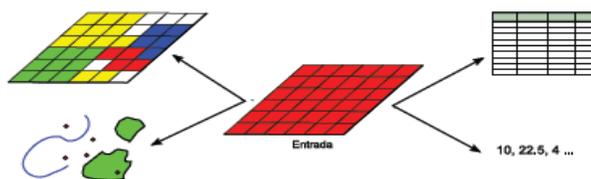


Figura 9 Resultados de una función global.

Las funciones de análisis global analizan el conjunto de valores de una capa para obtener un valor resultante, que puede ser un objeto geográfico (capa ráster o vectorial), como un valor escalar sencillo, una tabla u otro tipo de resultado.

En la función local se vieron las operaciones entre dos capas para obtener otra, por ejemplo en una capa resultante de la variación del suelo después de haber interceptado dos capas, se ve donde hay o no variación debido a los valores obtenidos. Entonces la función global lo que hace es coger ese resultado final y trabaja sobre ella pudiendo definir en qué tiempo vario el suelo dada dos capas iniciales del suelo. **(3)**

Debido a que los operadores globales trabajan sobre toda la capa hay momentos convenientes en los que no se necesitan todos los valores de la capa, debido a que la capa ráster tiene una forma rectangular no siempre el área analizar toma toda la capa por lo que en esta función es de vital importancia el uso de máscaras para desechar los valores que no tienen ningún interés para el cálculo de la misma.

2.1.1.1.5 Variables del álgebra de mapas

Las variables principales son los mapas en formato ráster y diferentes valores escalares que podemos combinar con los anteriores, como también se puede ver en las diferentes funciones que estas se realizan con una capa o varias capas.

Existe el caso de que cuando se realicen las funciones entre dos capas las dos tengan la misma estructura, lo que hace el proceso menos complejo debido a que poseen las mismas dimensiones las ventanas, un mismo tamaño de celdas y la misma georreferenciación. Pero si las capas tienen diferentes estructuras y procedencias se tiene que realizar un remuestreo, es decir, cuando se tienen dos capas con dimensiones $n \times m$ y necesitamos calcular las celdas correspondientes a cada capa, entonces tenemos que hacer un remuestreo debido a la diferencia que existe entre ellas.

2.1.1.1.6 Remuestreo

Es la preparación de las capas para adecuarlas a un mismo marco geográfico sobre el aplicar las funciones del álgebra de mapas de forma adecuada. Si este marco consiste en una malla de $n \times m$, y las coordenadas de cada celda i, j son respectivamente x_{ij} e y_{ij} , deben calcularse los valores de las capas en esas coordenadas a partir de los valores en los marcos de referencia originales.

Para el remuestreo se utilizan diversos métodos como:

Por vecindad: Calcula la nueva malla situando valores que se calculan por mera vecindad, tomando el de la celda más cercana.

Este método suele llamarse interpolación de orden cero y se resuelve con una función de redondeo. Al punto de coordenadas reales (x, y) se le asigna la altitud del elemento de la matriz más cercano; la fila corresponde con el entero más próximo a la coordenada y , y la columna con el de la coordenada x :

$Z_{x,y} = Z_{i,j}$; donde $i = \text{int}(y)$ y $j = \text{int}(x)$, x, y valores aproximados del punto de coordenadas reales (x, y) al punto problema.

Esta opción no suele ser aceptable en el tratamiento de los modelos digitales, donde se desean errores reducidos, tanto en el plano XY como en la altitud. Es más interesante la realización de una interpolación bilineal utilizando los 4 valores más próximos al punto problema. **(21)**

Interpolación bilineal: Para una celda i', j' en la nueva malla, está dada por la fórmula siguiente trabajando con las 4 celdas más cercanas a ella.

$$z(i', j') = z(i, j)R(-a)R(b) + z(i, j+1)R(a)R(-(1 - b)) + z(i+1, j)R(1 - a)R(b) + z(i+1, j+1)R(1 - a)R(-(1 - b))$$

Donde $R(x)$ es una función triangular de la forma: **(3)**

$$R(x) = \begin{cases} x + 1 & \text{si } -1 \leq x \leq 0 \\ 1 - x & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Interpolación bicúbica: Es un método de interpolación multivariante bidimensional que emplea 16 celdas para el cálculo en vez de 4 como en el bilineal y un polinomio en tercer grado para cada una de las direcciones.

Cuando se va a elegir el método que se va a utilizar para el remuestreo, hay que tener en cuenta el tipo de información que tiene la capa. Una diferencia que se tiene que tener en cuenta es que de los métodos anteriores el del vecino más cercano es el único que garantiza que los valores resultantes existen como tales en la capa origen, lo que hace que este sea el único método que puede realizarse a la hora del remuestreo de capas categóricas. **(3)**

2.1.1.2 Análisis hidrológico

Las relaciones hidrológicas que ocurren en una cuenca se pueden estudiar a través de modelos que simplifiquen y representen los distintos fenómenos que suceden al interior de ésta, siendo los modelos matemáticos una herramienta importante en la captura de las diferentes variables que caracterizan a la hidrología. Así, los modelos matemáticos permiten representar un sistema hidrológico por medio de relaciones lógicas y cuantitativas, capaces de ser modificadas para observar cómo el sistema reacciona. **(27)**

En el contexto del análisis hidrológico, un objeto o bien podría representar las características físicas de una corriente de agua o una red de drenaje, mientras que el comportamiento del objeto se le atribuyen los procesos hidrológicos que en ellos acontecen. Importante resaltar que el estado y el comportamiento son conceptos que se tratan por separado. Las variables de estado se almacenan y se manejan por la base de datos, mientras que la de comportamiento la define la selección del modelo que se vaya a utilizar. **(23)**

2.1.1.2.1 Cálculo de flujo

El proceso de construcción de una línea de flujo a partir de un punto inicial, es interactivo y consta de tres fases fundamentales.

1. Se fija el punto inicial de la línea. $P(i)$

2. Se calculan las pendientes hacia sus 8 vecinos más próximos, se pueden dar tres casos:
 - a) Todas las pendientes son negativas (se trata de una concavidad): fin de la línea.
 - b) Todas las pendientes son negativas y el punto está en el borde del MDE (la cuenca continua probablemente fuera de los límites del MDE): fin de la línea.
 - c) Se localiza al menos un punto con pendiente positiva: se elige el punto con pendiente máxima.
3. Punto elegido (pendiente máxima) se incorpora a la línea de flujo y se toma como base para resolver el paso 2. **(26)**

2.1.1.2.2 Cálculo de la Capacidad de escorrentía.

Definición de escorrentía: Corriente de agua que rebosa su depósito o cauce natural o artificial, erosión producida por una corriente de agua. **(12)**

Topmodel es un modelo hidrológico muy extendido en el que el parámetro **I** representa la capacidad de cada celda para producir escorrentía.

El cálculo del parámetro **I** de Topmodel se calcula mediante la ecuación:

$$I = \ln(a' / \tan B)$$

Donde **B** es la pendiente, que se calcula mediante un operador de vecindad, y **a'** es el área tributaria específica (el área de la cuenca vertiente a la celda dividido por la anchura de la celda) que se calcula mediante un operador zonal. **(12)**

2.1.1.2.3 Cálculo de la pendiente de una cuenca según el método de Horton.

Con frecuencia basta con medir la pendiente media del cauce principal, pero en ocasiones necesitamos calcular la pendiente media de toda la superficie de la cuenca. Se representa una cuenca, a la que se ha superpuesto una cuadrícula regular²⁰.

Para el método de Horton según Viessman se siguen los siguientes pasos:

Se cuentan los puntos de intersección de las líneas verticales con cualquier curva de nivel.

Luego se mide la longitud de los tramos verticales de la rejilla dentro de los límites de la cuenca.

Se calcula mediante la siguiente fórmula la pendiente vertical:

$$Pv = n * e / \Sigma Lv$$

n es el número de intersecciones con la cuenca.

²⁰ Menor espaciado de la cuadrícula dará mayor precisión, pero también más trabajo.

e es la distancia entre las curvas de nivel.

ΣL_v es la sumatoria de las longitudes verticales de la cuadrícula.

Se calcula la pendiente de la misma forma pero horizontalmente.

Luego se calcula la pendiente de la cuenca realizando la media, de la siguiente forma:

$$P_m = P_v + P_h / 2 \quad (13)$$

2.1.1.2.4 Reclasificación de pendiente

La inclusión de operadores lógicos y condicionales permite elaborar operadores complejos en los que no sólo los valores sino también las operaciones que definen la capa de salida dependan de los valores en las capas de entrada. El caso más simple sería la reclasificación o cálculo del nuevo valor a partir del valor de la misma celdilla en otra capa en base a un conjunto de reglas sencillas de reclasificación.

Por ejemplo, muchas metodologías de estudios de impacto ambiental no trabajan directamente con los valores de pendiente sino con las pendientes reclasificadas. La operación de reclasificación se haría, suponiendo que la capa S contiene la pendiente en tanto por ciento y que queremos generar una capa de pendientes reclasificadas a la que llamaremos S_r , con órdenes del tipo:

Si $S < 3$ entonces $S_r=1$: Pendiente baja

Si $3 \leq S$ AND $S < 10$ entonces $S_r=2$: Pendiente moderada

Si $10 \leq S$ AND $S < 25$ entonces $S_r=3$: Pendiente media

Si $25 \leq S$ AND $S < 50$ entonces $S_r=4$: Pendiente alta

Si $S \geq 50$ entonces $S_r=5$: Pendiente muy alta **(11)**

2.1.1.3 Describir los tipos problemas.

Los procesos hidrológicos que se desarrollan en las cuencas hidrológicas son similares: precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento, entre otros. La relación entre estos procesos puede ser estudiada a través de modelos que simplifiquen y representen los distintos fenómenos que suceden al interior de la cuenca. En este contexto, la predicción y el modelado digital representan una alternativa interesante para la generación de información hidrológica de variables dinámicas como las precipitaciones, los caudales y la pérdida de suelos. **(32)**

El desarrollo de estos métodos indirectos de evaluación de los recursos hídricos, sumado a los avances computacionales y a la masificación de los Sistemas de Información Geográfica, ha permitido el análisis

de los procesos hidrológicos considerando intervalos de tiempos más cortos y con un mayor detalle espacial dentro de la cuenca. **(30)** En la construcción de los modelos hidrológicos de una zona dada es necesario tener en consideración el comportamiento de cada uno de los parámetros que componen el balance hídrico, especialmente, el comportamiento de la variable precipitación por su influencia directa en el comportamiento del resto de las variables del balance.

Se entiende por balance hídrico o hidrológico al balance cuantitativo que se establece entre los ingresos y las pérdidas de agua que tiene lugar en un objeto de estudio determinado y durante un período de tiempo específico. Este concepto está siempre relacionado con el de ciclo hidrológico donde se tiene en cuenta la distribución y el movimiento del agua, bajo y sobre la superficie del suelo. Por tanto, el balance hídrico constituye un proceso global que gobierna el ciclo hidrológico y que en su concepción más simple está representado por la siguiente ecuación:

$$P - E - ETR - I +/- \Delta S = 0 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

P: Precipitación medio anual en mm

ETR: Evapotranspiración Real medio anual en mm

I: Infiltración medio anual en mm

ΔS : Variación del almacenamiento hídrico (a largo plazo ≥ 10 años, su valor es poco importante, es igual a cero).

E: Escurrimiento superficial medio anual en mm.

Como puede observarse, los valores estimados de los elementos del balance permiten concluir cuando hay un desequilibrio hídrico o un balance entre las variables hidrológicas permitiendo saber si existe algún problema en cuanto a inundación o escorrentía por precipitaciones. Aclarando que las variables hidrológicas tienen una fuerte relación, debido a que una crea la otra en el ciclo del modelo hidrológico.

El caudal se calcula mediante la ecuación de balance hídrico de largo plazo, en la que se considera que el cambio en el almacenamiento es despreciable frente a los cambios de los otros flujos involucrados (precipitación y evaporación real), y se escribe como $R = P - E$, donde R es la escorrentía, P es la precipitación y E es la evaporación real.

El aguacero más desfavorable aporta información acerca de la variabilidad de la lluvia en el espacio y el tiempo, es decir, donde, cuando, qué cantidad y con qué intensidad precipita. La segunda fase del modelo consiste en averiguar que fracción de agua de lluvia se convierte en escorrentía, o lo que es lo mismo se

trata de estimar la lluvia efectiva, la que impacta más en el suelo.

Escorrentía: Existen dos tipos de escorrentía, la escorrentía superficial y la subterránea. La escorrentía superficial es el agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. Esta es en función de las características de la cuenca y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la misma. Luego se produce la infiltración y cuando la capacidad de almacenamiento del suelo, ya descontada la infiltración, está en límite se inicia el proceso de circulación superficial del agua. **(36)**

Infiltración: Cuando comienzan las abundantes precipitaciones el suelo almacena cierta cantidad de agua se inicia el proceso de infiltración a capas inferiores. Luego de ocurrir la infiltración y el suelo estar saturado de agua se produce la escorrentía subterránea. La infiltración o percolación está dada por la abundante agua en la superficie de la tierra y está condicionada por las grandes precipitaciones.

En el ámbito de los SIG las operaciones para el análisis integrado del riesgo por inundaciones emplean casi siempre funciones de superposición algebraica de las coberturas que representan los componentes. **(29)** Esto se refleja en el uso de varios mapas de representación de alguna variable continua como es el caso de las precipitaciones, temperatura, presión atmosférica. Los mismos son utilizados e interpolados para obtener una nueva capa resultante, donde se pueda percibir y calcular otro parámetro o variable hidrológica, tal es el caso de las inundaciones o infiltraciones.

Todas las fases del modelo hidrológico permiten la toma de decisiones en cuanto las probabilidades de inundaciones o de catástrofes naturales, debido a que las variables que lo conforman contribuyen a orientación de la ubicación de las cuencas y ayuda a la toma de medidas de ingeniería necesarias para minimizar los posibles daños causados por un evento natural, de manera que se mejore o se preserve el entorno y se reduzca la vulnerabilidad ante dichas amenazas.

Las modelizaciones hidrológicas en conjunto a álgebra de mapas como herramienta para los cálculos matemáticos, permiten predecir problemas que contribuyen al balance del medioambiente.

- Alteraciones en el comportamiento hidrológico frente a acciones naturales y antrópicas²¹.
- Cuantificar el impacto que produciría un incremento generalizado del riego en los procesos

²¹ **Antrópicas** referido al efecto ambiental provocado por la acción del hombre.

hidrológicos y su vulnerabilidad frente a procesos de contaminación.

- Permite simular el comportamiento a largo plazo de los flujos y almacenamiento de los componentes superficial y subterráneo.

2.1.1.4 Herramientas y tecnologías existentes.

Hoy día el desarrollo de herramientas y tecnologías que tributan al modelado de fenómenos ambientales son la vía para el manejo y análisis de fenómenos ambientales, grandes empresas y para la toma de decisiones. El diseño e implementación de las mismas requieren de un mayor compromiso y exactitud por parte de los desarrolladores debido al constante manejo y cálculo de datos que representan cada característica del mundo real.

2.1.1.4.1 ID+GIS

El análisis y la evaluación de los riesgos constituyen una herramienta innovadora para la gestión de presas y embalses, ID+GIS²² es un sistema de gestión de integridad de ductos basados en la tecnología SIG que permite mejorar la eficiencia en la operación de los ductos.

La aplicación de riesgo hidrológico permite realizar análisis hidrológico, destinado a la prevención de escurrimiento en instalaciones de superficie y ductos. A partir de las cuencas y redes de drenaje creadas a partir de un modelo digital de elevaciones, esta aplicación permite realizar:

1. Determinación de la cuenca de aporte: la cuenca de aporte de un punto de interés es delineada automáticamente por la aplicación utilizando la información de direcciones de flujo del MDE. Combinando la cuenca con información de suelos y uso de la tierra, el sistema reporta el curso más largo, la pendiente promedio y un perfil topográfico.
2. Transformación lluvial-caudal: Esta permite calcular para una lluvia definida el caudal de agua que escurrirá y su tiempo de concentración. **(20)**

2.1.1.4.2 HEC-RAS

La hidráulica fluvial trata de las intervenciones humanas en los ríos para su adecuación al aprovechamiento de los recursos o la reducción de los riesgos de daño. Las simulaciones hidráulicas nos presentan una manera de análisis de interrelación entre la topografía del cauce de un río los volúmenes de

²² ID+GIS acrónimo de Sistema de Gestión de Integridad de Ductos basados en la tecnología SIG.

agua y sedimentos transportados, así como la manera que influyen en el nivel de agua las obstrucciones u obras hidráulicas que se presenten en su cauce. Siendo una herramienta muy útil para entender estos temas y darle soluciones a problemas planteados en el manejo de causas naturales, es el software de simulación hidráulica HEC-RAS. Es un paquete integrado de análisis hidráulico, programa en el que el usuario actúa recíprocamente con el sistema a través del uso de una interface gráfica del usuario. El sistema es capaz de realizar cálculos de flujos de la superficie del agua. **(18)**

Se utiliza en el diseño de puentes, en el cálculo del daño que puede ser producido por el paso del agua en los pilares y estribos lo que evita un posible derrumbe del mismo al pasar de los años. En la planicie de los terraplenes de una carretera, para determinar la planicie de inundación y planificar el desarrollo urbano de una ciudad. Las simulaciones efectuadas nos proporcionan información básica para la evaluación hidráulica de un cauce y también nos permite agregar otros elementos que nos permiten representar otros elementos del cauce principal como las obstrucciones y características específicas del mismo.

2.1.1.4.3 Hidro-SIG

Es un sistema de información geográfico (SIG) para la estimación, despliegue, análisis y consulta interactiva de las variables más importantes del ciclo hidrológico en Colombia, tales como precipitación, evaporación potencial y real y escorrentía.

El SIG ha sido creado utilizando el lenguaje IDL. Es un SIG flexible y versátil para la estimación hidrológica en cuencas con y sin medición, ya que permite estimar los caudales promedios de largo plazo en cualquier punto de la hidrografía. Se hizo un esfuerzo por estimar los campos de precipitación y evaporación utilizando la mayor cantidad de datos disponible, así como técnicas de estimación e interpolación de campos aleatorios. Se elaboraron mapas digitales necesarios para la estimación de las variables básicas del ciclo hidrológico.

Se construyen mapas de precipitación usando varias técnicas geoestadísticas de interpolación y se calcula el caudal mediante la ecuación de balance hídrico de largo plazo. **(28)**

Otra herramienta de gran utilidad es la rutina implementada para localizar regiones con condiciones climáticas particulares, ésta permite combinar los mapas en la base de datos para detectar regiones que cumplen con un conjunto de restricciones dado. Ejemplo se presenta en el que se combinan los mapas de topografía y precipitación con las restricciones altura mayor que un valor especificado y precipitación

media anual mayor que otro valor , las cuales podrían ser favorables desde el punto de vista agrícola para algún cultivo particular. **(31)**

2.1.1.4.4 ArcHydro

ArcHydro es un sistema para apoyar las solicitudes de los recursos hídricos. Se compone de dos componentes claves:

- Modelos de Datos ArcHydro.
- Herramientas de ArcHydro.

Estos dos componentes, junto con el marco de la programación genérica, ofrecen un diseño de base de datos básica y un conjunto de herramientas que facilitan el análisis de frecuencia se realiza en el área de los recursos hídricos. ArcHydro está destinado a proporcionar la funcionalidad inicial, que luego se puede ampliar añadiendo a ella las estructuras de base de datos y funciones requeridas por una tarea específica o la aplicación.

La estructura de ArcHydro se apoya en tres pilares básicos: a) Un formato estándar para almacenar la información hidrológica de carácter espacial y temporal; b) el establecimiento de relaciones espaciales lógicas entre los elementos hidrológicos; c) un conjunto de herramientas que permiten la creación, manipulación y visualización de la información hidrológica. **(35)**

2.1.1.4.5 GRASS

Geographic Resources Analysis Support System; Sistema de soporte al análisis de recursos geográficos. Es una aplicación GIS de código abierto y por tanto gratuito. Es un buen sistema para operar con datos ráster y está muy extendido en el ámbito académico. El código fuente es mantenido por una red de desarrolladores de muchas partes del mundo. **(18)**

Módulos de GRASS: Módulos de análisis de imágenes de satélite.

Al margen de los incluidos en esta sección, los módulos de visualización de mapas ráster son evidentemente útiles tanto para realizar un análisis visual previo de la información de partida, como para ver los resultados de muchos de los análisis. Por otro lado r.mapcalc permite programar diversos algoritmos útiles en teledetección:

- Cálculo de índices.

- Algoritmos sencillos de clasificación como los del vecino más próximo, árboles de decisión que en definitiva se basan en operadores locales de álgebra de mapas.
- Otras técnicas de teledetección se basan en operadores de vecindad y pueden también programarse con `r.mapcalc` o bien calcularse con comandos ad hoc como `r.filter` o `r.neighbors`. **(38)**

Con esta herramienta se puede determinar la dirección de drenaje. Para ello se recurre al método más utilizado llamado algoritmo D-8, que aplica un operador de vecindad de álgebra de mapas para asignar a cada celda la vecina, con un valor menor, respecto a la que tiene mayor pendiente. La aplicación de este algoritmo se desarrolla con el módulo `r.watershed` de GRASS, que permite eliminar las depresiones ficticias presentes en un MDE. Solventa los problemas del método, eliminando las depresiones del MDE y asignando direcciones a las áreas llanas resultantes, de forma que el flujo salga del área por el punto con menor elevación.

Las estimaciones de pérdidas de suelo por erosión se calculan según los modelos USLE y MUSLE, muy extendidos en este tipo de estudios. Ambos modelos se basan en la determinación de una serie de parámetros de naturaleza empírica algunos de los cuales se componen de factores con unos valores predeterminados en tablas publicadas en numerosas obras científicas. Tanto el cálculo de los parámetros constituyentes de los modelos, según los factores que los definen, como los valores de estimación de pérdidas de suelo derivados de los mismos, se calculan con el módulo `r.mapcalc` de GRASS, que constituye una potente herramienta de álgebra de mapas. **(33)**

2.1.1.4.6 GDAL

Es la biblioteca de acceso a datos ráster, soporta decenas de formatos y es multiplataforma. Su principal creador, Frank Warmerdam uno de los más importantes desarrolladores del mundo. Una librería para formatos de datos geoespaciales ráster, tiene cuatro características principales:

Variedad: Soporta más de 40 formatos ráster.

Abstracción: Cualquier aplicación que emplee GDAL accede automáticamente a esos 40 formatos.

Herramientas: Las herramientas que emplean GDAL posiblemente ahorren esfuerzos de programación.

Funciones: Sus funciones pueden ser empleadas por programadores de distintos lenguajes: C, C++, Python. Para otros lenguajes, puede emplearse SWIG (Perl, Java, PHP, Ruby, etc.)

En resumen: No hay que preocuparse del formato de una imagen para poder analizarla y emplearla. **(39)**

2.1.1.4.7 Quantum GIS (QGIS)

Quantum GIS es un Sistema de Información Geográfica de código libre para plataformas Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite manejar formatos raster y vectoriales, así como bases de datos. QGIS está desarrollado en C++, usando la biblioteca Qt para su Interfaz gráfica de usuario.

Algunas de sus características son:

- Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
- Manejo de archivos vectoriales *Shapefile*, *ArcInfo coverages*, *Mapinfo*, GRASS GIS.
- Soporte para un importante número de tipos de archivos raster como GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG

Realiza el análisis espacial utilizando el plugin de GRASS integrado, incluyendo:

- Álgebra de mapas.
- Modelos Hidrológicos.
- Análisis hidrológico.
- Análisis de redes. **(19)**

2.1.1.4.8 Sextante

Sextante es una biblioteca de algoritmos de análisis espacial de código libre ²³disponible para varios software de Sistemas de Información Geográfica. Su objetivo principal es crear una plataforma que facilite tanto el uso como la implementación de estos algoritmos. Actualmente Sextante contiene más de 240 herramientas de análisis geográfico.

Sextante está programado en Java desarrollado por la Universidad de Extremadura (UNEX) y financiado por la Junta de Extremadura que se distribuye bajo la licencia GPL cumpliendo con los cuatro principios necesarios para clasificarlo como software libre. Algunas de sus utilidades son:

²³ El software libre suele estar disponible gratuitamente, o al precio de costo de la distribución a través de otros medios; sin embargo no es obligatorio que sea así, por lo tanto no hay que asociar software libre a "software gratuito".

- Análisis hidrológico básico.
- Estadísticas de celda para múltiples capas ráster.
- Estadísticas por vecindad para una capa ráster.
- Geomorfometría y análisis del relieve.
- Herramientas básicas para capas ráster.
- Herramientas de análisis para capas ráster.
- Herramientas de cálculo para capas ráster.
- Herramientas para capas ráster categóricas.
- Herramientas para capas discretas e información categórica.
- Herramientas para crear nuevas capas ráster.
- Rasterización e interpolación.
- Índices y otros parámetros hidrológicos.

Actualmente existen adaptaciones de la biblioteca para Geotools, gvSIG y OpenJUMP, y están en desarrollo las versiones para Kosmo, OrbisGIS.

2.1.1.5 Algoritmos informáticos.

Los diferentes tipos de descriptores en los MDE pueden utilizarse conjuntamente para analizar y caracterizar el relieve y sus componentes, así como las variables hidrológicas permiten modelar los diferentes estados de la hidrología. Dado que los procesos geológicos e hidrológicos dejan una huella morfológica sobre las aéreas afectadas, el MDE y sus modelos derivados pueden ser un instrumento de análisis objetivo de gran utilidad. **(42)** Existen diversos algoritmos que se pueden utilizar para el modelado y representación de diferentes parámetros hidrológicos y para el cálculo de variables topográficas como la curvatura y pendiente.

2.1.1.5.1 Trazado de líneas de flujo.

La rutina denominada HIDROPERFIL, construye una línea de flujo con los criterios mencionados, almacenándolo en una estructura tipo VECTOR3MD para permitir su tratamiento posterior. Se define una rutina auxiliar, MAXIPEN, que localiza al vecino con máxima pendiente. Si el valor devuelto es el propio punto de entrada se entiende que no existe posibilidad de continuar el flujo y el perfil se da por terminado.

Construye una línea de flujo con el criterio de máxima pendiente.

HIDROPERFIL (P: Punto2MD; V: Vector3MD; NP: entero)

ARGUMENTOS

P: punto inicial de la línea

V: vector resultado, con la situación (fila, columna, altitud) de los puntos de la línea

NP: resultado con el número de puntos de la línea

LOCALES

MAXIPEN: subrutina que localiza al vecino con valor de máxima pendiente si existe.

FINAL: indica la finalización de la línea (lógico)

EXISTE: indica si se ha encontrado un punto con pendiente positiva (lógico)

S: matriz de 3x3 para las operaciones (Entorno3)

GLOBALES

NFIL, NCOL: número de filas y columnas del MDE (entero)

MAXIPEN (S: Entorno3; P: Punto2MD, EXISTE: lógico)

ARGUMENTOS

S: matriz de 3x3 centrada en el punto problema

P: resultado que contiene el punto hacia el que drena

EXISTE: toma el valor *cierto* si el punto buscado existe y *falso* si no.

LOCALES

I, J: índices (entero)

FSAL, CSAL: auxiliares (entero)

PMAX: pendiente máxima (real)

DIST: distancias (real)

PEND: pendientes (real)

BEGIN

PMAX ← -10000.0

FSAL ← 2

CSAL ← 2

FOR I=1 TO 3 DO

FOR J=1 TO 3 DO

BEGIN

DIST ← SQRT ((I-2) ^2+ (J-2) ^2)

IF DIST=0.0 THEN PEND ← 0.0

ELSE IF S [I, J] <0.0 THEN PEND ← -1000000.0

ELSE PEND ← (S (2, 2)-S (I, J))/DIST

IF PEND>PMAX THEN

BEGIN

PMAX ← PEND

FSAL ← I

CSAL ← J

END

```
END
EXISTE ← (PMAX>0.0)
P.F ← P.F-2+FSAL
P.C ← P.C-2+CSAL
END
BEGIN
NP ← 0
CREAV3 (P, S)
IF S [2, 2]>-1 THEN FINAL ← FALSO
WHILE NOT FINAL THEN
BEGIN
NP ← NP+1
V [NP].F ← P.F
V [NP].C ← P.C
CREAV3 (P, S)
V [NP].Z ← TRUNC(S[2,2])
MAXIPEN (S, P, EXISTE)
FINAL ← NOT EXISTE
END
END
```

El algoritmo propuesto elabora la línea de flujo sin operaciones de interpolación por lo que la distancia entre los datos puede tomar únicamente dos valores: la unidad, en términos del MDE, cuando los datos están en la misma fila o columna, o bien 2, cuando están dispuestos en diagonal. Esto debe tenerse en cuenta en los programas de dibujo o presentación gráfica que puedan utilizarse, así como en el análisis estadístico de parámetros relacionados con la línea de flujo. El trazado de la línea finaliza, cuando se alcanza el borde del modelo, o cuando llega a una depresión o concavidad. **(21)**

2.1.1.5.2 Cálculo de flujo utilizando una matriz de códigos de flujo.

Dado que el sentido del flujo para un punto del modelo es una constante, es posible almacenar éstos en una matriz específica con una codificación adecuada. Disponer de este archivo permite un considerable ahorro de tiempo de proceso en operaciones posteriores, especialmente cuando los cálculos implicados en la rutina MAXIPEN deben repetirse numerosas veces.

Este archivo, que denominaremos de códigos de flujo (CDF) contiene una codificación de los posibles sentidos de la escorrentía superficial, reducidos a 9 valores: el 1 identifica los flujos en dirección al Norte; del 2 al 8, en sentido horario, del NE a NO respectivamente; finalmente, el 9 identifica las concavidades y

zonas planas, en las que el flujo no es posible o queda indefinido.

La rutina que crea los códigos de flujo es similar a MAXIPEN y toma la forma siguiente, devolviendo el valor del código de flujo.

```
FUNCION CODIGO_F (S: Entorno3): entero
ARGUMENTOS
S: matriz de 3x3 centrada en el punto problema
LOCALES
I, J: índices auxiliares (entero)
DIST, PEND, PMAX: variables intermedias (real)
BORDE: define si el punto está en el límite del modelo (lógico)
CODMAT: matriz con los códigos de flujo (matriz de 3x3 de enteros)
BEGIN
CODMAT ← ((8,1,2), (7,9,3), (6,5,4))
PMAX ← -1000.0
BORDE ← FALSO
FOR I=1 TO 3 DO
FOR J=1 TO 3 DO
BEGIN
DIST ← SQRT ((I-2) ^2+ (J-2) ^2)
IF S [I, J] <0 THEN BORDE ← CIERTO
IF DIST>0 AND S [I, J]>-1 THEN
BEGIN
PEND ← (S [2, 2]-S [I, J])/DIST
IF PMAX>PEND THEN
BEGIN
PMAX ← PEND
FSAL ← I
CSAL ← J
END
END
END
IF PMAX ≤ 0.0 THEN CODIGO_F ← 9
ELSE CODIGO_F ← CODMAT [FSAL, CSAL]
END
```

La matriz de códigos de flujo es similar al modelo de orientaciones, el modelo de orientación indica el azimut de la línea de máxima pendiente basándose en los cuatro vecinos más próximos y se trata, por tanto, de una pendiente global del entorno del punto problema, mientras que los cálculos de MAXIPEN se aplican a una pendiente local, en la que se analiza individualmente cada vecino del punto sin que el valor

del resto ejerza influencia sobre los resultados parciales. **(21)**

2.1.1.5.3 Problema de las concavidades.

Una solución que ofrece alguna garantía es el "relleno" artificial de las depresiones, operación que puede realizarse mediante métodos diversos. Existe un algoritmo basado en el trazado de líneas de flujo que simula verosímilmente el proceso real de inundación de las depresiones:

1. Se elige un punto $P(i)$ del MDE.
2. Se localiza el punto siguiente de la línea de flujo, $P(i+1)$. Pueden darse dos casos:
 - 2.1 $P(i+1)$ existe: se incorpora a la línea y se continúa en el paso 2.
 - 2.2 $P(i+1)$ no existe, lo que supone el fin de la línea. Pueden darse 2 casos:
 1. El punto $P(i)$ es un límite del MDE: se elige un nuevo punto origen y se repite el proceso desde el paso 2.
 2. El punto $P(i)$ no está en el límite del MDE: se busca la altitud menor de sus 8 vecinos, se asigna a $P(i)$ la altitud mencionada más un metro, se elige un nuevo punto origen y se repite el proceso desde el paso 2.

Aplicando iterativamente el método anterior se consigue modificar paulatinamente la altitud de los puntos que forman una concavidad hasta forzar la conectividad hidrológica. El proceso modifica necesariamente el modelo de elevaciones original por lo que en algunos casos debe ser aplicado con precaución y los resultados deben interpretarse teniendo en cuenta el contexto en el que se obtienen. **(21)**

2.1.1.5.4 Delimitación de cuencas.

El análisis de cuencas de drenaje presenta algunos problemas especiales que deben tenerse en cuenta para un buen funcionamiento de los algoritmos. Entre estas dificultades destaca la existencia formas cóncavas, en las que la línea de flujo finaliza al no encontrar pendientes positivas. La delimitación de cuencas, supuesta la conectividad hidrológica, no debe presentar dificultades especiales. Uno de los algoritmos más citados por Collins, opera de la forma siguiente:

1. Los puntos del MDE se ordenan en función de su altitud. El orden de dos puntos con el mismo valor de elevación no tiene importancia. A todos se les asigna un cero como número de cuenca.
2. Se localiza el punto $P(i)$ de menor altitud del MDE. Se le asigna el número de cuenca 1.
3. Se localiza el punto siguiente de mínima altitud $P(j)$ y se examinan los valores de cuenca de los 4 vecinos más próximos del mismo. Pueden ocurrir 3 casos:

3.1. Uno o más tienen algún valor diferente de cero pero igual entre sí: al punto $P (j)$ se le asigna este mismo valor. Se continúa en el paso 3.

3.2. Ninguno de ellos tiene un valor previo diferente de cero: se le asigna a $P (j)$ un nuevo número de cuenca. Se sigue en el paso 3.

3.3. Dos o más tienen números de cuenca diferentes de cero y diferentes entre sí: el punto $P (j)$ es una divisoria de cuencas por lo que se le asigna un valor especial. Se sigue en el paso 3.

Se ha comprobado que el algoritmo de Collins no funciona satisfactoriamente cuando se aplica en su forma original, aún en ausencia de pozos o artefactos similares, ya que es frecuente que los datos con la misma altitud no sean adyacentes, con lo que se multiplican las cuencas y las líneas divisorias, efecto especialmente notable si el análisis de los vecinos se realiza exclusivamente con los 4 más próximos.

2.1.1.5.5 Método alternativo basado en la rutina de trazado de líneas de flujo.

Este método presenta la ventaja de su simplicidad conceptual y de su similitud con los procesos existentes en la realidad. Se desarrolla este método en el cual se les asigna inicialmente el valor de cuenca 0 a todos los puntos del MDE; a continuación se sigue el proceso siguiente:

1. Se elige un punto $P (j)$ del MDE y se comprueba si está asignado a alguna cuenca. En caso afirmativo se continúa con el siguiente punto del modelo; en caso negativo se calcula su línea de flujo, compuesta por n puntos.

2. Se comprueba el valor de cuenca del último punto de la línea.

Pueden presentarse dos casos:

2.1. El punto final de la línea no está asignado aún a ninguna cuenca (mantiene el valor 0): se asigna a todos los puntos de la línea un nuevo valor de cuenca y se inicia el proceso con el siguiente punto del MDE.

2.2. El punto final de la línea es diferente de cero, lo que implica que la línea de flujo comunica con una cuenca preexistente: todos los puntos pertenecientes a la línea actual se asignan a esa cuenca y se inicia el proceso en 1 con un nuevo punto del modelo.

El proceso continúa hasta que todos los puntos del MDE han sido barridos una vez. Puede notarse que

todos los puntos se asignan a una cuenca, sin que existan puntos con códigos especiales (como las divisorias de cuencas en el algoritmo de Collins). El proceso es de ejecución relativamente rápida ya que se utiliza la matriz de códigos y sólo se traza la línea de flujo para puntos que no han sido asignados previamente a ninguna cuenca y, por tanto, mantienen el valor inicial de cero.

Aunque el método puede realizarse partiendo de cualquier punto del modelo, resulta preferible operar eligiendo los puntos por orden decreciente de altitud. De esta forma, los perfiles iniciales son los más largos y barren el mayor número de puntos del modelo. La rutina CUENCA, realiza la asignación de cuencas trazando perfiles hidrológicos desde el punto más elevado, en orden decreciente de altitud. Crea una matriz a cuyos elementos se les asigna el número de cuenca fluvial o depresión a la que pertenecen.

CUENCA (Q: Vector3MD; CD, Z: MatrizMD)

ARGUMENTOS

Q: vector con los puntos ordenados por altitud

CD: matriz con los códigos de flujo

Z: matriz con la asignación de cuencas

LOCALES

I, K: índices (entero)

V: vector de almacenamiento temporal (Vector3MD)

NP: número de elementos del vector V (entero)

NCUENCA: número de cuenca actual (entero)

LINFLUJO: rutina de cálculo de la línea de flujo

GLOBALES

NFIL, NCOL: número de filas y columnas de las matrices (entero)

BEGIN

NCUENCA ← 0

NPUNTOS ← NFIL*NCOL

FOR I=1 TO NPUNTOS DO

IF Z [Q [I].F, Q[I].C]=0 THEN

BEGIN

P.F ← Q [I].F

P.C ← Q [I].C

LINFLUJO (P, V, NP)

IF Z [V [NP].F, V [NP].C] =0 THEN

BEGIN

NCUENCA ← NCUENCA+1

FOR K=1 TO NP DO Z [V [K].F, V [K].C] ← NCUENCA

END

ELSE

FOR K=1 TO NP-1 DO Z [V [K].F, V [K].C] ←

Z [V [NP].F, V [NP].C]

END
END

El resultado del algoritmo anterior es una matriz con las cuencas de drenaje numeradas en función de la altitud máxima de su cabecera. **(21)**

2.1.1.5.6 Autómatas celulares.

Las características topográficas de una ladera determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. Los MDE contienen información suficiente para definir, al menos en una aproximación las propiedades de la red de drenaje y de las cuencas hidrográficas, para lo cual se pueden utilizar una serie de algoritmos denominados autómatas celulares (AC). Estos algoritmos han sido poco utilizados en los SIG, pero se pueden utilizar por dos razones: representan una forma de abordar los problemas de una forma diferente de la convencional, y la otra es que pueden ofrecer soluciones nuevas a algunos problemas más difíciles de tratar por otros medios.

Autómatas celulares: Un AC es un modelo matemático que simula sistemas dinámicos y que puede utilizarse para modelar procesos reales. Los AC pueden funcionar en espacios de d dimensiones. Funcionan sobre una matriz regular d -dimensional, por lo que pueden ser aplicados directamente al caso de los MDT matriciales.

En el contexto bidimensional, los AC obedecen a un conjunto de reglas:

1. La organización matricial define el universo de celdas o lugares sobre los que se desarrolla el proceso.
2. Cada celda puede adoptar un valor a , dentro de un conjunto finito de valores: a_1, a_2, \dots, a_k .
3. Los valores de cada celda se actualizan a intervalos de tiempo finitos y discretos, $t, t+1, \dots$ hasta que le proceso finaliza.
4. La asignación de valores a cada celda i , obedece a una función o regla de propagación que depende del valor de la propia celda y de los vecinos más próximos; por ejemplo:

$$a_{i,j}^{(t+1)} = \xi[a_{i,j}^t, a_{i-1,j}^t, a_{i+1,j}^t, a_{i,j-1}^t, a_{i,j+1}^t] = \xi[Ua^t]$$

Donde $a_{i,j}^{(t+1)}$ en i, j es el valor de la celda $a_{i,j}$ en la iteración $(t+1)$; la expresión de la derecha, más

resumida, se interpreta como el conjunto de estados del entorno de la celda problema. En el interior de la matriz debe especificarse un entorno que cada celda debe examinar para pasar por los estados de a a t al de a^{t+1} . (42)

2.1.1.5.6.1 Generación de líneas de flujo.

SE denomina línea de flujo al trayecto que, a partir de un punto inicial, seguiría la escorrentía superficial sobre el terreno. Las líneas de flujo dentro de un MDE siguen la línea de máxima pendiente y solo finalizan en los supuestos casos de desembocar en el mar o llegar al borde del modelo y optativamente de alcanzar una concavidad topográfica.

El sentido del flujo para cada celda del MDE es una constante, por lo que el resultado de la simulación es estacionario y no varía a partir de una iteración determinada, en función de la longitud de la línea.

Un AC sencillo que genere las líneas de flujo se puede construir a partir de los datos de altitud de un MDE: Estados: Se trata de un AC binario donde las celdas pueden tomar solo dos valores (0, 1).

$$a^t = \begin{cases} 0 \Rightarrow a \notin L \\ 1 \Rightarrow a \in L \end{cases}$$

Donde L es la línea de flujo.

Entorno: Los vecinos más próximos y la propia celda.

Variables auxiliares: Z , altitud.

Reglas de propagación:

1. El inicio es en una única celda donde $a_{i,j}^0 = 1$
2. La propagación se realiza a la celda que cumpla con la condición de pendiente máxima negativa desde la celda anterior.

Tiempo: El AC funciona hasta que la celda a la que se propaga ya pertenece a la línea de flujo o no existe candidata con pendiente negativa, lo que implica una concavidad o una zona plana sin trayectoria definida.

Importante observar que las pendientes se definen con signos, para diferenciar la pendiente ladera arriba-positiva- de la de ladera abajo-negativa.

Pasos para trazar una línea de flujo:

1. Se señala una celda origen de la línea de flujo: $a_{i,j}^0 = 1$

	ESTADOS, a			VARIABLE, v			TIEMPO, t
	$j-1$	j	$j+1$	$j-1$	j	$j+1$	
$i-1$	0	0	0	z_8	z_1	z_2	0
i	0	1	0	z_7	z_0	z_3	
$i+1$	0	0	0	z_6	z_5	z_4	

2. Definidos los valores de la variable auxiliar para la celda y su entorno se calculan las pendientes locales.

$$P_1 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_1}{d}; P_2 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{2} * d}; \dots P_8 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_8}{\sqrt{2} * d}$$

La regla de propagación define la celda que cambiará de estado en función de los valores de la pendiente que en este caso, tiene signo:

$$a_m^{t+1} \leftarrow 1 \Rightarrow P_m < P_{n * m}$$

Suponiendo que $m=4$, que la pendiente máxima ladera abajo señala la diagonal inferior derecha la transición será:

	$t=0$				$t=1$			
	$j-1$	j	$j+1$		$j-1$	j	$j+1$	
$i-1$	0	0	0	→	0	0	0	
i	0	1	0		0	1	0	0
$i+1$	0	0	0		0	0	1	0
					0	0	0	

El anterior AC genera líneas de flujo que crecen sobre la matriz y cuya longitud depende de las iteraciones necesarias para llegar a que se cumplan algunas de las condiciones de finalización. En cada iteración se calcula para cada celda un sentido de flujo, es decir, la dirección de máxima pendiente ladera abajo en su entorno inmediato. Una línea de flujo está compuesta, por tanto, por una secuencia ordenada de sentidos de flujo.

Los sentidos de flujo individuales pueden ser codificados mediante los denominados códigos de Freeman. En vez de definir una cadena de celdas, como le componen una línea de flujo, por ejemplo, mediante sus

coordenadas, se definen mediante códigos que representan los incrementos de fila y columna. La regla de propagación del AC anterior permite calcular todo lo necesario para generar los códigos de Freeman de las celdas de una línea de flujo pero no los almacena. Una simple variante puede construir en un único paso los códigos para todas las celdas:

Estados: Las celdas pueden tomar 9 valores (0, 1, 2...8). El estado 0 significa que la celda no tiene sentido de flujo, concavidad, o este se es indefinido, zona plana; el estado 1 supone que la celda drena hacia el N, 2 hacia el NE, hasta el 8 que corresponde al NO.

Entorno: Los 8 vecinos más próximos y la propia celda.

Variables: Z, altitud.

Reglas de propagación:

1. Se inicia simultáneamente en todas las celdas, con $a_{i,j}^0 = 0$
2. La propagación se realiza a la celda que cumpla con la condición de pendiente máxima negativa que adopta el estado correspondiente en función de la posición de la celda inicial.
3. Se finaliza en un único paso: $t=1$

El proceso se puede representar de la forma siguiente:

1. Se calcula una celda origen de la línea de flujo $a_{i,j}^0 = 1$

	ESTADOS, a			VARIABLE, v			TIEMPO, t
	$j-1$	j	$j+1$	$j-1$	j	$j+1$	
$i-1$	0	0	0	z_8	z_1	z_2	
i	0	1	0	z_7	z_0	z_3	0
$i+1$	0	0	0	z_6	z_5	z_4	

2. Definidos los valores de la variable auxiliar para la celda y su entorno se calculan las pendientes locales.

$$P_1 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_1}{d}; P_2 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{2} * d}; \dots P_8 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_8}{\sqrt{2} * d}$$

3. La regla de propagación define la celda que cambiará de estado en función de los valores de la pendiente:

$$a_m^{t+1} \leftarrow m \Rightarrow P_m < P_{n \neq m}$$

Suponiendo que $m=4$, es decir, que la pendiente máxima ladera abajo señala la diagonal inferior derecha, la transición será:

	$t=0$				$t=1$		
	$j-1$	j	$j+1$		$j-1$	j	$j+1$
$i-1$	0	0	0	→	0	0	0
i	0	0	0		0	4	0
$i+1$	0	0	0		0	0	0

Repitiendo el proceso para la totalidad de las celdas, se obtiene una matriz de códigos de flujo, cuyos valores indican el sentido de máxima pendiente en función de la topografía local. **(42)**

2.1.1.5.6.2 Definición de cuencas hidrológicas

La delimitación de cuencas hidrográficas puede realizarse mediante un AC simple. Para ello se deben definir dos conceptos importantes:

1. Se define el área subsidiaria de una celda como el conjunto de elementos del MDE cuyas líneas de flujo convergen en ella.
2. Por extensión, una cuenca hidrológica está formada por el área subsidiaria de una celda singular, que actúa como sumidero.

Por tanto, el área subsidiaria puede establecerse para cualquier celda del MDE, mientras que no todas las celdas son sumidero de una cuenca hidrológica. De cualquier forma un AC puede comenzar en una celda arbitraria, sin establecer necesariamente condición alguna de singularidad.

Existe el algoritmo citado por Collins, el cual no funciona satisfactoriamente cuando se aplica en su forma original y si el análisis se realiza exclusivamente con los 4 vecinos más próximos. También Felicísimo se propone un método alternativo basado en líneas de flujo, el cual es inicialmente se le asigna el valor de cuenca 0 a todos los puntos del MDE. Finalmente, el método basado en AC está diseñado para definir la cuenca subsidiaria de un punto, aspecto que no está cubierto por los métodos anteriores.

En efecto, cuando se trata de definir la totalidad de cuencas de un MDE no hay problema en iniciar el proceso en cualquier celda y repetirlo para cada una de las restantes en cualquier orden, ya que todas deben ser asignadas a una cuenca correcta. Sin embargo, es posible conocer con antelación cual es el camino de los perfiles topográficos de cada celda.

Por este motivo, para definir que celdas forman parte de la cuenca subsidiaria de un punto por el método anterior es necesario ejecutar el proceso para todas las celdas del modelo y descartar los perfiles que no pasen por el punto problema. Aunque es posible diseñar algoritmos que incrementen la eficacia del análisis, es obvio que un proceso ciego como este no resulta muy eficaz, especialmente par modelos de grandes dimensiones.

El AC permite realizar el proceso en orden inverso, de abajo hacia arriba, partiendo del punto problema. De esta forma, las dimensiones del análisis quedan acotadas y no es necesario el proceso exhaustivo mencionado antes. El AC tiene las siguientes características:

Estados: Se trata de un AC binario donde las celdas pueden tomar solo dos valores (0, 1).

$$a^t = \begin{cases} 0 \Rightarrow a \notin C \\ 1 \Rightarrow a \in C \end{cases}$$

Donde C es el área subsidiaria de la celda origen.

Entorno: Los 8 vecinos más próximos y la propia celda.

Variabes auxiliares: Z, altitud.

Reglas de propagación:

1. El inicio es una única celda donde $a_{i,j}^0 = 1$
2. La propagación se realiza a las celdas que cumpla la condición de pendiente positiva desde la celda anterior.

Tiempo: Se finaliza cuando se alcance el estado estacionario, es decir, no hay cambios de estado entre dos iteraciones.

El proceso se puede representar de la forma siguiente:

1. Se señala una celda origen de la línea de flujo $a_{i,j}^0 = 1$

	ESTADOS, a			VARIABLE, v			TIEMPO, t
	$j-1$	j	$j+1$	$j-1$	j	$j+1$	
$i-1$	0	0	0	z_0	z_1	z_2	0
i	0	1	0	z_3	z_4	z_5	
$i+1$	0	0	0	z_6	z_7	z_8	

2. Definidos los valores de la variable auxiliar para cada celda y su entorno, se calculan los valores de las pendientes locales:

$$P_1 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_1}{d}; P_2 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{2} * d}; \dots P_8 = \tan^{-1} \frac{z_0 - z_8}{\sqrt{2} * d}$$

La regla de propagación define las celdas que cambiarán de estado en función de los valores de la pendiente con signo:

$$a_m^{t+1} \leftarrow 1 \Rightarrow P_m > 0$$

Suponiendo que $m=4, 5$ y 6 es decir, que existe pendiente ladera arriba para las celdas mencionadas, la transición será:

	$t=0$			$t=1$					
	$j-1$	j	$j+1$	$j-1$	j	$j+1$			
$i-1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	0	1	0	0	1	1	0	0	0
$i+1$	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la siguiente iteración, se analizarán todas las celdas con valor 1, de forma que se analizarán para cada una de las anteriores las celdas subsidiarias vecinas. La propagación del proceso ladera arriba finaliza cuando no existan nuevas celdas con pendiente positiva; en este caso se llega a un estado estacionario que finaliza el análisis. (42)

2.1.1.5.6.1 Estimación del caudal máximo.

La magnitud del área subsidiaria de un punto del MDE está directamente relacionada con el caudal

máximo potencial (CMP), en el mismo. En efecto, el caudal que puede circular en un momento dado en un punto del terreno depende, entre otros factores, de la magnitud del área subsidiaria, de las precipitaciones sobre ella y de la pendiente de la zona, que le permite la circulación con menor o mayor rapidez.

Mediante mínimas variantes de los AC descritos anteriormente es posible la estimación del CMP en un punto en el caso más sencillo. Por ejemplo, si se supone una precipitación continua y constante sobre el terreno, el CMP es proporcional al área subsidiaria una vez que se alcanza un estado en el que todas las celdas han tenido tiempo de drenar hacia el punto problema.

Este proceso implica que la mayor parte de los puntos tendrán valores relativamente bajos, especialmente los situados en zonas de cumbres y crestas y, en menor medida, los constituyentes de laderas. En cambio, los flujos convergerán en los fondos de los valles y el valor irá aumentando progresivamente aguas abajo hasta alcanzar el valor máximo en el punto que ejerce de sumidero de la cuenca.

El resultado de la simulación es un modelo que representa los valores de caudal máximo potencial en cada punto, supuesto que se alcance una situación de equilibrio en el proceso. La situación de equilibrio llega cuando el número de ciclos elementales, paso de un punto a otro del modelo, ha sido suficiente para completar la línea de flujo más larga. En la realidad, el equilibrio llega cuando tras un periodo de lluvia suficientemente largo, la escorrentía superficial originada en el punto más alejado del sumidero de la cuenca ha tenido ya tiempo de pasar por el mismo.

La simulación de los CMP puede depurarse introduciendo modificaciones en las lluvias, de forma que estas no sean homogéneas sobre todo el terreno. Para ello deberá disponerse de un MDT auxiliar donde cada celda tenga asignado un valor que representa el agua disponible para circular hacia la celda siguiente. Estos datos pueden determinarse a partir de modelos meteorológicos, gradientes altitudinales, interpolación a partir de estaciones meteorológicas, incorporando incluso, la influencia de otros factores como la evapotranspiración o la infiltración.

Con esta forma de tratar el problema, los estados posibles de cada celda cambian y pasan a ser ahora una función, no solo del área subsidiaria, sino de la disponibilidad en cada lugar de la cuenca. **(42)**

2.1.1.5.7 Cálculo de variables topográficas.

2.1.1.5.7.1 Gradiente

En las aplicaciones sobre MDE matriciales, las estimaciones de los coeficientes del gradiente se realizan

mediante operadores que se aplican sobre un entorno definido del punto problema (habitualmente los 4 vecinos más próximos). Para un punto situado en la fila i , columna j , donde d es la distancia entre filas y columnas, los valores se calculan a partir de los cambios de altitud entre puntos vecinos. La opción más simple utiliza las expresiones siguientes:

$$a_{10} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2*d} \quad a_{01} = \frac{z_{i-1,j} - z_{i,j}}{2*d}$$

El siguiente algoritmo muestra la transcripción de las expresiones anteriores a un lenguaje de programación genérico para calcular el valor de los coeficientes del gradiente en un punto del MDE.

Estima el valor del gradiente para un punto del MDE.

```
GRADIENTE (FI, CO: entero; A10, A01: real)
ARGUMENTOS
FI, CO: fila y columna del punto problema
A10, A01: valores del gradiente (resultado)
GLOBALES
Z: matriz con el MDE (MatrizMD)
D: distancia entre filas y columnas (entero)
BEGIN
CASE FI OF
1 : A01 ← (-3.0*Z[FI,J]+4.0*Z[FI+1,J]-Z[FI+2,J]) / (2*D)
NFILA: A01 ← (Z[FI-2,J]-4.0*Z[FI-1,J]+3.0*Z[FI,J]) / (2*D)
ELSE: A01 ← (Z[FI-1,CO]-Z[FI+1,CO]) / (2*D)
CASE CO OF
1 : A10 ← (-3.0*Z[FI,J]+4.0*Z[FI,J+1]-Z[FI,J+2]) / (2*D)
NCOLU: A10 ← (Z[FI,J-2]-4.0*Z[FI,J-1]+3.0*Z[FI,J]) / (2*D)
ELSE: A10 ← (Z[FI,CO+1]-Z[FI,CO-1]) / (2*D)
END
```

2.1.1.5.7.2 Pendiente

Esta función permite calcular la pendiente para un punto del MDE.

```
FUNCION PENDIENTE (FI, CO: ENTERO): REAL
ARGUMENTOS
FI, CO: fila y columna del punto problema
LOCALES
A10, A01: valores del gradiente (reales)
BEGIN
GRADIENTE (FI, CO, A10, A01)
```

```
PENDIENTE ← ROUND (ARCTAN (SQRT (A10*A10+A01*A01)))  
END
```

En el algoritmo anterior, el valor de la pendiente se expresa en radianes, de aquí que se trate de una variable real. La pendiente debe transformarse a números enteros para permitir el almacenamiento de los valores en una matriz, de forma similar a un MDE, por lo que, en este caso, sería razonable su transformación a grados sexagesimales. **(21)**

2.1.1.5.7.3 Orientación

La función siguiente proporciona el valor de la orientación calculado a partir del gradiente. El algoritmo es algo más complejo que en el caso de las pendientes ya que deben contemplarse algunos casos especiales (terreno llano, por ejemplo), así como rectificar los valores devueltos por el lenguaje de programación (valores negativos del ángulo para valores negativos del argumento de la función arco tangente): Estima el valor de la orientación para un punto del MDE.

```
FUNCION ORIENTACION (FI, CO: entero): REAL  
ARGUMENTOS  
FI, CO: fila y columna del punto problema  
LOCALES  
A10, A01: valores del gradiente (reales)  
AZIMUT: variable auxiliar (real)  
NUL10, NUL01: var. auxiliares (lógico)  
BEGIN  
GRADIENTE (FI, CO, A10, A01)  
NUL10 ← ABS (A10) <1E-04  
NUL01 ← ABS (A01) <1E-04  
CASE NUL10 OF  
TRUE: IF NUL01 THEN AZIMUT ← RADIAN (361.0)  
ELSE IF A01>0.0 THEN AZ ← 2.0* $\pi$   
ELSE AZ ← 0.0  
FALSE:  
BEGIN  
AZIMUT ← ARCTAN (A01/A10)  
IF A10<0.0 THEN AZIMUT ←  $\pi/2.0$ -AZIMUT  
ELSE AZIMUT ← 3.0* $\pi/2.0$ -AZIMUT  
END  
ORIENTACION ← AZIMUT  
END
```

Del mismo modo que en el caso anterior, el valor devuelto es real y en radianes. La función puede hacer

uso de otra auxiliar denominada RADIAN, que realiza la transformación de grados a radianes²⁴.

En el algoritmo se comprueba en primer lugar si la pendiente es nula, en cuyo caso el valor de orientación carece de sentido, y se marca el punto con el equivalente en radianes a 361grados. En caso contrario, se comprueba si el denominador es nulo; si es así, el signo del numerador discrimina las dos opciones posibles: orientación al Este o al Oeste. Finalmente, se realizan las transformaciones necesarias para evitar valores negativos del ángulo y distribuir el resultado en el rango de 0 a 2π radianes. **(21)**

2.1.1.5.7.4 Curvatura

La función siguiente proporciona el valor de curvatura para un punto del modelo: Estima el valor de curvatura para un punto del MDE.

```
FUNCION CURVATURA (FI, CO: entero): REAL
ARGUMENTOS
FI, CO: fila y columna del punto problema
GLOBALES
Z: matriz con el MDE (entero)
D: distancia entre datos (entero)
BEGIN
CURVATURA ← ((Z[F-1,C]+Z[F,C-1]+Z[F,C+1]+Z[F+1,C]-
4*Z [F, C])/ (D*D))
END
```

El análisis de curvatura puede tener interés en forma direccional como, por ejemplo, realizando un seguimiento a lo largo de un perfil hidrológico y perpendicularmente a la línea de flujo. En este caso, la formulación de la curvatura depende del valor de orientación en el punto problema. En los análisis a partir de los modelos matriciales el problema puede simplificarse ya que cabe considerar solamente 4 casos: curvatura sobre la fila, la columna o sobre una de las dos diagonales. **(21)**

2.1.1.5.7.5 Rugosidad

El algoritmo que se muestra a continuación realiza el cálculo de la rugosidad para un punto utilizando un entorno de 3x3 a partir del modelo digital de elevaciones. Este método es el menos eficaz ya que, obviamente, el procedimiento puede agilizarse notablemente si se dispone de los modelos de pendientes y orientaciones previamente calculados. También sería posible y ventajoso el cálculo previo de las

²⁴ Esta operación se realiza multiplicando el argumento por la constante $\pi/180$.

componentes rectangulares de cada vector para reducir la redundancia de las operaciones trigonométricas. Estima el valor de rugosidad para un punto del MDE usando un entorno de 3x3. **(21)**

```
FUNCION RUGOSIDAD (FI, CO: entero): REAL
ARGUMENTOS
FI, CO: fila y columna del punto problema
LOCALES
I, J: auxiliares (entero)
A10, A01: componentes del gradiente (real)
PEN, ORI: pendiente y orientación (real)
D: distancia entre datos (entero)
BEGIN
XT ← 0.0
YT ← 0.0
ZT ← 0.0
FOR I=1 TO 3 DO
FOR J=1 TO 3 DO
BEGIN
GRADIENTE (FI-2+I, CO-2+I, A10, A01)
PEN ← PENDIENTE (A10, A01)
ORI ← ORIENTACION (A10, A01)
XT ← XT + SIN (PEN)*COS (ORI)
YT ← YT + SIN (PEN)*SIN (ORI)
ZT ← ZT + COS (PEN)
END
RUGOSIDAD ← 1.0-SQRT (XT*XT+YT*YT+ZT*ZT)/9.0
END
```

Conclusiones

En este capítulo se realizó un estudio profundo del estado actual de las diferentes herramientas y tecnologías que utilizan el álgebra de mapas y análisis hidrológico para la obtención y modelado de mapas. Se definen modelos matemáticos existentes para darle solución a los principales problemas que hoy presentan las modelizaciones hidrológicas, así como sus principales variables e impacto en la representación de los modelos. Se plantean los modelos, algoritmos y herramientas para el posterior desarrollo de una propuesta de algoritmo para la plataforma GeneSIG.

CAPÍTULO 3: Descripción de la solución propuesta.

Introducción

En este capítulo se hará una descripción de la propuesta a defender, en vista a solucionar la situación actual en el campo de acción. Se propone el modelo, algoritmo y herramientas a utilizar en el proyecto GeneSIG, partiendo de los modelos matemáticos y algoritmos propuestos en los capítulos anteriores. Esta propuesta se elaboró con el fin de facilitar el trabajo con los diferentes algoritmos en el álgebra de mapas y análisis hidrológico, y agilizar el desarrollo del módulo de análisis del terreno en la plataforma GeneSIG.

3.1 Solución para álgebra de mapas.

El álgebra de mapas es una herramienta de análisis que permite realizar diferentes operaciones entre mapas para obtener nuevos y diversos modelos a partir de uno o varios mapas. Esta herramienta tiene 4 funciones especiales que son las que permiten realizar los diferentes procedimientos entre las capas, las cuales lo realizan en función de un valor o varios valores para obtener la nueva capa resultante. Las funciones locales y focales son en este caso, según la autora son las más importantes dentro del proceso de análisis, debido a que permiten realizar diferentes operaciones aritméticas y otras que forman un subconjunto de lo que se puede llamar aritmética de mapas.

La cantidad de datos que utilizan para realizar las operaciones, la aplicación dentro del álgebra de mapas, las operaciones que aplican para el cálculo y el resultado; son parámetros de vital importancia para lograr una comparación entre las funciones del álgebra de mapas. En la tabla siguiente se muestra el resultado de los parámetros anteriores.

Función	Cantidad de datos	Operadores	Aplicación	Resultado
Local	Celda problema	Aritméticos Trigonométricos Lógicos y relacionales Estadísticos	Ecuación de USLE Máscaras Operaciones con una o varias capas	Una nueva capa
Focal	Celda problema y vecinos	Aritméticos Estadísticos Matemáticos	Filtrado de capas Clasificación Remuestreo	Una nueva capa

Zonal	Celda problema y celdas con la misma clase.	Aritméticos Estadísticos Lógicos	Operaciones con una o varias capas.	Una nueva capa
Global	Todas las celdas	Todos	Operación con la capa resultante.	Objeto geográfico Tablas Valor escalar

Tabla 1 Comparación entre las funciones del álgebra de mapas.

3.1.1 Solución propuesta

En la función local como su nombre lo indica, el resultado de la información de la nueva celda es en función de la celda inicial, es decir, la capa resultante va a tener en cada celda el valor en función del valor de la celda en la capa inicial. Esta función permite a partir de una capa inicial remodelar u obtener otra en función de la capa de entrada. Utiliza operadores de fácil implementación y todos son utilizados en función de un solo valor para obtener otro en la capa resultante. En conjunto a los operadores utilizados para las operaciones y las variables de entrada se pueden realizar procedimientos como la reclasificación o cálculo del nuevo valor a partir del valor de la misma celda en otra capa en base a un conjunto de reglas sencillas de reclasificación para lograr la homogeneidad de la capa resultante.

Otro uso de esta función muy utilizado son las bien llamadas máscaras, las cuales mediante las funciones de tipo aritmético se realizan la intercepción de capas que no tienen valor en la celda y al realizar la operación se obtiene una capa final con una celda sin datos, las cuales son utilizadas para eliminar alguna información de la capa que se quiere mostrar al final o resaltar algún tipo de información específica en la capa resultante.

En la función focal la información de las celdas en la capa resultante van a ser en función de la celda correspondiente en la capa inicial y de las situadas en un entorno definido alrededor de la misma, lo que permite que las operaciones realizadas sobre la capa problema utilicen más datos y por resultado obtenemos una capa con valores más exactos, permitiendo la creación de MDE.

Esta función permite realizar el filtrado de capas, utilizado para suavizar o realzar los modelos, así como para la reducción de datos en los mismos. El suavizado y realce permiten equilibrar el modelo, eliminando detalles presentes en el mismo, haciendo la superficie más suave y marcando las discontinuidades. La reducción del volumen de datos ayuda a eliminar datos redundantes dentro de la digitalización del

proceso, ahorra en disco y tiempo de proceso. Permite obtener mediante la clasificación capas discretas y continuas, permitiendo realizar el agrupamiento mediante reglas, de los elementos en grupos o clases con propiedades diferentes entre sí.

Realizada la comparación anterior y por los argumentos planteados, se decide presentar como propuesta final para el módulo de análisis del terreno en la plataforma GeneSIG, a las funciones local y focal. Con la propuesta de un algoritmo que permita las funcionalidades matemáticas con los modelos, aplicarle una función matemática a una o varios mapas, permitiendo la manipulación de los modelos digitales para facilitar las transformaciones necesarias para obtener un nuevo modelo. Las características de estas dos funciones permitirán al módulo de análisis del terreno realizar cualquier transformación de un modelo a otro utilizando los diferentes operadores planteados en la investigación, así como la creación de un nuevo modelo partiendo de una capa de valores específicos para la construcción de la misma.

La función local presenta una gran simplicidad a la hora de la implementación de los modelos matemáticos y operadores que utiliza, permitiendo su rápido desarrollo y comprensión por parte del equipo de desarrolladores del módulo. Paralelamente el focal se utilizará para análisis más complejos, la misma por lo general es un poco más compleja que la de tipo local pero más simple que los restantes según los datos de entrada. Los datos de entrada permiten minimizar o aumentar el tiempo de procesamiento según la cantidad que requieran las funcionalidades para poder ser realizadas en la aplicación.

En el caso de la función local y focal utilizan la menor cantidad de datos de entrada posible, mientras que la zonal depende del criterio de clasificación por clases y la global como su nombre lo indica utiliza todos los datos de la matriz de valores. Esta característica le brinda a la plataforma la posibilidad de agilizar el tiempo de respuesta al cliente o usuario final, debido a que la aplicación es web y requiere la mayor simplicidad posible para realizar los cálculos.

La propuesta es la solución óptima para el módulo de análisis del terreno, permitiendo la ejecución de las funcionalidades de álgebra de mapas y cumpliendo con las características que se necesita para modelar y calcular valores en el terreno. Brinda la posibilidad de realizar y cumplir el objetivo principal de estas herramientas de análisis.

3.2 Solución de algoritmos para análisis hidrológico.

Los algoritmos planteados permiten generar, delimitar y calcular tres de las principales características dentro del análisis hidrológico, las líneas de flujo, delimitación de cuencas y el cálculo del caudal máximo. Permitiendo que el modelado de estas propiedades se haga de una forma más fácil y directa. No todos los algoritmos planteados son los posibles a utilizar, por lo que se realiza una comparación de los mismos en cuanto a tiempo de ejecución y el problema que resuelve dentro del análisis hidrológico.

Algoritmos	Problema que resuelve	Tiempo de ejecución ²⁵
Rutina Hidroperfil.	Construye una línea de flujo.	$O(n)$ n
Rutina Fun_Código.	Devuelve valor de código de flujo.	$O(n)$ n
Problema concavidad.	Modifica las altitudes de los puntos que forman concavidad.	$O(n)$
Delimitación de cuencas. Método Collins.	Delimitación de cuencas.	$O(n)$
Delimitación de cuencas. Método Felicísimo.	Delimitación de cuencas.	$O(n)$
Autómata celular	Generación de flujo.	$O(n)$
	Definición de cuencas.	$O(n)$
	Estimación caudal máximo potencial.	$O(n)$

Tabla 2 Comparación entre algoritmos que resuelven el cálculo de parámetros hidrológicos.

3.2.1 Solución propuesta.

La tabla anterior permite definir una propuesta para lograr la implementación de un algoritmo que permita realizar tres de las principales características del análisis hidrológico. El módulo de análisis del terreno de la plataforma contará con un algoritmo que le permitirá a los desarrolladores ahorrar en esfuerzo y tiempo en el desarrollo de esta funcionalidad. Todos los algoritmos planteados brindan la posibilidad de realizar

²⁵ Todos tienen valor lineal $O(n)$, n es porque recorre todos los puntos del modelo.

los diferentes cálculos de los parámetros hidrológicos, pero el más completo y efectivo es el autómata celular, permitiendo el desarrollo de la representación de las cuencas hidrológicas, las líneas de flujo y los caudales máximos de las mismas.

El autómata celular permite mediante estados ir calculando los valores que toma la variable hidrológica al transitar por diferentes estados de tiempo. Lo que hace que se obtenga una matriz de valores que después permiten modelar y representar los diferentes parámetros de la hidrología. Este algoritmo permite calcular los tres parámetros de la misma forma, mientras que los otros se centran en el cálculo de uno en particular. Esto demuestra que mediante el autómata celular se puede ganar en tiempo y esfuerzo en la implementación de esta herramienta dentro del módulo.

Para el cálculo de la pendiente y la curvatura del relieve se propone los algoritmos función curvatura y función pendiente, permitiendo obtener información de la concavidad y convexidad de un punto dentro del terreno. Además, a partir del valor de la pendiente se puede determinar la evaluación de la erosión y el sentido del flujo, parámetro adecuado para aplicaciones de tipo hidrológico. Las soluciones propuestas permitirán a los desarrolladores de la plataforma la facilidad de contar con algoritmos que le permitan al módulo de análisis del terreno realizar las diferentes funcionalidades del análisis hidrológico.

3.3 Propuesta de herramientas para la plataforma.

Teniendo en cuenta las necesidades de la plataforma con respecto al tiempo y cantidad de datos geográficos utilizados y generados, se puede inferir que no es factible utilizar en la plataforma ninguna de las soluciones existentes para este tipo de situación planteada en el capítulo anterior.

Las herramientas planteadas en el capítulo anterior son de forma general sistemas de información geográfica, por lo que están diseñadas para el trabajo de un usuario final. No presentan interfaces para comunicarse con otros sistemas, lo que no permite interactuar o utilizar las diferentes funcionalidades implementadas en otras aplicaciones. Esto contribuye a que la plataforma GeneSIG no utilice para su primera versión una herramienta específica, debido al tiempo y esfuerzo que tomará estudiar las diferentes funcionalidades de la misma para luego ser implementadas por la plataforma.

La candidata pudiera ser Sextante debido a que es una biblioteca de algoritmos de análisis espacial de código libre disponible para varios software de Sistemas de Información Geográfica. Su objetivo principal es crear una plataforma que facilite tanto el uso, como la implementación de estos algoritmos. Esta biblioteca está implementada en java, lo que toma mucho tiempo y esfuerzo por parte de los

desarrolladores para hacerla compatible con php. Debido que para el uso del mismo se deberá crear un servicio que permita a la plataforma el uso de este lenguaje sin presentar una incompatibilidad con php lenguaje utilizado por la misma.

Además Java no es un lenguaje libre para Cuba, debido a que es un lenguaje que pertenecía a la compañía norteamericana SUM Microsystems y luego fue comprada por Oracle Corporation, otra compañía norteamericana; lo que se corre el riesgo de que en un futuro surjan nuevas necesidades y al ser un lenguaje que no es libre para Cuba no se podrá utilizar para satisfacer dichas necesidades. La posición de los Estados Unidos en cuanto al bloqueo impuesto a Cuba, prohíbe que entidades o empresas norteamericanas comercialicen con entidades cubanas.

3.4 Validación

Los algoritmos planteados permiten la modelación de los diferentes parámetros hidrológicos, sin embargo se debe analizar el tiempo que demorará desarrollar las funcionalidades en dependencia de los algoritmos que se escojan para aplicarlo en el módulo. De ahí se deriva el cálculo de cantidad de horas/hombres o esfuerzo en el estudio de cada una de las soluciones propuestas y su aplicación en la plataforma. En el caso de cada uno de los algoritmos se emplean como tiempo promedio 56 horas/hombres para su desarrollo en el módulo, mientras que en el caso del autómatas celular se emplea un promedio de 112 horas/hombres para su desarrollo.

Este algoritmo necesita más tiempo debido a que es una solución que contiene tres de los principales parámetros hidrológicos que necesita la herramienta, por lo tanto, emplea más tiempo para su estudio y diseño. Para esta estimación se hizo necesario consultar al desarrollador del módulo de análisis del terreno, para obtener los datos de las horas que trabaja al día y las afectaciones que puede tener tanto docentes como laborales. El desarrollador trabaja 6 días a la semana y su jornada de trabajo es de 8h diarias. La tabla siguiente muestra el tiempo que necesita cada algoritmo para ser desarrollado en el módulo y las horas/hombres que emplea aplicar esta funcionalidad en el módulo.

Algoritmos	Problema que resuelve	Tiempo(días)	Horas/Hombre
Rutina Hidroperfil.	Construye una línea de flujo.	7	56

Rutina Fun_Código.	Devuelve valor de código de flujo.	7	56
Problema concavidad.	Modifica las altitudes de los puntos que forman concavidad.	7	56
Delimitación de cuencas. Método Collins.	Delimitación de cuencas.	7	56
Delimitación de cuencas. Método Felicísimo.	Delimitación de cuencas.	7	56
Total de tiempo		35	280
Autómata celular	Generación de flujo.	5	40
	Definición de cuencas.	5	40
	Estimación caudal máximo potencial.	4	32
Total de tiempo		14	112

Tabla 3 Tiempo estimado en el que los desarrolladores necesitan para el estudio de cada algoritmo.

Luego de obtener las horas necesarias para el desarrollo de cada algoritmo se hizo necesario saber las horas reales para el desarrollador sin las afectaciones que pueda tener tanto docentes como laborales. Según los resultados obtenidos se puede estimar los días que se demoran en el desarrollo de cada uno de las soluciones, para poder validar la solución propuesta en la investigación.

Afectaciones del desarrollador:

- Tiene un día a la semana afectación por Preparación Metodológica.
- Está vinculado a la docencia y la ejerce 2 días a la semana en una sesión.

Por lo que se puede concluir que el trabajador de los 6 días de trabajo según sus afectaciones solo puede trabajar en el desarrollo del proyecto 4 días enteros dedicados al diseño de la plataforma.

El cálculo del esfuerzo en los 5 primeros algoritmos se realiza de la siguiente forma:

Como todos los algoritmos resuelven un problema en específico, se necesitan de todos para lograr el

Capítulo 3: Descripción de la solución propuesta

desarrollo de esta herramienta en el módulo. Por lo tanto, se trabaja con el total de tiempo para el cálculo del esfuerzo de cada uno de ellos.

Horas/ Hombre	Días laborables	Semanas	Meses
280	35	8.5	2.18
	$280 / 8h = 35$	$35 / 4 = 8.5$ (4 días laborables)	$8.5 / 4 = 2.18$ (4 semanas del mes)

Tabla 4 Parámetros para el cálculo del esfuerzo en los primeros algoritmos.

A las Horas/Laborales se le restan las Horas/Preparación Metodológica y las Horas/Clases y se obtiene el total de Horas/Hombre para los algoritmos implicados en el cálculo.

El resultado es 2.18 meses para lograr el desarrollo de estas funcionalidades en la plataforma.

Cálculo del esfuerzo para el autómata celular:

Este algoritmo permite calcular por una sola vía tres parámetros hidrológicos, aún teniendo más Horas/Hombre que los demás.

Horas/ Hombre	Días laborables	Semanas	Meses
112	14	3.5	--
	$112 / 8h = 14$	$14 / 4 = 3.5$ (4 días laborables)	

Tabla 5 Parámetros para el cálculo del esfuerzo en el autómata celular.

A las Horas/Laborales se le restan las Horas/Preparación Metodológica y las Horas/Clases y se obtiene el total de Horas/Hombre para el algoritmo autómata celular.

El resultado es 3.5 semanas para lograr el desarrollo de esta funcionalidad en la plataforma.

Según los resultados de los cálculos se puede resaltar la eficiencia en cuanto a tiempo y esfuerzo del autómata celular con el resto de los algoritmos, permitiendo el ahorro de recursos materiales y humanos utilizados en el desarrollo de las funcionalidades en el módulo. La solución propuesta permite minimizar las horas de trabajo dentro de la plataforma para el desarrollo de la misma, logrando de esta manera un

mejor aprovechamiento de la capacidad de rendimiento de los ordenadores.

Conclusiones

En el capítulo se propuso la solución final de los diferentes algoritmos para el desarrollo del álgebra de mapas y análisis hidrológico en el módulo de análisis del terreno de la plataforma GeneSIG. Estos algoritmos permitirán al módulo el perfil y cálculo de las variables hidrológicas, además de la implementación de las herramientas de análisis de álgebra de mapas y análisis hidrológico en el mismo. Se logrará la representación de las cuencas con sus líneas divisorias y zonas subsidiarias, así como las direcciones del flujo del agua en la visualización de la misma. La unión de capas para la obtención de nuevos valores y mapas será otra funcionalidad que será resuelta al implementar la propuesta final, permitiendo operar sobre diferentes capas de mapas y valores mediante operadores sencillos. Brindará la posibilidad al usuario de realizar operaciones con los valores geográficos y lograr visualizarlos, permitiéndole interactuar y realizar análisis sobre la misma.

Conclusiones generales

Los Sistemas de Información Geográfica en la actualidad marcan un punto crucial en el desarrollo de la geografía y en su integración con la rama de la informática. Estos sistemas permiten a los usuarios obtener información georreferenciada de forma visual, lo que les permite abstraerse de los datos iniciales e interactuar y combinar información a través de los SIG.

Al finalizar esta investigación se concluye que:

- La propuesta permitirá a los desarrolladores de la plataforma contar con el conocimiento y herramientas para lograr completar la implementación del módulo de análisis del terreno.
- Aporta el conocimiento necesario para lograr la representación de los principales parámetros del ciclo hidrológico y el cálculo con diferentes modelos para la obtención de nuevos valores.
- El módulo de análisis del terreno se complementará con nuevas herramientas de análisis, lo que permitirá que en menos tiempo los desarrolladores logren la implementación del mismo.
- Los algoritmos propuestos constituyen, sin lugar a dudas, un paso de avance para el desarrollo del módulo de análisis del terreno de la plataforma y futuros sistemas que mediten el uso y cálculo de mapas digitales, tales como, predicción de inundaciones en el terreno, delimitación de cuencas y cálculo de flujos de la superficie; además de la modelación y simulación de variables topográficas, unión de capas utilizando operaciones matemáticas en uno o varios mapas, para la obtención de nuevos valores.
- Se cumplió el objetivo general planteado al principio de la investigación debido a que se presentó una propuesta que ayudará al desarrollo de la primera versión de la plataforma GeneSIG, específicamente en el módulo de análisis del terreno de la misma.

Recomendaciones

Se recomienda el estudio de esta tesis para poner en uso la solución propuesta, para la implementación de estas herramientas de análisis en el módulo de análisis del terreno.

Se exhorta continuar el estudio de otros algoritmos para el análisis hidrológico o modificar los propuestos según las necesidades de la plataforma y sus respectivos módulos en posteriores versiones.

Continuar el estudio de las demás funciones del álgebra de mapas en especial la función global que permite la obtención de valores escalares, objetos geográficos y tablas con valores geográficos, lo que permitirá en futuras versiones el desarrollo de un producto más completo.

Referencias bibliográficas

1. Escuela Naval "Almirante Padilla". [En línea] 7 de Diciembre de 2009.
<http://www.esuelanaval.edu.co/docfof/SIG.pdf>.
2. Henares, Prof. Joaquín Bosque Sendra Departamento de Geografía Universidad de Alcalá. Mapping Interactivo. [En línea] Diciembre 7, 2009.] http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318.
3. Sistema de Información Geográfica (SIG). 26 de junio de 2007. Edición 1.0.
4. Días., Ing. Juan Javier Durán. Modelo digitales de elevación para el continuo de elevaciones mexicanas.
5. Felicísimo, Ángel Manuel. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico. Abril 1999.
6. The free Dictionary by farlex. [En línea] Diciembre 10, 2009.
<http://es.thefreedictionary.com/orograf%C3%ADa>.
7. Definicion.de. [En línea] Diciembre 10, 2009. <http://definicion.de/modelo-matematico/>
8. Felicísimo, Ángel Manuel. Modelos digitales de terreno.
9. Peralta, F. J. Análisis Espacial con Datos Ráster en ArcGIS Desktop 9.2.
10. Benito Zaragoza, S. D. Tratamiento espacial de los desprendimientos de laderas en ambientes semiáridos mediante SIG. Universidad de Alicante (España).
11. Formato ráster: Álgebra de mapas.Cap.5

12. WordReference.com. [En línea] Enero 28, 2010, Diccionario de la lengua española:
<http://www.wordreference.com/definicion/>
13. Román, F. J. Citado febrero 4, 2010, Hidrología, Hidrogeología: <http://web.usal.es/javisan/hidro>
14. Pesce., L. F. Aportes de la Hidrología Morfométrica a la Ecología Fluvial. Programar en Access VBA. [En línea] febrero 8, 2010, <http://www.programarvba.com/componentes-sistema-gis.htm>
15. Urcolo Adriana, I. R. Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco – Sede Ushuaia, Darwin y Canga.
16. Computación, F. d. "Análisis, Diseño e implementación de una aplicación multimedia interactiva para mostrar tiempos, distancias y rutas en un sistema de transporte masivo urbano utilizando herramientas de software libre y tecnología de web 2.0."
17. Peña, J. S. (1998, Septiembre). Estudio Hidrológico en explotaciones agrarias, a partir de sus MDTs. [En línea] Febrero 5, 2010, <http://www.mappinginteractivo.com/>
18. gabrielortiz.com. [En línea] Febrero 9, 2010, gabrielortiz.com:
<http://gabrielortiz.com/descargas/manual-hecras.pdf>
19. Quantum GIS, Guía de Usuario e Instalación Versión 0.9.1 'Ganymede'. [En línea] Junio 16, 2010
http://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/qgis-0.9.1_user_guide_es.pdf
20. Aeroterra Soluciones básicas. [En línea] Febrero 8, 2010, <http://www.aeroterra.com/>
21. Felicísimo, Ángel Manuel. Modelos Digitales del terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales.
22. [En línea] Febrero 25, 2010 <http://www.rena.edu.ve/TerceraEtapa/Geografia/Hidrografia.html>

23. Munir Morad y Alejandro Triviño Pérez. Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación.
24. Modelos digitales del terreno. Capítulo 7
25. gabrielortiz.com. [En línea] Diciembre 11, 2009, gabrielortiz.com:
<http://recursos.gabrielortiz.com/index.asp?destino=diccionario&termino=Algoritmo%20%28Algorithm%29>
26. Portal infopais. [En línea] Febrero 13, 2010.
http://www.infopais.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=188
27. Hidro-SIG: Una herramienta para la estimación de balances hidrológicos de Colombia. Mesa, Oscar. Proveda, Germán. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Pregrado de Ingeniería Civil.
28. Llorente Isidro, Miguel, Andrés Díez-Herrero y Luis Laín Huerta: Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: Avances recientes. , Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
29. Pizarro, Roberto; Soto, Manuel; Farías: César y Jordan, Cristian (2005): Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. Bosque 26(2): 123 - 129 [En línea] Marzo 17, 2010.
http://eias.utralca.cl/2publicaciones/paper/pizarro_soto_farias.pdf
30. Garzón Sánchez, Henry (1991) Evaluación de la erosión hídrica y la escorrentía superficial bajo sistemas agroforestales, en tierras de ladera, Turrialba, Costa Rica. Centro Agrónomo tropical de investigación y enseñanza.
31. Triviño Pérez, Alejandro: Metodología para la modelización distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos.

32. Sánchez San Román, Javier (España 2004): El ciclo hidrológico.
<http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T020.pdf>
33. Quiñonero Rubio, J.M; Alonso Sarría, F: Modelización de la dinámica hidrológica y erosiva en barrancos de la cuenca del rio Quipar (sureste de España) con GRASS. Universidad de Murcia.
34. Vázquez Rodríguez, Cad. Dwan: Título: “Algoritmos para la Modelación Digital del Terreno en un Sistema de Información Geográfico”. Instituto Técnico Militar “José Martí “Facultad de Comunicaciones, Inteligencia Militar y Lucha Radioelectrónica Cátedra de Automatización y Cifras.
35. Sarria, F. Alonso; Castillo, F. Gomáriz; V.Centella (2004): Relación de módulos de GRASS.
<http://www.um.es/geograf/sigmur/comandos.html>
36. Van Heesch, Dimitri, (2010): GDAL - Geospatial Data Abstraction Library.
http://www.gdal.org/gdal_utilities.html.
37. Antúnez, Romanuel Ramón; Hernández Montero, Lidisy (2008): Desarrollo de una biblioteca de métodos numéricos (BMN), referente al cálculo de raíces de funciones, interpolación y ajuste de curvas y resolución de ecuaciones diferenciales.
38. Felicísimo, Ángel: Descripción y análisis del relieve. Capítulo 4.
30. Felicísimo, Ángel: Simulación de procesos: Cuencas hidrológicas y cuencas visuales. Capítulo 5

Bibliografía consultada

1. Concepto. [En línea] Diciembre 10, 2009.
<http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/intro.htm#CONCEPTO>.
2. Mapping Interactive. http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1318.
3. Pérez., Munir Morad y Alejandro Triviño. Modelo digitales de elevación para el continuo de elevaciones mexicanas.
4. Análisis espacial ráster. [En línea] Febrero 4, 2010, Análisis espacial ráster:
http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/AnalisisRáster/RSAModule/RSA_T_Re.htm
5. Román, F. J. [En línea] Febrero 4, 2010, Hidrología, Hidrogeología: <http://web.usal.es/javisan/hidro>
6. Pesce., L. F. Aportes de la Hidrología Morfométrica a la Ecología Fluvial. Programar en Access VBA. [En línea] Febrero 8, 2010, <http://www.programarvba.com/componentes-sistema-gis.htm>
7. Urcolo Adriana, I. R. Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco – Sede Ushuaia, Darwin y Canga. WordReference.com. [En línea] 2010, diccionario de la lengua española.
8. Computación, F. d. "Análisis, Diseño e implementación de una aplicación multimedia interactiva para mostrar tiempos, distancias y rutas en un sistema de transporte masivo urbano utilizando herramientas de software libre y tecnología de web 2.0."
9. Peña, J. S. (1998, Septiembre). Estudio hidrológico en explotaciones agrarias, a partir de sus MDTs. [En línea] Febrero 5, 2010, Aeroterra soluciones geográficas.:
http://www.aeroterra.com/PDF/ASA_Integridad_Ductos.pdf
10. (Programar en Access VBA)

Programar en Access VBA. [En línea] Febrero 8, 2010, Programar en Access VBA:

<http://www.programarvba.com/componentes-sistema-gis.htm>

11. (Pesce., Aportes de la Hidrología Morfométrica a la Ecología Fluvial.) (2006, Noviembre 8). Recursos GIS. Inventario de herramientas. [En línea] Febrero 7, 2010, <http://psicosix.iespana.es/bd2/trabajo12.pdf>

12. Pesca, Aportes de la Hidrología Morfométrica a la Ecología Fluvial.

13. Felicísimo, A. M. Simulación de procesos: cuencas hidrológicas y cuencas visuales. Cap.5.

14. Sarria, J. T. Cálculo de parámetros morfométricos y propuesta de ordenación agroforestal en la subcuenca el cacao. Provincia Ciudad de la Habana.

15. Análisis espacial ráster. [En línea] Febrero 4, 2010, Análisis espacial ráster:

http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/AnalisisRáster/RSAModule/RSA_T_Re.htm

16. Felicísimo, Ángel Manuel. Modelos Digitales del terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales.

17. <http://www.rena.edu.ve/TerceraEtapa/Geografia/Hidrografia.html> [En línea] Febrero 25, 2010.

18. Modelos digitales del terreno. Capítulo 7

19. Silvina Belmonte y Virgilio Núñez: Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.

20. Hidro-SIG: Una herramienta para la estimación de balances hidrológicos de Colombia. Mesa, Oscar. Proveda, Germán. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Pregrado de Ingeniería Civil.

21. Llorente Isidro, Miguel, Andrés Díez-Herrero y Luis Laín Huerta: Aplicaciones de los SIG al análisis y

gestión del riesgo de inundaciones: Avances recientes. , Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

22. Cruz Moticelli, Juan (2005): Road Map to Water Synergies in the Américas, Departamento de Desarrollo Sostenible. [En línea] Marzo 17, 2010, <http://www.hidro.cu>

23. Programas en Access VBA. [En línea] Febrero 8, 2010, Programas en Access VBA:
<http://www.programarvba.com/componentes-sistema-gis.htm>

24. Pesce, (2006, noviembre 8): Aportes de la Hidrología Morfométrica a la Ecología Fluvial. Recursos GIS. Inventario de herramientas. [En línea] Febrero 7, 2010, <http://psicosix.iespana.es/bd2/trabajo12.pdf>

25. Software shop. [En línea] Marzo 13, 2010.
http://www.software-shop.com/in.php?mod=ver_producto&prdID=160

26. <http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/AnálisisRáster>.

27. Silvina Belmonte y Virgilio Núñez: Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.

28. Galván, L. Olías, M.; Fernández de Villarán, R.; Domingo, J.M; Nieto, J.M. (Huelva, España)
Modelización de la cuenca del río Meca.

29. XIX Congreso Latinoamericano de hidráulica -Córdoba 2000.

30. El rincón del vago. Capítulo 6. Escorrentía y cuenca hidrológica.
<http://html.rincondelvago.com/escorrentia-y-cuenca-hidrologica.html>

31. Pizarro Roberto, Soto Manuel, Farías Cesar, Jordan Cristian: Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central.