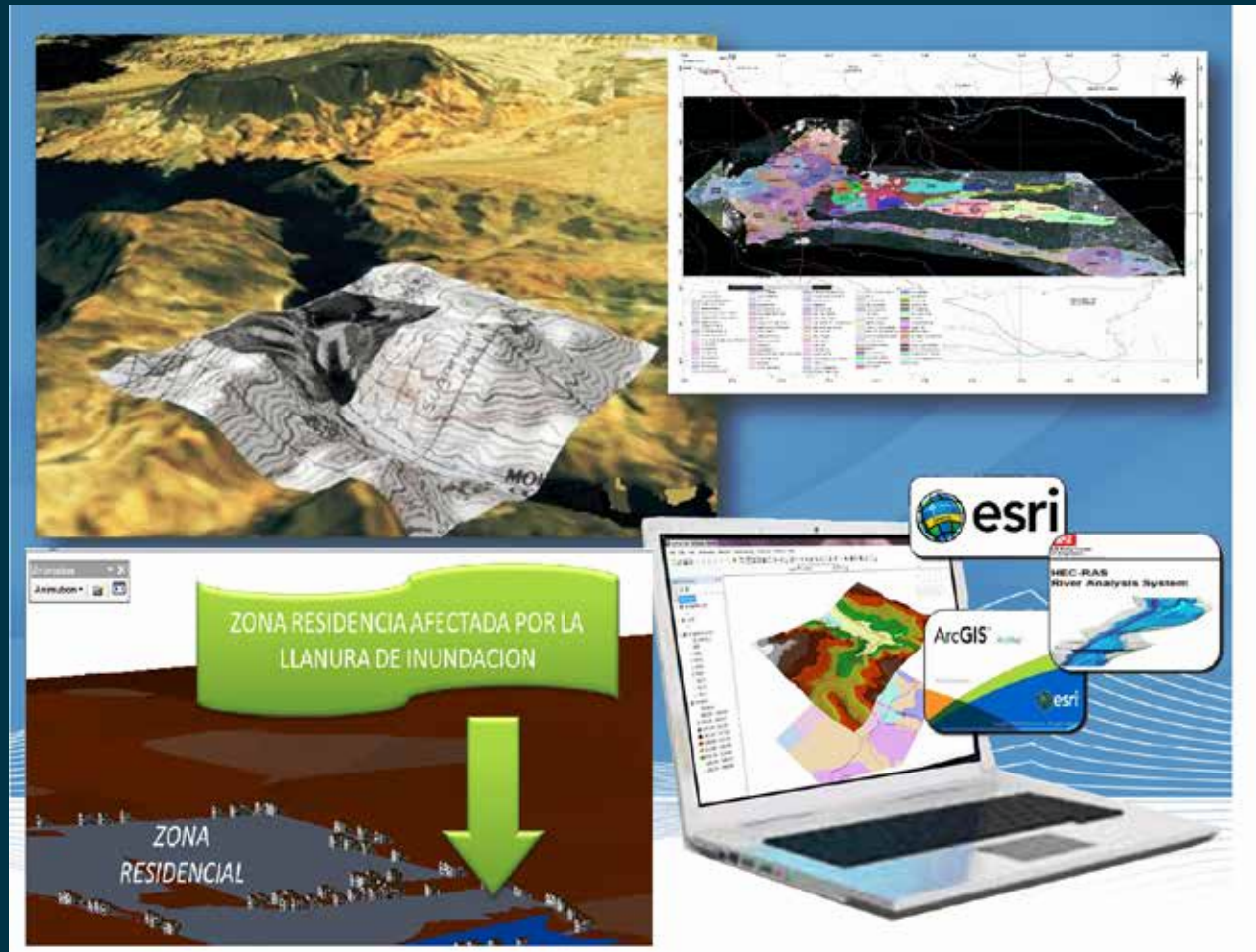


Cartilla sobre las **GENERALIDADES** **DEL PROCESO DE SIMULACIÓN**



Cartilla sobre las

GENERALIDADES DEL PROCESO DE SIMULACIÓN



UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS

Km 12 vía Puerto López – Vereda Barcelona
Tel. (57+8) 6616800 Ext. 130
Villavicencio (Meta) - Colombia
www.unillanos.edu.co

RECTOR

Oscar Domínguez González

DECANO

Facultad de Ciencias Básicas e Ingenierías
Elvis Miguel Pérez Rodríguez

DIRECTOR

Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombia (ICAOC)
Marco Aurelio Torres Mora

DIRECTORA

Maestría en Gestión Ambiental Sostenible
Sandra Liliana Parada Guevara

ECOPETROL S.A.

Carrera 13 # 36-24 Tel: (1) 2344000
Bogotá, Colombia
www.ecopetrol.com

Administrador del convenio 5211592

Jairo Centeno Amaya

Gestor técnico del convenio 5211592

Alexandra Patricia Chiquillo Olivieri

Impresión

Ediprint. Bogotá, Colombia
500 ejemplares

Cítese como:

Torres-Mora, M. A., Parada-Guevara, S. L. y Jaimes-Tibamoza, Z. Y. 2015). Cartilla sobre las generalidades del proceso de simulación. Universidad de los Llanos, Ecopetrol S. A. 1ª ed. Editorial Unillanos. Villavicencio. Colombia. 20 pp.

Universidad de los Llanos

® Ecopetrol S.A.

Derechos reservados según la Ley. Los textos pueden ser reproducidos total o parcialmente citando la fuente.

Este material se publica en el marco del convenio 5211592 suscrito entre Unillanos y Ecopetrol "Identificación de alternativas de manejo ambiental de los río Guayuriba, Ocoa y los caños Quenane-Quenanito de la cuenca alta del río Meta, Orinoco. Basado en estrategias educativas, investigativas y de proyección social".

Universidad de los Llanos - Sistema de Bibliotecas Catalogación en la fuente

Cartilla sobre las generalidades del proceso de simulación. Torres-Mora, Marco Aurelio (et al.): Bogotá, Editorial Ediprint, 2015.

20 p.: il. 21x21 cm.

Incluye: bibliografía.

ISBN: 978-958-8927-06-0

1. Cuenas hidrográficas – Meta (Colombia). 2. Guayuriba (Río, Meta – Colombia). 3. Ríos – Meta (Colombia). I. Torres-Mora, Marco Aurelio. II. Parada Guevara, Sandra Liliana. III. Jaimes Tibamoza, Zulay Yaneth.

CDD: 551.483 Ed. 21

Catalogación en la publicación – Biblioteca Universidad de los Llanos.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
MARCO CONCEPTUAL	5
DEFINICIÓN DE SIMULACIÓN	5
DIFERENCIA ENTRE MODELADO Y SIMULACIÓN	6
CLASES DE SIMULACIÓN	6
CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN	7
PASOS PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN	7
ETAPAS DEL PROCESO DE SIMULACIÓN	7
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN	8
REQUERIMIENTOS PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN	8
SIMULACIÓN DE LLANURAS DE INUNDACIÓN	9
PRE-PROCESO	11
PROCESO DE MODELIZACIÓN DE FLUJO CON HEC-RAS	11
POST-PROCESO Y VISUALIZACIÓN 3D EN ARCGIS 10.1	15
ÁREAS DE APLICACIÓN Y USO DE LAS SIMULACIONES CON ÉNFASIS AMBIENTAL	16
EMPLEO DE SOFTWARE Y SIMULACIÓN	16
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

FIGURA 1.	Panorámica cuenca del río Guayuriba	9
FIGURA 2.	Curvas de nivel a cada cuenca río Guayuriba	9
FIGURA 3.	TIN cuenca río Guayuriba	10
FIGURA 4.	Modelo Raster cuenca río Guayuriba	10
FIGURA 5.	Procedimiento de la Simulación	11
FIGURA 6.	Digitalización en ArcGis10.x a partir del MDE	11
FIGURA 7.	Importación desde ArcGis 10.1 a HEC-RAS	12
FIGURA 8.	Parametrización de datos en HEC-RAS	13
FIGURA 9.	Secciones transversales	13
FIGURA 10.	Modelamiento de cauce en HEC-RAS	13
FIGURA 11.	Características del cauce del río	14
FIGURA 12.	Proceso de simulación en HEC-RAS	14
FIGURA 13.	Proceso de simulación Tr 10 años en HEC-RAS	14
FIGURA 14.	Creación del archivo de exportación ArcGis 10.1	15
FIGURA 15.	Plano de llanuras de inundación río Ocoa a 10, 25 y 50 año	15
FIGURA 16.	Llanuras de inundación río Ocoa a 10 años – Zona Urbana	15
FIGURA 17.	Visualización 3D	15
FIGURA 18.	Capas vectoriales de líneas, polígonos y puntos con QGIS	16
FIGURA 19.	SAGA GIS Análisis espacial de una cuenca andina en SAGA GIS	16
FIGURA 20.	HEC-RAS Esquema del sistema fluvial por HEC-RAS y secciones de análisis	17
FIGURA 21.	iRIC Visualización de resultados de inundación de río modelado en iRIC	17
FIGURA 22.	HEC-HMS Modelamiento hidrológico de un evento en una cuenca andina	17
FIGURA 23.	PRMS Distribución del flujo modelado en PRMS en escorrentía superficial, interrumpo y flujo base	18
FIGURA 24.	Modelo numérico de una cuenca andina tridimensional en MODFLOW	18
FIGURA 25.	Modelamiento de pluma contaminante de un botadero minero	18
FIGURA 26.	Modelamiento de velocidad de flujo a través de una abertura con OpenFOAM	18
FIGURA 27.	Python. Ejemplo de análisis espacial y temporal con Python – Scipy	19

INTRODUCCIÓN

Los descubrimientos y desarrollos científicos han modificado las costumbres de los seres humanos. De forma paralela al progreso ha aumentado la demanda de los recursos naturales para satisfacer las necesidades básicas y la generación de energía, hasta el punto en que con el crecimiento poblacional y la expansión urbana los seres humanos hemos invadido los ecosistemas de forma descontrolada originando condiciones adversas que se evidencian con el cambio climático. Una forma de predecir lo que puede suceder en el tiempo es la simulación, una herramienta que abstrae de la realidad características, que pueden ser asimiladas a modelos matemáticos para aplicar algoritmos que permitan predecir su comportamiento.

En el desarrollo de la simulación hay una etapa que nos permite analizar los resultados obtenidos, hacer el proceso de retroalimentación con el modelo matemático soportado y la realidad abstraída para llegar a conclusiones que nos permitan tomar decisiones oportunas para manejar los cambios que pueden alterar la realidad estudiada, en especial en los fenómenos naturales. Se han desarrollado simulaciones que recrean escenarios de cambio climático, inundaciones, contaminación, áreas de sequía, migración de especies, entre otras temáticas abordadas.

Por otra parte, la simulación es una manera de probar y refinar los resultados de estas abstracciones y por lo tanto también suele modificar nuestros modelos mentales (Equihua y Pérez-Maqueo, 2004).

MARCO CONCEPTUAL

DEFINICIÓN DE SIMULACIÓN

La simulación es la experimentación con un modelo que abstrae ciertos aspectos de la realidad esto permite trabajar en condiciones similares a ella, pero con parámetros de las variables controladas. A continuación se presentan definiciones de algunos expertos:

Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann la definen así: «Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para

describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos.»

“Un display conectado a un ordenador digital nos da la oportunidad de ganar familiaridad en conceptos no realizables en el mundo físico. Es un espejo que nos lleva hacia un país de maravillas matemáticas” (SUTHERLAND, 1965).

Habla también de “comprensión de conceptos, de especificidades de un medio, más que de una tecnología,

con lo que deja abiertas muchas puertas a la exploración y experimentación”. También hace referencia al mundo fantástico de Lewis Carroll (CARROLL, 1965) en el que se mezclan situaciones imposibles con lógicas y teorías matemáticas falsas, pero de gran coherencia en su contexto.

Una definición más formal, formulada por R. E. Shannon es: «La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos- para el funcionamiento del sistema.»

“Una realidad artificial percibe las acciones del participante en términos de la relación de su cuerpo con un mundo gráfico y genera respuestas que mantienen la ilusión que sus acciones se están desarrollando dentro de este mundo” (Krueger, 1991).

La simulación parte de un sistema en el cual se nos presenta una realidad y a través de cálculos o intercambio de valores en las variables, podemos tomar decisiones según el comportamiento que tenga el modelo en la simulación.

DIFERENCIA ENTRE MODELADO Y SIMULACIÓN

La modelación parte de un sistema netamente real y lo convierte en patrones o formulas en que los resultados o valores no varían mucho de la realidad que ya se conoce.

La teoría que hay detrás es antigua ya que toda se basa en la definición de modelos matemáticos y estadísticos, y en el estudio de la evolución de estos modelos a lo largo

de un período determinado de tiempo. No obstante, la simulación ha avanzado de forma realmente importante a partir de la explosión de las herramientas informáticas, por la facilidad que supone generar los resultados y tratar los datos y los cálculos complejos. De hecho, la simulación está estrechamente ligada al inicio de la informática con las simulaciones de balística para aplicaciones militares a mediados de los cuarenta.

La simulación por ordenador es la intersección de tres herramientas de investigación o aproximaciones analíticas (Whicker y Sigelman, 1991): modelado, simulación de sistemas, uso de un ordenador¹, las cuales definimos más adelante.

Cuando se construye un modelo, estamos construyendo un sistema cuyos componentes –partes e interrelaciones– se ha reducido una cantidad manejable para simplificar el sistema real. Para que los resultados sean aceptables es necesaria una precisa selección de los componentes importantes, cada uno de los cuales debe, a su vez, ser un modelo adecuado del componente real. La simulación imita la realidad y la modelación crea un patrón de la realidad y en ambos casos podemos usar computadores o modelos manuales según sea el caso de complejidad.

CLASES DE SIMULACIÓN

- **Simulación Discreta:** modelación de un sistema por medio de una representación en la cual el estado de las variables cambian instantáneamente en instante de tiempo separados.
- **Simulación Continua:** modelación de un sistema por medio de una representación en la cual las variables de estado cambian continuamente en el tiempo.

1. <http://www.dtic.upf.edu/~gvirtual/master/rv/seccio2/seccio2.htm>

- **Simulación Combinada Discreta-Continua:** modelación de un sistema por medio de una representación en la cual unas variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo y otras cambian instantáneamente en instante de tiempo separados.
- **Simulación Estática y Dinámica:** la simulación estática es aquella en la cual el tiempo no juega un papel importante, en contraste con la dinámica en la cual si es muy importante.
- **Simulación con Orientación hacia los eventos:** modelaje con un enfoque hacia los eventos, en el cual la lógica del modelo gira alrededor de los eventos que ocurren instante a instante, registrando el estado de todos los eventos, entidades, atributos y variables del modelo en todo momento.
- **Simulación con Orientación hacia procesos:** en cierta forma, es un modelaje basado en un esquema de flujo grama de procesos, el cual se hace es un seguimiento a la entidad a través de la secuencia de procesos que debe seguir.

CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

- Está basada en su totalidad por actividades lógicas y matemáticas.
- Es adaptable. El modelo va cambiando parcialmente conforme ocurren los eventos.
- Brinda credibilidad.
- Simplicidad (menor número de parámetros).
- Es un estudio factible tanto en Información como en recursos.
- Económico.

PASOS PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN

- Establecer los objetivos y las restricciones.
- Reunir, analizar y validar los datos del sistema.
- Construir un modelo preciso y útil.
- Conducir experimentos de simulación.
- Documentar y presentar los resultados.

ETAPAS DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

1. **Definición del sistema:** consiste en entender y analizar el problema para determinar lo que buscamos y generar la simulación más adecuada a nuestras necesidades.
2. **Formulación del modelo:** es la creación teórica de un posible modelo en función a las variables que afecten el resultado.
3. **Recolección de datos:** es el proceso de estudiar el sistema e identificar sus variables y registros históricos que estadísticamente podrían predecir el comportamiento del sistema.
4. **Implementar el modelo del programa:** es el diseño de una solución que una vez introducida al software, genera resultados similares a la realidad que probablemente ocurra.
5. **Verificar el modelo:** es la comprobación de que los resultados obtenidos son los deseados en función a todas las variables planteadas.
6. **Validar el sistema:** esto no es más que la aprobación del modelo empleado que cubre las necesidades planteadas.

7. **Experimentar:** implica correr varias veces el programa para comparar los resultados y crear la estrategia que solucione nuestros problemas de la forma más eficiente.
8. **Interpretar los datos obtenidos:** es la evaluación de los pros y contras que genera el modelo e interpretar si el sistema es eficiente y factible o definitivamente hay que intentarlo con otros modelos.
9. **Documentar:** es plasmar nuestro modelo ya comprobado y bien definido para poderlo presentar ante los interesados.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN

La Simulación como todo tiene sus ventajas y desventajas, pero a nivel mundial es una herramienta ampliamente empleada y aceptada.

VENTAJAS

- Es un proceso relativamente eficiente y flexible.
- Puede ser usada para analizar y sintetizar una compleja y extensa situación real.
- En algunos casos la simulación es el único método disponible.
- Los modelos de simulación se estructuran y nos resuelve en general problemas trascendentes.
- No interfiere en sistemas del mundo real.

- Estudia los efectos interactivos de los componentes individuales o variables para determinar las más importantes.
- Permite la inclusión en complicaciones del mundo real.

DESVENTAJAS

- El desarrollo de un modelo puede ser costoso, laborioso y lento.
- Existe la posibilidad de cometer errores. No se debe olvidar que la experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real; entonces, si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos.
- No se puede conocer el grado de imprecisión de los resultados. Por lo general el modelo se utiliza para experimentar situaciones nunca planteadas en el sistema real, por lo tanto no existe información previa para estimar el grado de correspondencia entre la respuesta del modelo y la del sistema real.

REQUERIMIENTOS PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN

- Para empezar a formar un modelo hace falta que la información sobre el estudio este completamente reunida y validada.
- Tener el modelo empezado antes de que los datos estén completamente reunidos puede ayudar a identificar información que se necesita para seguir adelante. Un modelo útil es aquél que tiene suficientes detalles y exactitud para alcanzar los objetivos de la simulación.

SIMULACIÓN DE LLANURAS DE INUNDACIÓN

A continuación se explicaran los conceptos de realidad, modelación y simulación. En la figura 1 se observa una panorámica del río Guayuriba, esa es nuestra realidad (existencia verdadera y efectiva de algo o alguien, cosa que existe en el mundo real).²

La realidad es aquello que *acontece de manera verdadera o cierta*, en oposición a lo que pertenece al terreno de la fantasía, la imaginación o la ilusión. Lo real, por lo tanto, es lo que *existe efectivamente*. Al hacer un análisis de nuestra realidad, en este caso la cuenca del río Guayuriba procedemos a conceptualizar un componente que hace parte de toda la zona de estudio: la altura y podemos decir que cada punto del territorio tiene un valor de altura; la



Figura 1. Panorámica cuenca del río Guayuriba.

Fuente: www.google.com

forma de representar este atributo puede ser incorporar el concepto de curvas de nivel.

Una curva de nivel³ es aquella línea que en un mapa une todos los puntos que tienen igualdad de condiciones y de altitud. Las curvas de nivel suelen imprimirse en los mapas en color siena para el terreno y en azul para los glaciares y las profundidades marinas. Para recrear nuestra realidad es necesario responder a la siguiente pregunta, ¿cada cuantos metros vamos a medir la altura?

- Cada cien metros o cada cinco metros.

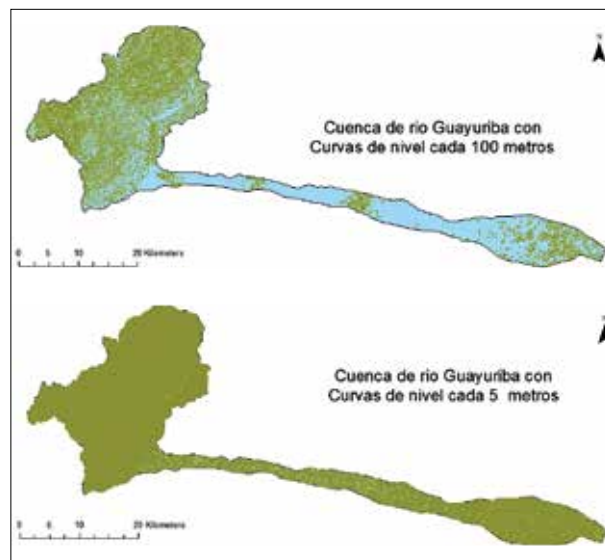


Figura 2. Curvas de nivel a cada cuenca río Guayuriba.

Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015

2. Lee Definición de realidad - Qué es, Significado y Concepto en: <http://definicion.de/realidad/os>

3. http://es.wikipedia.org/wiki/Curvas_de_nivel

Esta representación de la realidad tiene un fundamento matemático. Según Kovalenko (1993) y Refsgaard (1996), los modelos matemáticos se pueden clasificar en modelos determinísticos, estocásticos e híbridos.

La curva de nivel⁴ c de la función $z = f(x, y)$ es el conjunto de puntos (x, y) del plano, que cumplen $f(x, y) = c$

A partir de una digitalización de las mismas, la altura se puede interpolar a todo el dominio con la técnica Triangular Irregular Network (TIN)⁵, que consiste en construir una triangulación tal que los vértices de los elementos estén ubicados sobre puntos de cota conocida, permitiendo así una interpolación lineal dentro de cada triángulo.

Al emplear una función matemática podemos llevar nuestra realidad a un modelo, en nuestro caso vamos a representar la altura que obtenemos a partir de las curvas de nivel a un modelo digital de elevación.

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) es una forma de representación de la superficie del terreno en formato Raster. A partir del modelo Raster se puede asociar las zonas de color azul a las áreas con mayor humedad y el color naranja con menor humedad.

El MDE en los sistemas de información geográfico abre las puertas a un conjunto de métodos de representación de la realidad y de simulación de procesos que complementan de forma importante la capacidad de los SIG para el manejo de información temática.

La simulación de las llanuras de inundación se puede realizar utilizando dos herramientas informáticas: Arcgis 10.1 con la extensión HEC-GeoRAS y HEC-RAS.

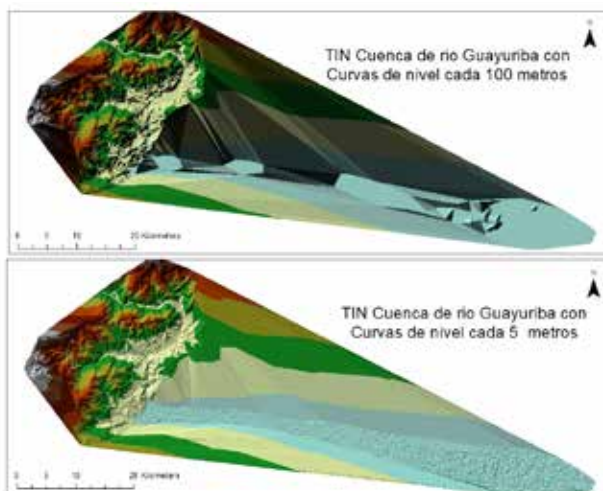


Figura 3. TIN cuenca río Guayuriba
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

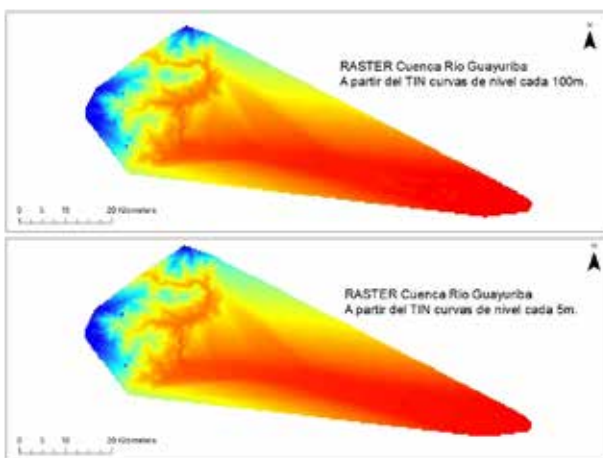


Figura 4. Modelo Raster cuenca río Guayuriba
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015

4. <http://www3.uah.es/fsegundo/calculo/esquemas/140-FuncionesDosVariables.pdf>

5. Ángel Felicísimo (1999). «Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales» (pdf). Archivado desde el original el 25 de noviembre de 2015. Consultado el 27 de diciembre de 2013.

El procedimiento consta de tres pasos:



Figura 5. Procedimiento de la Simulación.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

PREPROCESO

(Trabajo previo con ArcGis y HEC-GeoRAS), para generar un archivo de importación para HEC-RAS que va a contener la información geométrica de las secciones transversales.

En ArcGis 10.1 se crea un nuevo proyecto para cada una de las cuencas, a partir del modelo digital de elevación (MDE) y se realizan las siguientes operaciones:

- Digitalización del cauce del río, las márgenes izquierda y derecha del río, las secciones transversales.
- Añadir la topología y la elevación del cauce.
- Añadir la topología y la elevación a las secciones transversales.
- Verificar las capas.
- Crear el fichero de importación para HEC-RAS.



Figura 6. Digitalización en Arcgis10.x a partir del MDE
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

PROCESO DE MODELIZACIÓN DEL FLUJO CON HEC-RAS

El programa HEC-RAS (River Analysis System) es una herramienta informática que permite la simulación de planicies de inundación calculando el nivel de agua en cada sección transversal en el tramo del río. El flujo puede ser permanente o no.

Al iniciar el trabajo con el software Hec-Ras se hace necesario para la modelación definir el tipo de canal que se va a trabajar. Los canales son conductos en los que el agua circula debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera.

De acuerdo con su origen los canales pueden ser naturales (ríos, arroyos etc.) o artificiales (construidos por el hombre). Dentro de ellos pueden incluirse conductos cerrados que trabajen parcialmente llenos. Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de

manera natural en la Tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas canales abiertos naturales. Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes con las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo en estos canales se vuelvan manejables mediante el tratamiento analítico de la hidráulica teórica.

Los canales artificiales son aquéllos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano, canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canaletas de madera, cunetas a lo largo de carreteras, etc., así como canales de modelos construidos en el laboratorio con propósitos experimentales. Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado o diseñadas para cumplir unos requisitos determinados. La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirá, por tanto, resultados bastante similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño (Perla, 2010).

La definición de las secciones transversales de dicho canal son otro punto de partida primordial, la sección transversal de un canal natural es generalmente de forma muy irregular y varía de un lugar a otro, en los cauces naturales las secciones transversales son irregulares y la medición de sus características geométricas se realiza con levantamientos batimétricos.

La línea que une los puntos más profundos de las secciones transversales a lo largo de la corriente se denomina thalweg. En las corrientes de lecho aluvial se observan continuas variaciones en las secciones transversales y en la línea del thalweg. Las magnitudes y frecuencias de estas variaciones dependen del régimen de caudales, la capacidad de transporte de sedimentos, y el grado de estabilidad del cauce.

Además de calcular los niveles de agua en cada sección, el HEC – RAS tiene la capacidad de calcular la socavación en los elementos de apoyo de un puente para el diseño de la cimentación de los mismos. El ingreso de datos es sencillo porque las ventanas en entorno Windows permiten introducir los datos de manera ordenada.

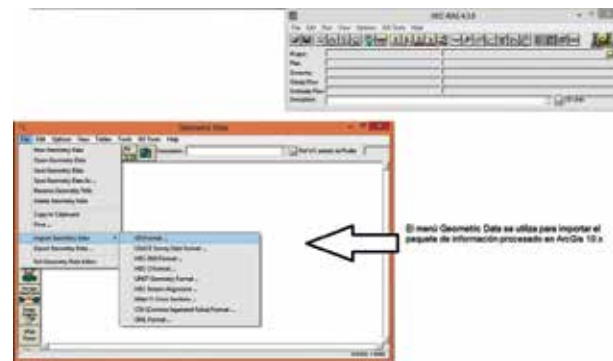


Figura 7. Importación desde ArcGIS 10.1 a HEC-RAS

Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

La modelación del flujo con HEC-RAS se realiza a partir de la información obtenida del programa ArcGIS.

En la siguiente imagen podemos observar desde el entorno de HEC-RAS las características abstraídas de la cuenca en estudio. En esta etapa se ingresarán datos de caudales, condiciones de contorno y pendientes; a estos datos se les

conoce como condiciones hidráulicas. Las condiciones de contorno son aquellas bajo las cuales el programa simulará la inundación que se producirá en diferentes años, es decir, 10, 25 y 50 años de cada cuerpo de agua, caño Quenane, Quenanito, río Ocoa y río Guayuriba.

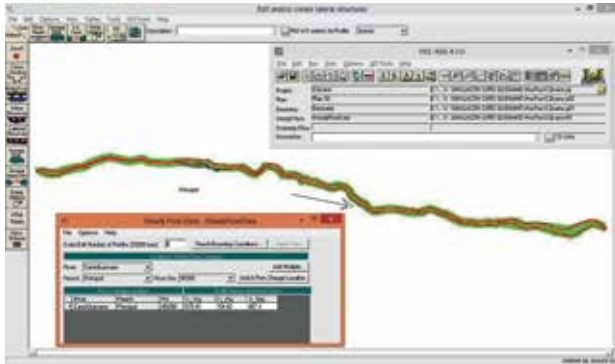


Figura 8. Parametrización de datos en HEC-RAS.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

La sección transversal de un canal natural es irregular y la medición de sus características geométricas se realiza con levantamientos batimétricos.

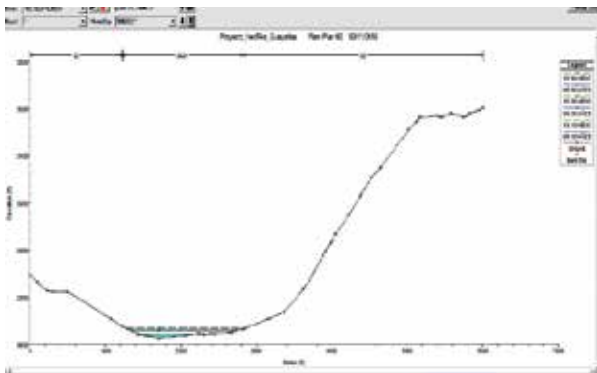


Figura 9 .Secciones transversales.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

En las corrientes de lecho aluvial se observan continuas variaciones en las secciones transversales y en la línea del thalweg (La corriente se denomina así). Las magnitudes y frecuencias de estas variaciones dependen del régimen de caudales, la capacidad de transporte de sedimentos y el grado de estabilidad del cauce.

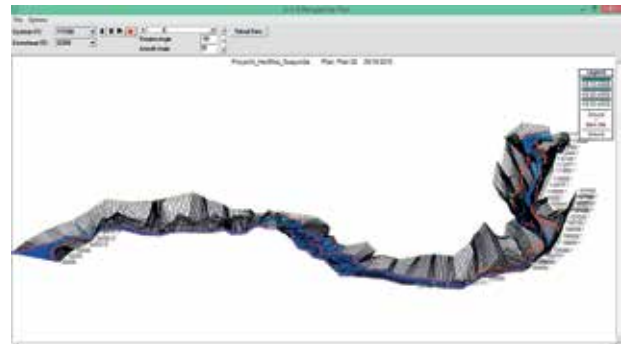


Figura 10. Modelamiento de Cauce en HEC-RAS.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

El régimen de flujo en un tramo particular de una corriente natural se clasifica en función del Número de Froude, NF , el cual es una relación adimensional entre fuerzas de inercia y de gravedad. En el régimen supercrítico ($NF > 1$) el flujo es de alta velocidad, propio de cauces de gran pendiente o ríos de montaña. El flujo subcrítico ($NF < 1$) corresponde a un régimen de llanura con baja velocidad. El flujo crítico ($NF = 1$) es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico (INGTEKCH, 2009).

Además de las especificaciones de las secciones transversales, se decide puntualizar el coeficiente de rugosidad de Manning.



Figura 11. Características del cauce del río.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

La fórmula de Manning es una evolución de la fórmula de Chézy para el cálculo de la velocidad del agua en canales abiertos y tuberías, propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning, en 1889:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Siendo S la pendiente en tanto por 1 del canal.

Para algunos, es una expresión del denominado coeficiente de Chézy C utilizado en la fórmula de Chézy:

$$V(h) = C \sqrt{R(h) \cdot S}$$

El cual depende estrictamente del tipo de cobertura que compone al tramo del afluente; la ecuación de Manning es el resultado del proceso de un ajuste de curvas, y por tanto es completamente empírica en su naturaleza. Debido a su simplicidad de forma y a los resultados satisfactorios que arroja para aplicaciones prácticas, la fórmula Manning se ha hecho la más usada de todas las fórmulas de flujo uniforme para cálculos de escurrimiento en canal abierto. La acción de la vegetación, es vista como una clase de rugo-

sidad superficial. Este efecto depende principalmente de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación, y es muy importante en el diseño de canales pequeños de drenaje, ya que por lo común éstos no reciben mantenimiento regular (Duque y Marcela, 2012). Una vez ingresados los datos se realiza la simulación y se verifican si existen errores.

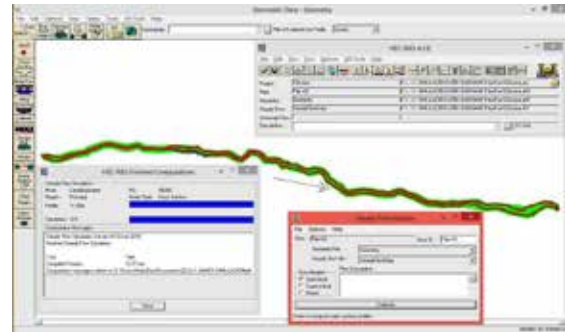


Figura 12. Proceso de simulación en HEC-RAS.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

El resultado puede observarse a través de tablas, gráficos y en 3D.

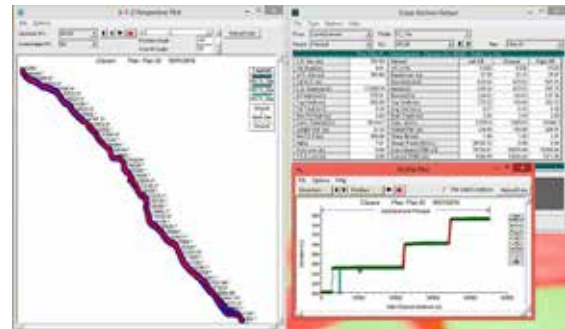


Figura 13. Proceso de simulación Tr 10 años en HEC-RAS.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

Al finalizar la simulación, se debe guardar la información en un formato que el ArcGIS lo pueda reconocer y a través del cual se puedan generar las llanuras de inundación.

POST-PROCESO Y VISUALIZACION 3D EN ARCGIS 10.1

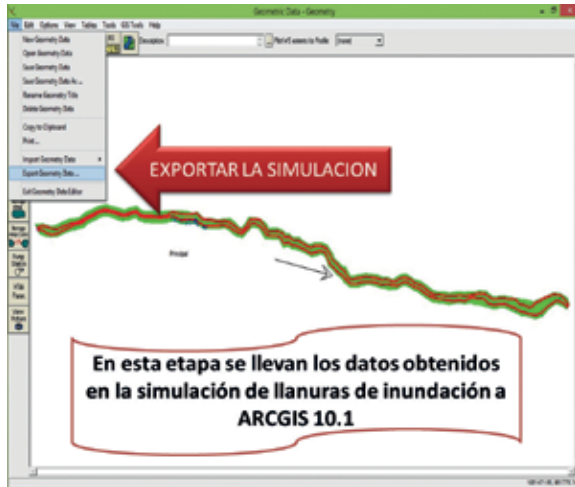


Figura 14. Creación del archivo de exportación ArcGis 10.1.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

Para el análisis de la información obtenida en la simulación de las llanuras de inundación en diferentes periodos de retorno (T_r) se puede hacer con el aplicativo ArcGis 10.1:

- ArcMap permite importar el archivo de los datos de la simulación desde HEC-RAS utilizando la extensión HEC-GeoRAS, los resultados se pueden mostrar a través de mapas, informes.
- ArcScene con esta herramienta la superficie de inundación para cada periodo de retorno se superpone sobre el modelo digital de elevación para ser analizadas con diferentes capas del área de la cuenca. Los productos que se obtienen de este ejercicio son animaciones en 3D donde se puede visualizar el cauce del río, las llanuras de inundación, el uso del suelo, la división política y malla vial para contribuir en la toma de decisiones para la conservación de cada una de las cuencas.

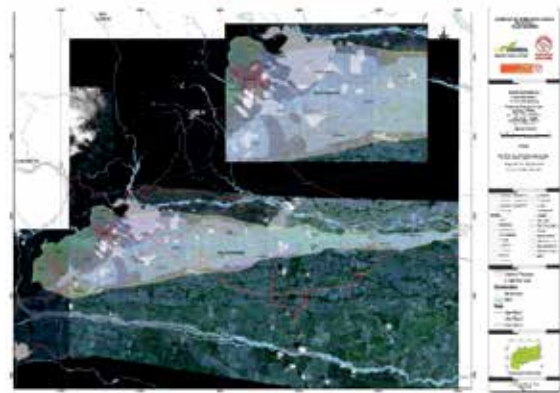


Figura 15. Plano de Llanuras de inundación río Ocoa a 10, 25 y 50 años. Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos. 2015.



Figura 16. Llanuras de inundación río Ocoa a 10 años – Zona Urbana. Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

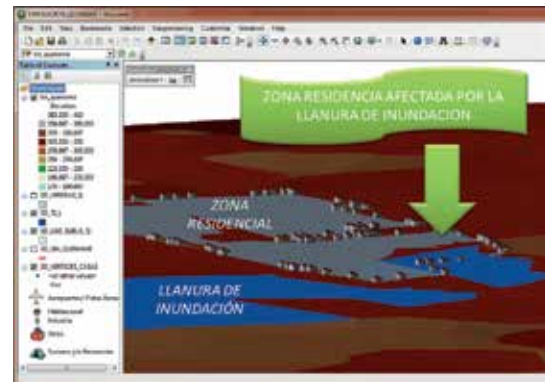


Figura 17. Visualización 3D.
Fuente: Proyecto Cuencas Unillanos 2015.

ÁREAS DE APLICACIÓN Y USO DE LAS SIMULACIONES CON ÉNFASIS AMBIENTAL

En los últimos años el empleo de la tecnología de simulación ha crecido considerablemente dentro del ámbito de las ciencias medioambientales. Las principales áreas de aplicación están enfocadas al estudio de modelos de interacción suelo-planta-atmósfera, modelos de flujos superficiales, subsuperficiales, modelos digitales de elevación, métodos de evaluación ambiental (riesgos de contaminación, erosión, degradación de masas forestales), entre otras áreas.

EJEMPLO DE SOFTWARE Y SIMULACIONES

QGIS es la herramienta SIG de código abierto más conocido con una probada trayectoria y una vibrante comunidad, además de tener su particular ecosistema de complementos “plugins”. QGIS ofrece una alternativa verdaderamente abierta que reduce las barreras de entrada y de costo, no tiene derechos de licencia, y se ejecuta en el sistema operativo de su elección (www.qgis.org).

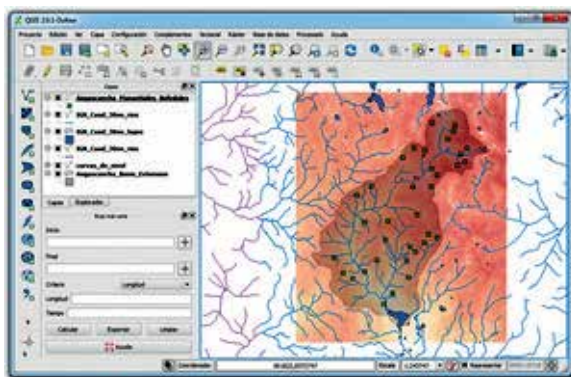


Figura 18. Capas vectoriales de líneas, polígonos y puntos con QGIS. Fuente: <http://qidahatari.com/ih-es/>

SAGA GIS, una plataforma GIS más orientada al análisis espacial. SAGA GIS es un software simple pero potente, tiene una gran librería para el análisis espacial y la caracterización de cuencas. Las opciones de interpolación en SAGA GIS están mejor implementadas que en otros software libres y comerciales (www.saga-gis.org).

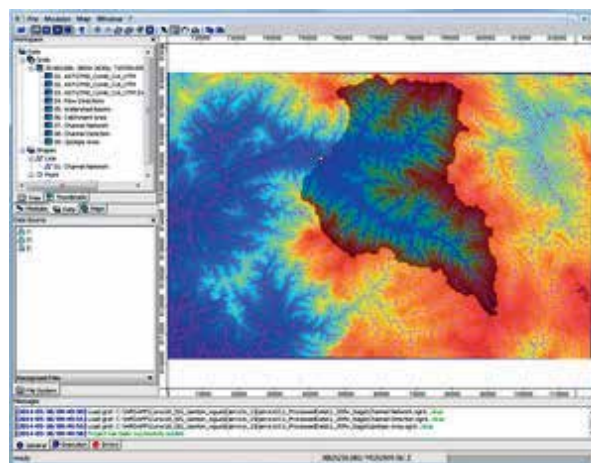


Figura 19. SAGA GIS. Análisis espacial de una cuenca andina en SAGA GIS. Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es>

El modelo numérico HEC-RAS está desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos. Los modelos hidráulicos de río utilizan la gradiente y la topografía para evaluar el tirante, las velocidades y las zonas inundadas. También sirve para calcular el transporte de sedimentos y la temperatura del agua (<http://hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>).

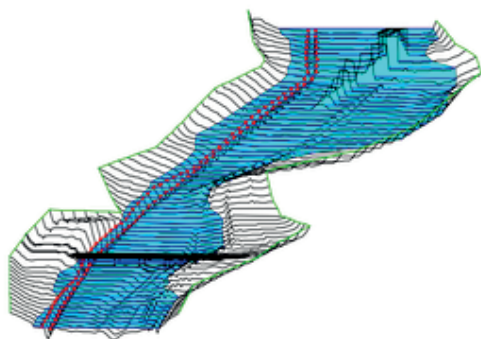


Figura 20. HEC-RAS Esquema del sistema fluvial por HEC-RAS y secciones de análisis. Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/>

IRIC (International River Interface Cooperative) es un software desarrollado con la finalidad de proporcionar un entorno completo de simulación del cauce del río, cuyos resultados pueden ser importados y utilizados por los usuarios con fines de análisis, mitigación y prevención de desastres, mediante la visualización de los resultados de la simulación del río (<http://i-ric.org/en/>).



Figura 21. IRIC Visualización de resultados de inundación. Fuente: <http://civilgeeks.com/2014/05/31/los-10-mejores-software-libres-en-recursos-hidricos/>

El Sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos hidrológicos de cuencas. El software incluye procedimientos de análisis hidrológico tradicional, como eventos de infiltración, hidrogramas unitarios, y enrutamiento hidrológico. HEC-HMS también incluye los módulos para la evapotranspiración, derretimiento de nieve y cálculo de la humedad del suelo (www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms).

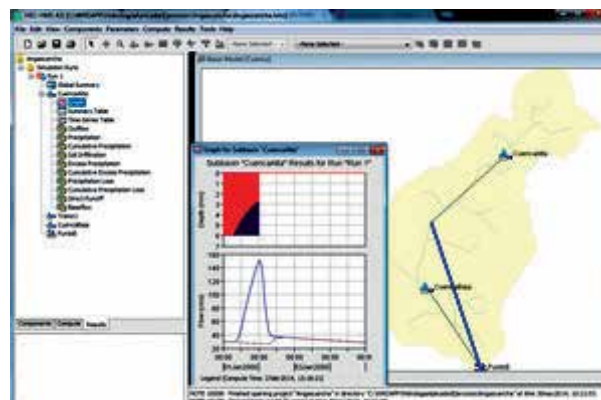


Figura 22. HEC-HMS Modelamiento hidrológico de un evento en una cuenca andina. Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/>

El código de modelamiento PRMS (Sistema de Modelamiento de Precipitación-Escorrentía) es un sistema modular, de parámetros espacialmente distribuidos, que representa los procesos físicos de una cuenca hidrográfica. Fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos – USGS para evaluar los efectos de varias combinaciones de geomorfología, tipo y uso de suelo, vegetación y parámetros climáticos sobre la respuesta hidrológica de la cuenca (www.brr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/PRMS.html).

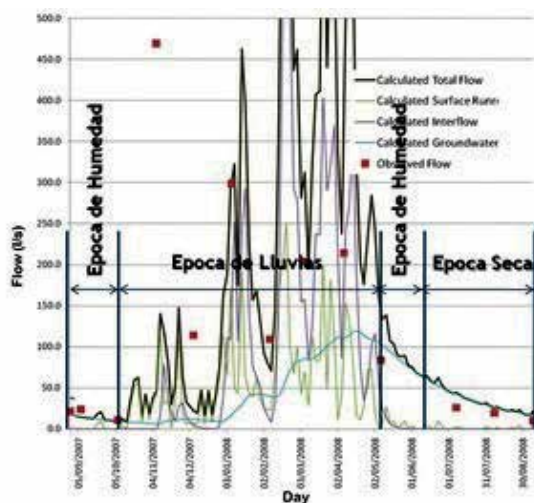


Figura 23. PRMS Distribución del flujo modelado en PRMS en escorrentía superficial, interflujo y flujo base.

Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/>

MODFLOW Modelo de agua subterránea por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El modelamiento numérico es capaz de simular el flujo de agua subterránea en dos o tres dimensiones y simula los principales procesos físicos relacionados con el régimen de agua subterránea como recarga, evapotranspiración, bombeo, drenaje, etc. (<http://water.usgs.gov/ogw/modflow/>).

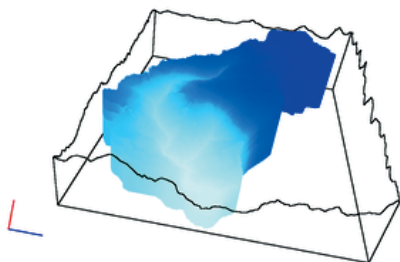


Figura 24. Modelo numérico de una cuenca andina tridimensional en MODFLOW. Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/>

El paquete MT3DMS es un modelo de transporte de masa acoplado a un modelo de flujo en MODFLOW. El código MT3DMS simula la advección, dispersión/difusión y las reacciones químicas de adsorción/absorción de los contaminantes en agua subterránea (<http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/>).

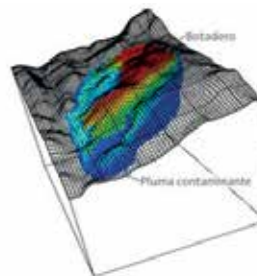


Figura 25. Modelamiento de pluma contaminante de un botadero minero. Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/>

Prácticamente cualquier fenómeno físico asociado a dinámica de fluidos puede representarse con el software y la cantidad de paquetes, así como la disponibilidad libre del código hacen que uno pueda explorar posibilidades de modelar diversos tipos de problemas incluyendo el acople con un modelo reactivo (www.openfoam.org).

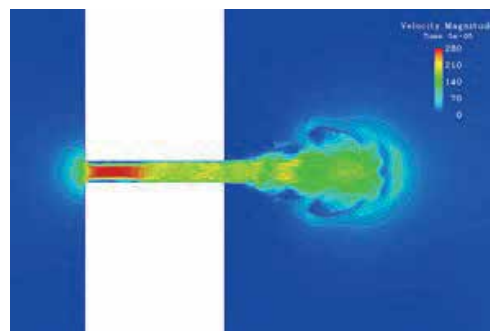


Figura 26. Modelamiento de velocidad de flujo a través de una abertura con OpenFOAM. Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/>

Es el software predilecto para el análisis científico y por ende para la evaluación de los recursos hídricos y el medio ambiente. Tiene una serie de paquetes para distintas herramientas como SIG, análisis matemático, e inteligencia artificial. Si se requiere una herramienta completa para la manipulación, procesamiento, arreglo y ploteo de datos estructurados, Python - Scipy es una solución efectiva, versátil y de código libre (www.python.org, www.scipy.org).

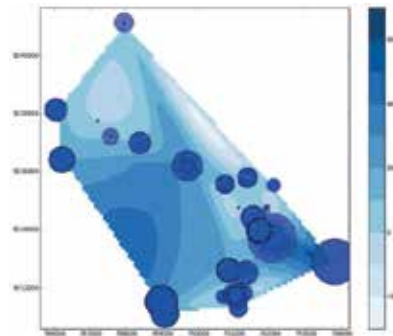


Figura 27. Python Ejemplo de análisis espacial y temporal con Python – Scipy. Fuente: <http://gidahatari.com/iH-es/>

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Hydrologic Engineering Center (2002).HEC-GeoRAS, An extension for support of HEC-RAS using ArcView. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Environmental Systems Research Institute (1996). ArcView Gis: Using ArcView GIS, ESRI inc, Relands, CA.

Hydrologic Engineering Center (2002). HECRAS (version 3.1), River Analysis System, User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Hydrologic Engineering Center (2002). HECRAS (version 3.1), River Analysis System, Hydraulic

Technical Reference Manual (2000). U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Hydrologic Engineering Center (2002). HECRAS (version 3.1), River Analysis System, Applications Manual, U.S. Army Corpsof Engineers, Davis, CA.

FAO (1997). Modelos y sus usos. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W7452S/w7452s01.htm#TopOfPage>. Consultado el 1 de noviembre de 2015.

Domínguez, E. (2000). Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos. *Meteorol. Colombia* 2: 33-38. Disponible en: http://www.geociencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_23/file/04%20Dominguez%20protocolo.pdf. Consultado el 1 de noviembre de 2015.

Galán, J. M., L. R. Izquierdo, S. Izquierdo, J. O. Santos, R. del Olmo, A. López-Paredes y E. Bruce (2009). Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2 (1): 1.

Guzmán D., L. M. (2000). Coeficiente de Manning. Disponible en: <http://www.carreteras.org>. Consultado el 1 de noviembre de 2015.

Kuroiwa Z., J. M. (2002). Introducción al uso del HEC – RAS. Disponible en: <http://www.es.scribd.com/doc/71396503/INTRODUCCION-AL-USO-DEL-HEC-RAS>. Consultado el 1 de noviembre de 2015.

INGTEKCH (2010). Elementos geométricos de la sección transversal de un canal. Disponible en: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/02/elementos-geometricos-de-la-seccion.html>. Consultado el 1 de noviembre de 2015.

Aplicaciones prácticas del Hec-Ras. Capítulo 17 – 18. Elementos de restricción de flujo en las secciones. Disponible en: <http://www.gits.ws/05academico/ficheros/Cap17-18.Aplicacionespracticass.pdf>

Colombo, G. (1971). Manuale dell'ingegnere. 80a Edizione, Hoepli. 270 pp.

Ven Te Chow (1982). Hidráulica de los canales abiertos. Editorial Nomos S. A. Bogotá, Colombia. 337 pp.

Hidráulica de canales. Franklin Ramírez. (1991). Editora Universitaria UASD.

Hidráulica de canales abiertos. Richard H. French (1988). McGraw Hill, México. Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). «Systems simulation: the art and science». IEEE Transactions on Systems. *Man and Cybernetics* 6 (10): 723-724.

Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). «Systems simulation: the art and science». IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 6(10). pp. 723-724.

