PN-ABG-286

CENTRO DE HIDROCIENCIAS

PROJECT NUMBER: 6.255
DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE COMPUTER GRAPHIC SYSTEM FOR THE DESIGN OF AGRICULTURAL DRAINAGE

FINAL REPORT

Rec'd in SCI OCT 1 0 1990

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRICOLAS

Rec'd in SCI OCT 1 0 1990

936-5542

FINAL REPORT

COVERING PERIOD: JANUARY 1987-JULY-1990

SUBMITTED TO THE OFFICE OF THE SCIENCE ADVISOR
U.S. AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE COMPUTER GRAPHIC SYSTEM FOR THE DESIGN OF AGRICULTURAL DRAINAGE

PRINCIPAL INVESTIGATORS: OSCAR LUIS PALACIOS-VÉLEZ AND
BALTASAR CUEVAS RENAUD

GRANTEE INSTITUTION: COLEGIO DE POSTGRADUADOS
CENTRO DE HIDROCIENCIAS
MONTECILLO, MÉX.
56230 MEXICO

PROJECT NUMBER: 6.255

AID GRANT PROJECT OFFICER: SR. GERARD BOWERS

PROJECT DURATION: JANUARY 1987 - JULY 1990

Best Available Document

TABLE OF CONTENTS

PAG.

I.- EXECUTIVE SUMMARY 3

II.- RESEARCH OBJECTIVES 4

III.- METHODS AND RESULTS 7

IV.- APPENDIXES:

1) SHIFT: SISTEMA HIDROLÓGICO DE FACETAS TRIANGULARES MANUAL TÉCNICO Y DE USO.

2) "SHIFT: A DISTRIBUTED RUNOFF MODEL USING IRREGULAR FACETS", MANUSCRIPT SUBMITTED TO THE JOURNAL OF HYDROLOGY.

3) "A DYNAMIC HIERARCHICAL SUBDIVISION ALGORITHM FOR COMPUTING DELAUNAY TRIANGULATIONS AND OTHER CLOSEST-POINT PROBLEMS". MANUSCRIPT ACCEPTED FOR PUBLICATION IN THE ACM TOMS, 1990.

4) "AUTOMATIC CASCADE NUMBERING OF UNIT ELEMENTS IN DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELS", JOURNAL OF HYDROLOGY, 112(1990) 375-393.

5) EOS, TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, VOL. 70 NO. 43. OCTOBER 24, 1989, PP 1091 AND 1094.

I.- EXECUTIVE SUMMARY

The main objetive of this project was the "Development of a methodology to facilitate and improve the calculations needed for the topographical, hydrological and hydraulic design of agricultural drainage".

The developed methodology includes modules to construct and eventually edit the topographic model of the watershed to be studied, to input and interpolate soil, riverbed and rainfall data and to calculate and route the runoff.

It should be noted, however, that the development of numerical schemes for the solution of the Kinematic Wave equations (that describe the flow of water with free surface) took more time that initially expected. Likewise, the development of an interactive and "user-friendly" editor for the construction (and modification) of the watershed model, that was not considered in the original project, took some time. Because of this, the resulting system covers only part of the initiall. stated objectives: the calculation of runoff in a physically-based distributed model. The system allows, however, and in a very easy way, for the identification of points in the watershed where the expected discharge could exceed the local discharge capacity, thus producing floods.

In this project two foreign researchers took part: one from the Universidad Nacional Agraria "La Molina" from Lima, Perú and

other from the Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. Two mexican graduate students obtained a M.S. degree developing parts of the system.

The system is fully documented (in Spanish), one article has been published in the Journal of Hydrology and another one has been submitted to this journal. Likewise one article is in press for the next issue of the ACH IDMS and another one has been recently submitted to this journal. The system has been presented in the AGU Fall Meeting December 4-8, 1989, in San Francisco, CA and workshops about it took place in México, Bolivia and Perú.

II) Research Objectives

The main objetive of this project was the **"Development of a methodology to facilitate and improve the calculations needed for the topographical, hydrological and hydraulic design of agricultural drainage".**

Observe that rather than study the design problems of agricultural drainage in a specific region, the objetive of this project was to develop a computer-aided methodology that could significantly facilitate the design in <u>any</u> region, <u>if</u> the needed information (breakpoint rainfall data, soil parameters such as hydraulic conductivity and moisture content) is available. When this minimum information is not available it seems more advisably to invest some funds and obtain it, rather than use models that "do not require" such data.

The reason that motivated this project is explained in the following.

The wet lands of Southeast Mexico, as in other countries, are the main land reserve for agriculture, but their use presents many problems, including the necessity of preventing floods and constructing drainage to control excess water. The required studies are laborious and time-consuming. Because of this usually a few design alternatives are analyzed. For instance, it is difficult to identify the storm that produces the highest discharge: sometimes the storm with the highest intensity covers only part of the watershed. Other storms, with less intensity, could cover a larger part of the watershed, or could traverse the watershed in such a way that the resulting hydrograph has a higher peak discharge. The only way to solve this problem is by means of distributed models and simulating as much storms as possible.

The development of physically-based distributed models is a relatively new trend in hydrological modeling. Some of the most significant and advanced models, such as the so called SHE model (Système Hydrologique Européen), developed jointly by the Danish Hydraulic Institute, the British Institute of Hydrology and the French firm SOGREAH, were described in the literature (Abbot et al., 1986a, 1986b and Bathurst, 1986)[1] more or less at the time that this project started. Beven (1985) discusses the nature,

---

1) See the list of references at the end of Appendix No. 2.

main characteristics, and fields of application of distributed models. Recently Beven (1989) also cautions about the careless use of these models.

The questions why the principal investigators decided to develop a new distributed model is answered as follows:

1) A digital Elevation Model (DEM) is the basis of a distributed hydrological model and the principal investigators had some experience regarding the Triangular Irregular Network (TIN) models (Palacios and Cuevas, 1986a). The TIN models are probably the most advanced DEMs (Feuchter et. al., 1978) The TIN models are quite flexible in comparison with the square-grid models (used by SHE and other distributed models). It seemed a very good idea to develop a hydrological model with a TIN DEM basis.

2) Most distributed models are run in mainframe computers and in a batch mode, thus unaccesable to many organisations in LDC. The principal investigators had in mind a PC-oriented, interactive and computer graphic system, that could be easily used even by persons with no experience in computers.

3) The development of an integrated hydrological model (one that includes the TIN-DEM construction and edition, input of soil, riverbed and rainfall data, and calculation and routing of runoff) would allow the principal investigators, their graduate students and associates to gain a deeper insight into the hydrologic problems.

4) Finally this project would allow the Colegio de Postgraduados and in particular the Centro de Hidrociencias, to consolidate academic relationships with the Universidad Nacional Agraria "La Molina", Lima, Perú and the Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, since researchers from them would participate in the project. We also consolidated and/or established academic relationships with several American Universities and with the Agricultural Research Service of Tucson, Az.

III.- METHODS AND RESULTS

The developed system is described in detail in the Manual Técnico y de Uso (Appendix No. 1), which is written in Spanish. Two versions of the code were produced: one with menus and help screens in Spanish and a second one in English. Two 3 1/2" diskettes, containing the executable code (English version) are included with the Manual. A more general description, with emphasis of the innovative aspects, is contained in the manuscript of an article submitted to the Journal of Hydrology (Appendix No. 2).

For the construction and edition of the TIN DEM a new algorithm was developed. This algorithm is described in an article that will be published in the next issue of AGU IUHS (see the manuscript, approved for publication, in the Appendix No. 3).

Probably the most innovative contribution of this research, the automatic definition of a kinematic cascade of the unit elements of the distributed model, is described in an article that was recently published by the Journal of Hydrology (Appendix No. 4) and that served as the basis of a M.S.thesis of a graduate student that worked under the direction of the principal investigators.

The system was presented at the AGU Fall Meeting, that took place in San Francisco, Ca., Dec 4-8, 1989. The abstracts appeared in EOS, Transactions. American Geophysical Union. Vol. 70 No. 43 October 24. 1989 (see Appendix 5). The system was presented in workshops organized in Perú, Bolivia and México, with a total attendance of 85 persons (28 in Peru. 30 in Bolivia and 27 in México). The system was also presented in seminars and demo sessions that took place in the ARS, Aridland Watershed Management Research Unit Tucson, Az. and at the Department of Agricultural Engineering, University of Illinois.

Many small and big problems arose during the development of the project. They are described in detail in the previous progress reports, submitted to AID. (See Progress Report. 1986; Avance de Investigación Enero-Julio de 1988; Avance de Investigación Agosto-Diciembre de 1988; Avance de Investigación Enero-Junio de 1989, Avance de Investigación Julio-Diciembre de 1989 and Avance de Investigación Enero-Julio de 1990).

In the following we present an overview of the developed system.

SHIFT (Sistema Hidrológico de Facetas Triangulares) is an integrated distributed modeling system, primarily intended as a research and teaching tool. It allows for:

a) The construction of a catchment Digital Elevation Model (DEM) based on the Triangular Irregular Network (TIN) concepts.
b) The input and interpolation of soil data
c) The input and interpolation of riverbed data
d) The input and interpolation of rainfall data and
e) The hydrological simulation that calculates the runoff.

These operations are explained next.

BEST AVAILABLE

a) Digital elevation model (DEM) construction.

This module has four options:

- Preliminary DEM construction
- DEM edition
- Definition of a kinematic cascade
- 2-D and 3-D graphic representations

a.1) Preliminary DEM construction

The preliminary DEM construction uses the information contained in a dsl file previously prepared by the user, with a set of elevation points distributed arbitrarily and representing the places where the topography changes abruptly. SHIFT models the watershed surface as a set of contiguous non-overlapping

triangular facets (Delaunay triangles).

As a result of the preliminary DEM construction a structural matrix of triangular facets is formed. This matrix has 6 columns, the first 3 point to the vertex number forming the "Delaunay" triangle, and the second 3 point to the triangle numbers opposing to the vertices. The matrix has exactly 2N+1 triangles or rows, where N is the number of vertices, although some triangles are auxiliary.

The preliminary DEM construction also identifies the river-course network, formed by triangle edges with converging slopes, generating a second structural matrix with as many rows as number of river-course segments and 6 columns. The first 2 point to the number of upstream and downstream vertices, the second two point to the number of upstream and downstream river-course segments, if any. The last 2 columns point to the triangles number forming the river-course segment.

a.2) DEM edition

The DEM edition allows for the correction or modification of a DEM. SHIFT has an interactive editor, which allows to introduce new vertices, delete old vertices or change their elevation. From the model it is possibly to select a rectangular portview that defines the area where the edition will take place. There is an arrow cursor that points in the direction of the steepest slope of the triangular facet in which it is located. When the facet is

flat (which does not occur very often) the cursor takes the shape of a single cross.

To insert a point first it is necessary to locate the cursor in the appropiate position, give the elevation of the point and press F3. To eliminate the point just press F4. SHIFT makes the changes without a total network reconstruction.

a.3) Definition of a kinematic cascade

The kinematic cascade is used for runoff routing through the basin model, it is carried out by a recursive procedure that starts in the higher model elements and descends until finally reaching the outlet. The only condition for a valid calculation sequence of model elements, is that when analyzing a given element (triangular facet or reach), all of the upstream neighboring elements should have already been analyzed. This sub-module identifies for the river-course segments such a calculation sequence, also called hydrologic or kinematic cascade.

Following this sequence, for each reach SHIFT identifies all of the triangular facets that totally or partially form its contributing area. It should be noted that a given triangular facet may be part of the contributing area of different reaches.

a.4) 2-D and 3-D graphic representations

Once a topographic watershed model has been constructed SHIFT provides a choice of different 2-D and 3-D graphic representations, these may be formed by contour lines and by profile (vertical) cuts, parallel to either the X or Y axes or perpendicular to the line of vision.

The vertical scale may be attenuated or exaggerated and the vertical and horizontal angles for the line of vision are arbitrarily fixed by the user.

b) Soil information input and interpolation

This module allows for the input of soil information, corresponding to the sites where the measurements took place. This information includes soil moisture content, hydraulic conductivity, roughness and other parameters needed by the Smith & Parlange infiltration formula. Afterwards, a "thin plate" interpolation procedure is applied to calculate the values of the parameters in other parts of the watershed.

c) Riverbed information input and interpolation

This module allows for the input of riverbed information for those reaches where the measurements took place. The information includes the same infiltration and roughness parameters mentioned above, plus the riverbed width. Afterwards interpolation

procedures are applied to extend this information to all of the river segments.

d) Rainfall data input and interpolation

SHIFT assumes that one or more rain gauge stations exist in the studied area or are close to it. SHIFT uses the mentioned "thin plate" interpolation procedure to calculate the hyetograph at the center of all of the triangular facets.

e) Hydrological simulation

This module has the following options:

- Overland flow calculation
- Channel flow calculation
- Hydrograph selection and presentation

e.1) Overland flow calculation

Each facet is analyzed (only once) in the previously defined sequence. Since the flow calculations are treated as a one-dimensional problem, the triangular-shaped facet is transformed into a rectangular-shaped one, with the same area but with a length equal to one-half the length of the maximum slope line. The soil parameters and the hyetograph for the point in the center of the facet were previously interpolated from the known data in given locations.

Infiltration is calculated by the Smith & Parlange equation. By taking it into account the resulting runoff is calculated by the kinematic wave equation, solved by a Newton-Raphson scheme in each space interval. The proposed scheme is general enough to take into account the different flow forms: runoff formation due to rainfall, runoff routing and their combinations.

The sequence of calculations is illustrated in a graphic representation of the partitioned watershed by shadowing those triangular facets that are already analyzed. In this scheme it is easy to see which part of the basin still has to be calculated. When there are hundreds of facets the calculation can tale several hours.

e.2) Channel flow calculation

The channel flow calculations follow a procedure similar to that of the facets. In fact the same algorithms are used in both cases to carry out the hydrologic computations. There are differences only in the interpretation of some parameters. For instance, the lateral inflow in the facets is the rainfall, while in the channels it is the hydrograph obtained from the facets that form the reach.

The sequence of calculation is also illustrated in a graphic representation of the basin, by recoloring those reaches already analyzed.

14

e.3) Hydrograph selection and presentation

Once the hydrologic calculation are completed, the user can move through the watershed model in an interactive way to choose a facet or reach and then observe its hydrograph. It is only necessary to locate the cursor in the corresponding facet or reach and press F3 or F4.

The hydrograph can be saved in a disk file or sent to a printer.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
CENTRO DE HIDROCIENCIAS
MONTECILLO, MEXICO

SHIFT

SISTEMA HIDROLOGICO DE FACETAS TRIANGULARES

Versión 1.0

MANUAL TECNICO Y DE USO

Desarrollado bajo la dirección de:
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
M.C. Baltasar Cuevas Renaud

Auspiciado por la Agencia Internacional
de Desarrollo del Gobierno de los Estados Unidos
de América

Marzo de 1990.

16

IMPORTANTE

Este documento y los programas de computadora correspondientes han sido elaborados con el mayor cuidado posible, dentro de las limitaciones existentes; sin embargo no se garantiza que estén libres de errores, por lo que la utilización de los mismos será bajo la responsabilidad única del usuario.

Las marcas de productos, tanto de "hardware" como de "software" mencionadas en este documento, tienen como único propósito proporcionar información específica. Las menciones de marcas comerciales no deben interpretarse como recomendación de uso sobre otros productos no mencionados.

PROLOGO

El Sistema Hidrológico de Facetas Triangulares (SHIFT) es un modelo que viene siendo desarrollado en el Centro de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados con el apoyo de la Agencia Internacional de Desarrollo del Gobierno de los Estados Unidos. El sistema permite construir un modelo hidrológico de parámetros distribuídos, capturar y procesar la información requerida y simular el escurrimiento superficial que se produce en la cuenca como consecuencia de un evento pluvioso.

El sistema puede ser útil como herramienta de trabajo en las áreas de docencia e investigación. Por sus características puede ser utilizado en la predicción de los cambios en el hidrograma de salida de una cuenca, producidos por la variación espacial ya sea de la lluvia o del uso del suelo.

El propósito del presente documento es dar a conocer los requerimientos de hardware y software para la instalación del SHIFT, explicar algunos aspectos teóricos en los que se apoya y los pasos a seguir para el uso del sistema.

El manual consta de ocho capítulos, el primero corresponde a una introducción, donde se explican algunas generalidades de los modelos distribuidos y se presenta una vista panorámica del sistema SHIFT; el segundo capítulo corresponde a los requerimientos de hardware y

software para la instalación del sistema; en el tercero se listan las limitaciones del sistema; en el cuarto se trata lo referente a la construcción del modelo digital de elevaciones; en el quinto, sexto y séptimo capítulos se explican los procedimientos para realizar la captura y procesamiento de información de facetas, de cauces y de datos de lluvia respectivamente y en el octavo se describe todo lo relacionado con los cálculos hidrológicos.

Los capítulos 4, 5, 6, 7 y 8 están divididos en tres partes, una donde se describen algunas consideraciones teóricas de aquellos aspectos del sistema que lo ameritan, otra donde se dan los pasos a seguir para la operación del módulo y una última donde se explica la estructura interna que guardan los archivos generados por el sistema, esto último es solamente para información del usuario, dado que casi todos los archivos son generados por el sistema y en su estructura no interviene para nada el usuario. Prácticamente cada capítulo es independiente, sin embargo cuando en dos o más capítulos se utiliza un mismo procedimiento, las bases del mismo se describen en el que lo aborda primero. De esta forma el usuario puede consultar solo la parte operativa de un módulo o, si lo desea, puede ver los aspectos teóricos correspondientes.

El sistema SHIFT contiene archivos y datos de omisión ("default"), con los cuales el usuario puede entrenarse, es decir esta información y los mensajes de ayuda disponibles en las diferentes partes del sistema sirven como información tutorial sobre el sistema, de tal manera que el usuario que por primera vez lo utiliza no tendrá problemas.

19

Este trabajo ha sido planeado y se ha desarrollado bájo la dirección y supervisión del Dr. Oscar Luis Palacios Vélez y el MC. Baltasar Cuevas Renaud. Otros investigadores han participado en la elaboración de distintos módulos, como se indica a continuación.

El módulo topográfico fue desarrollado por el Dr. Oscar L. Palacios Vélez y el MC. Baltasar Cuevas Renaud. El MC. William Gandoy Bernasconi, el Ing. Eduardo Chávarri Velarde y el MC. José Pimentel López trabajaron en el módulo hidrológico. El Dr. Luis Rendón Pimentel desarrolló el sub-módulo de infiltración; el MC. Pablo López Antezana participó en el desarrollo del módulo meteorológico y el submódulo de interpolación; el Dr. Jesús Chávez Morales en el diseño general del sistema y el Ing. José Antonio Pedraza O. fue el principal apoyo en aspectos de programación, tanto de lenguaje Turbo Pascal, como de ensamblador. El Ing. Pedraza participó además de manera específica en el desarrollo de algunos programas para representaciones gráficas, manejo de pantallas y en general la incorporación de características "amigables" del sistema. El Sr. Juan Avila Alcíbar prestó una gran ayuda en la prueba de programas. Finalmente debe indicarse que la presente documentación fue preparada por los investigadores principales y el MC. José Pimentel López.

Diferentes partes del sistema, en particular el módulo hidrológico, fueron ampliamente discutidas con los Drs. David A. Woolhiser y David C. Goodrich, del USDA ARS de Tucson, Arizona. Asimismo diferentes procedimientos específicos, sobre todo en los

cálculos de infiltración fueron desarrollados tomando como modelo el sistema denominado KINEROS, en el que ha venido trabajando el Dr. Woolhiser y otros distinguidos investigadores desde hace algún tiempo (véase Woolhiser *et. al.*, 1989).

Las reuniones de trabajo con los Drs. Woolhiser y Goodrich que tuvieron lugar tanto en Montecillo, Méx. como en Tucson, Az. se realizaron con el apoyo del Grupo de Trabajo Agropecuario DGAI-SARH (MEX)/OICD-USDA (EUA).

C O N T E N I D O

I INTRODUCCION 1.1

II REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE 2.1

III LIMITACIONES DEL SISTEMA 3.1

IV CONSTRUCCION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE) 4.1

4.1 Generalidades 4.1

4.2 Aspectos teóricos 4.1

4.2.1 Construcción preliminar del MDE 4.1

4.2.2 Edición del MDE 4.4

4.2.3 Definición de la cascada cinemática 4.5

4.2.4 Representaciones gráficas del MDE 4.7

4.3 Operación del módulo 4.9

4.3.1 Construcción preliminar del MDE 4.10

4.3.2 Edición del MDE 4.11

4.3.3 Definición de la cascada cinemática 4.14

4.3.4 Representaciones gráficas del MDE 4.15

4.4 Estructura interna de archivos 4.22

V CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE FACETAS 5.1

5.1 Generalidades 5.1

5.2 Aspectos teóricos 5.2

5.3 Operación del modulo 5.5

5.3.1 Captura de datos de facetas 5.6

5.3.2 Interpolación de datos de facetas 5.9

5.3.3 Modificación de datos previamente interpolados 5.10

5.4 Estructura interna de archivos 5.12

VI CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAUCES 6.1

6.1 Generalidades 6.1

6.2 Aspectos teóricos 6.2

6.2.1 Determinación de la geometría de cauces 6.2

6.2.2 Interpolación de parámetros 6.4

6.3 Operación del módulo 6.4

6.3.1 Captura de los datos de cauces 6.5

6.3.2 Interpolación de datos de cauces 6.8

6.3.3 Modificación de datos previamente interpolados 6.9

6.4 Estructura interna de archivos 6.11

VII CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LLUVIA 7.1

7.1 Generalidades 7.1

7.2 Aspectos teóricos 7.1

7.3 Operación del módulo 7.2

7.3.1 Captura de datos de lluvia 7.3

7.3.1.1 Agregar una estación 7.4

7.3.1.2 Consultar una estación 7.5

7.3.2 Interpolación de datos de lluvia 7.8

7.4 Estructura interna de archivos 7.11

VIII SIMULACION DE EVENTOS HIDROLOGICOS 8.1

8.1 Generalidades 8.1

8.2 Aspectos teóricos 8.2

8.2.1 Determinación de la cascada cinemática 8.4

8.2.2 Cálculo del escurrimiento en facetas 8.6

8.2.2.1 Geometría de la faceta rectangular equivalente 8.6

8.2.2.2 Cálculo de la infiltración del agua en las facetas 8.7

8.2.2.3 Interpolación del ancho sujeto a infiltración 8.14

8.2.2.4 Tránsito del escurrimiento en facetas 8.17

8.2.2.5 Determinación del valor de los parámetros ϕ y ϕz del frente del avance 8.24

8.2.3 Cálculo del escurrimiento en cauces 8.27

8.2.3.1 Infiltración dentro de la red de cauces 8.28

7.2.3.2 Tránsito del escurrimiento en la red de segmentos de cauce 8.28

8.3 Operación del módulo 8.29

8.3.1 Cálculo del escurrimiento en facetas 8.29

8.3.2 Cálculo del escurrimiento en cauces 8.31

8.3.3 Selección y presentación de hidrogramas 8.33

8.4 Estructura interna de archivos 8.37

IX BIBLIOGRAFIA 9.1

I INTRODUCCION

Dentro de la Hidrología se han utilizado una variedad muy amplia de enfoques y métodos para estudiar los diferentes procesos del ciclo hidrológico. Más recientemente, con el advenimento de computadoras con alta velocidad de procesamiento de datos, han proliferado en particular los modelos matemáticos para simular los procesos hidrológicos.

Todos los modelos simplifican en diferente grado la complejidad del sistema real, al tomar en cuenta solo algunos factores y procesos haciendo abstracción de aquellos que se consideran menos importantes para un fin dado. En la actualidad se ha incrementado el interés por los modelos llamados de parámetros distribuidos, los cuales consideran al sistema hidrológico formado por un conjunto de elementos unitarios, tales como planos de escurrimiento y segmentos de cauce, en los que se supone una uniformidad de los parámetros y los datos considerados por el modelo, como puede ser: suelos, cobertura vegetal, precipitación, etc. Por lo tanto, un modelo de parámetros distribuidos permite considerar la variabilidad espacial que caracteriza a ciertos parámetros y variables de entrada. Además en aquellas areas donde se desee considerar con mayor detalle la variabilidad espacial se puede aumentar el número de elementos que forman esa parte de la cuenca (Beven, 1985).

El modelo que se ha desarrollado pertenece a este tipo de modelos y en los párrafos siguientes se presenta una descripción panorámica del mismo, la cual se detalla en los capítulos posteriores de este documento.

El modelo SHIFT (Sistema HIdrológico de Facetas Triangulares), viene siendo desarrollado en el Centro de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados desde 1986, aunque el uso de modelos digitales del terreno se inició en este centro desde los años 80. En el desarrollo de este modelo han participado especialistas en diferentes disciplinas, como son la Geometría y Geomorfología Computacional, Meteorología Agrícola, Hidráulica de cursos de agua y Computación.

El sistema SHIFT está constituido de 5 módulos que realizan las siguientes funciones:

a) La construcción de un modelo hidrológico de parámetros distribuidos, basado en una red irregular de triángulos.

b) La captura e interpolación de datos de las facetas triangulares

c) La captura e interpolación de datos de los segmentos de cauce

d) La captura e interpolación de datos de precipitación y

e) El cálculo del escurrimiento para la red de facetas y la red de cauces.

Estos puntos definen, por cierto, las 5 opciones que presenta el menú principal del sistema SHIFT. Estos 5 módulos deben ser llamados

-26-

en el orden indicado, debido principalmente a que cuando se ejecuta un módulo se utiliza información que ha sido previamente determinada, concretamente por ejemplo, no se puede llamar al módulo 2 sin antes haber ejecutado el módulo 1.

En cualquiera de los menús donde aparece una serie de opciones el usuario podrá elegir una de ellas utilizando las teclas ↓, ↑ o presionando el número de la opción deseada.

Se tienen mensajes de ayuda en línea que por razones obvias no tienen el nivel de detalle de la presente documentación, pero que facilitan la selección de opciones. Asimismo se tienen archivos de datos de una microcuenca de ejemplo y valores de omisión ("default") de diferentes variables, por lo que el usuario que por primera vez utiliza este sistema no encontrará mayores problemas para familiarizarse con el mismo. Todos los archivos son creados automáticamente por SHIFT, exceptuando el archivo de coordenadas de los puntos de la cuenca que tiene que ser generado por el usuario.

A continuación se describen brevemente los diferentes módulos, para dar al usuario una panorámica del sistema, en el entendido de que los siguientes capítulos habrán de detallar los aspectos teóricos que lo ameritan, la operación del sistema y para información del usuario se dará una descripción de la estructura de los archivos creados por el sistema.

1) Construcción del modelo digital de elevaciones (MDE)

El módulo cuenta con 4 opciones:

1.1 Construcción preliminar del MDE

1.2 Edición del MDE

1.3 Definición de la cascada cinemática o secuencia de cálculo

1.4 Representaciones gráficas del MDE

La construcción preliminar del modelo digital de elevaciones se realiza a partir de un conjunto de puntos definidos por sus tres coordenadas espaciales, los cuales corresponden a las localidades del terreno donde la pendiente cambia bruscamente.

El archivo que contiene las coordenadas X, Y, Z de los puntos del terreno, los que generalmente quedan irregularmente distribuidos, debe ser previamente preparado por el usuario. Estos puntos definirán los vértices de las facetas triangulares que formarán al modelo topográfico de la cuenca. El resultado de la construcción del MDE es una red irregular de triángulos que no se superponen. En este submódulo también se identifica la red de cauces, los cuales coinciden con las aristas de los triángulos hacia donde las pendientes convergen.

La edición del MDE permite corregir o modificar el modelo existente, generalmente con el propósito de eliminar discontinuidades de la red de drenaje identificada durante la

28

construcción del modelo. A través de este submódulo se pueden agregar y eliminar puntos o modificar su elevación.

Es probable que el método más riguroso para realizar los cálculos del escurrimiento sea el utilizar las ecuaciones de St. Venant. Las ecuaciones se resuelven separadamente y en forma alternada. Primero son resueltas para el cauce principal, considerando las confluencias como puntos donde la descarga es conocida (del intervalo de tiempo anterior). En seguida las ecuaciones se resuelven para cada tributario, considerando conocidos los tirantes en el punto de descarga hacia el cauce principal (del intervalo de tiempo anterior). Es claro que este método es bastante complicado y consume mucho tiempo de computadora, aún para redes muy simples.

Entre los métodos más simples para realizar el cálculo del escurrimiento se tiene la aproximación de la onda cinemática. En este caso la complejidad de los cálculos se reduce a la solución recursiva de un solo elemento, con la única condición de que la entrada desde el elemento vecino localizado aguas arriba sea conocida, ya que los efectos de remanso no son considerados por la ecuación de la onda cinemática. Esta condición implica que los elementos del modelo distribuido deben ser analizados en un orden o secuencia específica, conocida como cascada cinemática.

Para un mismo modelo existen un gran número de secuencias de

cálculo válidas que cumplen con el requisito mencionado. En este módulo se define una cascada de segmentos de cauce y para cada segmento se identifican las facetas (o la fracción de las mismas) que constituye el área de contribución de cada segmento. Es oportuno indicar que una misma faceta puede formar parte del área de contribución de diferentes segmentos de cauce. Sin embargo, los cálculos se realizan una sola vez para cada faceta triangular y los resultados se almacenan en un archivo para su utilización posterior las veces que sea esto necesario.

Las representaciones gráficas ofrecen vistas de apariencia tridimensional del MDE que muestran en forma atenuada o exagerada (según desee el usuario), las variaciones topográficas del terreno. Asimismo se pueden obtener planos de curvas de nivel en proyección plana.

2) Captura y procesamiento de datos de facetas

Las opciones con las que cuenta el módulo son:

2.1 Captura de datos de facetas

2.2 Interpolación de datos de facetas

2.3 Edición de datos de facetas previamente interpolados

Durante la captura de los datos de facetas se registran las coordenadas de los sitios de muestreo localizados dentro de la cuenca en estudio, asi como ciertas características de los suelos de

-30

cada faceta. La mayoría de los parámetros capturados son utilizados en la ecuación de infiltración.

En la interpolación de los datos de la faceta se utiliza un procedimiento simple llamado de la "placa delgada". El proceso se aplica para aquellas facetas donde no se conoce el valor de los parámetros.

La edición de datos de la faceta previamente interpolados permite desplegar y modificar el valor de los parámetros de cualquier faceta. Mediante esta opción también se puede imprimir los datos de las facetas.

3) Captura y procesamiento de datos de cauces

Las opciones de este módulo son:

3.1 Captura de datos de cauces

3.2 Interpolación de datos de cauces

3.3 Edición de datos de cauces previamente interpolados

Mediante la captura se realiza el registro de la información de los segmentos de cauce donde tuvo lugar el muestreo. La información capturada incluye los mismos parámetros que para el caso de suelos, además del ancho del segmento de cauce.

La opción de interpolación de datos de cauces permite extender

la información capturada a todos los segmentos de cauce, para tal fin se aplica el método mencionado de la "placa delgada".

En la edición de datos de cauces previamente interpolados, se tiene la posibilidad de desplegar y modificar el valor de los parámetros de cualquier segmento de cauce. También es posible enviar a impresión los datos de todos los segmentos.

4) Captura y procesamiento de datos de precipitación

Las opciones que contiene el módulo son:

4.1 Captura de datos de precipitación

4.2 Interpolación de datos de precipitación

El sistema supone que existen una o más estaciones pluviográficas dentro del área de la cuenca estudiada, de tal manera que durante la captura se registrará la historia del evento de lluvia considerado.

En este caso se utiliza también el procedimiento de interpolación de la "placa delgada" para calcular un hietograma en el centro de cada una de las facetas triangulares.

5) Simulación de eventos hidrológicos

El módulo está formado por las siguientes opciones:

5.1 Cálculo del escurrimiento en facetas

5.2 Cálculo del escurrimiento en cauces

5.3 Selección y presentación de hidrogramas

Este es el módulo principal del sistema SHIFT. Durante el cálculo del escurrimiento en facetas, cada una de éstas es analizada una sola vez en el orden previamente establecido (Tercera opción del módulo de *Construcción del modelo digital de elevaciones*). Considerando que los datos de suelos y precipitación son conocidos en cada faceta con un nivel bajo de aproximación, se ha considerado razonable el que la faceta de forma triangular sea transformada a una faceta de forma rectangular con la misma área, pero con una longitud igual a la mitad de la longitud de la línea de máxima pendiente, esto con el fin de tratar el escurrimiento como un problema unidimensional y simplificar asi los cálculos hidrológicos.

La infiltración se determina aplicando la ecuación de Smith-Parlange y el cálculo del escurrimiento se realiza utilizando la ecuación de la onda cinemática, resolviéndola mediante el esquema de Newton-Raphson.

En el cálculo del escurrimiento en cauces se sigue un procedimiento similar al de las facetas. En ambos casos se utilizan los mismos algorítmos para llevar a cabo los cálculos hidrológicos. Existen diferencias solamente en la interpretación de algunos parámetros. Así, mientras que en las facetas la entrada lateral es la precipitación, en los cauces es el hidrograma de las facetas que

33

forman cada segmento de cauce.

Una vez que se han concluido los cálculos hidrológicos, el usuario puede obtener una representación de los hidrogramas. Para esto se tiene la opción de seleccionar en forma interactiva la faceta o el segmento de cauce cuyo hidrograma se desea conocer.

34

II REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE

Para utilizar el sistema SHIFT se debe contar con una microcomputadora PC compatible, del tipo AT o superior, con 640 KB de memoria RAM, con disco duro de 20 MB como mínimo, una pantalla gráfica a color del tipo VGA (con 640 X 480 pixels) y una impresora Epson-1000 o equivalente, o bien una HP Laser Jet o equivalente. El sistema también puede ser utilizado en una microcomputadora con monitor EGA, sin que aparezca la primer pantalla y con cierta deformación de las representaciones gráficas. No se recomienda que el sistema sea utilizado en microcumputadoras con monitor CGA.

Se requiere contar con sistema operativo MS-DOS versión 3.3 o más avanzada. Es indispensable que el archivo CONFIG.SYS contenga la instrucción FILES = 20.

También se requiere de un editor para generar el archivo inicial de coordenadas de puntos que servirá de base para el modelo de la cuenca. Para esto puede ser utilizado el editor Turbo Pascal o un procesador de palabras.

El sistema está contenido en 2 discos de $3\frac{1}{2}''$; los archivos contenidos en éstos son:

Nombre	Extensión	Función que cumple
P_SHIFT	EXE	Programa principal del SHIFT
CNSMDE	EXE	Construcción del MDE
MDE	EXE	Representaciones gráficas del MDE
CPDSF	EXE	Captura y procesamiento de datos de facetas
CPDSC	EXE	Captura y procesamiento de datos de cauces
CPDPR	EXE	Captura y procesamiento de datos de lluvias
SEHD	EXE	Programa principal para la simulación del escurrimiento
CESF	EXE	Calcular el escurrimiento en facetas
CESC	EXE	Calcular el escurrimiento en cauces
SPHD	EXE	Presentación de hidrogramas
SHIFT	MEN	Pantallas de ayuda para P_SHIFT.EXE
CNSMDE	MEN	Pantallas de ayuda para CNSMDE.EXE
MDE	MEN	Pantallas de ayuda para MDE.EXE
CPDSF	MEN	Pantallas de ayuda para CPDSF.EXE
CPDSC	MEN	Pantallas de ayuda para CPDSC.EXE
CPDPR	MEN	Pantallas de ayuda para CPDPR.EXE
SEHD	MEN	Pantallas de ayuda para SEHD.EXE
LOG001	IMG	Almacena una imagen que se presenta cuando se ejecuta P_SHIFT.EXE
LOG002	IMG	Almacena una imagen que se presenta cuando se ejecuta P_SHIFT.EXE
********	—	Almacena los datos topográficos
********	TPG	Almacena matrices estructurales
********	DBJ	Almacena matrices estructurales
********	FCT	Almacena orden de cálculo de facetas
********	DOC	Almacena orden de cálculo de cauces
********	SMF	Almacena datos de sitios de muestreo de facetas
********	SMC	Almacena datos de sitios de muestreo de cauces
********	CSF	Almacena datos de suelos interpolados para facetas

36

Nombre	Extensión	Función que cumple
********	CSC	Almacena datos de suelos interpolados para cauces
********	SPR	Almacena datos de las estaciones pluviográficas
********	DPR	Almacena hietogramas de cada estación
********	PRE	Almacena datos de lluvia interpolados para cada faceta
********	FAN	Almacena facetas que fueron analizadas
********	SHF	Almacena hidrogramas de facetas
********	SHL	Almacena hidrogramas de entrada lateral
********	SHC	Almacena hidrogramas de cauces

Los nombres que aparecen con asteríscos corresponden a los archivos del ejemplo que se incluye con los programas del sistema.

Se sugiere al usuario abrir un subdirectorio para instalar el sistema dentro de éste, también se sugiere estar tomando nota de los archivos que se vayan generando al aplicar el sistema a una cuenca. El sistema puede ser ejecutado integralmente o cada uno de los programas ejecutables (con extensión EXE) se pueden correr independientemente.

III LIMITACIONES DEL SISTEMA

SHIFT tiene limitaciones conceptuales, de disponibilidad de información y de sistema operativo. Entre las limitaciones conceptuales se tiene la ausencia de un módulo de escurrimiento subterráneo. En aquellas cuencas en donde éste es importante los hidrogramas obtenidos, sobre todo en las partes más bajas, no corresponderán a la realidad. Por otro lado SHIFT no calcula la redistribución de la humedad del suelo ní su consumo en procesos evapotranspirativos. Por este motivo SHIFT es un modelo de un solo evento y no permite una simulación continua de un periodo largo de tiempo. Otra limitación importante, que se espera superar en futuras versiones, es que no se toma en cuenta el efecto de vasos reguladores dentro de la cuenca simulada.

SHIFT, al igual que otros modelos basados en principios físicos y de parámetros distribuidos, requiere de información sobre características de infiltración y rugosidad de los suelos. Esta información suele ser escasa y costosa su obtención. Además, siendo la información relativamente "puntual", su generalización a áreas mayores (las facetas triangulares) es discutida por algunos investigadores (Beven, 1989).

El sistema operativo DOS y el compilador de Turbo Pascal, utilizados en el desarrollo de SHIFT, imponen limitaciones en los arreglos utilizados. Estas limitaciones se listan a continuación:

a) El sistema operativo DOS solo permite utilizar 640 KB de RAM, de los cuales una parte variable, según la configuración, utiliza el propio sistema operativo y utilerías residentes en memoria.

b) El sistema puede ser aplicado a cuencas que tienen como máximo:

i) 128 puntos o vértices

ii) 257 facetas triangulares

iii) 64 segmentos de cauce

c) Un vértice lo pueden compartir como máximo 32 triángulos. En principio un vértice puede ser compartido por un número ilimitado de triángulos.. Sin embargo en situaciones reales rara vez más de 10 o 12 triángulos tiene un vértice en comun, por tanto es razonable considerar que este dimensionamiento muy rara vez constituirá una limitación.

d) En el caso de la captura de las características de suelos en facetas y cauces se pueden considerar como máximo hasta 8 sitios de muestreo y en el caso de estaciones pluviográficas pueden

considerarse hasta 12 estaciones. Además, el máximo número de intervalos de tiempo que puede considerarse es 64.

Algunas de estas limitaciones podrán eliminarse o aligerarse cuando se disponga de un sistema operativo y/o un compilador de Turbo Pascal donde se pueda utilizar más de 640 KB de RAM.

IV CONSTRUCCION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

4.1 GENERALIDADES

El sistema hidrológico y todos los cálculos que en él se realizan están basados en un modelo digital de elevaciones (MDE). Este modelo se construye a partir de un conjunto de puntos definidos por sus tres coordenadas espaciales (X, Y, Z). Este módulo permite la construcción del MDE, así como su modificación interactiva, si es necesario.

Complementariamente se pueden generar vistas de apariencia tridimensional, que permiten atenuar o exagerar artificialmente el factor de escala vertical con lo cual se puede lograr que se tenga una idea más clara de la topografía de la cuenca.

4.2 ASPECTOS TEORICOS

En esta sección se explican algunos aspectos teóricos en que se basan los algorítmos de este módulo.

4.2.1 Construcción preliminar del modelo digital de elevaciones

Para la construcción del modelo digital de elevaciones se utiliza un archivo previamente preparado por el usuario que contiene las tres coordenadas espaciales de los puntos donde la pendiente

cambia abruptamente. El MDE está formado por una red de triángulos (llamados de "Delaunay") en los que la elevación de los vértices no se considera para la construcción del modelo (esto puede originar problemas que después habrá que corregir, según se explica más adelante).

Para formar los triángulos el sistema selecciona tres puntos auxiliares que forman un triángulo muy grande, el cual contendrá a todos los puntos de la cuenca. A continuación el sistema inicia un proceso recursivo en el que va insertando cada uno de los puntos, la inserción de un punto tiene como consecuencia la destrucción de algunos triángulos y la formación de otros nuevos. Esto se realiza utilizando un procedimiento desarrollado por Palacios y Cuevas (1990) que consiste en los siguientes pasos:

a) Mediante una búsqueda (o "caminata") orientada, basada en coordenadas baricéntricas, se determina cual de los triángulos ya formados contiene al punto que se está insertando.

b) Se determina qué otros triángulos contiguos serán afectados por la inserción de este punto (cuando el círculo que circunscribe a un triángulo contiene al nuevo punto, ese triángulo será afectado).

c) Se forman los nuevos triángulos uniendo al nuevo punto con las aristas del polígono externo que forman los triángulos afectados.

d) Se actualiza la base de datos.

Cada una de estas etapas se describe con detalle en el trabajo anteriormente mencionado de Palacios y Cuevas (1990). Como un

resultado de la construcción preliminar del MDE se forma una "matriz estructural de facetas triangulares". Esta matriz contiene 6 columnas, en las tres primeras están los números de los vértices que forman el triángulo de "Delaunay" y en las otras tres restantes los números de los triángulos opuestos a los vértices.

Durante la construcción preliminar del MDE también se identifica la red de segmentos de cauce, un segmento de cauce se forma cuando las pendientes de dos facetas contiguas convergen hacia la arista que comparten. Como resultado de esto se genera una segunda "matriz de segmentos de cauce". La matriz tiene 6 columnas de datos, en las dos primeras columnas se encuentran los números de los vértices aguas arriba y aguas abajo del segmento de cauce, en las siguientes dos columnas los números de los segmentos de cauce aguas arriba y aguas abajo respectivamente (si es que existen) y en las últimas dos columnas los números de los triángulos que están formando el segmento.

El MDE queda entonces formado de las siguientes estructuras de datos:

a) Las coordenadas X, Y, Z de los puntos donde cambia la pendiente del terreno

b) La matriz de facetas triangulares

c) La matriz de segmentos de cauce

d) La cascada cinemática (descrita posteriormente).

4.2.2 Edición del modelo digital de elevaciones

Frecuentemente la red de cauces resulta con discontinuidades, cuya explicación es la siguiente. En primer lugar es posible que se tengan dos o más redes que corresponden a diferentes cuencas que se encuentran hidráulicamente desconectadas. En segundo lugar, estas discontinuidades aparecen durante la construcción de los triángulos de Delaunay donde no se considera la elevación de los puntos. En tercer lugar es posible que se tengan errores en los datos de entrada. Cualquiera que sea la causa es importante contar con un editor interactivo para la construcción definitiva del MDE, con el cual se puedan agregar o eliminar puntos y cambiar su elevación hasta lograr la continuidad de la red de cauces, puesto que de otra manera no se podrá transitar el escurrimiento superficial.

La eliminación de puntos es un problema complicado que se resuelve aplicando el algorítmo desarrollado por Palacios y Cuevas (1990) y que a continuación se describe brevemente.

a) Se localiza cualquier triángulo, uno de cuyos tres vértices es el punto que será eliminado.

b) Se identifican todos los triángulos que tienen al punto por eliminar como un vértice común (las relaciones de vecindad que están implícitas en la matriz estructural facilitan la solución de este problema).

c) Se identifica el polígono externo que forman estos triángulos, eliminando todas las aristas internas comunes.

d) Se prueban todas las combinaciones posibles de tres puntos del polígono externo y se seleccionan como triángulos de Delaunay

144

aquellos triángulos que cumplen con las siguientes condiciones:

i) Su círculo circunscrito no contiene otro punto del perímetro.

ii) Su círculo circunscrito contiene el punto que será eliminado.

e) Se actualiza la matriz de triángulos eliminando las hileras correspondientes a los triángulos que se eliminan y se añaden los triángulos nuevamente formados, después de identificar sus vecinos.

Al eliminar o introducir un nuevo punto y cuando se cambia la elevación de algun punto se identifican los cambios en los cauces (pueden aparecer y/o desaparecer segmentos de cauce). Estos cambios son entonces incorporados en la matriz de segmentos de cauce.

4.2.3 Definición de la cascada cinemática

Seguramente el método más riguroso para realizar el tránsito del escurrimiento es el que utiliza las ecuaciones de St. Venant. Las ecuaciones se resuelven por separado y en forma alternada. Primero son resueltas para el cauce principal, considerando las confluencias como puntos donde la descarga es conocida (del intervalo de tiempo anterior). Enseguida las ecuaciones se resuelven para cada uno de los tributarios, considerando conocidos los tirantes en el punto de descarga hacia el cauce principal (del intervalo de tiempo anterior). Como se puede observar el método es bastante laborioso y con seguridad consume mucho tiempo de computadora, aún tratandose de

redes muy simples.

Entre los métodos simplificados existentes para realizar el cálculo del escurrimiento se tiene la aproximación de la "onda cinemática". La complejidad de los cálculos se reduce a la solución recursiva de un solo elemento, con la única condición de que la(s) entrada(s) desde el(los) elemento(s) vecino(s) aguas arriba sea(n) conocida(s), debido a que los efectos de remanso no son considerados por la ecuación de la onda cinemática. Esto implica que los elementos del modelo distribuido deben ser analizados de acuerdo a una secuencia específica denominada "cascada cinemática".

La cascada cinemática se utiliza para transitar el escurrimiento a través de la cuenca, esto se lleva a cabo mediante un procedimiento recursivo que inicia en los elementos más elevados y desciende hasta alcanzar la salida de la cuenca. La única condición para que una secuencia de cálculo sea válida es que cuando se analize un elemento dado, todos los elementos vecinos aguas arriba ya deben haber sido analizados. Primeramente se determina una secuencia de cálculo o cascada cinemática para los segmentos de cauce y posteriormente para cada uno de los segmentos se identifican todas las facetas triangulares que total o parcialmente forman parte de su área de contribución. Estas operaciones se describen con detalle en el trabajo de Gandoy y Palacios (1990).

La cascada cinemática solo se identifica cuando han sido eliminadas las discontinuidades de la red de cauces descritas en la

sección anterior y de esta manera queda concluída la construcción del modelo de la cuenca.

Como complemento de las operaciones para identificar la cascada cinemática se calculan las áreas de contribución de cada segmento de cauce, así como el área acumulada hasta el vértice aguas abajo de cada segmento. Esta información es utilizada posteriormente para interpolar el ancho del cauce, según se explicará posteriormente.

4.2.4 Representaciones gráficas del modelo digital de elevaciones

Las representaciones están formadas por secciones transversales paralelas al eje X, al eje Y o perpendiculares a la dirección de la línea de visión o por curvas de nivel. La escala vertical puede ser exagerada (cuando el valor del factor de escala es mayor que 1) o atenuada.

El ángulo horizontal de la línea de visión varia entre 0° y 360°; asi se tiene que 0° corresponde a una vista del Este, 90° corresponde a una vista del Norte, 180° corresponde a una vista del Oeste y 270° corresponde a una vista del Sur. Por otro lado se tiene que el ángulo vertical de la línea de visión varia entre 0° y 90°, este último valor corresponde a una vista en planta.

Para construir las representaciones gráficas formadas por secciones transversales se calculan las proyecciones sobre un plano

perpendicular a la dirección de visión del observador, dichas proyecciones están definidas por poligonales cerradas. Comenzando con la proyección que se encuentra más lejana al observador se van dibujando cada una de ellas, borrando aquellos segmentos de poligonales anteriores contenidos en la poligonal que se dibuja (obviamente este procedimiento solo se aplica en pantallas de computadora y no en graficadores). Con esto se logra un dibujo con remoción de "líneas ocultas".

Para dibujar las curvas de nivel el procedimiento que se sigue es similar al descrito anteriormente. La identificación de un polígono o rama de una curva de nivel se hace con el siguiente procedimiento.

En primer lugar y con la finalidad de evitar problemas de singularidad inicialmente se verifica que la elevación de la curva de nivel no coincida con la elevación de ninguno de los vértices del MDE. En caso de que si coincida, se modifica ligeramente la elevación del vértice afectado y esto asegura que el plano de la curva de nivel corte en dos aristas a la faceta triangular (o en ninguna). Una vez hecho esto se realizan los siguientes pasos:

a) Se recorre la matriz de triángulos hasta encontrar uno no marcado (más adelante se explica cuando se marcan) que sea cortado por el plano de la curva de nivel, lo cual sucederá si la elevación de la curva de nivel está comprendida entre la elevación más alta y la más baja de los vértices del triángulo analizado.

b) Se identifican las dos aristas cruzadas por la curva de nivel.

c) Apoyándose en la matriz de triángulos, se sigue la curva de nivel por todos aquellos triángulos que son cortados por ésta, teniendo el cuidado de marcarlos para no pasar dos veces por ellos.

d) El proceso termina cuando se llega al punto de partida. En caso de que la curva de nivel llegue al límite de la cuenca se continua por los puntos más altos de la periferia.

e) Se continua el recorrido en la matriz de triángulos, indicado en el punto a), debido a que la curva de nivel puede tener varias ramas. En caso de que se detecte otra rama de la curva de nivel se repiten los pasos b), c) y d).

4.3 OPERACION DEL MODULO

Al ejecutar el módulo aparece el menú principal del mismo, en él se tienen 4 opciones (Figura 4.1). Las 4 opciones deben ser ejecutadas en el orden indicado. A continuación se explica cada una de ellas.

```
SHIFT          CONSTRUCCION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

OPCIONES:
          1.- CONSTRUCCION PRELIMINAR DEL MDE
          2.- EDICION DEL MDE
          3.- DEFINICION DE LA CASCADA CINEMATICA
          4.- REPRESENTACIONES GRAFICAS DEL MDE

     F1- Ayuda                          Esc- Regresar
```

Figura 4.1 Menú principal del módulo

4.3.1 Construcción preliminar del modelo digital de elevaciones

Mediante esta opción se construye el MDE que está formado por la matriz estructural de facetas triangulares y la matriz de segmentos de cauce.

Al momento de elegir esta opción el sistema pregunta por el nombre del archivo con los datos topográficos, el cual debe haber sido preparado previamente por el usuario usando, por ejemplo, el editor del compilador de Turbo Pascal. Una vez que se da el nombre se oprime la tecla RETURN y se inicia con el proceso de construcción del MDE.

Durante la construcción del MDE aparece una pantalla en la que se pueden observar los puntos y facetas que se van analizando

(Figura 4.2).

```
SHIFT          CONSTRUCCION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

     GENERACION DE LA RED IRREGULAR DE TRIANGULOS
                                Número de vértices
                                Insertando el vértice
                                Número de facetas
     IDENTIFICACION DE LA RED DE SEGMENTOS DE CAUCE
                          Analizando la faceta
                          Número de segmentos de cauce
                          Analizando el segmento
```

Figura 4.2 Datos que se analizan durante la construcción del MDE

4.3.2 Edición del modelo digital de elevaciones

Mediante esta opción se puede introducir nuevos vértices, cambiar la elevación de los que existen y eliminar aquellos vértices que producen falsas salidas. Cuando se elimina un vértice es recomendable que el usuario tome nota de su elevación, ya que en caso de no obtener los resultados deseados pueda insertarlo sin la necesidad de retornar al menú previo y entrar nuevamente al editor.

Cuando se ejecuta esta opción el sistema pregunta por el nombre del archivo con los datos topográficos, el cual debe ser proporcionado por el usuario. Una vez que se da este nombre se oprime la tecla RETURN y aparece la pantalla que se muestra en la

51

Figura 4.3, donde se muestran los datos de la red irregular de triángulos. En la parte inferior de la pantalla aparece una serie de funciones asignadas a teclas específicas, una de éstas es la tecla F2 que al oprimirla despliega la red irregular de triángulos (Figura 4.4) y también en la parte inferior de la pantalla aparece una serie de funciones asignadas a teclas específicas, además aparece una ventana que delimita cierta área de trabajo de la red cuyo tamaño se puede aumentar o disminuir con las teclas que se indican en la parte inferior.

```
SHIFT                    EDICION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

                         DATOS DEL MDE :

    CUENCA

    NUMERO DE VERTICES

    NUMERO DE FACETAS TRIANGULARES

    NUMERO DE SEGMENTOS DE CAUCE

    NUMERO DE INTERRUPCIONES EN LA RED DE CAUCES

    F1- Ayuda              F2- Continuar          Esc- Regresar
```

Figura 4.3 Características de la red irregular de triángulos

Si se oprime la tecla F5 se muestra con mayor detalle el área delimitada por la ventana (Figura 4.5), justo en este momento se puede proceder a modificar la elevación de un vértice, insertar o eliminar algún vértice mediante la utilización de las teclas que se indican en la parte inferior de la pantalla, para esto se debe

posicionar el cursor en el punto deseado. El cursor tiene forma de flecha, que marca el sentido de la máxima pendiente, excepto cuando la faceta triangular es horizontal o el punto se localiza fuera de la cuenca.

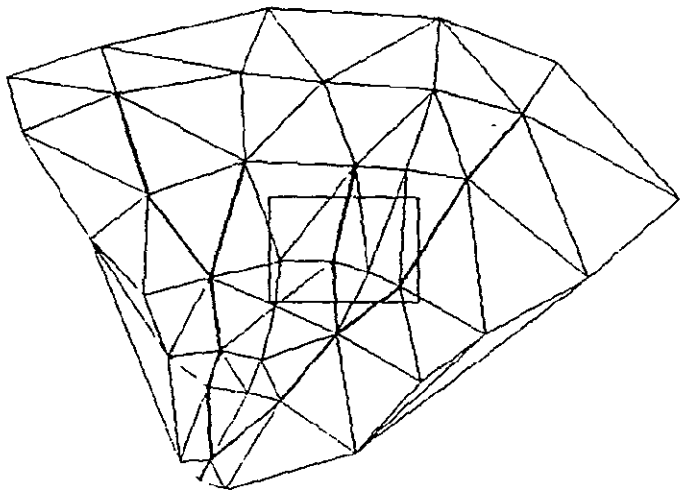


Figura 4 4 Malla irregular de triángulos

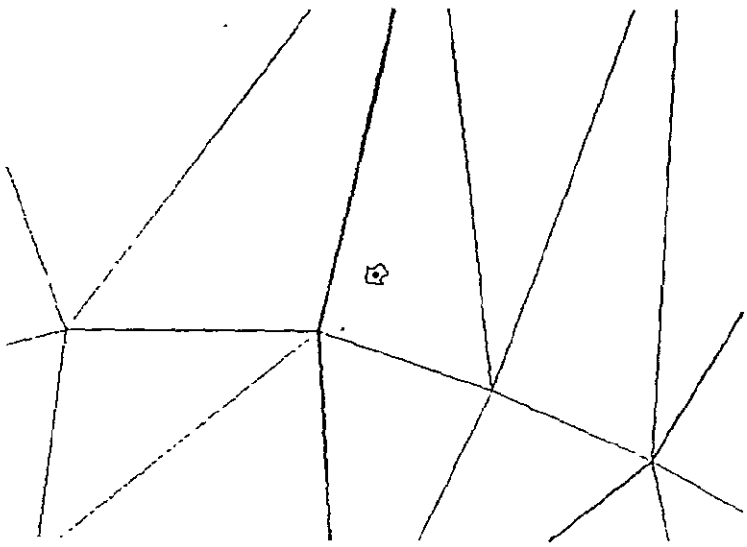


Figura 4.5 Area delimitada por la ventana de trabajo

Presionando sucesivamente la tecla Esc se regresa a los menús anteriores hasta llegar a una pantalla en donde el sistema pregunta si se desean grabar las modificaciones hechas.

4.3.3 Definición de la cascada cinemática

Mediante esta opción se determina el orden en que serán analizados los segmentos de cauce así como el orden de análisis de las facetas triangulares.

Al ejecutar esta opción el sistema pregunta por el nombre del archivo con los datos topográficos, el cual debe ser proporcionado por el usuario. Cuando se da el nombre y se oprime la tecla RETURN se despliega una pantalla (Figura 4.6), lo cual indica que se ha iniciado el proceso de la determinación de la secuencia de cálculo. Una vez que se ha terminado este proceso se oprime la tecla Esc y se regresa al menú principal del módulo.

```
SHIFT                          DEFINICION DE LA CASCADA CINEMATICA

NUMERO TOTAL DE SEGMENTOS DE CAUCE

ANALIZANDO EL SEGMENTO....

NUMERO DE FACETAS EN LA CASCADA DEL MARGEN DERECHO

NUMERO DE FACETAS EN LA CASCADA DEL MARGEN IZQUIERDO
```

Figura 4.6 Definición de la secuencia de cálculo

-59'

4.3.4 Representaciones gráficas del modelo digital de elevaciones

Mediante esta opción se pueden obtener representaciones gráficas en planta (curvas de nivel) o de apariencia tridimensional. Las gráficas de apariencia tridimensional pueden estar formadas por curvas de nivel o secciones transversales. Estas últimas pueden ser paralelas al eje X; al eje Y o perpendiculares a la línea de visión.

Al ejecutar esta opción aparece un submenú con dos opciones (Figura 4.7).

```
SHIFT                          REPRESENTACIONES GRAFICAS DEL MDE

OPCIONES:
        1.- GENERAR UNA NUEVA GRAFICA
        2.- DIBUJAR UNA GRAFICA QUE YA EXISTE

F1- Ayuda                                  Esc- Regresar
```

Figura 4.7 Menú de opciones para las representaciones gráficas

Si se elige la primera opción "Generar una nueva gráfica", se despliega una pantalla (Figura 4.8), en la cual se pide que el usuario proporcione una serie de datos, que deben darse de acuerdo a las características que el usuario desea tenga la gráfica. Cada uno de los parámetros corresponde a lo siguiente:

85

1) Los titulos, como su nombre lo indica, son los nombres que se desea dar al dibujo de la gráfica.

2) El nombre del archivo de elevaciones corresponde al nombre del archivo que contiene las coordenadas x, y, z.

3) Para el tipo de modelo se debe indicar si los datos de las coordenadas espaciales coorresponden a una malla regular (1) o a una malla irregular (2). Cabe aclarar que el submódulo de representaciones gráficas fue desarrollado en forma independiente del SHIFT, por lo que tiene opciones no utilizadas por SHIFT, pero disponibles para el usuario. Es así que acepta modelos de malla regular, además de los de malla irregular. En el caso de modelos de malla regular, debe contarse con un archivo previamente elaborado por el usuario y que contenga:

a) Número de columnas (hasta 30)

b) Número de hileras (hasta 30)

c) Separación entre columnas

d) Separación entre hileras

e) Matriz de elevaciones

4) En el tipo de dibujo se indica si se trata de perfiles paralelos al eje x (1), perfiles paralelos al eje y (2), perfiles perpendiculares a la dirección de visión (3), o curvas de nivel (4).

5) El número de cortes corresponde al número de perfiles en que es seccionada la cuenca.

6) El factor de escala vertical corresponde a la relación que guarda una unidad horizontal con la vertical. Este factor permite acentuar

-66'-

o suavizar las variaciones espaciales.

7) El ángulo horizontal de visión corresponde al ángulo que existe entre el plano definido en el primer cuadrante por el eje Y y el eje Z, y la línea de la dirección de visión.

8) El ángulo vertical de visión corresponde al ángulo que existe entre el plano definido en el primer cuadrante por ele eje X y el eje Y, y la línea de la dirección de visión.

9) El color del fondo, el color interno, el color de las líneas y el color de los titulos está definido por un número entero que va desde 0 a 15, correspondiendo un color a cada número.

10) El tipo de líneas está definido por un número entero que va desde 0 a 5.

11) El grosor de las líneas se especifica mediante mediante un número entero que va desde 1 a 3.

12) El tipo de letra de los titulos se especifica mediante un número entero que va desde 0 a 6.

Después de teclear el valor de un dato se oprime la tecla RETURN y asi sucesivamente hasta proporcionar todos los datos.

```
SHIFT                                   REPRESENTACIONES GRAFICAS DEL MDE

        TITULO PRINCIPAL DEL DIBUJO:
                   TITULO SECUNDARIO:
  NOMBRE DEL ARCHIVO DE ELEVACIONES:
                     TIPO DE MODELO:   (1-REGULAR, 2-IRREGULAR)
                     TIPO DE DIBUJO:   (1,2,3-PERFILES,4-ISOL.)
                  NUMERO DE CORTES:
FACTOR DE ESCALA VERT. EXAGE./ATEN.:
     ANGULO HORIZONTAL DE VISION:
       ANGULO VERTICAL DE VISION:

                     COLOR DE FONDO:
                      COLOR INTERNO:
                COLOR DE LAS LINEAS:
                     TIPO DE LINEAS:
              GROSOR DE LAS LINEAS:
     TIPO DE LETRA DE LOS TITULOS:
              COLOR DE LOS TITULOS:

   F1- Ayuda          F2- Continuar          Esc- Regresar
```

Figura 4.8 Características de la gráfica por generar

Para continuar se oprime la tecla F2 y si se trata de un dibujo de isolíneas aparecerá otra pantalla (Figura 4.9) donde se piden más datos de las características de la gráfica. En las dos Figuras (4.8 y 4.9) se presenta un ejemplo de la información que solicita el sistema.

Cada uno de los parámetros de la Figura 4.9 se refiere a lo que a continuación se indica.

1) La elevación inicial corresponde a la elevación mínima a partir de la cual se desea que inicie el dibujo.

2) La elevación final corresponde a la elevación máxima que se desea tenga el dibujo.

3) El intervalo entre curvas especifica la separación que hay entre dos curvas de nivel.

4) A cada determinado numero de curvas, una de éstas se dibuja con un ancho mayor, para esto se debe especificar el valor de "REMARCAR A CADA: CURVAS".

5) "Comenzando en la curva No." corresponde al número de la primer curva que será remarcada.

6) El número de decimales especifica el número de éstos con que se escribirá el valor de las curvas remarcadas.

7) La separación mínima especifica la separación entre los números que indican el valor de la curva de nivel.

8) El tipo y tamaño de letra pueden tomar los mismos valores que en el caso de la Figura 4.8.

9) El coeficiente de curvatura máxima está relacionado con la ubicación del número que indica el valor de la isolínea, éste debe ser mayor que 1 y los valores recomendados varian entre 1.015 y 1.025.

10) El color, tipo y grosor de las líneas secundarias es el correspondiente a las líneas que no son remarcadas y el valor que pueden tomar es el mismo que en el caso de la Figura 4.8.

11) Por último, el nombre del archivo de límites corresponde al archivo que contiene las coordenadas que definen la frontera de la cuenca (si no existe el archivo o la frontera es mayor que la frontera definida por las facetas triangulares, la frontera de la cuenca queda definida por esta última).

Cuando se oprime nuevamente la tecla F2 el sistema realiza el

dibujo y en la parte inferior de la pantalla aparece una serie de funciones asignadas a teclas especificas que permiten enviar el dibujo a algún dispositivo de salida.

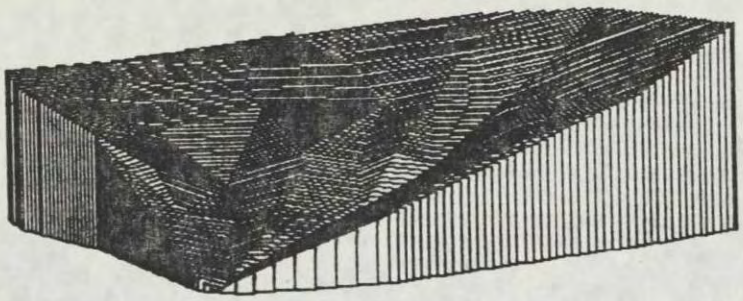
Si en el menú principal se elige la segunda opción "Dibujar una gráfica que ya existe", el sistema pregunta por el nombre del archivo donde se encuentra almacenada la gráfica. Al proporcionar el nombre y oprimir la tecla RETURN se dibuja la gráfica. En la parte inferior de la pantalla aparece una serie de funciones asignadas a teclas específicas que permiten enviar el dibujo a algún dispositivo de salida.

```
SHIFT                                   REPRESENTACIONES GRAFICAS DEL MDE

   CONSIDERANDO QUE:    ELEVACION MINIMA=
                        ELEVACION MAXIMA=
            INDICAR LOS SIGUIENTES PARAMETROS:

                ELEVACION INICIAL:
                  ELEVACION FINAL:
          INTERVALO ENTRE CURVAS:
                  REMARCAR A CADA:    CURVAS
     COMENZANDO EN LA CURVA No.:
            NUMERO DE DECIMALES:
              SEPARACION MINIMA:
                   TIPO DE LETRA:
                 TAMANO DE LETRA:
   COEFICIENTE DE CURVATURA MAXIMA:
   COLOR DE LAS LINEAS SECUNDARIAS:
    TIPO DE LAS LINEAS SECUNDARIAS:
  GROSOR DE LAS LINEAS SECUNDARIAS:
     NOMBRE DEL ARCHIVO DE LIMITES:

      F1- Ayuda          F2- Continuar          Esc- Regresar
```

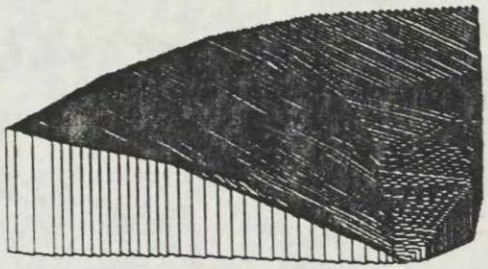
Figura 4.9 Parametros de la gráfica de isolíneas

En la Figura 4.10 se muestran ejemplos de representaciones gráficas obtenidas con este modulo.

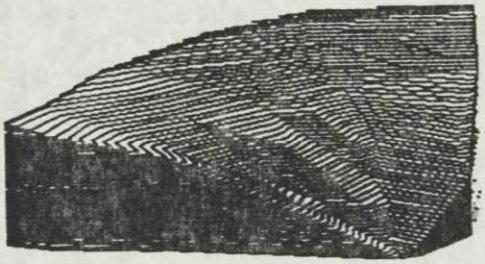
Perfiles paralelos al eje X



Perfiles paralelos al eje Y



C. de nivel con áng. ver. de vis. 10



Curvas de nivel

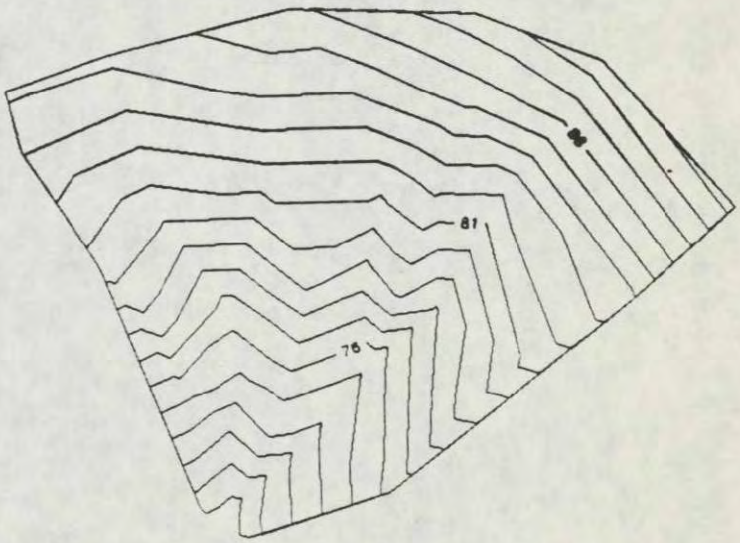


Figura 4.10 Representaciones gráficas

61

4.4 Estructura interna de archivos

Es importante señalar que, como ya se había dicho, la estructura de los archivos que aquí se presenta solo es para información del usuario, ya que éstos son generados internamente por el sistema.

Durante la construcción del modelo digital de elevaciones el sistema solicita información del archivo que contiene las coordenadas espaciales y a partir de estas se genera una serie de archivos que serán utilizados posteriormente en los otros módulos que componen al sitema SHIFT. La estructura que tienen estos archivos se describe a continuación. Antes de ejecutar la opción de *Construcción preliminar del MDE* el usuario debe haber preparado el archivo con los datos topográficos. Este archivo debe tener la estructura que se muestra en la Figura 4.11, en donde se puede observar que en el primer registro se almacena el identificador de la cuenca, en el segundo el número total de puntos seleccionados y a partir del tercer registro se almacenan las coordenadas x, y, z de cada uno de los puntos. Los valores que se indican dentro de los registros corresponden a los datos de ejemplo.

Número del registro

0	Cuenca Lucky Hills		
1	40		
2	44.71	34.55	89.20
3	38.60	41.57	88.50
⋮		⋮	
41	20.57	20.02	69.70

Figura 4.11 Estructura del archivo con los datos topográficos

62

A partir de los datos topográficos se genera el archivo con la matriz de triángulos y de segmentos de cauce. Dicho archivo tiene la estructura que se muestra en la Figura (4.12). Esta información se da solo para conocimiento del usuario, pues tanto este como otros archivos los crea el sistema en forma automática.En el primer registro se tiene el identificador de la cuenca; en el segundo se almacena el número de puntos (43), el número de facetas triangulares (81), el número de interrupciones (1) y el número de segmentos de cauce (14) de la cuenca en estudio. A partir del tercer registro se almacenan las coordenadas x, y, z de los vértices (43 registros), después de este bloque de información se almacenan los datos de la matriz de facetas triangulares (81 registros) y el último bloque (14 registros) contiene los datos de la matriz de segmentos de cauce.

	0	Cuenca Lucky Hills					
	1	43	81	1	14		
	2	-462.88		-300.90		0.00	
(43 registros)	⋮						⋮
	44	205.70		200.20		69.70	
	45	4	2	3	0	5	22
(81 registros)	⋮						⋮
	125	43	1	40	42	76	80
	126	18	29	3	4	3	30
(14 registros)	⋮						⋮
	139	38	42	9	11	78	79

Figura 4.12 Estructura del archivo generado durante la construcción del MDE.

V CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE FACETAS

5.1 GENERALIDADES

Para realizar la simulación del escurrimiento es necesario contar con ciertas características de los suelos de cada faceta como son:

a) Conductividad hidráulica a saturación

b) Potencial total de escurrimiento (Smith y Parlange, 1978)

c) Contenido de humedad inicial

d) Contenido de humedad a saturación y

e) Coeficiente de rugosidad de Manning

Estas características se pueden estimar a partir de pruebas de campo o de planos de uso del suelo. Después, por un procedimiento de interpolación se generaliza esta información a todas las facetas del modelo de la cuenca.

Debe hacerse notar que a través del coeficiente de rugosidad se pueden representar diferentes tipos de cubierta vegetal o uso del suelo.

Dado que en este módulo la captura o la interpolación de datos se realiza faceta por faceta, se consideró conveniente incluir

dentro del mismo el proceso de transformación de la faceta triangular a una faceta rectangular equivalente, para el posterior cálculo hidrológico, según se explica con detalle en el módulo correspondiente.

Cabe aclarar que en el módulo de captura y procesamiento de datos de lluvia también se realiza una interpolación de datos y se aplica el mismo procedimiento que será descrito en este apartado.

5.2 ASPECTOS TEORICOS

Interpolación de parámetros

El modelo requiere del conocimiento de los parámetros que intervienen en el proceso de infiltración y en el proceso de formación del escurrimiento superficial para cada faceta de la malla. Para obtener esta información (conductividad hidráulica a saturación, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación, coeficiente de rugosidad de Manning y la intensidad de la precipitación) en las facetas donde no se conoce, es necesario realizar una interpolación espacial. El método seleccionado para tal efecto es el de la "placa delgada" (Duchon, 1976). Este método se puede interpretar físicamente considerando que en cada sitio en donde se conoce la variable a interpolar ésta se representa por una elevación dada y que si se colocara una membrana flexible o placa delgada de tal manera que se apoyara en los puntos de elevación conocida, en los demás puntos la

65

placa tendría una elevación que definiría una curvatura mínima, valor que permite calcular el metodo mencionado.

La energía de flexión, cuando se da la curvatura mínima, es aproximada por el funcional:

$$J(\sigma) = \int_{\Omega} |\nabla^2 \sigma|^2 = \int_{\Omega} \left(D_x^2 \sigma\right)^2 + 2\left(D_{xy}^2 \sigma\right)^2 + \left(D_y^2 \sigma\right)^2 \qquad (5.1)$$

siendo σ una función donde la segunda derivada es continua y de norma mínima. Las funciones de la placa delgada conservan en todas las direcciones del plano las propiedades de las funciones "spline" cúbicas en una dirección. En las funciones de tipo placa delgada se cumple que:

$$\sigma(t_i) = z_i \qquad (\forall\ i;\ t_i:\ \text{punto de observación}) \qquad (5.2)$$

$$\int_{\Omega} |\nabla^2 \sigma|^2 = \text{mínimo} \qquad (5.3)$$

en donde (5.2) implica que la función "spline" en un punto de observación interpola el valor observado y (5.3) resulta de la minimización de la energía de flexión. En la ecuación (5.2) $\sigma(t)$ se refiere a la superficie "spline" o placa delgada y t representa el par de coordenadas x, y.

La función $\sigma(t)$ que cumple las condiciones (5.2) y (5.3) está dada por (Duchon, 1976):

$$\sigma(t) = \alpha + \beta x + \gamma y + \sum_{i=1}^{n} \psi_i \; k(t_i,t) \tag{5.4}$$

en la cual:

$$k(t_i,t) = |t_i - t|^2 \ln|t_i - t| \quad \text{para } t <> t_i \tag{5.5}$$

$$k(t_i,t_i) = 0 \tag{5.6}$$

y

$$|t_i - t| = \left((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2\right)^{1/2} \tag{5.7}$$

La ecuación (5.4) es de tipo interpolador, en la que sólo intervienen las coordenadas geográficas de los puntos de apoyo de la placa y del punto donde se desea interpolar. Los coeficientes α, β, γ, ψ se obtienen al resolver la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} K & E^t \\ E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

donde:

$$K = \{ k(t_i,t_j)\}_{i,j} \tag{5.9}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . & 1 \\ x_1 & . & . & . & x_n \\ y_1 & . & . & . & y_n \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

$$\psi^T = (\psi_1 \; . \; . \; . \; \psi_n) \tag{5.11}$$

67

$$\delta^T = (\alpha, \beta, \gamma) \tag{5.12}$$

De lo anterior resulta que la matriz de coeficientes:

$$G = \begin{bmatrix} K & E^T \\ E & 0 \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

es simétrica y no depende de los valores z_i en que se basa la interpolación, sino solamente de la localización de los puntos donde z_i es conocida. Para obtener la solución se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & E^T \\ E & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

Una vez que se resuelve esta ecuación matricial se pueden substituir los valores de α, β, γ y ψ en la ecuación (5.4) para obtener, así, la solución buscada.

5.3 OPERACION DEL MODULO

Al entrar a este módulo primeramente aparece el menú principal del mismo, en el que se tienen tres opciones (Figura 5.1), las cuales se deben ejecutar en el orden indicado. A continuación se comenta cada una de ellas.

```
SHIFT                CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE FACETAS

OPCIONES:
        1.- CAPTURA DE DATOS DE FACETAS
        2.- INTERPOLACION DE DATOS DE FACETAS
        3.- MODIFICACION DE DATOS PREVIAMENTE INTERPOLADOS

      F1- Ayuda                                Esc- Regresar
```

Figura 5.1 Menú principal del módulo

5.3.1 Captura de datos de facetas

Por medio de esta opción se capturan para los diferentes sitios de muestreo, los valores de las características de los suelos (conductividad hidráulica a saturacón, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación y coeficiente de rugosidad de Manning), asimismo se puede consultar y modificar el valor de cualquiera de los datos y se pueden enviar a impresión los datos capturados.

Al momento de elegir la opción de captura de información de facetas, el sistema solicita el nombre del archivo con la información de los sitios de muestreo, si no existe el archivo el sistema solicita el identificador de la cuenca, el cual no debe ser mayor de 40 caracteres. A continuación el sistema presenta un nuevo

menú con tres opciones (Figura 5.2) que realizan las funciones indicadas.

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE FACETAS

OPCIONES:
        1.- AGREGAR UN SITIO DE MUESTREO
        2.- CONSULTAR Y MODIFICAR LOS DATOS DE UN SITIO
        3.- IMPRIMIR LOS DATOS DE TODOS LOS SITIOS

F1-Ayuda                                        Esc-Regresar
```

Figura 5.2 Menú de opciones para la captura de datos

Cuando se capturan los datos de un sitio de muestreo se deberán proporcionar los valores de los parámetros que se solicitan (Figura 5.3) y en el caso de que se desee consultar y modificar los datos de un sitio, aparecerá el menú que se muestra en la Figura 5.4. En ambos casos en la parte inferior de la pantalla se indican diferentes funciones que se pueden realizar. Cuando se desea imprimir los datos capturados en los sitios de muestreo se elige la opción número tres "Imprimir los datos de todos los sitios". Al capturar la información de los diferentes sitios de muestreo, se genera en disco un archivo que contendrá la información de éstos. El nombre de este archivo debe ser elegido de tal manera que guarde cierta relación con la cuenca analizada. La extensión del mismo es

SMF (siglas que corresponden a Sitios de Muestreo de Facetas), la cual es asignada por el sistema.

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE FACETAS

  CUENCA

  SITIO                    COORDENADAS

  CARACTERISTICAS DEL SITIO
  CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA A SATURACION (cm/hr)
  POTENCIAL TOTAL DE ESCURRIMIENTO      (m)
  CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL          (cm3/cm3)
  CONTENIDO DE HUMEDAD A SATURACION     (cm3/cm3)
  COEFICIENTE DE MANNING

  F1-Ayuda   F2-Agregar un sitio   F3-Terminar   F4-Cancelar
```

Figura 5.3 Características de suelos por capturar

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE FACETAS

  CUENCA

  SITIO                    COORDENADAS

  CARACTERISTICAS DEL SITIO
  CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA A SATURACION (cm/hr)
  POTENCIAL TOTAL DE ESCURRIMIENTO      (m)
  CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL          (cm3/cm3)
  CONTENIDO DE HUMEDAD A SATURACION     (cm3/cm3)
  COEFICIENTE DE MANNING

F1-Ayuda Esc-Regresar F3-Sig. sitio F4-S. anterior F5-Cancelar
```

Figura 5.4 Características de los suelos en un sitio de muestreo

5.3.2 Interpolación de datos de facetas

Mediante esta opción se realiza la interpolación de las características de los suelos, como son: conductividad hidráulica a saturación, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación y coeficiente de rugosidad de Manning, para cualquier punto de la cuenca. La interpolación de estas características se hace aplicando el método de la placa delgada explicado al principio de este capítulo.

Como se mencionó anteriormente, se estimó conveniente incluir dentro de este módulo el cálculo del ancho, largo y la pendiente de la faceta equivalente ya que se tienen que analizar todas las facetas, siendo entonces un momento oportuno. Sin embargo el procedimiento que se sigue para realizar la transformación de faceta triangular a faceta rectangular equivalente, se explica en el módulo *Simulación de eventos hidrológicos*, dado que es parte de estos cálculos.

Al elegir esta opción primeramente se pregunta por el nombre del archivo con la información de la topografía, el cual fue generado mediante el módulo *Construcción del modelo digital de elevaciones*, después el sistema pregunta por el nombre del archivo con la información de los sitios de muestreo, generado al ejecutar la primera opción del módulo que se describe. El archivo que contendrá la información de los datos interpolados tendrá el mismo nombre que el que contiene la información de sitios de muestreo, pero con la

72

extensión CSF (siglas que son utilizadas para abreviar Características de Suelos para Facetas).

Durante el proceso de interpolación se muestra una pantalla en la que se indica el nombre del parámetro que se interpola y el número de la faceta analizada. Los valores de los datos interpolados son almacenados en un archivo de disco.

5.3.3 Modificación de datos previamente interpolados

Esta opción permite consultar y/o modificar datos de suelos previamente interpolados mediante la opción de *Interpolación de datos de facetas*, asimismo es posible enviar a impresión los datos de las facetas. Al ejecutar esta opción se despliega el menú que se muestra en la Figura 5.5, en él se observan dos opciones:

```
SHIFT                    MODIFICAR DATOS PREVIAMENTE INTERPOLADOS

OPCIONES:
        1.- CONSULTAR Y MODIFICAR LOS DATOS DE UNA FACETA

        2.- IMPRIMIR LOS DATOS DE LAS FACETAS

F1-Ayuda                                   Esc-Regresar
```

Figura 5.5 Opciones que se tienen con los datos interpolados

a) Consultar los datos de una faceta. Por medio de esta opción se consultan y/o modifican los valores de los parámetros que se muestran en la pantalla (Figura 5.6). En la parte inferior de la figura se observa el cuadro que contiene las funciones especiales. Cuando los datos de una faceta son mostrados en la pantalla el usuario puede modificarlos. Ya sea que se modifiquen o no, los datos vuelven a ser grabados y la estructura del archivo se conserva.

b) Imprimir los datos de las facetas. Por medio de esta opción se pueden imprimir los datos de las facetas, previamente interpolados. Al momento de ejecutar esta opción se le permite al usuario verificar que la impresora esté lista y después de oprimir la tecla RETURN se iniciará la impresión.

```
SHIFT                    MODIFICAR DATOS PREVIAMENTE INTERPOLADOS

  CUENCA
  NUMERO DE FACETA

  CARACTERISTICAS
  LARGO                                        (m)
  ANCHO                                        (m)
  PENDIENTE
  CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA A SATURACION (cm/hr)
  POTENCIAL TOTAL DE ESCURRIMIENTO             (m)
  CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL                 (cm3/cm3)
  CONTENIDO DE HUMEDAD A SATURACION            (cm3/cm3)
  COEFICIENTE DE MANNING

F1-Ayuda Esc-Regresar F3-Siguiente faceta F4-Faceta anterior
```

Figura 5.6 Menú de los datos interpolados

5.4 Estructura interna de archivos

Durante la catura de los datos de las facetas se genera en disco un archivo, el cual contiene la información obtenida en los sitios de muestreo. El archivo mantiene la estructura que se muestra en la Figura 5.7.

Número de registro ↓

0	Cuenca Lucky Hills						
1	5						
2	10.30	25.45	1.11	0.064	0.24	0.39	0.033
3	60.00	90.50	2.65	0.125	0.12	0.43	0.033
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	73.20	45.00	2.21	0.090	0.20	0.42	0.035

Figura 5.7 Estructura del archivo de datos capturados

En el registro número cero se almacena el identificador de la cuenca; en el registro 1 se almacena el número total de sitios de muestreo y a partir del tercer registro, que lleva el número 2, se almacena el valor de los parámetros que a continuación se indica. Los valores que se indican entre paréntesis, en el siguiente cuadro, corresponden a los parámetros de ejemplo que se encuentran almacenados en el registro que lleva el número 2.

No. de columna	Información almacenada
1 y 2	Coordenadas X, Y (10.30 y 25.45 respectivamente)
3	Conductividad hidráulica a saturación (1.11 cm/hr)
4	Potencial total de escurrimiento (0.064 m)
5	Contenido de humedad inicial (0.24 cm^3/cm^3)
6	Contenido de humedad a saturación (0.39 cm^3/cm^3)
7	Coeficiente de rugosidad de Manning (0.033)

También durante la ejecución del módulo se genera el archivo que contiene los datos interpolados para cada una de las facetas. El archivo con esta información tiene la estructura que se muestra en la Figura 5.8.

0								
1	25.30	35.20	0.1111	2.650	0.064	0.24	0.39	0.033
2	60.10	9.00	0.0925	1.450	0.125	0.20	0.39	0.033
⋮				⋮				
n	10.25	30.30	0.2000	2.000	0.085	0.12	0.39	0.033

Figura 5.8 Estructura del archivo con datos interpolados

A partir del registro número 1 se graba la información de los datos interpolados para cada faceta. La secuencia de los parámetros es la misma en todos los registros. Los valores que se indican entre paréntesis en el siguiente cuadro corresponden a la información que se ha almacenado en el registro que lleva el número 1. A continuación se indica el tipo de información que se registra en cada columna.

No. de columna	Información almacenada
1	Largo de la faceta equivalente (25.30 m)
2	Ancho de la faceta equivalente (35.20 m)
3	Pendiente de la faceta (0.1111)
4	Conductividad hidráulica a saturación (2.650 cm/hr)
5	Potencial de escurrimiento (0.064 m)
6	Contenido de humedad inicial (0.24 cm^3/cm^3)
7	Contenido de humedad a saturación (0.39 cm^3/cm^3)
8	Coeficiente de rugosidad de Manning (0.033)

En cada uno de los registros se almacena el mismo número de parámetros.

VI CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAUCES

6.1 GENERALIDADES

Asi como en las facetas triangulares es necesario conocer cierta información de los suelos, en el caso de los segmentos de cauce se presenta la misma situación, para realizar los cálculos hidrológicos es indispensable conocer en todos los segmentos las características del cauce: conductividad hidráulica a saturación, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación y el coeficiente de rugosidad de Manning. Además de las características anteriores, se requiere conocer el ancho del cauce en cada segmento de la red. También en este caso, el valor de estos parámetros puede ser estimado mediante algunas pruebas de campo y subsecuente interpolación a cada uno de los segmentos de cauce donde no se tiene información.

Dado que la interpolación de los diferentes parámetros se realiza segmento por segmento, se consideró conveniente incluir dentro de este módulo el cálculo de la pendiente, el largo y el ancho de cada segmento de cauce, información que será utilizada posteriormente al realizarse los cálculos hidrológicos.

6.2 ASPECTOS TEORICOS

A continuación se explican algunos cálculos que se realizan dentro de este módulo, relativos a los cauces.

6.2.1 Determinación de la geometría de cauces

Para estimar el largo y la pendiente de cada segmento de cauce se procede de la forma siguiente:

$$\text{Largo} = \sqrt{(X_U - X_D)^2 + (Y_U - Y_D)^2 + (Z_U - Z_D)^2} \qquad (6.1)$$

$$\text{Pendiente} = \frac{Z_U - Z_D}{\sqrt{(X_U - X_D)^2 + (Y_U - Y_D)^2}} \qquad (6.2)$$

donde:

X, Y, Z : Corresponden a las coordenadas topográficas.

U : Subíndice con el que se hace referencia al vértice aguas arriba del segmento de cauce analizado.

D : Subíndice con el que se hace referencia al vértice aguas abajo del segmento de cauce analizado.

Ahora bien, para estimar el ancho del segmento de cauce en aquellos segmentos en donde este dato no se conoce, se supone que conforme se avanza hacia aguas abajo a lo largo de un curso de agua el ancho del cauce aumenta, además se supone que existe una relación lineal entre el ancho del cauce y el área de contribución acumulada

79'

hasta el vértice de aguas abajo de cada segmento. Este último dato fue calculado en el módulo de *Construcción del modelo digital de elevaciones.*

Tomando en cuenta que el segmento de cauce con ancho conocido se localiza aguas abajo y sobre el mismo curso de agua que el de ancho desconocido, se tiene:

$$\frac{B}{A} = \frac{b}{a} \tag{6.3}$$

por lo que:

$$b = \frac{B\ a}{A} \tag{6.4}$$

donde:

b : Ancho de cauce por estimar .

a : **Area de contribución al escurrimiento acumulada hasta el segmento de ancho b.**

B : Ancho de cauce conocido.

A : Area de contribución al escurrimiento acumulada hasta el segmento con ancho B.

El segmento con ancho conocido corresponde al primer segmento que se encuentra aguas abajo y en el mismo curso de agua que el segmento de ancho desconocido. Para que el cambio entre el ancho del

segmento que se analiza y el del segmento de aguas abajo no sea muy brusco se calcula un promedio entre sus valores y el resultado se le asigna al segmento analizado.

6.2.2 Interpolación de parámetros

En el caso de la interpolación de los parámetros: conductividad hidráulica a saturación, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación y coeficiente de rugosidad de Manning, correspondientes al lecho del cauce, se aplica el método de la "placa delgada" descrito anteriormente en el módulo de *Captura y procesamiento de datos de facetas*.

6.3 OPERACION DEL MODULO

Antes de llamar a este módulo se debe haber ejecutado el módulo de *Construcción del modelo digital de elevaciones* dentro del cual se generó el archivo con la matriz estructural de facetas y la de cauces y el archivo con las áreas de contribución al escurrimiento para cada segmento de cauce.

En el módulo se contemplan tres opciones, que corresponden al menú principal (Figura 6.1). Estas opciones deben ser ejecutadas en el orden indicado, a continuación se comenta cada una de estas opciones.

81

```
SHIFT                    CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DEL CAUCE

OPCIONES:
        1.- CAPTURA DE DATOS DE CAUCES
        2.- INTERPOLACION DE DATOS DE CAUCES
        3.- MODIFICACION DE DATOS PREVIAMENTE INTERPOLADOS

F1-Ayuda                                        Esc-Regresar
```

Figura 6.1 Menú principal del módulo

6.3.1 Captura de los datos de cauces

Mediante esta opción se captura la información correspondiente a los segmentos de cauce en los que se han efectuado muestreos. Esta información debe incluir: número del segmento de cauce, coordenadas X, Y del sitio de muestreo, conductividad hidráulica a saturación, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación, coeficiente de rugosidad de Manning y ancho del segmento de cauce. Además, también mediante esta opción se puede consultar y/o modificar el valor de los parámetros o imprimir la información capturada.

Cuando se usa esta opción, en la pantalla aparece una pregunta sobre el identificador de la cuenca (cuando el archivo no ha sido generado), el cual no debe ser mayor de 40 caracteres e

inmediatamente se muestra otro menú con tres opciones, las que se observan en la Figura 6.2.

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE CAUCES

OPCIONES:
        1.- AGREGAR UN SITIO DE MUESTREO
        2.- CONSULTAR Y MODIFICAR LOS DATOS DE UN SITIO
        3.- IMPRIMIR LOS DATOS DE TODOS LOS SITIOS

        F1-Ayuda                                Esc-Regresar
```

Figura 6.2 Menú de opciones para la captura de datos

Cuando se capturan los datos del cauce se deberá elegir la opción *Agregar un sitio de muestreo* y proporcionar el valor de los parámetros que se muestran en la pantalla (Figura 6.3), en caso que se desee consultar y/o modificar los datos capturados se elige la opción *Consultar los datos de un sitio de muestreo* y al momento aparece la pantalla que se muestra en la Figura 6.4. Finalmente, si se desea imprimir los datos capturados se debe elegir la opción *Imprimir los datos de todos los sitios.*

Cuando se realiza la captura de los datos del cauce se genera un archivo con la extensión de SMC que corresponde a las siglas de Sitios de Muestreo de Cauces.

```
SHIFT                                        CAPTURA DE DATOS DE CAUCES

  CUENCA

  SITIO          CAUCE        COORDENADAS


  CARACTERISTICAS DEL CAUCE
  CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA A SATURACION (cm/hr)
  POTENCIAL TOTAL DE ESCURRIMIENTO      (m)
  CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL          (cm3/cm3)
  CONTENIDO DE HUMEDAD A SATURACION     (cm3/cm3)
  COEFICIENTE DE MANNING
  ANCHO DEL SEGMENTO DE CAUCE           (m)

  F1-Ayuda   F2-Agregar un sitio   F3-Terminar   F4-Cancelar
```

Figura 6.3 Parámetros por capturar

```
SHIFT                                        CAPTURA DE DATOS DE CAUCES

  CUENCA

  SITIO          CAUCE        COORDENADAS


  CARACTERISTICAS DEL LECHO DEL CAUCE
  CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA A SATURACION (cm/hr)
  POTENCIAL TOTAL DE ESCURRIMIENTO      (m)
  CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL          (cm3/cm3)
  CONTENIDO DE HUMEDAD A SATURACION     (cm3/cm3)
  COEFICIENTE DE MANNING
  ANCHO DEL SEGMENTO DE CAUCE           (m)

  F1-Ayuda Esc-Regresar F3-Sig. sitio F4-S. anterior F5-Cancelar
```

Figura 6.4 Parámetros capturados en un sitio de muestreo

-84'

6.3.2 Interpolación de datos de cauces

Cuando se usa esta opción se debe proporcionar la siguiente información: el nombre del archivo con la información topográfica, el nombre del archivo con las áreas de contribución acumuladas y el nombre del archivo con los sitios de muestreo.

Por medio de esta opción se realiza la interpolación de los datos del cauce, en aquellos segmentos donde los parámetros se desconocen. Los parámetros interpolados son: conductividad hidráulica a saturación, potencial total de escurrimiento, contenido de humedad inicial, contenido de humedad a saturación y coeficiente de rugosidad de Manning. El proceso de interpolación se realiza aplicando el método de la "placa delgada". Los detalles se dan en las bases teóricas del módulo de *Captura y procesamiento de datos de facetas*.

Para estimar el ancho de los segmentos de cauce en aquellos donde no se conoce, se hace en base al área de contribución al escurrimiento acumulada a cada segmento de cauce, por lo cual antes de usar esta opción se deben conocer dichas áreas, las cuales se calculan en el módulo de *Construcción del modelo digital de elevaciones*. Como se había mencionado antes, fue conveniente incluir dentro de esta parte el cálculo del largo y la pendiente del segmento de cauce dado que con esto se facilita la operación del sistema. La determinación de sus valores se hace en base a las coordenadas topográficas.

85

Durante el proceso de interpolación se muestra en la pantalla el número del segmento de cauce analizado y el nombre del parámetro interpolado.

El archivo que contendrá los datos interpolados tiene la extensión de CSC, que corresponde a las siglas de Características de Suelos en Cauces.

Al finalizar el proceso de interpolación se muestra en el monitor nuevamente el menú principal del módulo de *Captura y procesamiento de datos del cauce.*

6.3.3 Modificación de datos previamente interpolados

Mediante esta opción se puede consultar y/o modificar los datos previamente interpolados, o se puede enviar a impresión los mismos. Al usar esta opción se muestra un menú con dos opciones (Figura 6.5). A continuación se comenta cada opción.

a) Consultar los datos de un cauce. Por medio de esta opción se puede consultar y/o modificar los valores de los parámetros que se muestran en la pantalla (Figura 6.6). En la parte inferior de la pantalla se tiene una serie de teclas con funciones especiales. Cuando se muestra esta pantalla el usuario puede modificar el valor de cualquier parámetro. Ya sea que se realice o no alguna modificación los datos vuelven a ser almacenados en el archivo,

conservando éste su estructura.

```
SHIFT                    MODIFICAR DATOS PREVIAMENTE INTERPOLADOS

OPCIONES:
        1.- CONSULTAR Y MODIFICAR LOS DATOS DE UN CAUCE
        2.- IMPRIMIR LOS DATOS DE LOS SEGMENTOS DE CAUCE

      F1-Ayuda                              Esc-Regresar
```

Figura 6.5 Opciones que se tienen con los datos interpolados

```
SHIFT                    MODIFICAR DATOS PREVIAMENTE INTERPOLADOS

CUENCA
NUMERO DE CAUCE

CARACTERISTICAS
LARGO                                        (m)
ANCHO                                        (m)
PENDIENTE
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA A SATURACION (cm/hr)
POTENCIAL TOTAL DE ESCURRIMIENTO             (m)
CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL                 (cm3/cm3)
CONTENIDO DE HUMEDAD A SATURACION            (cm3/cm3)
COEFICIENTE DE MANNING

F1-Ayuda Esc-Regresar F3-Siguiente segmento F4-Segmento anterior
```

Figura 6.6 Parametros interpolados

b) Imprimir los datos de los cauces. Mediante esta opción se pueden

imprimir los datos interpolados de todos los segmentos de cauce. Cuando se usa esta opción no se inicia inmediatamente la impresion de los datos, se tiene la posibilidad de verificar que la impresora esté lista y hasta después de oprimir la tecla RETURN se iniciará el proceso de impresión.

6.4 Estructura interna de archivos

Dentro de este módulo son generados dos archivos, uno de ellos durante la captura de los datos de los cauces y el otro durante la interpolación. El primero tiene la estructura que se muestra en la Figura 6.7.

Número de registro

0	Cuenca Lucky Hills								
1	10								
2	12	22.10	40.35	3.22	0.263	0.067	0.28	0.045	4.0
⋮					⋮				
n	8	96.00	10.20	6.10	0.063	0.015	0.37	0.051	5.5

Figura 6.7 Estructura del archivo con los datos capturados

En la figura anterior se observa que el registro cero contiene el identificador de la cuenca y en el registro número 1 se almacena el número total de sitios de muetreo. A partir del tercer registro, que lleva el número 2, se almacenará la información correspondiente a los datos de cauces. Los valores que se indican entre paréntesis

en el siguiente cuadro correponden a la información de ejemplo almacenada en el registro que lleva el número 2.

No. de columna	Información almacenada
1	Número del segmento de cauce donde se localiza el sitio de muestreo (12)
2 y 3	Coordenadas X, Y del sitio de muestreo (22.10 y 40.35 respectivamente)
4	Conductividad hidráulica a saturación (3.22 cm/hr)
5	Potencial total de escurrimiento (0.263 m)
6	Contenido de humedad inicial (0.067 cm^3/cm^3)
7	Contenido de humedad a saturación (0.28 cm^3/cm^3)
8	Coeficiente de rugosidad de Manning (0.045)
9	Ancho del segmento de cauce (4.0 m)

El segundo archivo, que contendrá los datos interpolados para cada segmento de cauce, tiene la estructura que se muestra en la Figura 6.8.

Número de registro

0								
1	11.75	2.50	0.085	3.42	0.231	0.121	0.401	0.043
⋮				⋮				
n	120.20	4.20	0.111	2.85	0.301	0.092	0.420	0.055

Figura 6.8 Estructura del archivo con los datos interpolados para cada uno de los segmentos de cauce

A partir del registro número 1 todos los registros tienen la misma secuencia de los datos y cada uno contiene el mismo número de

parámetros. A continuación se describe el tipo de información que se registra en cada columna. Los valores que se indican entre paréntesis en el siguiente cuadro corresponden a la información de ejemplo almacenada en el registro que lleva el número 1.

No. de columna	Información almacenada
1	Largo del segmento de cauce (11.75 m)
2	Ancho del segmento de cauce (2.50 m)
3	Pendiente del segmento de cauce (0.085)
4	Conductividad hidráulica a saturación (3.42 cm/hr)
5	Potencial total de escurrimiento (0.231 m)
6	Contenido de humedad inicial (0.121 cm^3/cm^3)
7	Contenido de humedad a saturación (0.401 cm^3/cm^3)
8	Coeficiente de rugosidad de Manning (0.043)

VII CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LLUVIA

7.1 GENERALIDADES

Para alimentar el modelo debe conocerse la variación de la intensidad de la lluvia con respecto al tiempo en cada faceta del modelo de la cuenca, puesto que a partir de ésta se realiza el cálculo de la infiltración del agua en el suelo, así como del escurrimiento.

La historia de los eventos de precipitación se obtiene de las estaciones pluviográficas, de tal manera que para aplicar este modelo debe contarse con varias estaciones meteorológicas, ya sea que se localicen dentro o fuera de la cuenca en estudio.

7.2 ASPECTOS TEORICOS

La utilización del modelo requiere del conocimiento de un hietograma en cada una de las facetas del modelo. Para contar con esta información es necesario aplicar alguna técnica de interpolación espacial. Entre los métodos que se tienen para realizar esta tarea se cuenta al denominado Kriging. Sin embargo la aplicación de este método requiere de la identificación previa del llamado semivariograma, para el cual es necesario contar con información de un número considerable de estaciones, puesto que de

otra forma el semivariograma queda mal definido. Es posible suponer que en la mayoría de los casos no se tendrá un número suficiente de estaciones meteorológicas con las que se pueda construir un buen semivariograma, motivo por el cual se decidió utilizar el procedimiento de la "placa delgada", explicado en la sección de *Captura y procesamiento de datos de facetas*. El método requiere que se tengan de preferencia más de tres estaciones. El procedimiento se aplica sucesivamente con pequeños intervalos de tiempo.

En el caso de que se cuente con la información, de los eventos de precipitación, de una sola estación, a cada una de las facetas se les asigna exactamente el mismo hietograma de precipitación (en este caso no se realiza interpolación alguna). Cuando se cuenta con la información de dos estaciones, se realiza una interpolación ponderando de acuerdo al recíproco de las distancias que hay del centro de cada faceta a las dos estaciones existentes. En el caso de que existan tres o más estaciones, entonces se aplica el procedimiento de la "placa delgada".

7.3 OPERACION DEL MODULO

Al usar este módulo el sistema pregunta el nombre del archivo con la información de las estaciones pluviográficas, el cual debe ser proporcionado por el usuario. Inmediatamente después se oprime la tecla RETURN y aparece una pantalla que contiene dos opciones (Figura 7.1), las que deben ser ejecutadas en el orden indicado. A

continuación se comenta cada una de ellas.

7.3.1 Captura de datos de lluvia

Cuando se elige esta opción el sistema pregunta por el nombre del archivo con el directorio de las estaciones pluviográficas. Después aparece una pantalla (Figura 7.2) donde se muestran otras dos opciones para realizar los procesos de "*Agregar una estación*" y "*Consultar una estación*".

```
SHIFT                    CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LLUVIA

OPCIONES:
        1.- CAPTURA DE DATOS DE LLUVIA

        2.- INTERPOLACION DE DATOS DE LLUVIA

    F1-Ayuda                                  Esc-Regresar
```

Figura 7.1 Menú de opciones para la captura y procesamiento de datos de lluvia

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE LLUVIA

        OPCIONES:
                1.- AGREGAR UNA ESTACION

                2.- CONSULTAR UNA ESTACION

        F1-Ayuda                                Esc-Regresar
```

Figura 7.2 Opciones para la captura de datos de lluvia

7.3.1.1 Agregar una estación

Mediante esta opción se pueden capturar los datos de la ubicación de una estación. Cuando se elige esta opción se despliega una pantalla (Figura 7.3) para que el usuario proporcione los datos de la estación pluviográfica. En la parte inferior de la pantalla se observa una serie de funciones asignadas a teclas específicas con las cuales se puede: entrar a un nivel de ayuda, agregar otra estación, terminar con la captura y eliminar la estación.

El archivo que se genera para almacenar el directorio de las estaciones pluviográficas tiene la extensión de SPR.

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE LLUVIA

     CUENCA

     NUMERO DE ESTACION

     COORDENADAS:      X

                       Y

F1-Ayuda F2-Agregar otra estación F3-Terminar captura F4-Cancela
```

Figura 7.3 Datos a proporcionar de la ubicación de la estación

7.3.1.2 Consultar una estación

Por medio de esta opción se puede consultar o eliminar una estación y mediante la consulta de una estación se permite añadir, consultar o eliminar un evento de precipitación.

Cuando se ejecuta la opción de consultar una estación aparece una pantalla (Figura 7.4) donde se muestran las estaciones registradas (referenciadas por un número), las coordenadas de cada estación y el número de eventos de precipitación que tiene cada estación. En la parte inferior de la pantalla se observa una serie de funciones asignadas a teclas específicas con las que se puede ir a un nivel de ayuda, regresar a la pantalla inmediata anterior, consultar una estación y eliminar una estación.

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE LLUVIA

                    ESTACIONES PLUVIOGRAFICAS

     ESTACION        COORDENADAS        NUMERO DE EVENTOS

F1-Ayuda Esc-Regresar F3-Consultar estación F4-Eliminar estación
```

Figura 7.4 Estaciones pluviográficas y sus respectivos eventos

Si se desea consultar o eliminar alguna estación, solamente se elige el número de ésta y se oprime la tecla RETURN. Cuando se ha optado por consultar una estación aparecerá otra pantalla (Figura 7.5) en la que se muestra el número de la estación y los eventos de precipitación que tiene la estación. En la parte inferior de la pantalla se observa una serie de funciones asignadas a teclas específicas.

Se oprime la tecla F3 para añadir un nuevo evento de precipitación, se escribe la fecha del evento escribiendo los digitos correspondientes al día, mes y año separados por una diagonal "/". Después de oprimir la tecla RETURN aparecerá una pantalla (Figura 7.6) en donde se deberá registrar la historia del evento de precipitación, considerando que el tiempo debe estar en minutos e inicia en 0.0 y la precipitación debe estar en mm. El

tiempo es absoluto y las estaciones pluviográficas deben estar sincronizadas. Esta pantalla ofrece la posibilidad de cambiar las coordenadas de la estación, si el usuario así lo desea.

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE LLUVIA

    ESTACION NO.                        COORDENADAS

                EVENTO                  FECHA

F1-Ayuda Esc-Regresar F3-Añadir un evento F4-Consultar un evento
```

Figura 7.5 Datos que se presentan en la consulta de una estación

```
SHIFT                                   CAPTURA DE DATOS DE LLUVIA

  ESTACION                                  FECHA

T[min] P[mm] | T[min] P[mm] | T[min] P[mm] | T[min] P[mm] | T[min] P[mm]

        F1-Ayuda          F2-Gravar          F3-Eliminar
```

Figura 7.6 Datos por capturar del evento de precipitación

Después de consultar la información de un evento de precipitación se deberá oprimir la tecla F2 para grabar la información (aunque ya esté grabada) y regresar a la pantalla inmediata anterior.

Cuando se registra la historia del evento de precipitación se genera un archivo con la extensión DPR.

7.3.2 Interpolación de datos de lluvia

Cuando se usa esta opción el sistema pregunta al usuario el nombre del archivo con los datos topográficos y el nombre del archivo con los eventos de precipitación.

Una vez que esto se ha hecho aparecerá la pantalla que se muestra en la Figura 7.7, en la cual se le pide al usuario que seleccione un evento de precipitación para realizar el proceso de interpolación, para esto se indica la fecha del evento. Posteriormente aparecerá la pantalla que se muestra en la Figura 7.8, en ella se presentan para cada estación los tiempos inicial y final del evento seleccionado.

-98-

```
SHIFT                                INTERPOLACION DE DATOS DE LLUVIA

  ESTACION                    EVENTOS DE PRECIPITACION

      F1-Ayuda     Esc-Regresar     F3-Seleccione un evento
```

Figura 7.7 Eventos de precipitación con los que se puede realizar el proceso de interpolación

En la parte inferior de la pantalla se tienen, en particular la función F3-Parámetros, que permite definir los parámetros de la interpolación, es decir los tiempos inicial, final y el intervalo de tiempo. A continuación se le pide al usuario el nombre del archivo en donde se almacenarán las intensidades de precipitación interpoladas. Después de esto aparecerá una pantalla semejante a la Figura 7.9, en donde se puede observar el avance del proceso de interpolación.

Al terminar el proceso de interpolación de datos de lluvia, se ha generado un archivo con la extensión PRE.

```
SHIFT                                   INTERPOLACION DE DATOS DE LLUVIA

EVENTO DE LLUVIA DE

          ESTACION    TIEMPO INICIAL    TIEMPO FINAL
                          (min)             (min)

      F1-Ayuda          Esc-Regresar          F3-Parámetros
```

Figura 7.8 Evento seleccionado para la interpolación

```
SHIFT                                   INTERPOLACION DE DATOS DE LLUVIA

CUENCA

NUMERO DE FACETAS

PROCESANDO INFORMACION PARA LA FACETA No.

TIEMPO INICIAL (Hrs)

TIEMPO FINAL   (Hrs)

TIEMPO         (Hrs)
```

Figura 7.9 Datos que se muestran durante la interpolación

100

7.4 Estructura interna de archivos

El primer archivo que se genera durante la captura y procesamiento de datos de precipitación es el que contiene el directorio de las estaciones pluviográficas. Este archivo mantiene la estructura que se muestra en la Figura 7.10. En el primer registro de éste se almacena el identificador de la cuenca, en el segundo el número de estaciones, después se tiene un registro para cada estación en donde se almacenan las coordenadas x, y de la estación y el número de eventos (2 eventos en el ejemplo), enseguida de éste se tiene un registro por estación, en el cual se almacena la fecha de cada evento para cada estación (día, mes, año).

Número de registro

0	Lucky Hills		
1	6		
2	191.50	369.60	2
3	192.20	389.60	2
⋮		⋮	
n	250.20	216.00	2
n+1	31	8	66
n+2	10	8	71
⋮		⋮	
n+m	18	8	71

Figura 7.10 Estructura del archivo con el directorio de las estaciones

También uno de los archivos generados dentro del módulo es el que contiene los eventos de precipitación de cada una de las

estaciones que se han considerado para el estudio de una cuenca. Este archivo tiene la estructura que se muestra en la Figura 7.11 y contiene la siguiente información. Cada evento de precipitación ocupa dos registros, en uno de ellos se almacena el tiempo acumulado (en minutos) y en el otro la lámina precipitada correspondiente (en mm). El número máximo de datos que puede contener cualquiera de estos registros es 75. De acuerdo a esto el archivo contendrá todos los eventos de las estaciones que han sido consideradas. Los valores que se encuentran dentro de los registros corresponden a los datos de ejemplo.

	Número de registro						
n Estaciones como máximo — eventos de la estación 1 — un evento	1	0.0	3.0	17.0	28.0	...	200.0
	2	0.0	2.5	3.1	4.1	...	16.5
	⋮				⋮		
	i	0.0	5.0	24.0	30.0	...	150.0
	i+1	0.0	1.2	7.8	8.2	...	9.5
eventos de la estación 2	i+2	0.0	2.0	10.5	50.0	...	120.0
	i+3	0.0	0.5	2.0	10.8	...	18.0
	⋮				⋮		
	j	0.0	5.0	10.0	20.0	...	75.0
	j+1	0.0	1.0	3.0	5.0	...	9.2
	⋮				●		
eventos de la estación n	k	0.0	10.0	30.0	60.0	...	120.0
	k+1	0.0	0.2	0.3	5.0	...	12.0
	⋮				⋮		
	l	0.0	2.5	3.0	10.0	...	75.0
	l+1	0.0	1.0	2.7	3.1	...	7.3

Figura 7.11 Estructura del archivo con los eventos de lluvia

El último archivo que es generado durante el mismo proceso, es

102

el que contiene los datos del hietograma interpolado en cada una de las facetas. El archivo tiene la estructura que se muestra en la Figura 7.12. En el primer registro de éste se almacenan: día (31), mes (8), año (66), tiempo inicial (0.0) y tiempo final (200.0) de la interpolación, el número de intervalos de tiempo (40) y el incremento de tiempo (5.0) de los datos interpolados. A partir del segundo registro, para cada faceta se almacena su hietograma correspondiente.

Número de registro							
0	31	8	66	0.0	200.0	40	5.0
1	0.0	0.8	1.2	2.8	4.1	...	12.5
2	0.0	0.6	1.4	3.1	4.6	...	14.9
⋮				⋮			
n	0.0	1.0	2.3	2.8	5.1	...	12.1

máximo número de intervalos

Figura 7.12 Estructura del archivo con los datos de lluvia interpolados para cada faceta

VIII SIMULACION DE EVENTOS HIDROLOGICOS

8.1 GENERALIDADES

La generación de escurrimiento a partir de la pricipitación es un proceso muy complejo en el que intervienen tanto las características de la lluvia como de la cuenca. El conocimiento de los diferentes procesos implicados es determinante para calcular el hidrograma a la salida de la cuenca. Para esto es necesario calcular simultáneamente la infiltración y transitar el exceso de precipitación, primero analizando cada faceta de acuerdo al orden prestablecido (cascada de facetas) y después transitando el agua que entra al sistema de cauces, los que serán analizados también de acuerdo a una secuencia predeterminada. En este proceso el escurrimiento que se transita se ve enriquecido por el exceso de precipitación que se va teniendo a medida que se avanza aguas abajo; pero también se observa una disminución del mismo cuando la infiltración predomina. En principio es posible que se tenga un escurrimiento con interrupciones, lo que ilustra la dificultad de los cálculos y la necesidad de desarrollar enfoques robustos que permitan todos estos fenómenos.

Este módulo constituye pues la parte principal del sistema que se describe. En él se determina la infiltración y el escurrimiento

que tiene lugar en las facetas triangulares y en los segmentos de cauce. Toda la información generada es almacenada en archivos de tal manera que una vez que se finaliza con el proceso de simulación se tiene la posibilidad de desplegar el hidrograma de escurrimiento, si es que existe, de cualquier elemento que conforma a la cuenca.

8.2 ASPECTOS TEORICOS

Como se ha mencionado, es probable que el método más riguroso para realizar los cálculos del escurrimiento en modelos distribuidos sea el utilizar las ecuaciones de St. Venant. Las ecuaciones se resuelven separadamente y en forma alternada. Primero son resueltas para el cauce principal, considerando las confluencias como puntos donde la descarga es conocida (del intervalo de tiempo anterior). En seguida las ecuaciones se resuelven para cada tributario, considerando conocidos los tirantes en el punto de descarga hacia el cauce principal (del intervalo de tiempo anterior). Este proceso se complica cuando se tienen tributarios de orden mayor. Es claro que este método es bastante complicado y consume mucho tiempo de computadora, aún para redes muy simples.

Entre los métodos más simples para realizar el cálculo del escurrimiento se tiene la aproximación de la onda cinemática. En este caso la complejidad de los cálculos se reduce a la solución recursiva de un solo tipo de elemento, con la única condición de que

la entrada desde el elemento vecino "aguas arriba" sea conocida, ya que los efectos de remanso no son considerados por la ecuación de la onda cinemática. Esta condición implica que los elementos del modelo distribuido deben ser analizados en un orden o secuencia específica, conocida como cascada cinemática.

Por otro lado y considerando que los datos de suelos y precipitación son conocidos en cada faceta con un nivel bajo de aproximación, ha parecido razonable el que la faceta de forma triangular sea transformada a una faceta de forma rectangular con la misma área, pero con una longitud igual a la mitad de la longitud de la línea de máxima pendiente, esto con el fin de tratar el escurrimiento como un problema unidimensional y simplificar asi los cálculos hidrológicos. En realidad sería prácticamente imposible hacer el seguimiento de los caminos del agua con toda la diversidad de longitudes que tienen al pasar las diferentes facetas triangulares.

La determinación de la geometría de la faceta equivalente se realiza por comodidad en el módulo de *Captura y procesamiento de datos de facetas* pero los aspectos teóricos se explican dentro de este módulo. Igualmente, por comodidad el cálculo del largo, la pendiente y la interpolación del ancho del segmento de cauce se realiza dentro del módulo de *Captura y procesamiento de datos de cauces*. Fue conveniente hacerlo de esta manera debido principalmente, como se ha venido mencionando a lo largo de este

documento, a que con ello se estructura de mejor manera el sistema.

En esta sección se explicará primeramente la identificación de una cascada cinemática, enseguida el procedimiento para transformar la faceta triangular en una rectangular equivalente, después se abordará el fenómeno de infiltración y por último se describirá el marco teórico en que se basa el tránsito del escurrimiento en cada uno de los elementos de la cuenca: facetas triangulares y segmentos de cauce.

8.2.1 Determinación de la cascada cinemática

Antes de que se inicie el tránsito del escurrimiento es necesario conocer el orden en que serán analizadas las facetas y los segmentos de cauce. Como se ha dicho, un orden de cálculo válido debe tener la propiedad de que al analizar un elemento cualquiera, los elementos vecinos que se localizan aguas arriba ya deben estar analizados. Primeramente se define una secuencia o cascada de segmentos de cauce y luego para cada segmento se identifican también en orden de cascada las facetas (o la fracción de las mismas) que constituyen el área de contribución de cada segmento. Una misma faceta puede formar parte del área de contribución de diferentes segmentos de cauce, pero los cálculos se realizan una sola vez para cada faceta triangular y los resultados se almacenan en un archivo para que puedan ser utilizados posteriormente.

El procedimiento para identificar la cascada cinemática de segmentos de cauce consiste en lo siguiente (para más detalle véase Pimentel, 1989; Gandoy y Palacios, 1990):

a) Primeramente se selecciona el elemento hasta el cual se desea conocer la cascada.

b) Se verifica si hay elementos vecinos hacia aguas arriba. Se pueden presentar dos casos:

b.1 Si no hay elementos aguas arriba o si tales elementos ya tienen asignado un número de orden dentro de la cascada, se asigna número de orden al elemento que se analiza.

b.1.1 Si el elemento analizado corresponde al último elemento de la red de cauces considerada, termina el proceso.

b.1.2 Si no termina la red se avanza hacia el siguiente elemento aguas abajo y se repite el proceso desde el punto b.

b.2 Si hay segmentos hacia aguas arriba que no se les haya asignado un número de orden, se avanza hacia aguas arriba al siguiente elemento en esa dirección y se repite el procedimiento desde el punto b.

Antes de proceder con los cálculos del escurrimiento en cualquier segmento de cauce, es necesario identificar las facetas que forman su área de contribución y además, determinar la cascada cinemática de facetas triangulares. Estas 2 operaciones pueden realizarse mediante la aplicación de un procedimiento muy similar al antes descrito. La principal diferencia es que en el caso del escurrimiento en facetas usualmente se presentan confluencias y divergencias (para mayor detalle véase la referencia mencionada de Gandoy and Palacios, 1990).

103

8.2.2 Cálculo del escurrimiento en facetas

En esta sección se explicarán en forma breve los procesos relacionados con el escurrimiento en facetas y que han sido considerados en el desarrollo del sistema SHIFT.

8.2.2.1 Geometría de la faceta rectangular equivalente

La pendiente, largo y ancho se estiman en base a las coordenadas X, Y y Z de los vértices de cada faceta. Para esto considérese la Figura 8.1.

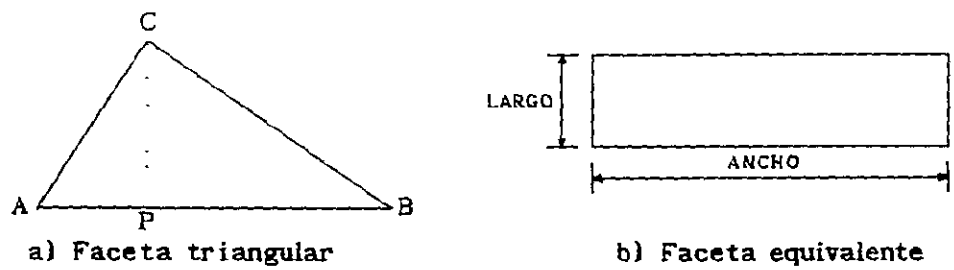


Figura 8.1 Transformación de la faceta triangular a la faceta equivalente. La línea CP marca esquemáticamente la dirección de máxima pendiente (y no es necesariamente perpendicular a la línea AB)

Se puede decir que el hidrograma promedio de salida de la faceta triangular será equivalente a considerar una longitud media de recorrido del agua en la dirección de la máxima pendiente. Esta

longitud media será la mitad de la longitud de la línea de máxima pendiente $\overline{CP}$, dado que la longitud de los recorridos del agua es lineal y van desde un valor máximo en la línea $\overline{CP}$ hasta un valor de cero en los extremos de la arista $\overline{AB}$. Por lo tanto:

$$\text{Largo de la faceta equivalente} = \frac{\overline{CP}}{2} \tag{8.1}$$

$$\text{Ancho de faceta equivalente} = \frac{\text{Area de la faceta triangular}}{\text{Largo de la faceta equivalente}} \tag{8.2}$$

$$\text{Pendiente} = \frac{ABS(Z(C) - Z(P))}{\overline{CP}} \tag{8.3}$$

El punto P, de la arista AB, donde cruza la línea de máxima pendiente que se origina en el vértice C se determina por un procedimiento de geometría diferencial desarrollado por Palacios y Cuevas, 1986. El procedimiento consiste básicamente en utilizar una expresión del gradiente, como la fórmula (6.2), poner la ordenada del punto buscado en función de su abscisa, obtener la derivada respecto de x, igualar esta derivada a cero y despejar la abscisa.

8.2.2.2 Cálculo de la infiltración del agua en las facetas

Existen distintos enfoques y métodos para realizar el cálculo de la infiltración y en el presente trabajo se ha aplicado la ecuación de Smith-Parlange (1978) por ser una ecuación deducida de bases conceptuales, la cual tiene la forma:

$$f = K_s \frac{e^{F/B}}{e^{F/B} - 1} \tag{8.4}$$

donde:

- F : Infiltración acumulada [L]
- f : Velocidad de infiltración [L/T]
- K_s: Conductividad hidráulica a saturación natural [L/T]
- $B = G(\theta_s - \theta_i)$ (8.5)
- o $B = G\ \phi(S_{max} - S_i)$ (8.6)
- θ_s: Contenido de humedad a saturación natural [L^3/L^3]
- θ_i: Contenido de humedad inicial [L^3/L^3]
- ϕ : Porosidad del suelo [L^3/L^3]
- S : Saturación relativa
- Smáx : Saturación relativa a saturación
- Si : Saturación relativa inicial

y G es definida como:

$$G = \frac{1}{K_s} \int_{-\infty}^{o} K(h)\ dh \tag{8.7}$$

en la cual:

- h : Potencial de presión [L]
- K(h) : Conductividad hidráulica [L/T]
- G : Potencial total de escurrimiento [L]

Por otro lado, se tiene que la ecuación (8.7) es equivalente a la ecuación:

$$G = \frac{1}{K_s} \int_0^{\theta_s} K(\theta) \cdot \frac{dh}{d\theta} \, d\theta \qquad (8.8)$$

con la cual, utilizando la ecuación de Averyanov (1949) citado por Poluvarinova-Kochina (1962):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\eta} \qquad (8.9)$$

$$\eta = \frac{2}{m} + \frac{1}{2} \quad \text{con} \quad 0<m<1 \qquad (8.10)$$

y la ecuación de van-Genuchten (1980):

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^m}; \quad \text{con} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \qquad (8.11)$$

donde:

η, m, n y h_g son parámetros empíricos

h : Potencial de presión [L]

se puede llegar a:

$$G = - \frac{h_g(1 - m)}{m} \int_0^{\theta_s} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\frac{1}{m}+\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{\theta_s}{\theta} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{1-m} d\theta \qquad (8.12)$$

de esta forma se puede conocer G, integrando numéricamente la ecuación anterior y determinando el valor de los parámetros que

intervienen mediante el procedimiento descrito por Fuentes *et. al.*, (1987), que se basa en el análisis granulométrico de los suelos, lo que es rápido y barato. De otra manera debe obtenerse la curva K(h), con pruebas de campo o laboratorio e integrarse gráficamente el área indicada por (8.7) o de acuerdo a la textura de los suelos, estimar los valores de G utilizando el Cuadro 8.1.

El cálculo de la infiltración en un momento dado cualquiera, en particular durante o después de una lluvia (si alcanzó a encharcar el suelo) requiere del siguiente análisis.

Supóngase que al inicio de un evento lluvioso el suelo está seco, de tal manera que la cantidad de agua que puede absorber en la unidad de tiempo (su capacidad de infiltración) es mayor que la intensidad de la lluvia en esos primeros instantes del evento. Bajo estas condiciones, se infiltrará toda la lluvia, es decir:

si $i < f_p$ entonces $f = i$

donde:

f_p : Capacidad de infiltración [L/T]

i : Intensidad de la lluvia [L/T]

Al continuar la lluvia, sobre todo si es muy intensa, el contenido de humedad del suelo aumenta hasta llegar al estado de encharcamiento. Entonces la capacidad de infiltración disminuye

Cuadro 8.1 Características hidráulicas de algunos suelos (Woolhiser *et. al.*, 1989)

Textura	ϕ (cm^3/cm^3)	Si	Smáx	Ks(cm/h)	G (cm)
Arenoso	0.437 0.374-0.500	0.045	0.95	21.0	10.1 2.2- 20.7
Areno migajoso	0.437 0.368-0.506	0.080	0.92	6.1	14.7 4.1- 32.3
Migajón arenoso	0.453 0.351-0.555	0.090	0.91	2.6	24.8 9.8- 52.6
Migajón	0.463 0.375-0.551	0.060	0.94	1.3	37.5 18.5- 93.7
Migajón limoso	0.501 0.420-0.582	0.030	0.97	0.68	48.5 22.0-104.3
Migajón arcillo arenoso	0.398 0.332-0.464	0.170	0.83	0.43	61.7 22.0-107.0
Migajón arcilloso	0.464 0.409-0.519	0.160	0.84	0.23	53.3 25.0-117.4
Migajón arcillo lomoso	0.471 0.418-0.524	0.080	0.92	0.15	72.0 37.0-147.0
Arcillo arenoso	0.430 0.370-0.490	0.250	0.75	0.12	76.8 37.3-173.0
Arcillo limoso	0.479 0.425-0.533	0.120	0.88	0.09	81.2 43.0-170.0
Arcilloso	0.475 0.427-0.523	0.190	0.81	0.06	89.0 46.0-183.0

conforme pasa el tiempo. En estas condiciones la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia, en tanto que ésta sea mayor que la capacidad de trasmisión del suelo, de tal forma que:

si $i > f_p$; $t > t_p$ entonces $f = f_p$

donde:

t_p : Tiempo de encharcamiento [T]

En el proceso de infiltración se han diferenciado 3 casos generales que a continuación se mencionan.

a) Infiltración solo por precipitación

Dada una intensidad de lluvia en el momento en que se realiza el cálculo de la infiltración, primeramente se calcula la lámina que se acumulará hasta el inicio del encharcamiento (bajo el supuesto de que no cambia la intensidad de precipitación). Esta lámina acumulada se calcula a partir de la ecuación (8.4). Como se conoce la intensidad media de lluvia se puede considerar que:

$$i_p = K_s \frac{e^{F/B}}{e^{F/B} - 1} \tag{8.13}$$

donde i_p es la intensidad media de precipitación que se tiene al alcanzar el valor de F. Despejando F de esta ecuación se llega a:

$$F = B \ln \frac{1}{1 - \frac{K_s}{i_p}} \tag{8.14}$$

Una vez que se conoce F se procede a determinar el tiempo que se tarda en llegar al encharcamiento, para lo cual se integra la ecuación:

$$f = \frac{dF}{dt} \tag{8.15}$$

$$dt = \frac{dF}{f} = \frac{e^{F/B} - 1}{e^{F/B}} \frac{dF}{Ks} = \frac{1}{Ks} \left[1 - \frac{1}{e^{F/B}} \right] dF \tag{8.16}$$

se obtiene:

$$\int_{o}^{t_1} dt = \frac{1}{K_s}\left[\int_{o}^{F_1} dF - \int_{o}^{F_1} \frac{1}{e^{F/B}}\, dF\right] \tag{8.17}$$

Considerando que:

$$-\int_{o}^{F_1} \frac{1}{e^{F/B}}\, dF = -B\left[1 - \frac{1}{e^{F_1/B}}\right] \tag{8.18}$$

se llega finalmente a:

$$t_1 = \frac{1}{K_s}\left[F_1 - B\left(1 - e^{-F_1/B}\right)\right]; \text{ ó} \tag{8.19}$$

$$F_1 = K_s\, t_1 + B\left(1 - e^{-F_1/B}\right)$$

donde F_1 es el valor calculado con la ecuación (8.14). Una vez que se conoce el valor de t_1 se puede determinar el valor de la lámina que se infiltra después de que se ha llegado al encharcamiento. Para calcular el valor de F (usando una fórmula análoga a la 8.19 donde F ocupará el lugar de F_1) se aplica el método de Newton-Raphson, que será descrito posteriormente en él apartado de Tránsito del escurrimiento en facetas. En el cálculo de la infiltración se debe elegir correctamente el primer estimador de F para que haya convergencia al utilizar Newton-Rapnson; un buen estimador es:

$$F = K_s\, t \tag{8.20}$$

donde t corresponde al tiempo de oportunidad (es decir contado a partir del tiempo de encharcamiento τ_1) más el tiempo de encharcamiento.

b) Infiltración debida a un hidrograma de entrada aguas arriba

Cuando se tiene un hidrograma de entrada aguas arriba de la faceta, se calcula primero el tiempo de llegada del agua a cada estación del elemento analizado y de acuerdo a este valor se determina el tiempo de oportunidad o tiempo que permanece el agua sobre la superficie, el cual corresponde al valor de t en la ecuación (8.20) y resolviendo la ecuación (8.19) se determina el valor de F_1.

c) Infiltración debida a una combinación de la precipitación y un hidrograma de entrada aguas arriba

Considerando el tiempo de oportunidad y el tiempo de encharcamiento para cada uno de los tramos en que se ha subdividido la faceta, se calcula el valor de la infiltración utilizando la ecuación (8.19).

8.2.2.3 Interpolación del ancho sujeto a infiltración

Es importante observar que siempre que los tirantes del escurrimiento son relativamente pequeños no todo el ancho del elemento analizado se encuentra cubierto con agua y sujeto a infiltración, sino que el agua se concentra en los canalillos de

-117-

elevación más baja y que se han formado con el transcurso del tiempo.

Para determinar el volumen de agua que se pierde por infiltración se ha supuesto que después de un cierto valor del tirante de escurrimiento hay infiltración a todo lo ancho del elemento analizado. En cambio si el tirante es pequeño la infiltración solo tendrá lugar en una parte del ancho del elemento.

Para calcular el ancho sujeto a infiltración se considera que existe una relación lineal entre éste y el tirante del escurrimiento. De acuerdo a la Figura 8.2 y tomando en cuenta lo antes dicho, se tiene que:

$$\frac{b}{h^*} = \frac{d}{h} \Rightarrow d = \frac{b}{h^*} h \text{ si } h < h^* \qquad (8.21)$$

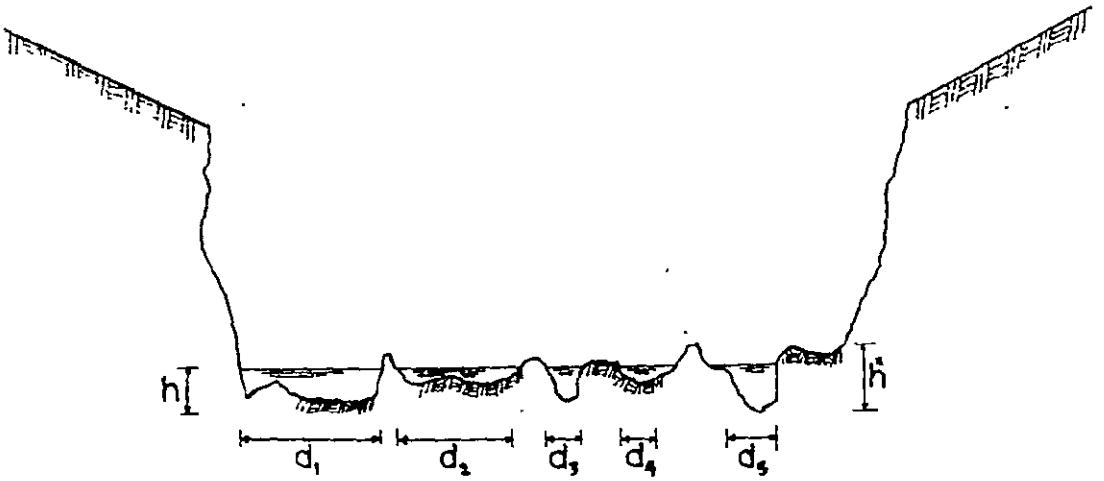
$$\text{y } d = b \text{ si } h \geq h^* \qquad (8.22)$$

donde:

- h^* : Tirante después del cual el ancho que estará sujeto a infiltración sera b
- h : Tirante del flujo del elemento analizado
- d : Parte del ancho del segmento de cauce que está sujeto a infiltración
- b : Ancho total del elemento analizado

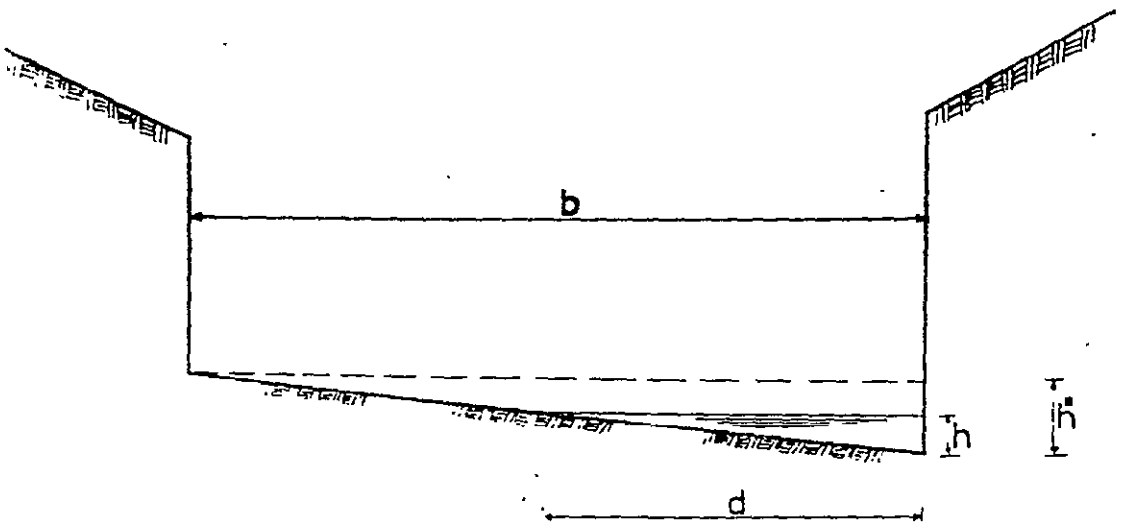
En el caso del modelo desarrollado se le ha asignado un valor de 10 cm a h^*, siendo éste un parámetro a calibrar con datos reales.

118



$$d = \sum_{i=1}^{5} d_i$$

a) Cauce natural



b) Cauce hipotético

Figura 8.2 Ancho sujeto a infiltración

-119-

Calcular el valor del ancho sujeto a infiltración en la forma que se ha propuesto es una manera de simplificar el problema, ya que en la realidad existe una relación bastante compleja entre el tirante h y el ancho d, debido principalmente a las irregularidades en la superficie de la faceta, la pedregosidad y la vegetación que se encuentra dentro de la misma.

8.2.2.4 Tránsito del escurrimiento en facetas

Para transitar el escurrimiento en cada uno de los elementos que forman a la cuenca, se aplicó la ecuación de la onda cinemática. Al aplicar este método se toma en cuenta el principio de continuidad expresado en la ecuación de almacenamiento de la forma (Pimentel, 1989):

$$\forall_e - \forall_s = \Delta\forall + \Delta\forall_i \qquad (8.23)$$

donde:

$\forall_e$: Volumen de entrada al tramo del elemento analizado $[L^3]$

$\forall_s$: Volumen de salida del tramo del elemento analizado $[L^3]$

$\Delta\forall$: Cambio en el volumen almacenado en el tramo del elemento analizado [L]

$\Delta\forall_i$: Cambio en el volumen infiltrado en el tramo del elemento analizado [L]

y además, la ecuación de cantidad de movimiento simplificada a la

120

forma:

$$S_f = S_o \tag{8.24}$$

donde S_f es el gradiente hidráulico y puede ser determinado con la ecuación de Manning y S_o es la pendiente del elemento analizado.

Considerando la Figura 8.3 y desglosando los términos de la ecuación (8.23) se obtiene:

$$\forall_e = \left[\omega\ Q_{i-1}^{j} + (1-\omega)Q_{i-1}^{j-1}\right]\Delta t + \left[\omega\ ql^{j} + (1-\omega)ql^{j-1}\right]\Delta x \tag{8.25}$$

$$\forall_s = \left[\omega\ Q_{i}^{j} + (1-\omega)Q_{i}^{j-1}\right]\Delta t \tag{8.26}$$

$$\Delta\forall_i = \left[\phi_z Z_{i-1}^{j} + (1-\phi_z)Z_{i}^{j}\right]\Delta x - \left[\phi_z Z_{i-1}^{j-1} + (1-\phi_z)Z_{i}^{j-1}\right]\Delta x \tag{8.27}$$

$$\Delta\forall = \left[\phi\ h_{i-1}^{j} + (1-\phi)h_{i}^{j}\right]\Delta x - \left[\phi\ h_{i-1}^{j-1} + (1-\phi)h_{i}^{j-1}\right]\Delta x \tag{8.28}$$

donde:

$\forall_e$: Volumen de entrada al tramo del elemento analizado de longitud Δx [L]

$\forall_s$: Volumen de salida en el tramo del elemento analizado [L^3]

$\Delta\forall_i$: Cambio en el volumen infiltrado dentro del tramo del elemento analizado [L]

$\Delta\forall$: Cambio en el volumen almacenado en el tramo del elemento analizado [L]

Q : Gasto o caudal [L^3/T]

121

Z : Lámina infiltrada acumulada [L]

h : Tirante del flujo [L]

ql : Lámina promedio precipitada en un intervalo Δt [L]

Δt : Intervalo de tiempo [T]

Δx : Longitud de los tramos en que es dividido el elemento [L]

i : Indice que corresponde al espacio

j : Indice que corresponde al tiempo

ω : Coeficiente de ponderación en el tiempo

ϕ : Coeficiente de ponderación en el espacio para el perfil de agua en la superficie

ϕ_z : Coeficiente de ponderación en el espacio para el perfil subterráneo de distribución de humedad

La ecuación que relaciona el tirante del flujo y el gasto se puede escribir de la forma:

$$Q = \alpha h^{\beta}; \text{ ó } h = (Q/\alpha)^{(1/\beta)} \tag{8.29}$$

siendo α y β parámetros que dependen de la forma y rugosidad de la faceta analizada. Considerando la ecuación de Manning y aplicandola a un ancho unitario se obtiene que:

$$\alpha = \frac{S_o^{1/2}}{n} \quad y \quad \beta = \frac{5}{3}$$

donde n corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning y S_o fue anteriormente definido. Substituyendo la ecuación (8.29) en la ecuación (8.28) y desarrollando, se obtiene:

122

$$\left[\omega Q_{i-1}^{j} + (1-\omega)Q_{i-1}^{j-1}\right]\Delta t + \left[\omega\ ql^{j}+(1-\omega)ql^{j-1}\right]\Delta x -$$

$$\left[\omega Q_{i}^{j} + (1-\omega)Q_{i}^{j-1}\right]\Delta t = (1/\alpha)^{(1/\beta)}\left\{\left[\phi\left(Q_{i-1}^{j}\right)^{(1/\beta)} + \right.\right.$$

$$\left.(1-\phi)\left(Q_{i}^{j}\right)^{(1/\beta)}\right]\Delta x - \left[\phi\left(Q_{i-1}^{j-1}\right)^{(1/\beta)} + (1-\phi)\left(Q_{i}^{j-1}\right)^{(1/\beta)}\right]\Delta x\Big\} +$$

$$\left[\phi_z Z_{i-1}^{j} + (1-\phi_z)Z_{i}^{j}\right]\Delta x - \left[\phi_z Z_{i-1}^{j-1} + (1-\phi_z)Z_{i}^{j-1}\right]\Delta x \qquad (8.30)$$

Cálculo de la solución

Para determinar el valor de Q_i^j se aplica el método Newton-Raphson. Si se define un residual r como:

$$r = \Delta\forall + \Delta\forall_l + \forall_s - \forall_e \qquad (8.31)$$

Suponiendo que la función r(Q) es continua, al aplicar la serie de Taylor y despreciar las derivadas superiores a la de primer orden, se tiene que para calcular el residual en la iteración k+1 se llega a:

$$r^{k+1} = r^{k} + (\partial\ r^{k}/\partial\ Q_i^j)\ (\Delta Q_i^j)^{k+1} \qquad (8.32)$$

donde:

k : Número de iteración

123

$(\Delta Q_i^j)^{k+1}$: Incremento al valor de Q_i^j

Como se espera que $r^{k+1} \longrightarrow 0.0$, despejando $(\Delta Q_i^j)^{k+1}$ de la ecuación (8.32) se obtiene que:

$$(\Delta Q_i^j)^{k+1} = \frac{-r^k}{\dfrac{\partial r^k}{\partial Q_i^j}} \tag{8.33}$$

obteniendo $\dfrac{\partial r^k}{\partial Q_i^j}$ y sustituyendo términos se obtiene:

$$(\Delta Q_i^j)^{k+1} = \frac{\forall_e - \forall_s - \Delta\forall_i - \Delta\forall}{\omega\ \Delta t + \Delta x\ (1-\phi)(1/\beta)(1/\alpha)^{(1/\beta)}\left(Q_i^j\right)^{(1-\beta)/\beta}} \tag{8.34}$$

por lo tanto :

$$(Q_i^j)^{k+1} = (Q_i^j)^k + (\Delta Q_i^j)^{k+1} \tag{8.35}$$

Frente del avance

En el caso de la fase de avance se presenta un frente en el perfil del flujo superficial. Para realizar el tránsito de la onda es necesario determinar la posición de éste, para lo cual se considera la Figura 8.4 y se procede con el balance de la forma siguiente:

$$\forall_e = \left[\omega Q_{i-1}^j + (1-\omega)Q_{i-1}^{j-1}\right]\Delta t + \left[\omega\ ql^j\ \Delta x frente + (1-\omega) ql^{j-1}\ \Delta x ant\right] \tag{8.36}$$

c 124

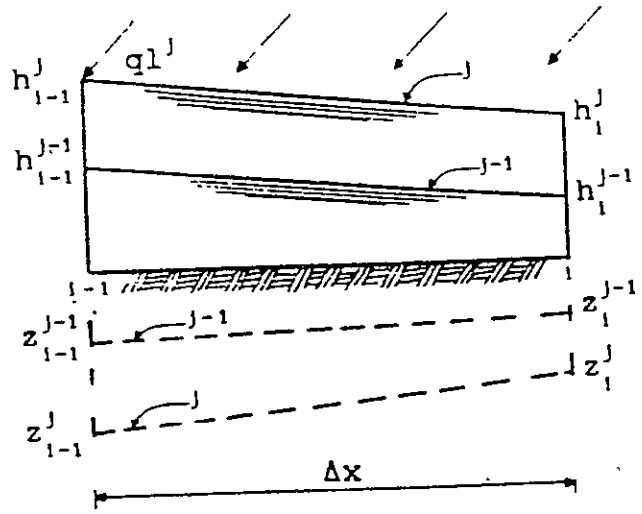


Figura 8.3 Propagación del perfil del escurrimiento superficial

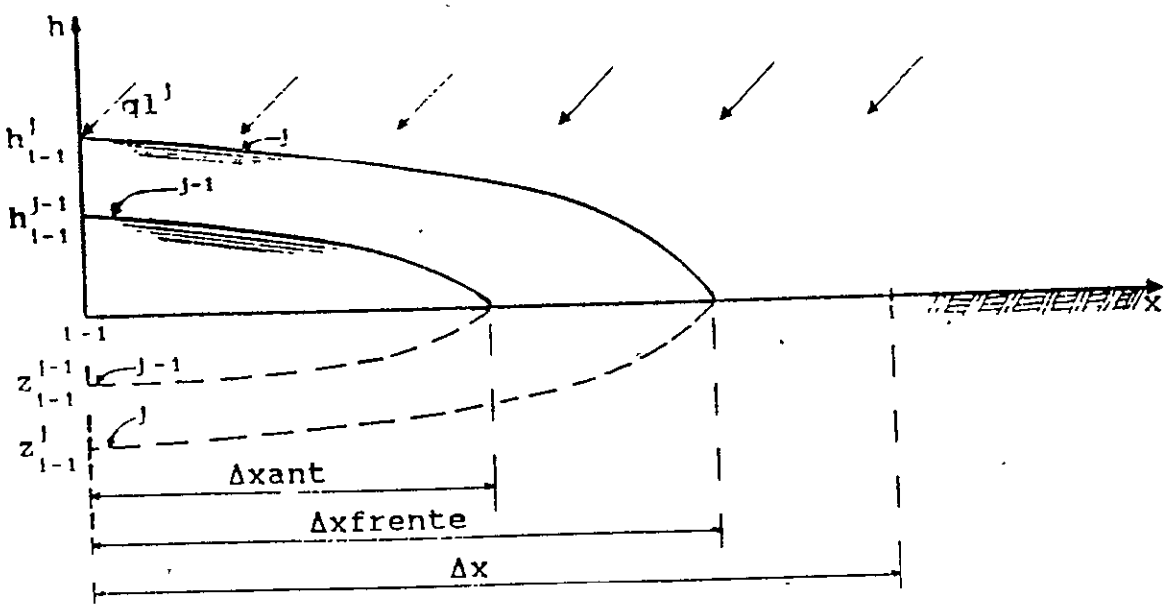


Figura 8.4 Frente del avance

125

$$\forall_s = 0.0 \tag{8.37}$$

$$\Delta\forall_i = \left[\phi_z Z_{i-1}^{j} \Delta xfrente - \phi_z Z_{i-1}^{j-1} \Delta xant\right] \tag{8.38}$$

$$\Delta\forall = \left[\phi\ h_{i-1}^{j}\ \Delta xfrente - \phi\ h_{i-1}^{j-1}\ \Delta xant\right] \tag{8.39}$$

donde:

$\Delta xant$: Posición del frente en el intervalo de tiempo anterior

$\Delta xfrente$: Posición del frente en el intervalo de tiempo actual

Por lo que:

$$\forall_e = \Delta\forall_i + \Delta\forall \tag{8.40}$$

Sustituyendo los términos de esta ecuación se obtiene:

$$\omega\left[Q_{i-1}^{j}\ \Delta t + ql^{j}\ \Delta xfrente\right] + (1-\omega)\left[Q_{i-1}^{j-1}\ \Delta t + ql^{j-1}\Delta xant\right] =$$

$$\left[\phi_z Z_{i-1}^{j}\ \Delta xfrente - \phi_z Z_{i-1}^{j-1}\ \Delta xant\right] +$$

$$\left[\phi\ h_{i-1}^{j}\ \Delta xfrente - \phi\ h_{i-1}^{j-1}\ \Delta xant\right] \tag{8.41}$$

Simplificando y aplicando la ecuación (8.29), se transforma en:

$$\Delta xfrente = \left\{\omega\ Q_{i-1}^{j}\Delta t + (1-\omega)\left[Q_{i-1}^{j-1}\ \Delta t + ql^{j-1}\ \Delta xant\right] +\right.$$

$$\left.\left[\phi_z Z_{i-1}^{j-1} + \phi\ (1/\alpha)^{(1/\beta)}\left(Q_{i-1}^{j-1}\right)^{(1/\beta)}\right]\Delta xant\right\} /$$

$$\left\{\phi_z Z_{i-1}^{j} + \phi\ (1/\alpha)^{(1/\beta)}\left(Q_{i-1}^{j}\right)^{(1/\beta)} - \omega\ ql^{j}\right\} \tag{8.42}$$

126

8.2.2.5 Determinación del valor de los parámetros ϕ y ϕz del frente del avance

Los factores de forma ϕ y ϕ_z (del perfil superficial y perfil subterráneo) son estimados con el fin de representar la no linealidad del perfil del flujo en la región cercana al frente del avance. El procedimiento descrito a continuación ha sido tomado del trabajo de Catalán (1987).

Si se supone que la velocidad del agua (V_N) en la zona cercana al frente es constante, la ecuación de momentum se reduce a:

$$\frac{dy}{dx} = S_o - S_f \quad o \quad \frac{dy}{dx} = S_o - \frac{V_N^2 n^2}{y^{4/3}} \qquad (8.43)$$

donde:

y : Tirante del flujo [L]

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

x : Distancia horizontal [L]

S_o : Pendiente de la faceta

S_f : Gradiente hidráulico

X_N : Distancia hasta el frente del avance [L]

A medida que $x \longrightarrow X_N$ el tirante $y \longrightarrow 0$, por lo cual el gradiente hidráulco aumenta sin límite, mientras que la pendiente de la faceta permanece constante, pudiendose considerar despreciable cerca del frente y la ecuación (8.43) se reduce a una ecuación diferencial ordinaria que al integrarse produce una descripción del tirante en

función de la distancia. Con el fin de facilitar la integración el origen de referencia se transfiere al frente de la corriente y se define la variable l como:

$$l = X_N - x \tag{8.44}$$

que al derivarse se obtiene:

$$dl = -dx \tag{8.45}$$

y al integrar resulta que:

$$y = \left[\left(\frac{7}{3}\right) V_N^2 \, n^2 \, l \right]^{3/7} \tag{8.46}$$

En la frontera izquierda de la celda lider $l = X_{N-1}$ y el tirante y_{N-1} será:

$$y_{N-1} = \left[\left(\frac{7}{3}\right) V_N^2 \, n^2 \, X_{N-1} \right]^{3/7} \tag{8.47}$$

El volumen superficial $\forall_N$ de la celda lider se obtiene al integrar la ecuación (8.46) sobre la longitud de la celda:

$$\forall_N = \int_0^{X_{N-1}} y(l) \, dl \tag{8.48}$$

de donde resulta que:

$$\forall_N = (7/10) \, y_{N-1} \, X_{N-1} \tag{8.49}$$

128

al dividir este resultado entre la longitud de la celda, se obtiene el tirante medio $\overline{y}$. El valor del factor de forma del perfil superficial del flujo para la celda lider será la relación del tirante medio y del tirante y_{N-1}, o sea que:

$$\phi = \frac{\overline{y}}{y_{N-1}} = \frac{7}{10} \tag{8.50}$$

Se realiza un análisis similar para estimar el valor del factor de forma del perfil del flujo subterráneo de la celda lider, tomando en cuenta la ecuación de infiltración utilizada.

El tiempo de oportunidad del agua de la superficie en cualquier punto x antes del frente del avance es dado por:

$$t = \frac{X_{N-1} - X}{V_N} \tag{8.51}$$

y la ecuación de Smith-Parlange (1978), para tiempos muy cortos es:

$$z = (2\ B\ K_s\ t)^{1/2} \tag{8.52}$$

Al sustituir la ecuación (8.51) en la ecuación (8.52) se obtiene la descripción de la lámina de agua infiltrada como una función de x:

$$z = \frac{(2\ B\ K_s)^{1/2}\ (X_{N-1} - X)^{1/2}}{V_N^{1/2}} \tag{8.53}$$

129

El volumen infiltrado $\forall_i$ en la celda lider se obtiene integrando la ecuación anterior sobre la longitud de la celda lider:

$$\forall_l = \int_0^{X_{N-1}} z(x)\, dx \tag{8.54}$$

resultando que:

$$\forall_l = (2/3)\, Z_{N-1}\, X_{N-1} \tag{8.55}$$

Para obtener el valor del factor de forma del perfil del flujo subterráneo de la celda lider, se hace un razonamiento análogo al realizado para obtener el valor del factor de forma del flujo superficial, por lo cual:

$$\phi_z = \frac{\overline{Z}}{Z_{N-1}} = \frac{2}{3} \tag{8.56}$$

8.2.3 Cálculo del escurrimiento en cauces

En esta parte se utilizan los mismos algorítmos que en el caso de las facetas para realizar los cálculos del escurrimiento dentro de la red de segmentos de cauce.

-130

8.2.3.1 Infiltración dentro de la red de cauces

La infiltración en la red de segmentos de cauce también es representada mediante la ecuación de Smith-Parlange (1978). La única diferencia con respecto a la infiltración en facetas, es que el valor del gasto de entrada lateral se transforma en una lámina promedio para cada intervalo de tiempo.

8.2.3.2 Tránsito del escurrimiento en la red de segmentos de cauce

Al igual que en el caso de facetas, se utiliza la aproximación de la onda cinemática para representar el flujo del escurrimiento. La teoría en que se basa este metodo ha sido descrita en el apartado del *Cálculo del escurrimiento en facetas.*

Cuando se trata de segmentos de cauce el valor de ql se calcula de la forma:

$$ql = El\ \Delta t/A \qquad (8.57)$$

donde:

El : Gasto de entrada lateral al segmento de cauce $[L^3/T]$

A : Longitud del segmento de cauce por el ancho considerado del mismo (igual a 1 m durante el análisis) $[L^2]$

-131

Para determinar el valor de Q_i^j se procede exactamente en la forma como se procedió en el caso de facetas.

8.3 OPERACION DEL MODULO

Mediante este módulo, como se mencionó antes, se puede calcular la infiltración y el escurrimiento que tiene lugar en cada uno de los elementos de la cuenca.

El módulo contiene 3 opciones, las que corresponden al menú principal del mismo (Figura 8.5). Las opciones deben ser ejecutadas en el orden indicado.

Para usar este módulo se deben haber llamado todos los demás módulos (*Construcción del DEM, Captura y procesamiento de datos de facetas, Captura y procesamiento de datos de cauces y Captura y procesamiento de datos de lluvia*).

8.3.1 Cálculo del escurrimiento en facetas

Por medio de esta opción se realiza el cálculo de la infiltración y del escurrimiento superficial en cada una de las facetas triangulares. Para cada faceta se realiza un cálculo hidrológico después de una etapa de preprocesamiento de información.

El preprocesamiento consiste en transformar la faceta triangular en una rectangular de área equivalente y con la misma pendiente máxima que tiene la faceta triangular original. Se decidió realizar esta simplificación, ya que no se analizan influencias perpendiculares a la dirección de máxima pendiente, que es la dirección del escurrimiento. La longitud media de la línea de la máxima pendiente en la faceta rectangular equivalente es igual a un medio de la longitud máxima de mayor pendiente en la faceta triangular original. Previamente se han calculado los datos de las características de suelos y el hietograma de precipitación.

```
SHIFT                          SIMULACION DE EVENTOS HIDROLOGICOS

OPCIONES:
        1.- CALCULO DEL ESCURRIMIENTO EN FACETAS
        2.- CALCULO DEL ESCURRIMIENTO EN CAUCES
        3.- SELECCION Y PRESENTACION DE HIDROGRAMAS

        F1-Ayuda                          Esc-Regresar
```

Figura 8.5 Menú principal del módulo

Cuando se ejecuta esta opción el sistema solicita al usuario nombres de los archivos que tienen la información topográfica, de la cascada cinemática, de las características de los suelos y de la precipitación.

Una vez que se ha proporcionado esta información en la pantalla se muestra la red irregular de triángulos de la cuenca analizada incluyendo los segmentos de cauce (en color azul). En la parte inferior se observan los tiempos inicial y final del proceso de simulación. Cuando se inicia la simulación en una faceta, ésta se sombrea de otro color (con respecto al que originalmente se tenía de fondo). Durante el proceso de simulación se generan dos archivos que contienen los hidrogramas de salida de cada faceta y los hidrogramas de entrada lateral a cada segmento de cauce. Los nombres de estos archivos serán los mismos que el archivo con la información de la precipitación y tendrán la extensión SHF y SHL, respectivamente.

8.3.2 Cálculo del escurrimiento en cauces

Después de obtener el hidrograma de escurrimiento para cada faceta, mediante esta opción se puede transitar el escurrimiento por la red de segmentos de cauce. El tránsito, al igual que en el caso de facetas triangulares, se realiza siguiendo una secuencia de cálculo o cascada hidrológica formada por segmentos de cauce.

También en la red de segmentos de cauce se utiliza la ecuación de Smith-Parlange para abordar el proceso de infiltración y la ecuación de la onda cinematica para transitar la onda del escurrimiento. Por tal motivo los cálculos son totalmente análogos a los que se realizan en las facetas triangulares. El procedimiento

principal para realizar los cálculos hidrológicos se utiliza tanto en el caso de los segmentos de cauce como en el caso de las facetas triangulares. Hay diferencias entre los dos casos, sólo en cuanto a la información de entrada y a la información b. .ca de la geometría y características de los suelos. Por ejemplo en las facetas la entrada lateral está constituida por la precipitación, mientras que en los segmentos de cauce está constituida por la aportación del escurrimiento superficial por parte de las dos facetas contiguas a cada segmento de cauce.

Al ejecutar esta opción se deberán proporcionar los nombres de los archivos con la información topográfica, la cascada cinemática, las caracteristicas de los cauces y los hidrogramas de entrada lateral.

Una vez que se ha proporcionado la información anterior, se dibuja en la pantalla la red de triángulos, los segmentos de cauce aparecen en un color café. En la parte inferior de la pantalla aparecen los tiempos inicial y final de la simulación, así como el tiempo de simulación.

Durante el proceso de simulación se genera un archivo que contendrá los hidrogramas de salida de cada uno de los segmentos de cauce, el nombre de este archivo será el mismo que el del archivo con la información de la precipitación, y tendrá la extensión SHC.

El proceso de simulación termina cuando todos los segmentos de cauce aparecen en color azul. En este momento se puede oprimir la tecla ESC para regresar al menú principal del módulo.

8.3.3 Selección y presentación de hidrogramas

Cuando se ha finalizado con la simulación del escurrimiento en facetas y segmentos de cauce, el usuario puede seleccionar un elemento en particular y desplegar la gráfica del hidrograma de escurrimiento.

Para usar esta opción el usuario deberá proporcionar el nombre de los archivos con la información topográfica y de la precipitacion.

Los nombres de los archivos con la información de los hidrogramas de las facetas y de los cauces no se piden debido a que tienen el mismo nombre que el archivo de precipitación pero con diferente extensión y el sistema toma en cuenta esta característica para realizar la lectura de los hidrogramas (por ejemplo nombre.PRE correspondería al archivo de precipitación, nombre.SHL correspondería al archivo con hidrogramas de facetas y nombre.SHC correspondería al archivo con hidrogramas de los segmentos de cauce).

Después de que el usuario ha proporcionado esta información el sistema presenta una pantalla semejante a la mostrada en la Figura 8.6. Para continuar se oprime la tecla F2 y el sistema muestra la malla irregular de facetas triangulares y la red de segmentos de cauce, los cuales se distinguen fácilmente ya que son de diferente color. En la parte inferior de la pantalla aparece una serie de teclas con funciones específicas principalmente para el manejo de la ventana de trabajo. Cuando se oprime la tecla F5 se muestra en toda la pantalla el área limitada por la ventana de trabajo y ahora aparece un cursor con forma de flecha, que el usuario podrá utilizar para elegir la faceta o el segmento de cauce del cual desea conocer su hidrograma. En la parte superior de la pantalla aparece el número de la faceta, el número del vertice y el número del segmento de cauce más cercanos al cursor. En la parte inferior se tiene una serie de teclas que permiten al usuario mover el cursor.

Para mostrar el hidrograma de un elemento determinado se oprimen las teclas F3 para facetas y F4 para cauces. Cuando se despliega el hidrograma de escurrimiento, en la parte inferior de la pantalla aparece una serie de teclas que permiten enviar a un dispositivo de salida la gráfica del hidrograma (Figura 8.7). Como se puede observar en la gráfica del hidrograma se dan algunos datos del balance del elemento al cual corresponde el hidrograma.

Cuando se desea finalizar con el proceso de selección y presentación de hidrogramas el usuario debe presionar sucesivamente

la tecla ESC hasta llegar al menú principal del módulo de simulación de eventos hidrológicos.

```
SHIFT                    SELECCION Y PRESENTACION DE HIDROGRAMAS

                          DATOS DEL MDE

  CUENCA

  NUMERO TOTAL DE VERTICES

  NUMERO TOTAL DE FACETAS TRIANGULARES

  NUMERO TOTAL DE SEGMENTOS DE CAUCE

  NUMERO DE SALIDAS (O DISCONTINUIDADES DE LA RED)

        F2-Continuar                        Esc-Regresar
```

Figura 8.6 Características de la malla irregular de triángulos

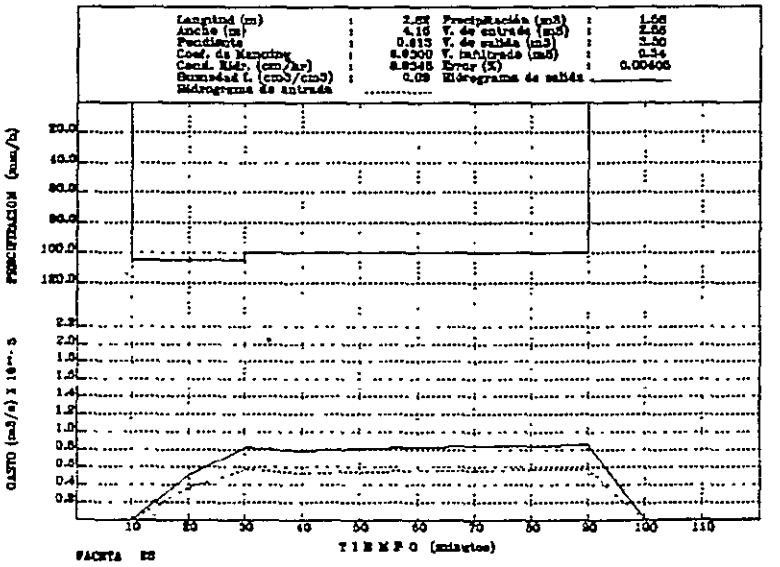


Figura 8.7 Gráfica del hidrograma de escurrimiento

139

8.4 Estructura interna de archivos

Cuando se realiza el proceso de simulación de eventos hidrológicos se genera una serie de archivos donde se almacenan los resultados finales, producto de transitar el escurrimiento a través del conjunto de facetas y el sistema de drenaje de la cuenca en estudio. El primer archivo que se genera es el que almacena los hidrogramas de cada faceta, este archivo tiene la estructura que se muestra en la Figura 8.6.

Número de registro ↓

0	C	T_i	T_f	Nint	Dtmin	Pmáx	Qmáx												
1	L_1	A_1	So_1	η_1	Ks_1	θi_1	Vp_1	Ve_1	Vs_1	Vi_1	Va_1	E_1	$Q1_1$	...	$Q1_n$	$P1_1$	...	$P1_n$	$q1_1$ ... $q1_n$
⋮									⋮										
m	L_m	A_m	So_m	η_m	Ks_m	θi_m	Vp_m	Ve_m	Vs_m	Vi_m	Va_m	E_m	Qm_1	...	Qm_n	Pm_1	...	Pm_n	qm_1 ... qm_n

Figura 8.6 Estructura del archivo con los hidrogramas de cada faceta

Dentro del registro cero del archivo con los hidrogramas de cada faceta se tiene: en la primera columna el número de segmentos de cauce simulados (C); en la segunda y tercera columnas, los tiempos inicial (T_i) y final (T_f) del proceso de simulación; en la cuarta columna el número de intervalos de tiempo (Nint); en la quinta columna el valor de cada intervalo de tiempo (Dtmin); en la sexta

columna la intensidad maxima de precipitación durante el evento de lluvia ($P_{máx}$); y en la séptima columna el gasto máximo ocurrido durante la simulación (Q_{max}).

A partir del segundo registro la secuencia de la información almacenada es la misma y el número de parámetros almacenados es igual para cada registro. La información almacenada en cada columna es:

Número de columna	Información almacenada
1	Largo de la faceta equivalente (L_1)
2	Ancho de la faceta equivalente (A_1)
3	Pendiente de la faceta (So_1)
4	Coeficiente de rugosidad de Manning (η_1)
5	Conductividad hidráulica a saturación (Ks_1)
6	Contenido de humedad inicial (θi_1)
7	Volumen total precipitado en la faceta (Vp_1)
8	Volumen total de entrada a la faceta (Ve_1)
9	Volumen total de salida de la faceta (Vs_1)
10	Volumen total infiltrado en la faceta (Vi_1)
11	Vulumen almacenado en la faceta (Va_1)
12	Porcentaje de error (E_1)
13 a n+13	Gastos del hidrograma de entrada ($Q_{1_1}...Q_{1_n}$)
n+14 a 2n+14	Intensidades del evento de lluvia ($P_{1_1}...P_{1_n}$)
2n+15 a 3n+15	Gastos del hidrograma de salida ($q_{1_1}...q_{1_n}$)

Se tendrán tantos valores de Q, P y q como facetas sean, en este caso m representa el número de facetas.

Cada segmento de cauce recibe un hidrograma de entrada lateral

proveniente de las dos facetas que comparte éste. Estos hidrogramas son al macenados en un archivo que mantiene la estructura que se muestra en la Figura 8.7. Este archivo también es generado cuando se realiza la simulación del escurrimiento superficial en el conjunto de facetas.

Número de registro					
0	C	Ti	Tf	Nint	Dtmin
1	$Q1_1$	$Q1_2$	. . .	$Q1_{n-1}$	$Q1_n$
. . .					
m	Qm_1	Qm_2	. . .	Qm_{n-1}	Qm_n

Figura 8.7 Estructura del archivo con hidrogramas de entrada lateral

En la primer columna del registro número cero de dicho archivo se almacena el número de segmentos de cauce simulados (C); en la segunda columna se almacena los tiempos inicial (Ti) final del proceso de simulación (Tf); en la cuarta columna se almacena el número de intervalos de tiempo (Nint); en la quinta columna se almacena el valor de cada intervalo de tiempo (Dtmin). A partir del segundo registro, que lleva el número 1, la secuencia de la información es la misma; en cada registro se almacenan los gastos del hidrograma de entrada lateral al segmentos de cauce correspondiente. En la figura, m representa el número de segmentos

de cauce.

Cuando han sido sombreadas todas las facetas que forman parte del área de contribución de la red de cauces de la cuenca, la simulación habrá terminado. Después que esto sucede, se oprime ESC y se regresará al menú principal del módulo de Simulación de eventos hidrológicos.

Por último, cuando se realiza la simulación del escurrimiento dentro de la red de cauces se genera un archivo que contiene los hidrogramas provenientes de cada uno de los segmentos de cauce. Este archivo tiene la estructura que se muestra en la Figura 8.8.

Número del registro																		
0	Cs	Ti	Tf	Nint	Dtmin	Qlmax	Qmax											
1	Ar_1	L_1	A_1	So_1	η_1	α_1	Ks_1	θi_1	Ve_1	Vs_1	Vi_1	E_1	$Q1_1 \ldots Q1_n$	$l1_1 \ldots l1_n$	$q1_1 \ldots q1_n$			
⋮										⋮								
m	Ar_m	L_m	A_m	So_m	η_m	α_m	Ks_m	θi_m	Ve_m	Vs_m	Vi_m	E_m	$Qm_1 \ldots Qm_n$	$lm_1 \ldots lm_n$	$qm_1 \ldots qm_n$			

Figura 8.8 Estructura del archivo con hidrogramas de salida de cada uno de los segmentos de cauce

En el registro cero se presentan sólo algunas diferencias con respecto al registro cero del archivo para facetas y cuya estructura se muestra en la Figura 8.6. Los cambios son en la sexta columna, en el caso de cauces corresponde al valor máximo del gasto de entrada

lateral ($Ql_{máx}$) y en la séptima columna el valor máximo del gasto de salida.

A partir del segundo registro, que lleva el número 1, la secuencia de la información almacenada es la misma y el número de parámetros almacenados en cada registro es igual. A continuación se describe la información almacenada en cada columna. Los valores que se indicarán entre paréntesis corresponden a la información almacenada en el registro número 1.

No. de columna	Información almacenada
1	Area de contribución al escurrimiento (Ar_1)
2	Largo del segmento de cauce (L_1)
3	Ancho del segmento de cauce (A_1)
4	Pendiente del segmento de cauce (So_1)
5	Coeficiente de rugosidad de Manning (η_1)
6	Parámetro de la ecuación de la onda cinemática (α_1)
7	**Conductividad hidráulica a saturación (Ks_1)**
8	Contenido de humedad inicial (θi_1)
9	Volumen de entrada al segmento de cauce (Ve_1)
10	Volumen de salida del segmento de cauce (Vs_1)
11	Volumen infiltrado hasta el segmento de cauce (Vi_1)
12	Porcentaje de error (E_1)
13 a n+13	Gastos del hidrograma de entrada aguas arriba ($Qi_1 \ldots Qi_n$)
n+14 a 2n+14	Gastos del hidrograma lateral ($li_1 \ldots li_n$)
2n+15 a 3n+15	Gastos del hidrograma de salida ($qi_1 \ldots qi_n$)

El subíndice n corresponde al numero de intervalos de tiempo y m corresponde al número de segmentos de cauce, los valores máximos que pueden adquirir estos parámetros se indican en el capítulo 3 *"Limitaciones del sistema"*.

145

IX BIBLIOGRAFIA

Beven, Keith. 1985. Distributed models, in Hidrological Forecasting. Ed. by M. G. Anderson and T. P. Burt. John Wiley & Sons Ltd., pp. 405-435.

Beven, Keith. 1989. Changing ideas in hidrology: The case of physically-based models. Journal of Hydrology. Vol. 105. pp. 157-172.

Catalán V., E. A. 1987. Modelo hidrodinámico para la predicción del avance en riego por melgas. Tesis de Maestro en Ciencias. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Duchon, J. 1976. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. Revue Francoise d'Automatique, Informatique et Recherche Opérationnelle. Vol. 10. No. 12. pp. 5-15.

Fuentes R., C.; R. Hernández S.; O. Palacios V.; R. Haverkamp y J.Y. Parlange. 1987. El potencial de presión y la conductividad hidráulica: análisis y predicción. Aceptado para publicación en la revista Chapingo. Chapingo, México.

Gandoy B., W. and O. Palacios V. 1990. Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hidrological models. Journal of Hidrology. Vol. 112. pp. 375-393.

Palacios-Vélez, O. L. and B. Cuevas-Renaud. 1986. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. Journal of Hydrology, 86. pp. 299-314.

Palacios-Vélez, O. L. and B. Cuevas-Renaud, 1990. A dinamic hierarchical subdivision algorithm for computing Delaunay triangulations and other closest-point problems. ACM TOMS, en prensa.

Poluvarinova-Kochina, P. 1962. Theory of groundwater movement. Princeton Univ. Press. Princeton, N. J. USA.

Pimentel L., J. 1989. Modelo matemático para simular el escurrimiento en una red de cauces. Tesis de Maestro en Ciencias, Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Smith, R. E. and J. Y. Parlange. 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research. Vol. 14. No. 3. pp. 533-538.

van-Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.

Woolhiser, D. A.; R. E. Smith and D. C. Goodrich. 1989. KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

147

DOCFIN

SHIFT: A Distributed Runoff Model Using Irregular Triangular Facets*

by: *Oscar Luis Palacios-Vélez and Baltasar Cuevas -Renaud*

ABSTRACT

SHIFT (Sistema Hidrológico de Facetas Triangulares) is a computational system that allows for the: a) creation, edition and visualization of a watershed TIN DEM, b) input and interpolation of soil, riverbed and rainfall data, and c) calculation and routing of runoff in all the facets and reaches. The TIN DEM model is constructed from a set of points, where the slope changes abruptly. Afterwards the drainage network is automatically identified and a interactive editor allows addition or deletion of points to eliminate network discontinuities. Rainfall data are interpolated by means of a procedure based on the minimization of the bending energy of a thin plate. In order to calculate and route the runoff, the system determines the routing sequence of river segments and for each one of them identifies the facets forming the contributing area and determines a cascade of overland

---

*) Contribution from the Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mex., 56230 MEXICO. This work was supported in part by a grant from the Agency for International Development, US Government.

148

flow planes. Then for each element and time interval the system calculates the infiltration and routes the resultant runoff by a numerical solution of the kinematic wave equations. This information is saved and the user can see the hydrograph for any facet or reach.

1) INTRODUCTION

The development of physically-based distributed models is a relatively new trend in hydrological modeling, propitiated by the dissemination and improvement of the computer technique. Beven (1985) discusses the nature, main characteristics, present limitations and problems of the distributed models. He also mentions four major areas for the potential application of these models.:

a) Forecasting the effects of land-use change,
b) Forecasting the effects of spatially variable [parameters and] inputs,
c) Forecasting the movements of pollutants and sediments; and
d) Forecasting the hydrological response of ungauged catchments.

The most significant difference between the distributed and other "lumped" models, is that the distributed models take into consideration the spatial variability of the land use, topography, soil and rainfall data. As a consequence the distributed models

offer the capability of forecasting what happens practically at any point within the catchment and not only at the outlet, as do the "lumped" models. The cost of this advantage is an increased requirement of information, mainly soil and rainfall data, a more complicated model construction, which is important when the number of unit elements is high and increased computer costs.

Presently several distributed models are already being applied to real-world problems or are reaching the testing stage. Probably the best known one is the Systeme Hydrologique Européen (SHE), developed in Denmark, France and Britain (Abbott *et. al.*, 1986a and 1986b).

Obviously, wider use of distributed models will be propitiated by the availability of more "user-friendly" systems that can be run in (advanced) personal computers.

The aim of this paper is to describe a distributed model, called SHIFT (Sistema Hidrologico de Facetas Triangulares), that unlike SHE and other distributed models, is based on a watershed model constructed by a network of non-overlapping irregular triangular facets, which better approximate the topography. SHIFT also has a series of "user-friendly" features and can be run on a PC, which is intended to facilitate its use. Such a description will provide the necessary background information for subsequent papers on applications of SHIFT.

150

2) BACKGROUND

SHIFT is being developed by a small group of researchers at the Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados (a Mexican public research and teaching institution in agricultural sciences) since 1986. However, the development of digital elevation models (DEM) in this center dates back to 1980. Later on the work was orientated towards the automatic definition of river-course networks and contributing areas from DEM data (Palacios and Cuevas, 1986a), a necessarily previous step for the hydrological computations. At this time the potential use of DEM as the basis for hydrological models became apparent (Palacios y Cuevas, 1986b).

The formal development of an integrated hydrological system starts in 1986, thanks to a research grant received from the Agency for International Development, US Government.

3) SHIFT DESCRIPTION

SHIFT is an integrated hydrological model that allows for:

a) The creation and interactive edition of a topographic model of a watershed.

b) The input and interpolation of soil, river-bed and rainfall data.

c) The calculation of runoff in all the facets conforming the watershed model, as well as in all the reaches of the drainage network.

The most relevant and distinctive features of these operations are described in the following. The details and system operation are described elsewhere (Palacios y Cuevas, 1990b).

3.1) CREATION AND INTERACTIVE EDITION OF THE TOPOGRAPHIC MODEL.

The topographic model is created on the basis of a set of "surface-specific" points (Peucker *et. al.*, 1978), that is, points where the topographic slope changes abruptly. The topographic domain is then partitioned into a network of non-overlapping Delaunay triangles using an algorithm that is described elsewhere (Palacios and Cuevas, 1990a). One useful feature of this algorithm is that it allows for the deletion of points without total network reconstruction, something that is important for an interactive editor, as will be explained later.

In a second step the drainage or river-course network is identified as composed by those triangle edges with converging slopes. For different reasons (Gandoy and Palacios, 1990) often the drainage network results with discontinuities and in order to eliminate them it may be necessary to re-sample (move) some points, that is delete some points and then add new ones, probably with a slightly different elevation. These operations are greatly

152

facilitated by an interactive editor with which the model builder can see immediatly in the computer screen the result of a proposed change.

Once the drainage network is free of discontinuities a cascade of reaches and a cascade of triangular facets are defined. These cascades are used to route the runoff by means of the kinematic wave equation. Usually each watershed model has many valid cascades that meet the condition that when analyzing an element, the input(s) coming from the neighbouring upstream element(s) be known.

An algorithm that is able to identify a kinematic cascade has been developed (Gandoy and Palacios, 1990) and is briefly explained in the following. The computations start at the outlet in an upstream direction and end in the same element with a downstream direction, after assigning a sequential number to all of the elements. The basic steps of the algorithm are:

```
BEGIN
  IF   (There are no upstream neighbours) OR (the upstream
       neighbours have already been assigned a sequential number
       in the cascade) THEN
       BEGIN
         Assign the next sequential number;
         IF  (This drainage segment is in the outlet)
             THEN STOP
         ELSE
            BEGIN
              Go to the next downstream neighbour;
              Repeat this procedure;
            END;
       END
  ELSE
    BEGIN
      Go to the unmarked upstream neighbour;
      Repeat this procedure;
    END,
END.
```

Once a cascade of reaches is defined, then for each reach its contributing triangular facets are identified and a specific cascade is also defined. Both operations are carried out simultaneously by an algorithm that is very similar to the presented one (Gandoy and Falaciros, 1990). The main differences

154

are due to the fact that the overland flow usually presents many branchings and mergings, which requires to use a stack list to assure that the calculations will end in the starting facet.

The topographic model of a watershed is defined by:

a) The coordinates X, Y and Z of N points where the slope changes abruptly.

b) A structural matrix of triangular facets (about 2N), defining which points form each facet as well as the number of neighbouring facets.

c) A structural matrix of reaches, defining wich points form each reach, the number of neighbouring reaches and the number of triangular facets forming each reach.

d) A cascade of reaches, defining a sequence that has to be followed for the channel flow computations (by means of the kinematic wave equation).

e) A cascade of triangular facets, formed by the union of cascades for each reach, defining a sequence that has to be followed for overland flow computations (by means of the kinematic wave equation).

The model builder has to provide the file with the coordinates of the topographic points and SHIFT defines automaticaly all the additional data structures. Fig. 1 shows a small part of a watershed model and Tables 1 and 2 show part of the triangular

105

facet and reach structural matrices.

In table 1 the rows corresponding to triangle number 36 and its neighbours (triangles 39, 37 and 39) have been highlighted. In table 2 the rows corresponding to reaches number 2, 5, 7 and 8 have also been highlighted. Finally, table 3 shows the cascades of triangles forming the contributing area of reach number 8. One cascade corresponds to the left margin and the second to the right margin contributing area. Observe that for each triangle the number and the decimal fraction of the area of upstream contributing neighbours (up to two) are indicated.

3.2) INPUT AND INTERPOLATION OF SOIL, RIVER-BED AND RAINFALL DATA.

SHIFT requires the knowledge of the roughness coefficient in all of the unit elements forming the watershed model. This parameter reflects the land use. The infiltration calculations are carried out by means of the Smith-Parlange (1978) equation. Hence the knowledge of the saturated hydraulic conductivity, the so called effective net capillary drive coefficient, the porosity, the saturation and the initial water content are also required. These data, obtained from field measurements, can be assigned or interpolated for all the model elements. The interpolation procedure is based in a method that minimizes the bending energy of a "thin plate" (Duchon, 1976; Dubrule, 1984).

156

In order to take into account the fact that the water rarely covers the whole surface of a unit element, and following Woolhiser *et. al.*, (1989), an assumption was made that the inundated area linearly varies, up to a critical point, with the calculated water depth. The value of the critical water depth requires some calibration and is a function of the dimensions of the unit element, but this seems an important correction that approaches more to reality the infiltration calculations.

The river-bed width should also be known for all the reaches. SHIFT assumes that this value is measured in some places and then interpolates it to all the reaches, assuming that there is a linear relationship between the river-bed width and the contributing area. This value was automaticaly calculated for all the reaches of the topographic model.

SHIFT interpolates a hyetogram at the central point of each triangular facet, using the mentioned "thin plate" procedure. This procedure requires that at least three raingauge stations are available in the catchment or close to it. The user fixes the time interval, as well as the initial and final time for the simulation.

187

3.3) RUNOFF CALCULATIONS

Probably the most rigorous method for making the runoff calculations in drainage networks is through the solution of the Saint-Venant equations. These equations are solved separately and in an alternating fashion. First, the Saint-Venant equations are solved for the main river-course, considering the confluences as point sources with known discharge from the previous time interval. Second, the equations are solved for each tributary, considering the outlet into the main river as a boundary of known water depth from the previous time interval. This method is applied recursively for higher order branchings, and a similar procedure could be applied for the overland flow. Obviously this method is highly complicated and time-consuming even for simple drainage networks, let alone for more complex ones.

Among the simpler methods to carry out the runoff calculations, the so-called Kinematic Wave approximation seems specially interesting. In this case the complexity of the calculations is reduced to the recursive solution for a single element (triangular facet for the overland flow or reach for the channel flow) with the only condition that the input coming from the neighbouring upstream element(s) be known, since the "backwater" effects are not considered by the kinematic wave equation.

158

As mentioned before the kinematic cascade of triangular facets, as well as the cascade of reaches were defined as part of the topographic model of the watershed.

At this point it is important to remark that considering that the soil and rainfall data are usually known in each facet only with a low level of approximation, it has seemed reasonable to carry out the overland flow calculations only for an average length of the water paths through the facet. This is equivalent to transform the triangular facet into a rectangular one, with the same area, the same steepest slope, but only one length of the (potential) water path: the average one. On the other hand, it would have been impossible to try to calculate the overland flow for any possible path of the runoff through one facet and through a network of facets.

When rainfall intensity is greater than the infiltration, calculated by the Smith-Parlange (1978) equation, or when there is an input from the neighbouring upstream element, the runoff is routed by the kinematic wave equation, solved by a Newton-Raphson scheme. The proposed scheme is robust enough to allow the description of different flux forms: runoff formation due only to rainfall, runoff routing (without rainfall) and their combinations. The same procedure is used for the overland and for the channel flow computations. The only difference is in the meaning of the lateral input: for the triangular facets it is the

rainfall and in the reaches it is the runoff from the converging triangular facets forming the reach.

The sequence of calculations is illustrated on the computer Screen, in a graphic representation of the partitioned watershed, by shadowing with different color those triangular facets (and afterwards reaches) that have already been analyzed. In this way the user can easyly see which part of the basin still has to be calculated at any moment. When there are hundreds of facets and/or time intervals the computation can take several hours. This time, however, will decrease as new and faster PC will appear and if mathematical coprocessors are employed.

SHIFT saves the results of all the computations and when they are completed the user can interactively choose any facet or reach in order to observe its hydrogram.

4) DISCUSSION

In this section we first discuss the limitations of the present version of SHIFT, and afterwards we will focus on those features that we deem could be of interest for model developers.

The present version of SHIFT is a very simple one that lacks a groundwater module, which is essential in many cases. SHIFT does not calculate the soil water redistribution and evapotranspiration

160

BEST AVAILABLE

and hence is unable of carring out a continuous simulation. It is an "event model" and hence it requires the knowledge of the initial water content for each event simulation.

Another limitation of the present version of SHIFT is that is does not consider the existence of ponds and reservoirs.

However, all these limitations are superable and future versions of the system may include the corresponding modules to overcome such deficiences. Much more important are other fundamental problems, such as those mentioned particularly by Beven (1989). Some soil parameters, as the hydraulic conductivity, are measured in sites covering a small area, say 100 m. and then it is assumed that a unit element of the watershed model, containing that site, has the same value of the "punctual" hydraulic conductivity. Even if several sites were located within what corresponds to a unit area in the watershed model, some simple function, say the arithmetic mean, of the measurements, will be assumed to represent or estimate the "effective" value (if such value exists) of the whole unit area. Afterwards it is assumed that the same equations of the small scale physics of homogeneous systems, (say the kinematic wave equations) can be applied to the model unit areas (triangular facets and reaches), that are predominantly heterogeneous.

161

The distributed models need the value of several parameters and input variables (roughness, hydraulic conductivity, saturation, initial water content, etc.) at each unit element (triangular facet or reach). This situation may pose an important economic limitation in many cases. However, if it is necessary to optimize those parameter values by comparison of observed and simulated responses a more important problem arises, since "many different combinations of parameter values may give equally acceptable results" (Beven, 1985).

Whether in spite of all of these fundamental problems the distributed models will be able to produce valuable hydrologic predictions is something that remains to be seen in the future. Some preliminary results (Bathurst, 1986) seem encouraging and probably this is why some other distributed models are being developed. Anyhow, to predict the influence of the variability of soil propierties and rainfall (at the watershed level) in the resulting runoff may be very difficult and not very accurate with the present distributed models, but it is entirely out of the question with models lumped to the catchment scale.

As mentioned before, in distributed models the basis for all the hydrologic computations is the topographic model of the watershed. Moore *et al* (1988) mention three principal types of digital topographic models: a) triangular irregular network (TIN), b) square-grid network and c) contour-based network. Peuker *et al*

162

(1978) showed the advantages of the TIN models over the square-grid ones, so we will only comment on the TIN and the contour-based topographic models.

Contour-based models partition the watershed into a series of interconnected parallel one-dimensional finite element cells. However, "this approach needs at least an order of magnitude more points in contour line form than in regular grid form to adequately describe the elevation surface and it is computationally slower than the grid cell approach" (Moore *et al*, 1988). It should be also noted that the definition of the lines of steepest slope is a time-consuming process. On the other hand, the runoff calculations may be easily performed, since the cells are ordered in cascades without influence from lateral cells, although some merging of stream tubes do occur, because of the converging water paths.

In the TIN models the water paths cross the triangle network in a way that at first seems untractable for runoff computations because of the many mergings and branchings (see Fig. 1, where the arrows point to the direction of the steepest slope). On the other hand, in these models it is relatively easy to find the lines of steepest slope (Palacios and Cuevas, 1986a). Being able to determine these lines it is also easy to define which triangles are upstream or downstream in regard with a given triangle. After this, as was shown in a previous section, the definition of

163

cascades of planes and reaches is straightforward and the hydrologic computations (using the kinematic wave equation) may be performed. We then conclude that our proposed way of creating (and eventually editing) a TIN watershed model possibilitates the automatic handling of the runoff computations in this kind of networks, something that will contribute to a wider use of TIN models, which present many advantages over other kind of topographic models.

5) FUTURE DEVELOPMENTS

As mentioned, there are areas of aplication of the distributed models, where lumped conceptual models are unable to give a response. It is unclear whether the fundamental problems discussed in the previous section will be somehow overcome. More work has to be done and in order to facilitate it, the development of "user-friendly" and PC oriented distributed models is of great importance.

It seems also possible to try to combine the lumped conceptual and the distributed models approaches. Rodríguez-Hernández (1989) has already developed a "two-input" variant of the DPFT (unit hydrograph) method, dividing the watershed in two parts. Actually it could be divided in more parts, according to the availability of rainfall data. This would be equivalent to develop a "n input" variant of the unit hydrograph method. The watershed could be

164

subdivided into sub-catchments, according to the travel time (the time that theoretically takes a drop of water to reach the basin outlet, that can be automatically estimated from the TIN model as well as from land use and soil data). For each sub-catchment an unit hydrograph (probably in the form of a three-parameter gamma distribution) could be identified and later used to route the rainfall of that sub-catchment. This approach would require calibration, but overcomes the problem of estimating "effective" parameters and the use of the kinematic wave equations to route the runoff.

6) ACKNOWLEDGEMENTS

Advantage is taken of this opportunity to acknowledge the researchers who have participated in this project. William Sandoy-Bernasconi (presently at the Departamento de Suelos, Univ. Autónoma Chapingo, México), José Pimentel-López and Eduardo Chávarri-Velarde (presently at the Depto. de Recursos de Agua y Tierra, Univ. Nacional Agraria "La Molina, Lima, Perú) worked in the hydrologic module. Luis Rendón Pimentel developed the infiltration sub-module. Pablo López-Antezana (presently at the Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia) participated in the development of the interpolation procedure and in the module to capture rainfall data. Jesús Chávez-Morales took part in the general design of the system and José Antonio Pedraza-Oropeza (presently at Departamento de Suelos, Univ. Autónoma Chapingo,

México) was of great help in developing some graphic routines and user-friendly features of the system. Juan Avila-Alcibar helped to test the programs and Guadalupe Ortiz Candia wrote the various manuscripts.

The authors would like to make special mention of Dr. David A. Woolhiser and Dr. David C. Goodrich, from the Arid Land Watershed Mgmt. Res. Unit, USDA-ARS, Tucson, Az. with whom many parts of the project were discussed and from whom many suggestions were received. Working meetings with Dr. Woolhiser and Dr. Goodrich took place with a financial support from the USDA-OICD and the Mexican Ministry of Agriculture. (SARH-DGAI).

7) REFERENCES.

Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E.O'Connell and J. Rasmussen, 1986a. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-based, Distributing Modelling System. J. of Hydrology, 87, 45:59.

Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E.O'Connell and J. Rasmussen, 1986b. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: The Structure of a Physically-based, Distributed Modelling System. J. of Hydrology, 87, 61:77.

166

Bathurst, J.C., 1986. Physically-based Distributed Modelling of an Upland Catchment Using the Systeme Hydrolrgique Europeen. J. of Hydrology, 87, 79-102.

Beven, K., 1985. Distributed Models, in Hydrological Forecasting. Edited by M.G. Anderson and T.P. Burt., John Wiley & Sons Ltd., 405-435.

Beven, K., 1989. Changing Ideas in Hydrology-The case of Physically-based Models. J. of Hydrology. 105. 157:172.

Duchon, J., 1976. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. Revue Française d'Automatique, Informatique et Recherche Opérationnelle. Vol 10, No. 12, 5:12.

Dubrule, O., 1984. Comparing Splines and Kriging. Computers & Geosciences Vol. 10, No. 2-3, 327:338.

Gandoy, B.W. and G. Palacios-Vélez, 1990. Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hydrological models. J. of Hydrology, (112), 375: 393.

167

Moore, I.D., J.C. Panuska, R.B. Grayson and I.P. Srivastava, 1988. Application of Digital Topographic Modelling in Hydrology. ASAE Proc. of the Intern. Symposium on Modeling Agricultural, Forest and Rangeland Hydrology, Chicago, Ill., Dec. 12-13, 447:481.

Palacios-Vélez O. and B. Cuevas Renaud, 1986a. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. J. of Hydrology, 86, 299:314.

Palacios-Vélez O. y B. Cuevas Renaud, 1986b. El Uso de Modelos Digitales del Terreno en la Solución de Algunos Problemas Hidrológicos. Memorias de la 1ra. Bienal Iberoamericana de Ost. de Inform. Hídrica. Ezeiza INCYTH-CIH. Buenos Aires Argentina, Nov. 10-14.

Palacios-Vélez O. and B.Cuevas Renaud, 1990a. A dynamic hierarchical subdivision algorithm for computing Delaunay triangulations and other closest-point problems. ACM TOMS, in press.

Palacios-Vélez O. and B. Cuevas Renaud, 1990b. SHTFI : Sistema Hidrológico de Facetas Triangulares. Manual Técnico y de uso. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx. MEXICO

168

Peucker, T.K., R.J. Fowler, J.J. Little and D.M. Mark. 1978. The Triangulated Irregular Network. Proc. of the ASP-ACSM Symp. on DTM's. St. Louis, Missouri, May 9-11, 516:540.

Rodriguez-Hernández J.Y., 1989, Modélisation pluie débit par la méthode DPFI: développements de la méthode initiale et extension à des cas bi-entrées. Thèse présentée à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

Smith, R.E. and J.Y. Parlange, 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Res. Research. Vol. 14, No. 3, 533-538.

Woolhiser, D.A.; R.E. Smith and D.C. Goodrich. 1989. KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual U.S.D.A., ARS.

169

FIGURE CAPTION:

Figure 1. Part of a watershed Triangular Irregular Network model. The arrows point to the direction of the steepest slope.

170

TABLE 1. Example of facet structural matrix

	No. of vertices			No. of opposite facet		
	V1	V2	V3	F1	F2	F3
	16	15	13	9	27	40
	16	13	1	21	12	26
(28)	19	9	12	19	36	33
	18	7	9	7	25	31
	29	18	17	25	52	3
	18	14	7	23	29	24
	34	29	26	52	67	46
	19	17	9	25	38	45
	33	28	20	14	74	44
	21	10	15	8	16	37
(36)	21	19	12	28	37	39
(37)	21	12	10	13	35	36
	31	30	25	47	54	50
(38)	25	19	21	36	54	49
	23	15	16	26	41	16
	23	16	20	13	14	40

-171-

TABLE 2. Example of drainage segment matrix

	Upstream Vertice	Downstream Vertice	Upstream Segment	Downstream Segment	Number of Triangle	Number of Triangle
	18	29	3	4	3	30
(2)	15	23	0	8	16	40
	7	18	0	1	29	31
	29	34	1	9	32	46
(5)	31	36	8	12	43	50
	19	27	0	10	48	49
(7)	21	31	0	5	51	56
(8)	23	31	2	5	56	57

132

TABLE 3. Cascade of triangles forming the contributing area of reach number 8

Triangle	Upstream Neighbour 1	Area fraction	Upstream Neighbour 2	Area fraction
17	0	0.0000	0	0.0000
8	17	0.9342	0	0.0000
11	0	0.0000	0	0.0000
13	17	0.0658	11	0.4866
37	13	1.0000	0	0.0000
35	8	0.8183	37	0.6311
16	35	1.0000	0	0.0000
56	16	0.6739	0	0.0000
57	56	0.6333	0	0.0000
17	0	0.0000	0	0.0000
8	17	0.9342	0	0.0000
9	8	0.1817	0	0.0000
26	9	1.0000	0	0.0000
40	26	1.0000	0	0.0000
41	40	0.8798	0	0.0000
14	41	1.0000	0	0.0000
57	14	1.0000	0	0.0000
56	57	0.4860	0	0.0000

13

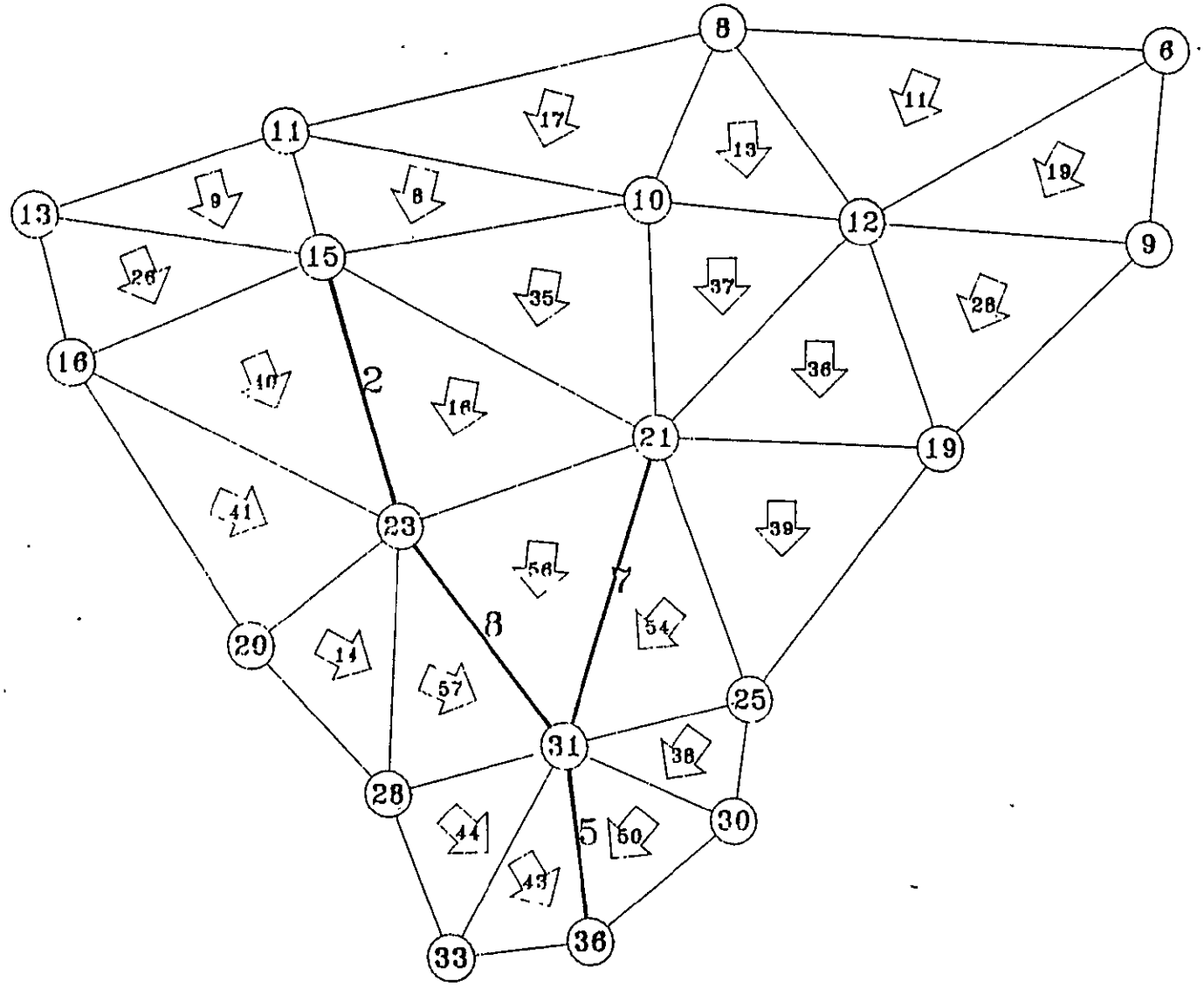


Fig 1 PALACIOS and CUEVAS

acm Transactions on Mathematical Software

A Publication of the Association for Computing Machinery • 11 West 42nd Street, New York, N.Y 10036 • 212/869-7440
TELEX 421686

Editor-in Chief, John R. Rice
Algorithms Editor, Richard J. Hanson

Executive Editor, Janet G. Benton

Date: April 2, 1990

To: Dr. Oscar Palacios-Velez

Re: A Dynamic Hierarchical Subdivision Algorithm

Your manuscript has been sent to the printer for typesetting. As of this time, your paper is tentatively scheduled to appear in the June 1990 issue of ACM TRANSACTIONS ON MATHEMATICAL SOFTWARE. Should it be necessary to postpone publication, you will be notified at the earliest possible time, but in no instance will your paper be held over for more than one issue. As the contact author, one set of galley proofs will be sent to you directly from the printer within three weeks. Corrected proofs must be returned to Roma Simon, Associate Editor, at the above address Within 48 hours.

As author, you are solely responsible for marking all printer's errors. You should also reread the paper for any errors in fact. These may be corrected in galley, but corrections should be kept to an absolute minimum. Changes in figures are permitted only in exceptional cases. We reserve the right to pass on to you, if necessary, the charges for any changes in copy made at proof time and for new plates for figures.

You will receive a Reprint Order Form with your galley proofs. This should be filled out and returned immediately to Waverly Press, Mt. Royal and Guilford Avenues, Baltimore, MD 21202. Information on this form should agree with any information transmitted earlier on a company purchase order.

Please note that the galley proofs and Reprint Order Form are sent only to you, the contact author. Be sure, therefore, to keep the co-authors informed and include their reprint needs when you complete the form.

Sincerely yours,

Roma Simon

Roma Simon
Associate Editor

John R Rice
Purdue University
Division of Mathematical Sciences
West Lafayette, IN 47907
317 494-6007

Richard J Hanson
Numerical Mathematics, Div 5642
Sandia National Laboratories
Albuquerque NM 87185
505 844-1715

A DYNAMIC HIERARCHICAL SUBDIVISION ALGORITHM FOR COMPUTING DELAUNAY TRIANGULATIONS AND OTHER CLOSEST-POINT PROBLEMS[1]

Oscar Palacios-Velez[2] and
Baltasar Cuevas Renaud[3]

ABSTRACT

A new dynamic, hierarchical subdivision and recursive algorithm for computing Delaunay triangulations is presented. The algorithm has four main steps: a) location of the already formed triangle that contains the point to be inserted. b) identification of other adjoining triangles whose circumcircle contains the point. c) formation of the new triangles and d) data base update. Different search procedures have been analyzed. It is shown that the "oriented walk" search has a better performance than the asymptotically optimal "hierarchical subdivision" search. when the total number of points is less than 417 or when the points are presorted by distance or coordinates. The algorithm has point deletion capabilities that are discussed in detail.

KEY WORDS: computational geometry, closest point problems. Delaunay triangulation, hierarchical search, dynamic algorithm.

---

[1] Contribution from the Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mex., 56230, Mexico.
This work was supported in part by a grant from the Agency for International Development, U.S. Government.

[2] Profesor Investigador Titular

[3] Profesor Investigador Adjunto

176

1. INTRODUCTION

The Delaunay triangulation, as well as the directly associated Voronoi polygons (also called Thiessen polygons) is being used more extensively as efficient methods for its automatic computation have been developed. Boots and Murdoch (1983), as well as Lee and Schachter (1980), mention a variety of disciplines where they are used, ranging from astronomy and geography to numerical analysis and statistics.

At the present time many researchers are interested in developing more efficient and dynamic algorithms. In particular the handling of deletions is considered the major open problem in this area (Guibas and Stolfi, 1985).

In their review of geometric searching problems, Lee and Preparata (1984) remark that "there are two types of queries, one-time queries and repetitive queries... (and) depending on whether the database is fixed or susceptible of being updated we have two types of environments, static and dynamic." They conclude that the repetitive queries, within dynamic environments, are more interesting.

The computation of the Delaunay triangulation and the Voronoi polygons is also important because, as was shown by Shamos and Hoey (1975), they can be used to solve a number of planar closest-point problems in optimal worst-case time. As noted by Bentley et. al (1980), "advances made in the computational efficiency of an algorithm for one of the problems can be applied to increase the computational efficiency of others." Green and Sibson (1978) also note that "readers familiar with sorting algorithms will no doubt

BEST
AVAILABLE

find the comparison with tessellation interesting: there are both helpful analogies and significant differences," although "the tessellation problem has geometrical aspects of far greater complexity than sorting."

The purpose of this paper is to present a new dynamic, hierarchical subdivision algorithm for computing the Delaunay triangulations with point deletion capabilities that may also be used to solve other closest-point problems. The algorithm was inspired by the analogy to tree-sorting algorithms. The fact that a FORTRAN implementation was developed suggests that the algorithm also deserves to be called practical. Its behaviour was studied by comparison with variations of the same algorithm.

2. STATEMENT OF THE PROBLEM

The problem may be stated as: "define the Delaunay triangles for a set of N (N ≥ 3) points arbitrarily distributed in the plane." The result of the computation should be a data structure (as defined by Lawson, 1977 and Gold et. al., 1977) or "structural matrix" with as many rows as Delaunay triangles (about 2 N) and six columns, the first three point to the number of the vertices of the triangle (in counterclockwise direction) and the second three point to the number of adjoining triangles opposing the vertices (see Fig. 1). This way of defining the triangles, although not the most efficient from the point of view of storage requirements, is quite convenient for triangle-by-triangle searching, a procedure that is often used when tracking contour lines and lines of steepest slope in digital terrain models (Tarvydas, 1984; Palacios and Cuevas, 1986). The

BEST AVAILABLE

region covered by the Delaunay triangles will be the convex hull of the N points. (See section 5.7 for more details).

The most thorough means of evaluating an algorithm is to code it and to use statistical techniques to estimate the expected and worst-case number of instructions executed. Since this is not always possible (sometimes there are no implementations), a weaker form of analysis, for instance the "asymptotic complexity", is usually used. However, "while the asymptotic complexity is a responsible estimate of the performance of the algorithm for very large problems, an algorithm with a greater asymptotic complexity may dominate the asymptotically optimal algorithm at all practical problem sizes" (Fowler, 1978).

We will show that our algorithm has O(NlogN) total search time and O(N) storage requirements. We will also show that a suboptimal variation, with $O(N^{3/2})$ total search time and O(N) storage requirements has a better performance over a specific range of N values and in those cases where the points are sorted by one of their coordinates or by distance.

3. THE ALGORITHM

We will first describe the algorithm in general form and then proceed to explain the details.

Since it is a recursive procedure it can be subdivided into "initialization" and "recursive insertion" steps, starting with the first (or second, since the insertion of the first point does not require a search) up to the N-point. We will explain the procedure

for deleting a point later.

The recursive insertion has four steps:

a) find which of the already formed triangles contains the point we are going to insert,

b) find the other adjoining triangles that will be affected by the insertion of this point,

c) form the new triangles, and

d) update the data base.

The last three steps require constant time, while the first step strongly depends on the number of points already analyzed. In order to generalize the procedure we will assume that the points are arbitrarily sequenced.

3.1. Initialization

To begin the process and following the ideas of Watson (as implemented by Sloan and Houlsby, 1984; Sloan, 1987) and Gold et. al., 1977, three auxiliary points are chosen to form a "supertriangle"--that completely encompasses all of the points to be triangulated. At this time we can insert the first point, which forms three triangles with the auxiliary points. In this way we fill the first three rows of the structural matrix of triangles.

3.2. Recursive Insertion

As stated earlier, the recursive insertion really starts with the second point (although formally it can start with the first) and is completely analogous for the rest of the points to be triangulated.

180

3.2.1. Search for the triangle that contains the query point

In order to define whether a triangle contains a point, we calculate the "triangular" area coordinates (Pinder and Gray, 1977; Gold et. al., 1977). Joining the point with the vertices of a given triangle (which are always in a counterclockwise order) we form three "small" triangles. If all of the areas of these "small" triangles are positive, then the given triangle contains the point. We use this method because it also gives information for an oriented search, (Lawson, 1977; Gold et. al., 1977), as will be mentioned later. Several strategies can be followed for this search.

3.2.1.A. Linear search

A simple procedure is to apply a containment test on all of the already formed triangles in the structural matrix, until we find the one that gives a positive result. In this case the search time will be $O(N)$; more precisely it will be proportional to $N/2$ and total search time will be $O(N^2)$.

3.2.1.B. Oriented walk search

A significant improvement is obtained if an oriented walk search, is implemented, using the information of the signs of the areas of the small triangles mentioned above, in the way used by Lawson (1977) and Gold et. al. (1977).

In this case the search time is improved to $O(N^{1/2})$ and total time to $O(N^{3/2})$.

181

BEST
AVAILABLE

It should be noted that, as observed by Lawson (1984), rounding errors in computing the areas could cause inconsistent sign determination and lead to cycling in the search process. This type of cycling was actually observed during tests. To avoid this we always keep a pointer to the last visited triangle and when a new one coincides with it the search is ended. We do not investigate further which triangle really contains the point, since for triangulating purposes it is enough to determine which triangles have a circumcirrle that contains the point and in these cases the circumcircles of both triangles will meet that condition. This way of avoiding cycling is considerably simpler that the method developed by Cline and Renka (1984).

3.2.1.C. Hierarchical subdivision search

By saving the information of the triangles subdivided by the insertion of previous points in a way similar to that suggested by Green and Sibson (1978) and Gowda et. al (1985) it is possible to improve the searching procedure further, in particular for large N values.

We propose a hierarchical subdivision search and in order to implement it we will need two sets of pointers:

1) We need a vector of pointers, say V1, of the same length as the structural matrix. This vector will keep the number of the point, whose insertion caused the subdivision of the corresponding triangle. Obviously, when we encounter a zero the triangle is unsubdivided. Observe that typically several triangles will be subdivided by a single point.

182

BEST
AVAILABLE

2) We need a second vector of pointers, say V2, of the same length as the maximum number of points to be inserted. This vector will keep the row number in the structural matrix, starting at which the triangles formed by its insertion are stored.

These pointers greatly facilitate the search that will proceed as follows:

a) find which of the three initial (big) triangles contains the new point to be inserted. then,

b) in a recursive way, if the triangle containing the point is already marked as subdivided (according to the information of the V1 vector of pointers), we will continue the search among the triangles formed by its subdivision (starting at the row number stored in the V2 vector of pointers), until we reach an unsubdivided triangle.

According to some numerical results, each point affects on the average close to four triangles (three in addition to the one that contains the point) and produces close to six new triangles. We conclude that in each hierarchical jump we eliminate from further analysis close to 1/3 of the remaining triangles and therefore the search is O(logN).

In fact, each hierarchical subdivision has an average of six triangles, with a minimum of three and an unbounded maximum that in numerical tests reached 12 in several thousand insertions. Similar results can be deduced from data given by Boots and Murdoch (1983). Therefore the question of how to search among these 3-12 or so triangles still remains inconclusive.

183

In the first version of our algorithm a linear search was used within each hierarchical subdivision. Very rapidly we realized that an oriented walk search could be used. Furthermore, in the last stage an improved oriented walk search is used, where the search walks across several generations of triangles until we reach an unsubdivided triangle.

The improvement consist of the following: If during the search we have to pass from triangle A to the adjoining triangle B before performing the containing test, which is a time-consuming floating-point operation, we first verify if triangle B is already marked as subdivided. If such is the case we advance the search directly to the first triangle produced by the subdivision of B sharing a common edge with triangle A. We apply this principle in a recursive way. It should be noted that the possibility of such an improved oriented walk search was anticipated by Green and Sibson (1978), who did not implement it probably because they were working with Thiessen polygons, which are more difficult to handle, in particular because of the variable number of edges.

These changes further improved the performance of the search. According to some tests explained below the last hierarchical subdivision-oriented walk search has search times less than half those of the hierarchical subdivision-linear search.

3.2.2. Definition of other triangles affected by the insertion

Since by definition a Delaunay triangle does not contain another data point (see for instance Lee and Schachter, 1980, lemma 3; Preparata and Shamos, 1985, theorem 5.3), all of the triangles whose

circumcircle contains the new point will be affected by the insertion. Obviously these still unsubdivided triangles (as mentioned on the average there are four, including the one that contains the point) are contiguous and we can find them in several ways. For instance, a simple linear procedure that even eliminates the need to carry out the search for the triangle that contains the point, is to perform the "circle test" (find whether the circumcircle of a triangle contains the point) to all already formed and unsubdivided triangles. However, once the triangle containing the point is defined, the following elegant recursive procedure solves this problem in a direct way, avoiding the need for later grid improvement and swapping procedures used in other algorithms (Lawson, 1977; Akima, 1978; Renka, 1984, Cline and Renka, 1984; Sloan, 1987).

In this procedure we have two lists: the list of affected triangles and the list of candidates. We put the triangle that contains the point on the first list since obviously its circumcircle contains the point, and its three neighbors on the second list. We analyze the triangles of the second list until there are no more triangles to test. If the circumcircle of one of these triangles contains the point we add its number to the first list and we also add the number of its three neighbors to the list of candidates, if they are not already on that list. At the end we will have the number of triangles that will be affected on the first list.

185

BEST AVAILABLE

3.2.3. Definition of the new triangles

In a way similar to that of the Watson algorithm, as described by Sloan and Houlsby (1984), we eliminate the common edges of the affected triangles and form a polygon (not necessarily convex) that will always contain the inserted point. The new triangles are formed by joining the point with each pair of vertices (see insertion of point number 15 in Fig. 1). On the other hand, two of the neighbors of these triangles are some of the new triangles themselves. The third neighbor is an external adjoining triangle to the given polygon.

The information regarding the new triangles is saved in a different way, depending on the search procedure:

a) in the oriented walk search approach we use the same space used by the triangles that will be destroyed by the insertion, plus two additional rows at the end of the structural matrix. Since the number of triangles for a 3-edge convex hull (the supertriangle) is 2N+1 (excluding the auxiliary points) each inserted point increases the number of triangles (rows in the structural matrix) by two.

b). in the hierarchical subdivison approach we save the information of the subdivided triangles. Hence each inserted point adds six new rows on the average to the structural matrix although the number of "active", unsubdivided triangles remains 2N+1.

Since the average number of triangles formed in each subdivision is six, the number of rows in the structural matrix should be about 6N for the hierarchical subdivision search. We immediatly see that the

BEST
AVAILABLE

necessary cost of the asymptotically improved search consists of extra storage of about 3N triangles that are subdivided during the insertion procedure.

3.2.4. Updating of the database

It should be noted that the topology of the triangle data structure is that of a "directed acyclic graph", as in the data structure developed by Kirkpatrick, 1983 (explained by Preparata and Shamos, 1985, pages 56-60). There are however, differences between our data structure and Kirkpatrick's. First, on the one hand our structure is dynamic, generated incrementally as new points are added. On the other hand, Kirkpatrick starts from a given triangulation and generates his data structure by removing nonadjacent points and their incident edges. Since he is dealing with a different problem (point location in planar subdivisions) he does not need a dynamic data structure.

In the oriented walk search approach the references to the destroyed triangles, contained in the surrounding triangles that were not destroyed by the inserted point (triangles 2,4,[illegible],6,7,9 and 11 in Fig. 1) should be updated. However these triangles are easily identified as the external neighbors of the triangles affected by the insertion.

In the hierarchical subdivision search approach we never update the references to destroyed (or subdivided) neighbors, since they will guide the search procedure. This fact facilitates the point deletion process, as will be explained later.

187

At the end of the whole procedure, when no more points will be added, the auxiliary triangles (those which have an auxiliary point as a vertex) and the subdivided triangles may be deleted. This is done through a simple procedure requiring no additional storage:

a) calculate and store the new row numbers that will correspond to the old ones after the deletion of the auxiliary and subdivided triangles,
b) replace the old row numbers of columns four, five and six in the structural matrix with the new ones, and
c) rewrite the structural matrix from a "reading address" that will skip the unnecessary triangles to a "writing address" that will increase one row at a time.

The area covered by the triangles is the convex hull of the data points (see section 5.3 for other details). We note that with the explained procedure we could obtain the convex hull each time we add (or delete) a point, but it would be necessary to save a copy of the complete structural matrix to be able to add (or delete) new points.

The final updating of the data base is a $O(1)$ task.

3.3. Point deletion

As a recursive or incremental procedure the algorithm works well every time a point is added. Point deletion, as often occurs in "inverse operations," is a more complicated procedure. Since different approaches were followed in the oriented walk and hierarchical subdivision algorithms, they are explained separately below.

188

3.3.1. Point deletion in the oriented walk algorithm

Because the oriented walk algorithm, as will be shown later, proved to be a good one (in some cases it was the best) this problem was studied in detail and a specific computer code was developed.

In this case all of the triangles are equally "active" and the deletion of any point demands, on the average, the same effort, regardless of the position of the point on the list of insertions.

Point deletion can be carried out as follows (see deletion of point 15 in Fig. 1):

a) locate any triangle, one of whose vertices is the point to be deleted,

b) identify all of the triangles that have the point to be deleted as a common vertex (the neighboring relationships that are implicit in the structural matrix facilitate the solution of this problem),

c) identify the external polygon, eliminating all common edges. Likewise, identify the external peripheral triangles,

d) test all the possible combinations of three points from the external polygon and select as Delaunay triangles those triangles that comply with the following conditions:

   i) their circumcircle does not contain any other point

   ii) their circumcircle contains the point to be deleted

   The second condition was added to avoid inclusion of "external" triangles, since the external polygon may be concave.

189

BEST
AVAILABLE

e) erase the corresponding rows in the structural matrix and add the newly-formed triangles, after identifying its neighbors.

Finally the structural matrix may be "compressed" to avoid empty rows and the remaining coordinate points can be renumbered, if necessary.

The effort needed to locate a point is proportional to $O(N^{1/2})$. The formation of the new triangles is constant, but the updating of the structural matrix and the renumbering of the remaining coordinate points is proportional to $O(N)$.

3.3.2. Point deletion in the hierarchical subdivision algorithm

The structural matrix stores information regarding not only the "active" unsubdivided triangles, but also the subdivided ones, precisely in their order of formation during the whole history of the insertion procedure. Thanks to this order the deletion of the last inserted point, or even the last "P" inserted points, is a simple operation. It suffices to:

a) change the number of inserted points, from, say, N to N-P. This means that if a point is inserted later on, the triangles formed by it will be stored in the space occupied by the triangles initially formed by one of the deleted points.

b) make the provision in the computer program to consider as unsubdivided any triangle marked as subdivided by the deleted points.

Since this is the most economical way of deleting points it is recommended in other situations. Suppose, for instance, that you

190

already inserted 1000 points and then realize that the last 100 are wrong, except k points distributed among those 100 points. It is advisable to delete the last 100 points in the described way, and then to re-insert the correct k points.

In general, however, the deletion of an initial or intermediate point is a more complicated task. The point deletion procedure should not only "erase" the active and subdivided triangles formed by the point, but it should also calculate the triangles that would have been formed if the deleted point had not been inserted, a more difficult task. Fortunately, all of these changes occur in the neighborhood of the point and affect only the space covered by the triangles that have that point as one of their three vertices.

Different strategies can probably be followed in order to solve this problem. In our case, after trying several approaches, we chose the procedure explained in the following steps:

a) identify all triangles subdivided by the initial insertion of the point that we want to delete now.

b) identify all triangles that have this point as one of their three vertices. (These triangles are the result of the subdivision of the above-mentioned triangles). Likewise, identify the points, if any, that subdivided these triangles.

c) reinsert these points (if any). At this time consider as unsubdivided any triangle that had been subdivided by the point to be deleted or by any other point with a number greater than the number of the point being reinserted. (The triangles generated in this process can be stored at the end in the same

structural matrix).

d) update the structural matrix, erasing the block of triangles initially formed by the point to be deleted and substituting the blocks of triangles formed with the reinserted points, if any. Special attention should be given to the remaining triangles that had referenced as a neighbor any one of the deleted triangles. In this case an appropriate substitute can be found from among the triangles identified in the first step of this procedure or from among the triangles formed by the reinsertion of points.

e) renumber, if necessary, all the points with a number greater than the one deleted.

Obviously the third and fourth steps require the greatest effort. As previously mentioned, each insertion is a O(logN) task and the number of points to be reinserted depends on the order of the point to be deleted as well as on the arrangement of neighboring points.

It is possible to estimate the expected number of reinsertions as a function of the total number of points N and the position K occupied by the point to be deleted on the list of initial insertions. Assuming, for simplicity, that at any time the K points already inserted are uniformerly distributed, and that each point has six neighbors and is located in the center of a regular hexagon (forming six and, in this case, equilateral Delaunay triangles) the union of the six circumcircles and the triangles forms the critical area. If the next K+1 point falls in this area one or more of the triangles formed by the K point will be subdivided.

After some elemental geometric calculations it can be shown that this area is: $[\sqrt{3} + 2\pi/3]d^2$, where "d" is the distance between two points (equal to the edge of the hexagon). The area of influence of each point is a small hexagon formed when joining the centers of the triangles. This area is $\sqrt{3}\, d^2/2$ and should be equal to $1/K$, if we consider that the unit area is subdivided by k points.

Hence, the probability that the next point will fall within the critical area is:

$$P = \frac{C}{K} \tag{1}$$

where $C = 2(1+ \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}) \approx 4.4184$

The expected value of the number of points that will successively fall within the diminishing critical area is:

$$M = \frac{C}{K} + \frac{C}{k+1} + \frac{C}{k+2} + \ldots \frac{C}{N} = C \sum_{i=k}^{N} \frac{1}{i} \tag{2}$$

We can also write:

$$M = C\left(\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{i} - \sum_{i=1}^{K} \frac{1}{i} \right) \approx C\log(N/K) \tag{3}$$

In the worst case, if we want to delete the first inserted point (K=1), we can expect, on the average, to have to reinsert C log(N) points. We can also see that as K approaches N the number of reinsertions diminishes. The updating of the structural matrix is a O(N) data-handling problem.

183

4. APPLICATIONS

FORTRAN computer codes were developed to implement the proposed algorithm in its search and point deletion procedure variations. HP-1000 (running under RTE-VII operating system) and HP-9000/320 (running under UNIX) computers were used for the trials.

The computer codes, about 1000 instructions long including comments, are arranged in a main program and a series of subroutines. The principal subroutines are the ones that produce the insertion of a point under different search strategies. However, the two subroutines used to update the structural matrix after a point deletion in the hierarchical subdivision search were probably the ones that demanded the greatest programming effort.

The mean storage requirements are fixed by the two point coordinates and the structural matrix, which, as mentioned, has as many rows as triangles (2N+1 for the linear or oriented walk search and about 6N for the hierarchical subdivision search, where N is the number of points) and six columns. An array for storing the area of the triangles is also used. In the hierarchical subdivision search algorithms an additional array (6N long) for storing the point numbers whose insertion subdivided a triangle and an array (N long) for storing the addresses in the structural matrix with the first triangle formed by each point insertion, are also needed. Several auxiliary arrays for storing the number of triangles subdivided by the insertion of a point, for storing the number of triangles adjoining the former ones, etc. are also needed. However, their dimension is practically independent of N.

Best Available Document

BEST
AVAILABLE

In order to perform the trials and comparisons the point coordinates were randomly generated from a unit square with a uniform distribution. In each case we were able to choose the seed value and, hence, to study the same list of insertions with the different algorithms.

We performed two kinds of tests. The first were oriented to evaluating the average behavior of the algorithms as a function of the number of points, while the second ones were designed to test the deletion procedures.

In the first case we generated, for instance, 800 (400,200...) sequences of 10 (20,40...) points and counted the total number of triangles visited during the point location. Since the rest of the network construction is the same in the different algorithms, this number is an excellent measure of the total work and efficiency of the algorithms. For large N values we used the HP-9000/320 computer. A summary of these tests is given in Figures 4 and 5.

For the second kind of trials we introduced changes in the computer codes that allowed us to skip the insertion of one or more points in an initial test. Then, in a second test we would insert all the points and delete those skipped in the first test. When the programs were debugged we obtained the same network of triangles in both cases.

We also studied the number of points removed when deleting a point in the hierarchical subdivision approach. These specific tests are explained in the next section.

Best Available Document

5. DISCUSSION

5.1. Efficiency

During the earlier stages of this research it became obvious that the linear and the hierarchical subdivision-linear search algorithms were significantly less efficient than the oriented wall and hierarchical subdivision-oriented wall approaches over the whole range of N values. Since they offer no advantages in storage requirements, their use can not be recommended. This situation is somewhat analogous to that observed with the sorting algorithms: once a Shell, Heap or Quick sort is available there is no reason to use the Bubble sort.

On the other hand, the comparison between the oriented wall and the hierarchical subdivision-oriented wall searches produced interesting results shown in Figures 2 and 3. For values of N up to about 417 the oriented wall approach is more efficient than the hierarchical subdivision one. An additional advantage is that it also has smaller storage requirements. However, as N increases the superiority of the second algorithm starts to reveal itself. Even the hierarchical subdivision-linear algorithm surpasses the oriented wall one, but only when N approaches 9248.

We were unable to compare our results with other optimal approaches, such as those developd by Lee[3] and Schachter (1980), Gowda et. al. (1983) who used the "divide and conquer" strategy, first proposed by Shamos and Hoey (1975). We feel that this strategy is an excellent one for static environments with a fixed N, although the results of Gowda et. al. apply to a variable N, including point deletion

BEST
AVAILABLE

capabilities. Using the analogy with the sorting algorithms once again, we see a certain parallel between the "divide and conquer" algorithms and the Merge or Quick sort, and our approach with the sorting algorithms based on the binary trees. It is well known (Wirth, 1976) that the binary trees have sorting capabilities with an efficiency comparable to that of the Quick sort, but are much better suited to handle dynamic situations in which it is very easy to add or delete items.

It is necessary to point out that up to now everything has referred to randomly distributed points, in which the location of one point bears no information regarding the location of the next one. There are situations, however, in which the next point on the list is close to the previous one. In these cases the oriented wall algorithm that starts the search in the most recently-lastly-formed triangle offers a considerable advantage that makes it the best algorithm. We were able to evaluate this situation through a test in which, with the aid of another computer program, we previously sorted the points in such a way that for point i, point i+1 is closer than any of the other remaining points. Since this kind of sorting (that only pretends to imitate the way an engineer would manually construct a digital terrain model from, e.g., contour line maps), is time-consuming for large values of N, we also tested the algorithms with a previous sorting of points according to their coordinate value.

The results are summarized in the Table 1.

197

BEST AVAILABLE

The data show a significant improvement in the performance of the oriented walk algorithm, and a significant worsening of the hierarchical subdivision one. This resembles the degeneration of the binary trees formed with sorted data. It is noteworthy that, unlike the Watson algorithm as implemented by Sloan and Houlsby (1984), in our algorithm the sorting of points in X (or Y) is not an indispensable step in order to build the network of triangles (otherwise it would not be dynamic). This test clearly suggests that when the data points are approximately sorted in the manner given, the use of the oriented walk algorithm is highly recommended. The importance of preprocessing the points has been also shown by Olya et. al. (1984) and Sloan (1987).

5.2. Point deletion

Although the main operation of network construction is the insertion of new points, a good algorithm, used in a dynamic environment, should also offer the possibility of deleting points. This feature is especially needed for digital terrain modeling when, for instance, we want to assure the continuity of river courses or simply correct some incorrect input. Gowda et. al. (1983) state that "to date no algorithm has appeared which can update ... (a Delaunay network) ... asymptotically faster than total reconstruction after a point is deleted ..."

We have showed that in the oriented walk algorithm the location of a point is a task that demands $O(N^{1/2})$ effort, and that the formation of new triangles is a constant job, but that the updating (including matrix "compression") and renumbering is a $O(N)$ task. In any case

198

deletion of a point is less than the total reconstruction ($O(N^{3/2})$).

The point deletion in the hierarchical subdivision approach presents two different cases. The deletion of the last K points is a simple and constant time consuming procedure. This is important because very often the point to be deleted will be one of the last inputs. The second and more general case of deleting an arbitrary point that does not happen to be the last one, is a more complicated task. In the method proposed, the deletion of the point that occupies the K position in the insertion process demands, on the average, the reinsertion of $4.1094\log(N/K)$ points. We first performed several tests to verify this approximate formula. In Table 2 we show for different values of N and K, the average number of 200 observed and calculated values (upper and lower numbers, respectively) of the number of points that were necessary to reinsert as part of the deletion procedure of the K point.

We can see that the proposed formula gives a good estimation, specially for small K values, since in this case the formula (3) gives a better approximation of the harmonic series.

A crucial question that necessarily arises is: How many points can we delete with an effort not greater than the total reconstruction of the whole network?

In order to obtain an approximate answer to this question we have to estimate the total number of reinsertions if we delete, for instance, from points K to J ($1 \le J \le N$; $1 \le K \le J$). If we integrate formula (3) we obtain:

$$S = C[J[1+\log(N/J)] - K[1+\log(N/K)]] \qquad (4)$$

BEST AVAILABLE

199

If in this equation [illegible], that is, assuming that the deletions occur mainly within the last inserted points, we obtain $E=0.6111$. In other words, we could delete close to 40% of the last points with an effort equal to reconstructing the remaining 60% of the network.

If we consider however that the deletions will take place at the beginning, $S = N+1$ and $E=0$. Therefore we obtain $E = 0.0551$. Hence we can delete [illegible] of the initial points at a cost equivalent to reconstructing the remaining [illegible] of the network.

We finally recall that updating the structure matrix is a [illegible] task. It is possible, at least in principle, to avoid matrix compression since the triangles formed by the deleted points, as well as those formed by the reinserted points during their first insertion, are no longer mentioned or referenced to other triangles. Even if we consider point deletion a [illegible] task, however, we could delete $O(\log N)$ points with a total effort comparable to reconstructing the whole network.

5.3. Relations with other closest-point problems

Finding the closest point to a given one or locating a point in Delaunay subdivision are problems that are a direct derivation of our algorithm. The answer to the second problem is an intermediate step of our algorithm. On the other hand, in order to find the closest point we only have to search among the vertices of the triangles affected by the local insertion as explained in 3.2.2. This is a search among six neighbors on the average (for instance points 2,14,5,8,16 and 4 when finding the closest point to point

Best Available Document

in (Fig. 1); hence, the solution to this problem requires O(N log N) search time and O(N) storage.

Another problem that can be solved is finding the convex hull in a dynamic way, as mentioned in Sec. 3.2.4. It is well known (see Preparata and Shamos, 1985, theorems 5.11 and 5.19), that once the Voronoi diagram is known (or its dual, the Delaunay triangulation), the convex hull (and other proximity problems) can be found in linear time. Actually the convex hull is formed by the edges shared by the triangles that include one auxiliary point (that form the initial supertriangle) and their internal neighbors. We note, however, that since the auxiliary points that form the initial supertriangle are at a finite distance, some elongated Delaunay triangles on the periphery (whose edges would be part of the convex hull) could be missing. These omissions could be corrected by analyzing the external polygon following a Jarvis march (Preparata and Shamos, 1985, theorem 3.8), that is greatly facilitated by the structural matrix.

BEST AVAILABLE

5.4. FUTURE DEVELOPMENTS

We can foresee two wave of improving the proposed hierarchical subdivision search. One way is introducing the equivalent of balancing the binary tree. Obviously the search is more efficient if the path to reach any unsubdivided triangle has the same number of hierarchical "jumps".

Secondly, in order to take advantage of the fact that successive points may be very close in space, it is possible to start the search in the triangles formed by the last inserted point. Then if

these triangles do not contain the point, the search could be continued in a block of triangles at a higher hierarchical level and so on until we reach a "big" triangle that contains the point. Then we would "descend" until we reach an unsubdivided triangle containing this point. This would require another pointer to the "parent" triangles but the procedure could be counterproductive if the points are randomly distributed, unless some kind of automatic change of strategy is implemented.

BEST AVAILABLE

6. CONCLUSIONS

A new dynamic algorithm for constructing a Delaunay triangulation for a set of points arbitrarily distributed in a plane, has been developed. The algorithm offers two search procedures. The first is an oriented walking search from triangle to triangle, (Lawson, 1977; Gold et. al., 1977), that has $O(N^{3/2})$ total search time. The second is a new hierarchical subdivision approach, that has $O(N\log N)$ processing time. Both procedures have $O(N)$ storage requirements; however, the oriented walk search generates only $\approx N$ "active" triangles, while the hierarchical subdivision search generates close to $6N$ subdivided and unsubdivided triangles.

When the points are randomly extracted from a unit square with a uniform density, the oriented walk search has a better performance than the hierarchical subdivison search for values of $N < 417$, as measured by the average number of triangles visited during the point location process. Above this value the hierarchical subdivision search surpasses the oriented walk one.

202

When the points are sorted by their x (or y) value or by the distance from the previous point, the performance of the oriented walk search significantly improves, while the hierarchical subdivision search significantly worsens, in a way similar to that observed in an unbalanced binary tree formed with sorted values.

The algorithm using either search procedure, offers point deletion capabilities.

BEST AVAILABLE

In the oriented walk search the effort needed to delete a point is independent of its position on the list of insertions and is proportional to $O(N^{1/2})$ although the matrix update and renumbering of the remaining points is $O(N)$. Hence, it is possible to delete $O(N^{1/2})$ points at a cost equivalent to the whole network reconstruction.

In the hierarchical subdivision search each point deletion depends on its position on the list of insertions and requires the reinsertion of about $4.4184\log(N/I)$ points (where I is the position of the deleted point). Since the updating and renumbering of the matrix of triangles are $O(N)$ tasks, at least $O(\log N)$ points could be deleted at a cost equivalent to the total network reconstruction. However, the deletion of the last I points is a very simple constant time consuming problem. This is important because [illegible] often the deleted points are those inserted last.

Several other closest point related problems are [illegible] be solved by the proposed algorithm itself or with some [illegible]. Thus, the point location inside a Delaunay subdivision is already part of the algorithm. Likewise, finding the closest point [illegible] practically

BEST AVAILABLE

7. C.M. Gold, T.D. Charters and J. Ramsden. "Automated contour mapping using triangular element data structures and an interpolant over each triangular domain," Comput. Graphics, Vol 11, pp. 170-175, 1977.

8. I.G. Gowda, D.G. Kirkpatrick, D.T. Lee and A. Naamad, "Dynamic Voronoi diagrams," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. IT-29, No.5, pp. 724-731, 1983.

9. P.J. Green and R. Sibson, "Computing Dirichlet tessellations in the plane," Computer J., Vol.21, No. 2, pp. 168-173, 1978.

10. L. Guibas and J. Stolfi, "Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of Voronoi diagrams," ACM Trans. Graphics, Vol. 4, No. 2, pp 74-123, Apr. 1985.

11. D. Kirkpatrick, "Optimal search in Planar subdivisions," SIAM J. Comput., Vol. 12, No. 1, pp. 28-35, Feb. 1983.

12. C.L. Lawson, "Software for C^1 surface interpolation," in Mathematical Software III, J.R. Rice, Ed., Academic Press, pp 161-194, 1977.

13. C.L. Lawson, "C^1 surface interpolation for scattered data on a sphere," Rocky Mountain J. Math., V. 14, pp 177-202, 1984.

14. D.T. Lee and F.P. Preparata, "Computational geometry - a survey," IEEE Trans. Comput., Vol. C-33, No. 12, pp. 1072-1101, 1984.

15. D.T. Lee and B. Schachter, "Two algorithms for constructing Delaunay triangulations," Int. J. Comput. Inform. Sci., Vol. 9, No. 3, pp. 219-242, 1980.

16. T. Ohya, M. Iri and K. Murota, "Improvements of the incremental method for the Voronoi diagram with computational comparison of various algorithms" J. Oper. Res. Soc. Jpn. 27, 4, pp. 306-336, 1984.

17. O.L. Palacios-Velez and B. Cuevas-Renaud, "Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data," J. of Hydrology, Vol. 85, pp. 379-396, 1986.

18. G.F. Pinder and W. G. Gray, "Finite Element simulation in surface and subsurface hydrology," Academic Press, pp. [illegible], 1977

19. F. P. Preparata and M.I. Shamos, "Computational Geometry: An Introduction," Springer-Verlag, 1985.

20. R. J. Renka, "Interpolation of data on the surface of a sphere", ACM TOMS, V. 10, pp. 417-436, 1984.

BEST AVAILABLE

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Behavior of bias-error and corresponding [illegible] matrix. Dashed lines show the bias-error behavior [illegible] the [illegible] unscaled covariance lines show the [illegible] deviation of the error [illegible].

Fig. 2. Performance of the [illegible] different [illegible] [illegible] N = 500.

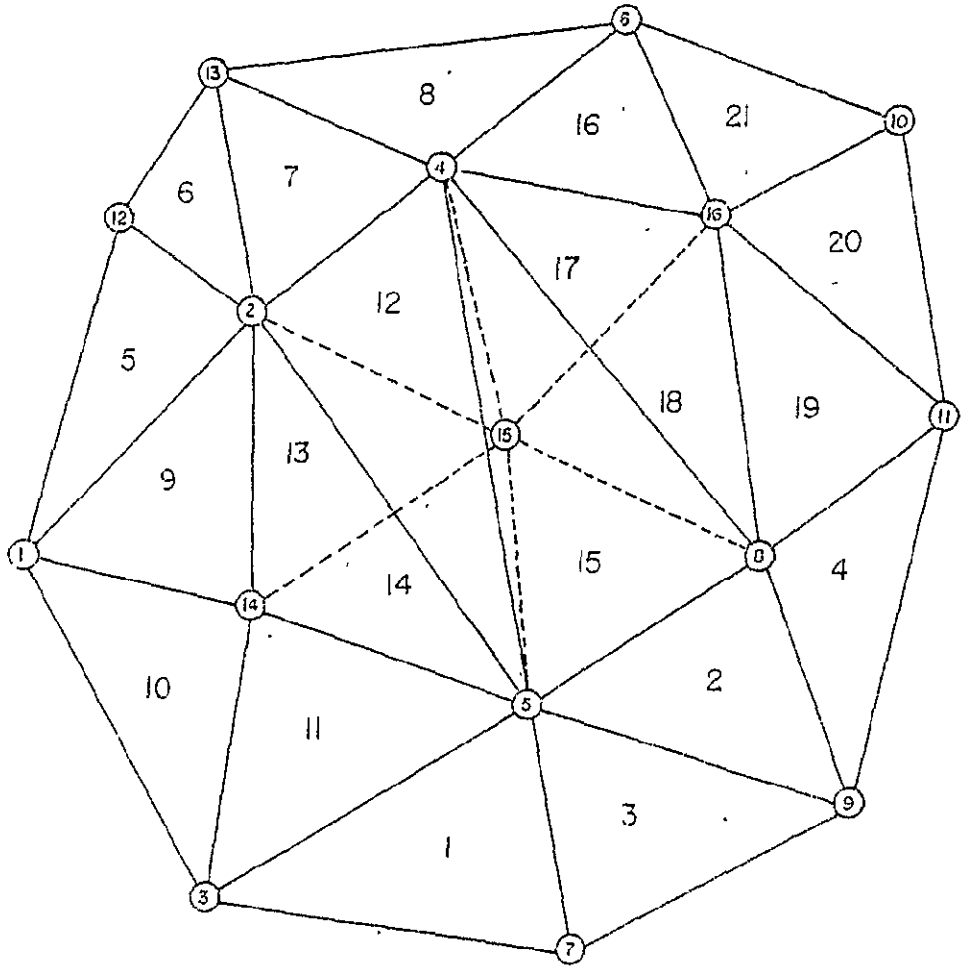
Fig. 3. Performance of the different [illegible] [illegible] 1000 N 15000.

N	ORIENTED WALK			HIERARCHICAL SUBDIVISION		
	UNSORTED	X-SORTED	DIST. SORTED	UNSORTED	X-SORTED	DIST SORTED
200	12.40	3.15	2.87	15 85	27.02	25.59
500	18.98	3.74	2.33	18 89	51.46	35.71
1000	25.71	4.22	3.15	21.18	40.31	32.94
1500	31 21	4.02	3.22	22.72	48.42	55 46
2000	35.41	3.75	3.16	23 83	56.57	53.24

PALACIOS & CUEVAS, TABLE I

N	VALUES OF K			
	1	N/4	N/2	3N/4
200	22.37 23.41	7.86 6.13	3.78 3.06	1.64 1.27
500	27.46 27.64	7 58 6.13	4.26 3.06	1.72 1.27
1000	31.67 30.52	8.23 6.13	4.21 3.06	1 84 1.27

PALACIOS & CUEVAS, TABLE 2

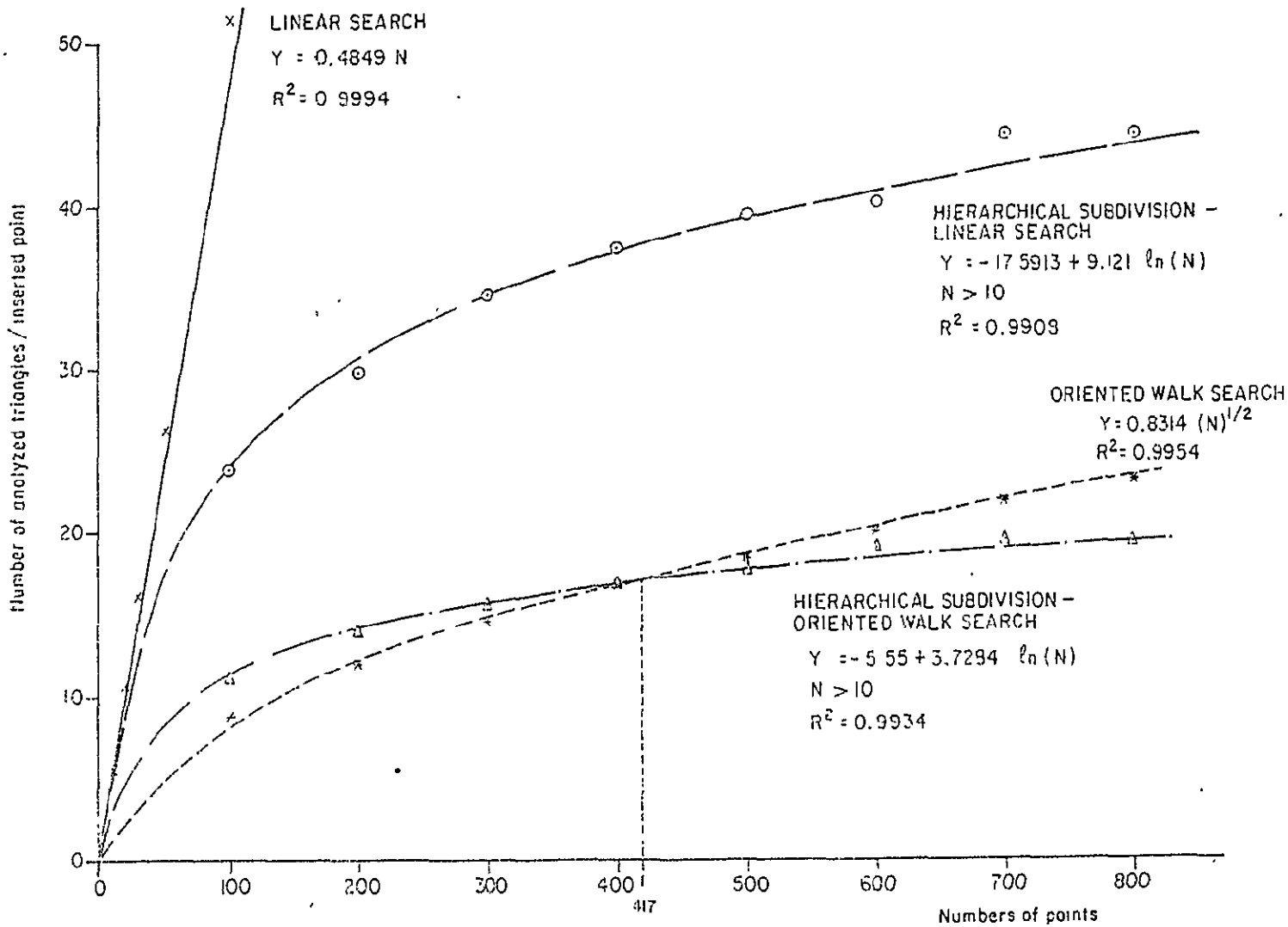


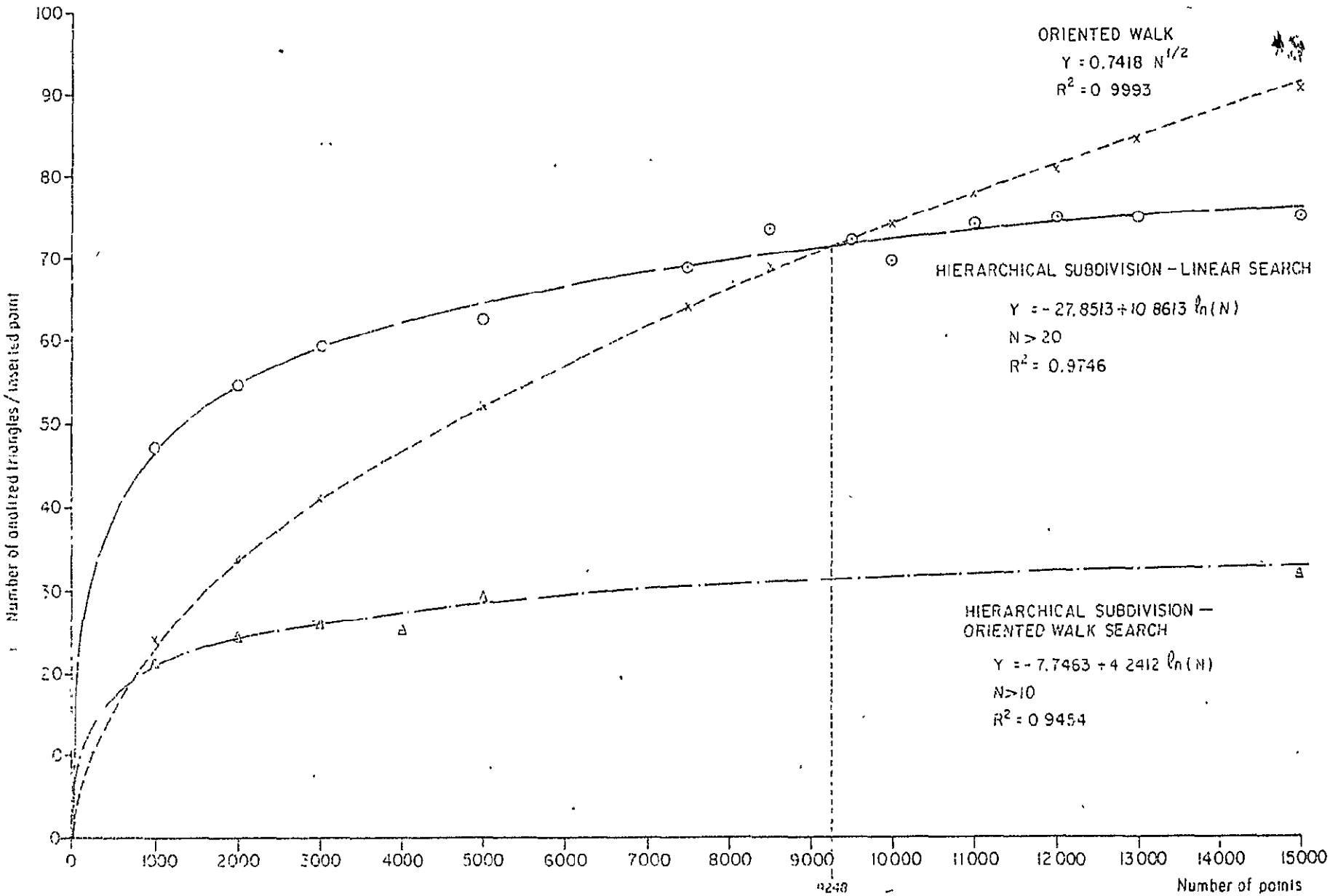
STRUCTURAL MATRIX

NO	V1	V2	V3	OT1	OT2	OT3
1	7	5	3	11	0	3
2	9	8	5	15	3	4
3	9	5	7	1	0	2
4	11	8	9	2	0	19
5	12	1	2	9	6	0
6	13	12	2	5	7	0
7	13	2	4	12	8	6
8	13	4	6	16	0	7
9	14	2	1	5	10	13
10	14	1	3	0	11	9
11	14	3	5	1	14	10
12	15	4	2	7	13	17
13	15	2	14	9	14	12
14	15	14	5	11	15	13
15	15	5	8	2	18	14
16	16	6	4	8	17	21
17	16	4	15	12	18	16
18	16	15	8	15	19	17
19	16	8	11	4	20	18
20	16	11	10	0	21	19
21	16	10	6	0	16	20

V1, V2, V3: VERTICES OF TRIANGLE.
OT1, OT2, OT3: ADJOINING TRIANGLES OPPOSING THE VERTICES

PALACIOS & CUEVAS, Fig 1


LINEAR SEARCH
Y = 0.4849 N
R² = 0 9994
HIERARCHICAL SUBDIVISION – LINEAR SEARCH
Y = -17 5913 + 9.121 ℓn (N)
N > 10
R² = 0.9903
ORIENTED WALK SEARCH
Y = 0.8314 (N)^1/2
R² = 0.9954
HIERARCHICAL SUBDIVISION – ORIENTED WALK SEARCH
Y = -5 55 + 3.7294 ℓn (N)
N > 10
R² = 0.9934
Number of analyzed triangles / inserted point
Numbers of points
0
10
20
30
40
50
100
200
300
400
417
500
600
700
800


ORIENTED WALK
Y = 0.7418 N^1/2
R^2 = 0 9993
HIERARCHICAL SUBDIVISION – LINEAR SEARCH
Y = - 27.8513 + 10 8613 ln(N)
N > 20
R^2 = 0.9746
HIERARCHICAL SUBDIVISION – ORIENTED WALK SEARCH
Y = - 7.7463 + 4 2412 ln(N)
N>10
R^2 = 0 9454
Number of amalgamated triangles / inserted point
Number of points
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
9000
10000
11000
12000
13000
14000
15000
9248

Journal of Hydrology, 112 (1990) 375–393
Elsevier Science Publishers B V , Amsterdam — Printed in The Netherlands

[4]

AUTOMATIC CASCADE NUMBERING OF UNIT ELEMENTS IN DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELS*

WILLIAM GANDOY-BERNASCONI and OSCAR PALACIOS-VELEZ

Departamento de Suelos, Universidad Autonoma de Chapingo, 56230 Mexico (Mexico)
Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, 26230 Mexico (Mexico)

(Received July 19, 1988; accepted after revision February 20, 1989)

ABSTRACT

Gandoy-Bernasconi, W. and Palacios-Velez, O., 1990. Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hydrological models. J. Hydrol., 112: 375–393.

New procedures were developed to identify river-course networks in a Digital Elevation Model of a watershed The procedures allow the assignation of a sequential number to each river-course segment that must be followed in a cascade algorithm to route the runoff through the watershed model, when the kinematic wave equation is going to be utilized Likewise, the developed algorithm allows for the identification of the triangular planar units forming the contributing area of each river-course segment, as well as the assignation of a sequential number that must be followed in a cascade model in order to route the overland flow The methodology has four parts: the first analyses the existing slope relationships between neighbouring planes. The second generates a data structure for the river-course segments. The third defines the calculus sequence which must be followed by the river-course segments to route the runoff in a cascade model The fourth part defines which triangular unit areas are constituents of the contributing area of each river-course segment. The computer code was tested using information from a small artificial and a large real watershed model. The results, concerning only the identification of the river-course and ridge networks, show agreement with known solutions.

INTRODUCTION

There are different approaches for modeling the rainfall–runoff relationship. One is based on the unit hydrogram in which the basin is handled as a global model with lumped parameters. In a second approach, the basin is first subdivided into smaller unit elements. Runoff is then calculated and routed from one element to another, and finally, the output of the entire basin is calculated. This paper deals with this second approach.

Distributed models are gaining greater importance in the study of the rainfall–runoff relationship because they offer the possibility of taking into account the spatial variability of the parameters involved. Yaramanoglu

*Contribution from the Colegio de Postgraduados and Universidad Autonoma Chapingo. This work was also partially supported by the Agency for International Development, U S. Government.

0022-1694/90/$03 50 © 1990 Elsevier Science Publishers B.V

– 213

(1978), as cited by Junes (1985), states: "an ideal model would be one in which for each point of the basin, every parameter would be quantitatively known. However, such a model would be impossible to use because of the great quantity of information needed. One way to overcome this difficulty is to subdivide the basin into small elemental units (unit areas), in which, the parameters are assumed to be single valued. These models, with this conception, are known as distributed parameter models." The model of Rovey et al. (1977) which consists of a cascade of rectangular plane areas and river segments is an example.

Recently, the concept of a distributed model has been enriched by the development of the so-called Digital Terrain Models. These are mathematical models consisting of a set of numbers representing the properties of the terrain, and certain rules for interpreting these numbers. A Digital Terrain Model is called a Digital Elevation Model (DEM) when only topographic elevations are taken into account. For a review of these concepts see, e.g. American Society of Agricultural Engineers (1988) and American Society of Photogrammetry (1978).

In distributed models, the basin surface is usually replaced with a few (20–40) plane rectangular areas, and the river-course with straight segments. This substitution implies a high level of subjectivity and the researcher has to define the main characteristics of the rectangles (dimensions, slope, soil parameters, etc.) according to the surfaces represented.

An approach that seems to reduce this subjectivity is the replacement of the basin surface with a network of non-overlapping triangles in space that constitutes a specific application of DEM. An example of a small watershed formed by triangular elements is shown in Fig. 1. The triangle vertices are surface specific points (Peucker and Douglas, 1975); that is, points where slopes change abruptly. The network of triangles can be defined in an automatic or semi-automatic way. Triangular elements can also be set in either a regular or irregular network.

In a regular network, the X and Y coordinates of each point progress at a constant interval. Therefore, when recording the information only the elevation Z of each point is stored because the horizontal coordinates X and Y can be calculated from the position of the elevation data on the data matrix. In the case of an irregular DEM network (Delaunay triangles are the most commonly used to create it), the points are placed at variable locations, and therefore, the DEM will consist of: (a) the three coordinates X, Y and Z of the points, and (b) the relationships between the neighbouring triangles.

These are recorded in a data structure, such as that proposed by Lawson (1977) and Gold et al. (1977), that we shall call "triangle structural matrix" which has as many rows as triangles and six columns: the first three with the numbers of the vertices following a counterclockwise direction and the second three with the numbers of the neighbouring triangles opposing the vertices.

This structural matrix is illustrated in Fig. 2, where the river-course segment structural matrix, explained later, is also shown. This way of defining

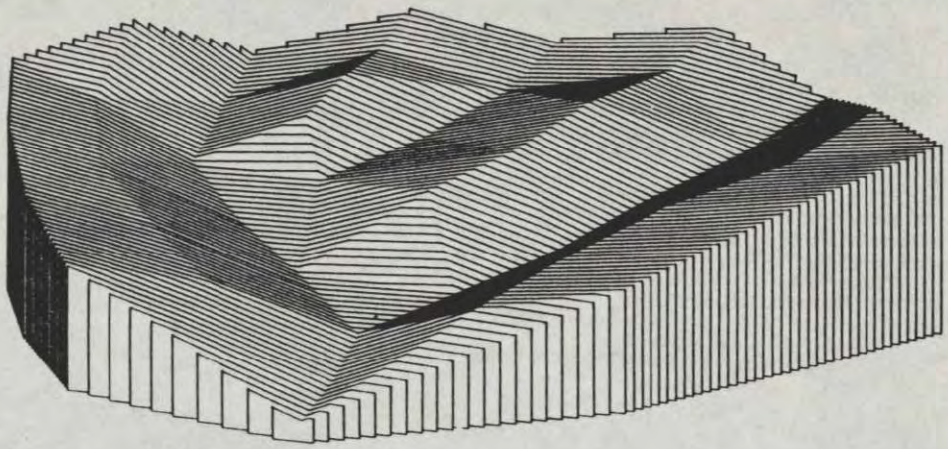
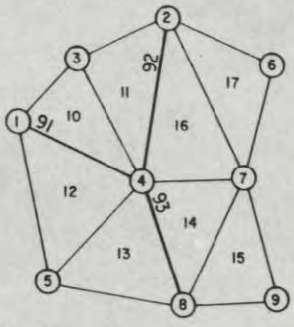


Fig. 1. Tridimensional representation of a small basin.

the triangles, though perhaps not the most efficient from the point of view of storage requirements, is quite convenient for triangle-by-triangle searching, a procedure often used when tracking contour lines and lines of steepest slope in Digital Elevation Models (Tarvydas, 1984; Palacios and Cuevas, 1986).

A series of advantages over the regular grid is offered by the irregular triangle network (Palacios and Cuevas, 1986); hence, the latter is utilized in the present research.

Probably the most rigourous method for obtaining the runoff hydrograms in distributed models is through the solution of the Saint Venant equations that



TRIANGLE STRUCTURAL MATRIX

TRIANGLE No.	VERTICES IN COUNTERCLOCKWISE DIRECTION			NEIGHBOURING TRIANGLE OPPOSING THE VERTICES		
10	1	4	3	11	0	12
11	3	4	2	16	0	10
12	1	5	4	13	11	0
13	4	5	8	0	14	12
14	4	8	7	15	16	13
15	7	8	9	0	0	14
16	2	4	7	14	17	11
17	2	7	6	0	0	16

SEGMENT STRUCTURAL MATRIX

RIVER COURSE SEGMENT No.	NUV	NDV	NUS	NDS	NTB1	NTB2
91	1	4	0	93	10	12
92	2	4	0	93	11	16
93	4	8	91	0	13	14

Fig. 2. Description of triangular structural and river-course structural matrices.

describe the overland flow over the contributing area of each river-course segment, as well as the channel flow through the river-course network. In order to show the importance of simplified methods, we briefly describe this procedure. Since these networks usually have a complicated structure of confluences, the Saint Venant equations are solved separately and alternatively for a main river-course (considering the confluences as point sources) and for each tributary (considering the outlet into the main river as a boundary with known water depth from a previous time interval). Obviously, this method is highly complicated and time-consuming and since important factors, such as infiltration and riverbed characteristics, vary considerably in space and are not usually very well known, other simpler methods are currently under analysis by researchers.

Among the simpler methods, the use of the so-called kinematic wave approximation seems especially interesting. This method allows the use of a cascade model, in which the basin is subdivided into the unit elements of the distributed model, and the runoff is routed from the upper to the lower elements. In the cascade model the runoff routing is reduced to the recursive solution for a single element (a triangle or a river-course segment) for which the runoff input coming from the upper elements is known, as well as local "perturbation" (rainfall minus infiltration) and this produces the output to the next lower element. In order to be sure that the runoff input is known when analysing any element, these elements must be studied in a specific order, hence the numbering system must be established prior to the routing procedure of the cascade.

When a distributed model consists of only a few elements, (e.g., 20–40), the order of the unit areas and river-course segments in the cascade model can be established visually. However, when models contain hundreds or even thousands of elements, the visual identification of unit areas forming the contributing area of each river-course segment and the generation on paper of the order of analysis in the cascade algorithm become impractical.

Consequently, the purpose of this paper is the development of an algorithm to automatically generate the sequence of analysis, or cascade numbering system, for the unit elements in a distributed model that must be followed when routing the runoff by means of the kinematic wave equation.

STATEMENT OF THE PROBLEM

The problem to be solved can be stated more formally as follows: Given the DEM of a watershed: (a) define the order of analysis of river-course segments in the cascade model; (b) identify the unit elements forming the contributing area of each river-course segment; and (c) define the order of analysis of these elements in the cascade model.

THE METHODOLOGY

The methodology consists of four parts: (1) The slope analysis between neighbouring triangles; (2) The automatic identification, characterization and

216

BEST AVAILABLE

ıg rea of each river-course
rive course network. In order
ls, we briefly describe this
complicated structure of con-
se rately and alternatively
nces as point sources) and for
ıain river as a boundary with
ıl). bviously, this method is
ce portant factors, such as
onsiderably in space and are
nethods are currently under

alled kinematic wave approxi-
l allows the use of a cascade
nit ements of the distributed
o the lower elements. In the
the recursive solution for a
nt) r which the runoff input
wel as local "perturbation"
he output to the next lower
s known when analysing any
specific order, hence the
he routing procedure of the

w ements, (e.g., 20–40), the
in the cascade model can be
contain hundreds or even
unit areas forming the
nd e generation on paper of
ecome impractical.
development of an algorithm
ys or cascade numbering
l that must be followed when
ve equation.

ormally as follows: Given the
ysis of river-course segments
nts forming the contributing
he order of analysis of these

Th slope analysis between
cation, characterization and

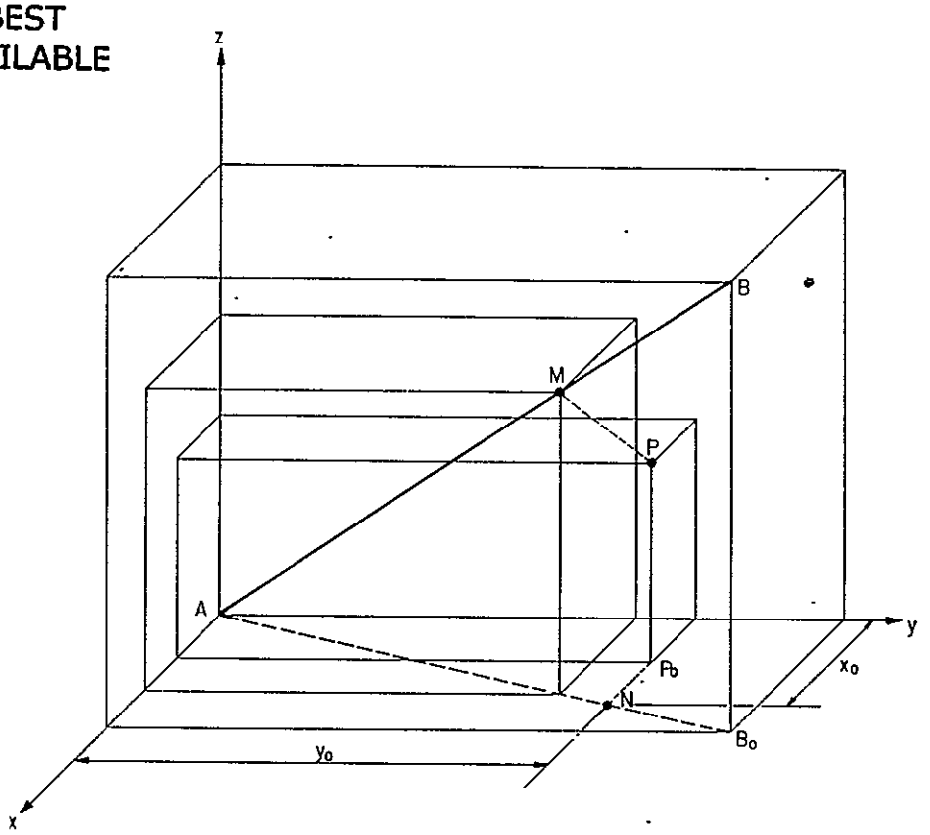


Fig. 3 Diagram of line AB and points M, N and P in space

linking of river-course segments; (3) The sequence of analysis of river-course segments; and (4) The identification and generation of the sequence of analysis of triangles forming the contributing areas of any river-course segment.

The first two are preparatory to the third, and the first is a preliminary step to the fourth, through two independent processes.

These parts will now be discussed in depth.

Slope analysis between neighbouring triangles

The identification of rivers, ridges and other elements of the landscape can be obtained from the analysis of the perpendicular component of the steepest slope with respect to the common edge between neighbouring triangles. This operation, therefore, constitutes the first part of the methodology and all the triangles forming the watershed must be analysed in this way.

Palacios and Cuevas (1985) proposed the method used here to calculate the steepest slope in any triangle. Briefly, the method consists of finding a point $M(x, y, z)$ on line AB defined by eqns. (1) and (2), which gives an optimum

217

(maximum or minimum) slope when joined to an external point $P(u, v, w)$ (Fig. 3). The line equations are:

$$Y = aX + b \tag{1}$$

$$Z = cX + d \tag{2}$$

The gradient of line $P - M$ is defined as the difference in elevation, divided by the distance:

$$g = (Z - w)/D \tag{3}$$

where:

$$D = [(X - u)^2 + (Y - v)^2]^{1/2} \tag{4}$$

By substituting eqns. (1) and (2) in eqn. (3), calculating the derivative of g with respect to X and equating to zero, the obtain, after some simplification:

$$X^* = (X_0^2 + (Y_0 - v)^2 - X_1 X_0)/(X_0 - X_1) \tag{5}$$

where:

$$X_0 = [u + a(v - b)]/(1 + a^2) \tag{6}$$

$$Y_0 = aX_0 + b \tag{7}$$

$$X_1 = (w - d)/c \tag{8}$$

Notice that in the $X - Y$ plane, X_0 and Y_0 are the coordinates of point N which is the closest point on line AB_0 to P_0 (projection of P onto the $X - Y$ plane). Likewise, X_1 is the abscisa of the point in the line defined by eqn. (2), whose elevation equals that of point P.

X^* is the X coordinate of point M which produces the steepest slope, and Y^* and Z^* are calculated from eqns. (1) and (2).

The first part of the algorithm consists of a sequential analysis of each triangle with regard to its three neighbours. In the following we explain the possible cases that can take place, as well as the ways of coding and storing this information.

The slope component in a perpendicular direction to each edge of a triangle may be towards the edge, away from the edge, or zero.

When studying the slope relationship between two adjacent triangles in the following, the main triangle is designated (1), and the neighbouring triangle (2). The number of possible cases is ten (Fig. 4): 1 Water flows toward the shared edge in triangle (1) and from the shared edge in triangle (2). 2. Water flows toward the shared edge in triangle (1) and triangle (2) is horizontal. 3. Water flows toward the shared edge in hoth triangles. It is a river. 4. (1) is horizontal and water flows from the shared edge in triangle (2). 5. (1) is horizontal and water flows toward the shared edge in triangle (2). 6. (1) and (2) are both horizontal. 7. Water flows from the shared edge in triangle (1) and triangle (2) is horizontal. 8. Water flows from the shared edge in both triangles. It is a ridge. 9. Water flows from the shared edge in triangle (1) and toward the

28

BEST
AVAILABLE

ter al point $P(u, v, w)$ (Fig.

(1)

(2)

erence in elevation, divided

(3)

(4)

culating the derivative of g
, after some simplification:

(5)

(6)

(7)

(8)

the coordinates of point N
ection of P onto the $X - Y$
the line defined by eqn. (2),

es the steepest slope, and Y^*

sequential analysis of each
ne following we explain the
ys coding and storing this

on to each edge of a triangle
zero.
wo adjacent triangles in the
the neighbouring triangle
1. Water flows toward the
dge in triangle (2). 2. Water
triangle (2) is horizontal. 3.
angles. It is a river. 4. (1) is
ge in triangle (2). 5. (1) is
in triangle (2). 6. (1) and (2)
ed edge in triangle (1) and
ared edge in both triangles.
tr ngle (1) and toward the

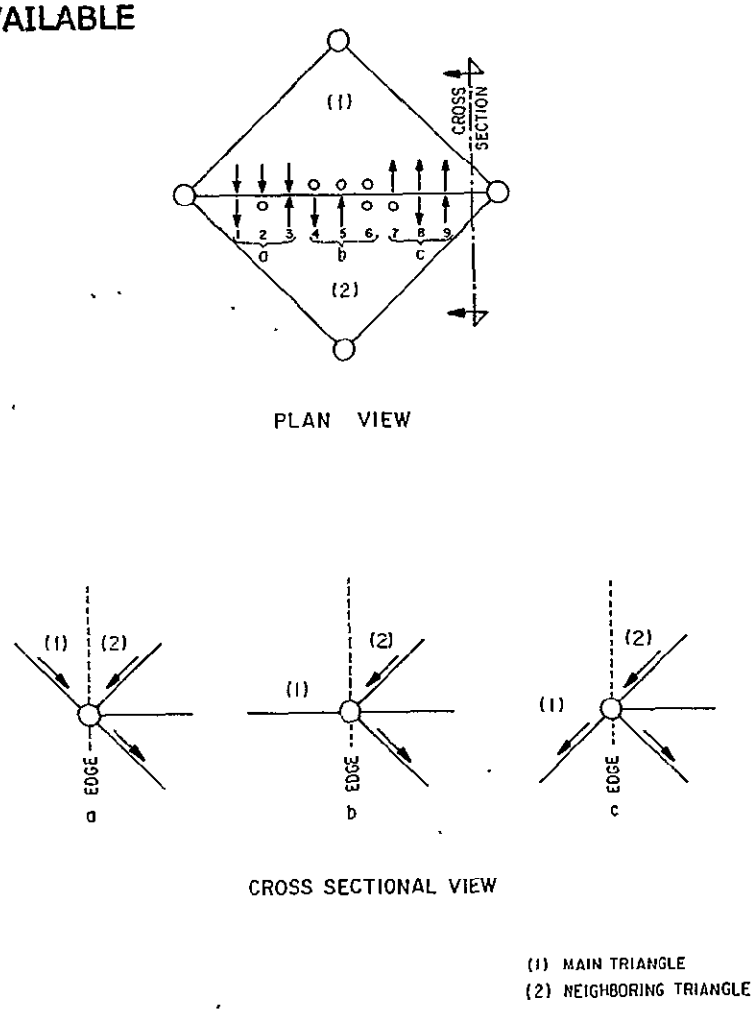


Fig. 4 Slope relationships between neighbouring triangles

shared edge in triangle (2). It is a typical input of runoff. 10. The edge is the boundary of the studied domain and hence (2) does not exist.

Each triangle has a maximum of three neighbouring triangles, and the relationship with each is codified with a number from one to nine; a zero is used if a neighbour does not exist. In order to save memory in the computer, this information can be codified and recorded as one integer with three digits. The first digit corresponds to the relationship between the triangle and its first neighbour, whose number appears in the fourth column of the triangle structural matrix and lies opposite the first vertex. The second and third digits, corresponding to the second and third neighbouring triangles, are handled in the same way.

297

When identifying the triangles which form the contributing area of a river-course segment, and establishing their order of calculation in the cascade model, it is important to develop the criteria that permit "walking" from one triangle to one of its neighbours in the upstream (when looking for a starting triangle) or downstream (when numbering the triangles) direction. The criteria are based on the number of water flow inputs and outputs as well as the fact that some neighbouring triangles might already have been numbered for the cascade.

Proceeding from a known analysed triangle (in either an upstream or downstream direction) only the remaining two neighbouring triangles of the triangle under study require analysis. Observe that the two neighbouring triangles can have several combinations of water flow inputs (case numbers 5 and 9) or outputs (case numbers 1, 2 and 3), but there are only three possibilities when the analysis goes in the upstream direction and also three when it proceeds in the downstream direction.

In the upstream direction search, three situations define the next triangle to be analysed: 1. The runoff inputs, if any, are already numbered. Here the upstream analysis stops, the triangle can be numbered and the procedure continues in the downstream direction. 2. There is at least one unnumbered runoff input and zero outputs. The upstream analysis continues to the triangle from which the runoff is coming. 3. There is one unnumbered runoff input and one output. The upstream analysis continues to the triangle which originates the runoff. The previous triangle (the third neighbour) is marked in order to avoid confusion in the return downstream analysis.

In the downstream direction, the following situations can occur: 4. The runoff input, if any, has already been numbered. The present triangle can be numbered and the downstream analysis continues to the triangle to which the runoff flows. 5. There is one unnumbered runoff input. The direction of analysis is changed to an upstream search towards the triangle from which the runoff input is coming. 6. There are two runoff outputs. The triangle is numbered and the analysis continues with the triangle previously marked in situation No. 3.

The reader will observe that during the downstream analysis, there will always be at least one runoff output because the river-course segment itself is considered a runoff output from the triangle.

Automatic identification, characterization and linking of river-course segments

In order to simplify the order of analysis of the river-course segments, a second structural matrix, based on the Lawson-Gold triangle structural matrix, and referred to in the following as the segment structural matrix, is introduced. This matrix has as many rows as river-course segments and six columns with the information as shown in Fig. 2.

Each segment is defined by its two vertices, its neighbouring upstream and downstream river-course segments, and the bank triangles.

This part of the algorithm searches for the existence of river-course segments corresponding to case number 3 in the integer of three digits as

BEST AVAILABLE

contributing area of a river-
culation in the cascade
permit "walking" from one
(when looking for a starting
ngs) direction. The criteria
l outputs as well as the fact
have been numbered for the

(i either an upstream or
eighbouring triangles of the
that the two neighbouring
flow inputs (case numbers 5
e are only three possibilities
on and also three when it

ns define the next triangle to
lready numbered. Here the
umbered and the procedure
is least one unnumbered
sis continues to the triangle
nnumbered runoff input and
ne triangle which originates
ibour) is marked in order to
is.
ituations can occur: 4. The
The present triangle can be
to the triangle to which the
out The direction of analysis
ane from which the runoff
he triangle is numbered and
y marked in situation No. 3.
ist am analysis, there will
iver-course segment itself is

zing of river-course segments

he river-course segments, a
n-fold triangle structural
gment structural matrix, is
er-course segments and six

neighbouring upstream and
triangles.
: existence of river-course
: integer of three digits as

explained above. Then, for each segment, the corresponding row in the segment matrix is filled in two steps. First, columns 1, 2, 5 and 6 are directly defined from the triangle structural matrix. Then in a second step, columns 3 and 4 are filled with the numbers of the upstream and downstream segments found through a search of the remaining segments. When there is no adjacent segment, a zero is placed in the respective column of the segment structural matrix (Fig. 2).

Analysis sequence of river-course segments

After defining, characterizing and linking the river-course segments, it is possible to define the analysis sequence or numbering system which has to be followed in order to route and integrate the runoff.

The only requirement for an acceptable or valid sequence is that, when analyzing a segment, the upstream river-course segment (or segments when there are confluences), must already have been analysed. This implies that the upstream segment or segments, if any, will always have a lower sequential number

We first describe this part of the algorithm in a simplified way using a Pascal-like pseudo-code and later on we will go into further detail.

The river-course network of a basin has only one outlet. However, a given set of data, assumed to correspond to one specific basin, can show several outlets. This may be due to two possible factors: first, the sampling of topographic points was really made over several basins, or second, a problem in selecting the points in the sampling process causes apparent discontinuities in the river-course network. This apparent situation will be discussed later.

```
STEP  1: (* Finding any unnumbered river-course segment *)

BEGIN
  Take the next unnumbered segment in the segment matrix;
  (Take the first segment to start the process)
  IF there are no more unnumbered segments
     THEN the process is over
     ELSE go to step 2;
END;

STEP 2: (* Upstream analysis *)

IF column 3 (number of upstream segment) > 0
   THEN
     BEGIN
       go to that segment;
       repeat step 2;
     END
   ELSE (column 3=0, which means there is no upstream segment)
        BEGIN
          assign the next sequence number;
          goto step 3;
        END;

STEP 3: (* Downstream analysis *)
```

-221-

```
IF column 4  (number of downstream segment) > 0
   THEN
     BEGIN
       go to that segment;
       go to step 4;
     END;
   ELSE (column 4=0, which means, there is no downstream segment)
     go to step 1; (this is the outlet of a river network)

STEP 4: (* Verification of existence of confluences *)

IF column 1 ( the upstream vertex) is registered as a
   confluence (in a separate vector)
   THEN
     IF all  the  upstream segments of the confluence  are
        already numbered
        THEN
          BEGIN
            assign  the  next  sequence  number;
            go to step 3;
          END
        ELSE
          BEGIN
            take  any unnumbered  segment;
            go to step 2;
          END;
   ELSE
     BEGIN
       assign  the next sequence number;
       go to step 3;
     END;
```

As an intermediate step in the process of assigning order numbers it is important to distinguish two kinds of river-course segment confluences. In the first, the two river-course segments upstream of the confluence are edges of the same triangle. In the second, two river-course segments are edges of different triangles. This is very important when ordering the segments following a cascade criterion because all the confluences must be detected in order to assign ordinal numbers.

Although several valid sequences of analysis are possible, the one obtained by this algorithm will necessarily depend on the way the segment matrix was initially generated.

The algorithm works no matter how complicated the river-course network is. The only exception occurs when the river branches off downstream, as in a delta, but in this case, the use of the kinematic wave equation would not be justified. and obviously a cascade model to route the runoff would not be utilized.

Identification and generation of the sequence of analysis of triangles forming the contributing area of any river-course segment

The last part of the algorithm simultaneously solves the problem of identifying the triangles forming the contributing area of any segment, as well as the

generation of the sequence of analysis of those triangles allowing the calculation of the overland flow to the river-course segment. This part is now described using, once again, a Pascal-like pseudo-code. The process starts in an upstream direction with the chosen bank triangle that forms the river-course segment, and is over when a sequential number is assigned to this triangle after reaching it in a downstream direction. We first explain the algorithm in a rather simplified version and later on we present some details.

```
STEP  1:  (* Identification of triangle characteristics and  slope
             relationships *)

      IF the initial triangle is not numbered
         THEN
           BEGIN
           Identify which of the three neighbours is the previous-
           ly  analysed  triangle from which the present  triangle
           was reached; { when starting this procedure  the uncho-
           sen triangle that also forms the river-course  segment,
           is considered the previous triangle. }

           Identify the other two neighbouring triangles where the
           process can eventually continue;

           Identify  the  slope relationships (runoff  inputs  and
           outputs)  with  the last two triangles by decoding  the
           integer of three digits that stores this information:

           Identify the case number of slope relationships  accor-
           ding to the number of runoff inputs and outputs and the
           direction of the analysis { upstream or downstream }
           END;
         ELSE the process is over

STEP 2: (* Case Analysis *)

      CASE number_of_case OF
      {Upstream analysis}

'1': (* The runoff inputs, if any, are already numbered *)

           BEGIN
             Assign   the  next  order  number  to  the   analysed
             triangle;
             Remark process as going downstream;
             Take the downstream unnumbered triangle;
             Go to step 1;
           END;

'2':  (*  There is at least one unnumbered runoff input  and  zero
          outputs *)

           BEGIN
             Take the unnumbered upstream triangle;
             Go to step 1;
           END;

'3': (* There is one unnumbered runoff input and one output *)
           BEGIN
```

BEST AVAILABLE

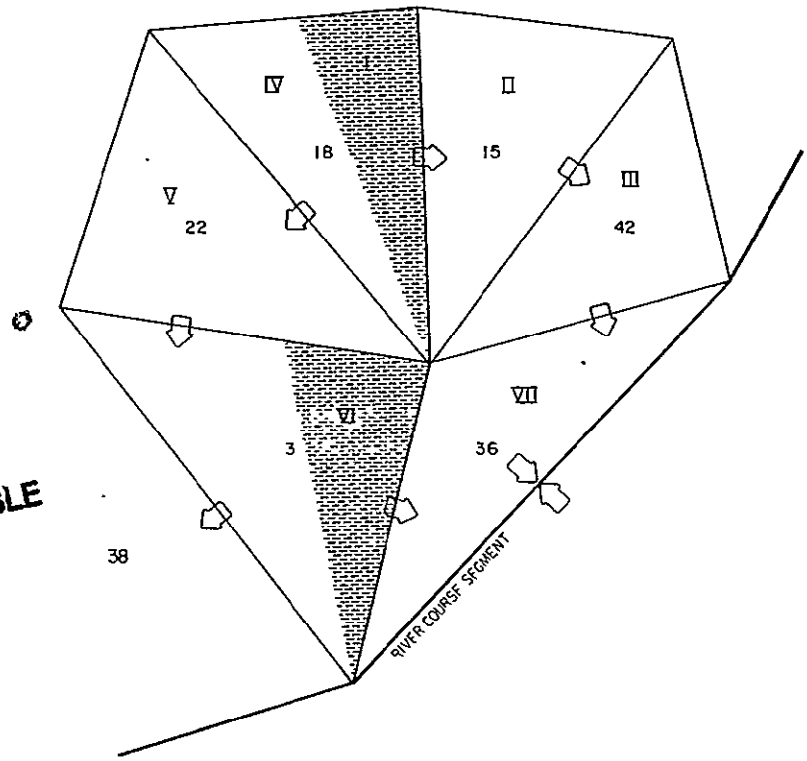
```
            Take  note of the analysed triangle in order to iden-
            tify  it later as part of the return path;
            Take the unnumbered upstream triangle;
            Go to step 1;
          END;

      {Downstream analysis}

'4': (* The runoff input, if any, has already been numbered *)

          BEGIN
            Assign   the   next   order   number   to   the   analysed
            triangle;
            Take the downstream triangle;
            Go to step 1;
          END;

'5': (* There is one unnumbered input *)

          BEGIN
            Remark process as going upstream;
            Take the unnumbered upstream triangle;
            Go to step 1;
          END;

'6': (* There are two runoff outputs *)

          BEGIN
            Assign   the   next   order   number   to   the   analysed
            triangle;
            Calculate  the percentage of the total runoff of  the
            triangle that flows towards the river-course segment;
            Take the output triangle that was recorded during the
            upstream analysis (case 3 );
            Go to step 1;
          END;
```

We now discuss some important details. As mentioned above, the process ends when a sequential number is assigned to the initial triangle. Therefore, each time an order number is assigned, it must be verified if the triangle just numbered is the initial one.

The proposed algorithm identifies all the triangles that entirely or partially contribute runoff to the river-course segment. In the latter instance the percentage of the triangle area that contributes to the runoff is calculated.

Sometimes the triangle runoff branches off and only a part of it finally reaches the segment. At other times both branches eventually come together once again and reach the same segment. In this case the triangle receives two sequential numbers, corresponding to the two parts of the triangle that separately contributed to the runoff.

As an example six triangles receive seven order numbers (Fig. 5). The contributing area analysis begins with triangle 36 which is a river-course segment bank. This triangle has two runoff inputs and the process proceeds to triangle 42, and so on to triangle 18, which has no inputs. Triangle 18 receives analysis order number I but, as can be observed, only a fraction of it (the shaded



BEST AVAILABLE

Fig. 5 Example of river-course segment contributing area.

area) delivers runoff to triangle 15 (its downstream neighbour) through which the searching process passed. Then, the process advances to triangles 15 and 42 assigning them order numbers II and III respectively. When arriving at triangle 36, the search detects an unnumbered runoff input; therefore, it continues towards triangle 3. Here, an additional output is detected towards triangle 38. Triangle 36 is marked in order to assure that on the return path, the process does not go to triangle 38, which is outside the contributing area. From here, the analysis continues to triangle 22 and then to triangle 18. This time this triangle (or more specifically, the unshaded portion) receives sequential number IV.

Each time sequential number is assigned to a triangle, we take note of the downstream triangle from which we reached the present triangle. When we analyse a triangle such as number 22, we detect a runoff input from triangle 18, which already has a sequential number. However, this number refers only to the runoff that flows from the shaded area towards triangle 15. Therefore, the runoff input from triangle 18 towards triangle 22 has not yet been numbered. Hence, before assigning a sequential number to triangle 22, we ascend to the unshaded portion of triangle 18, give it a second sequential number and only then can we come back to triangle 22, to assign it the next sequential number.

The process now continues downstream, assigning numbers V, and VI, to triangles 22 and 3 respectively. Triangle 3 receives number VI, but it has two outputs. As previously mentioned, the process, in order to follow the correct runoff route to the segment under study, looks for and follows the true output previously marked during the upstream analysis.

Then, once number VI is assigned, the process goes on towards triangle 36, which is now numbered VII and the process stops.

APPLICATIONS

A FORTRAN 4X computer code was developed in order to implement the proposed algorithm. A HP 1000 computer, running under RTE-VI/VM operating system, was used. (The FORTRAN compiler was the only one available at the time we carried out this research. Presently the computer code is being translated to Pascal on an HP Vectra).

The computer code, about 1550 instructions long including comments, is arranged in a main program and three subroutines. The main subroutine is used to define the runoff cases (in the first part of the algorithm), and to define

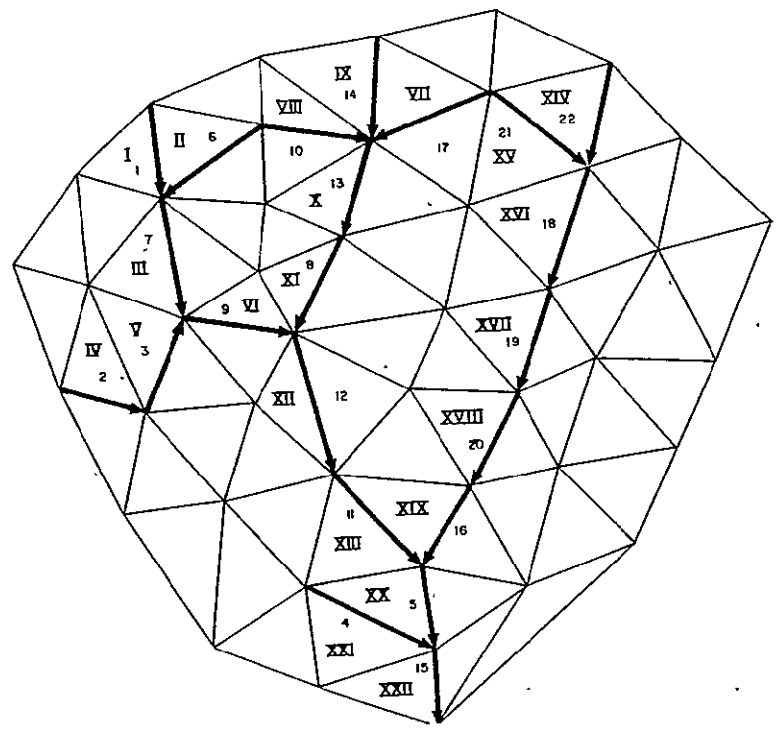
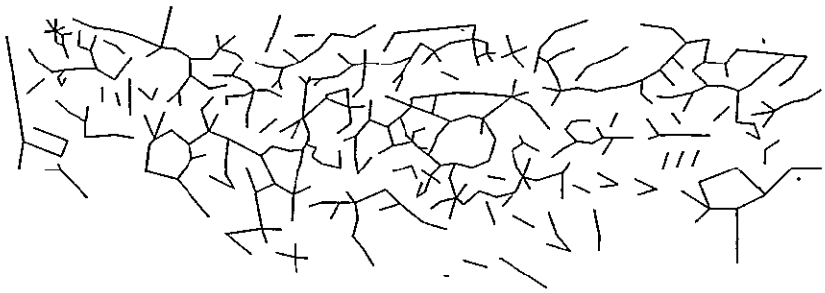


Fig. 6. Bidimensional representation of the small basin. Roman numerals indicate order numbers of river-course segments, and Arabic numerals, their position in the river-course segments matrix.

BEST AVAILABLE

a)



b)

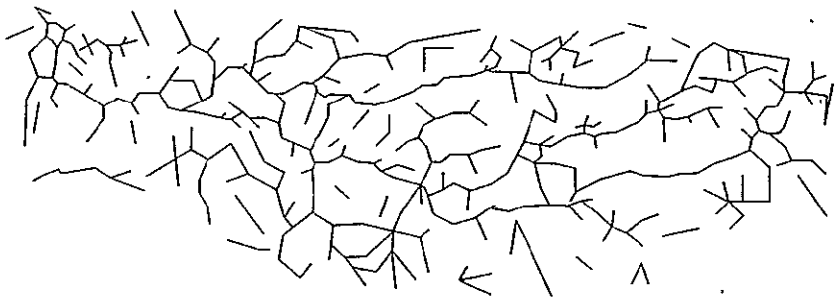


Fig. 7. Ridges (a) and river-courses (b) obtained with computer programs using Walnut Gulch data.

the runoff fraction of a triangle with two runoff outputs (in the fourth part of the algorithm). The other two are graphic subroutines.

In order to develop and test the computer code, an artificial small basin was used. This basin was represented by 45 points and 70 triangles, producing 21 river-course segments. Afterwards, information from the much bigger Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, U.S.A. was utilized in order to test the code with real information. This basin was represented by 651 topographical points and 1305 triangles, producing 425 river-course segments.

Different kinds of trials were made. Some were carried out in order to detect the ten cases of slope relationships. Others were conducted to identify the river-course networks and ridges. And finally, trials were performed in order to detect the contributing area of chosen river-course segments. These trials verified the number of triangles and also calculated the percentages of runoff coming from triangles with two runoff outputs.

The memory requirement for storing the computer codes is 60 K. The first basin occupies 10 K of memory and the second, 154 K. In order to save RAM memory when obtaining the results of each of the four parts of the process, the user can choose either to send the results to a file, or to present them on the screen.

DISCUSSION

Generation of river-course networks

The river-course networks of the two known basins obtained by means of the algorithms were compared with the networks obtained visually from maps, and in the case of the Walnut Gulch Experimental Watershed, with the network obtained by Palacios and Cuevas (1985) who utilized a different algorithm.

In the small basin, 21 river-course segments were detected, generating identical results in every case compared with the previously known information. In Fig. 6 the river-course segments are shown with their respective sequential numbers. For reasons of scale, the big basin is not shown with its numbered network.

The ridge and river-course networks were compared with those generated by Palacios and Cuevas (1985) and identical results were obtained (Figs. 7a and b). The Walnut Gulch basin was analysed and 425 river-course segments were detected (Fig. 7b). The resulting drainage network was compared with the existing map, and more river-course segments were detected than could be discovered visually, due to the high resolution capability of the computer program. These segments were detected, even when convergent slopes (divergent ones at ridges) were slight. These minimal slopes are impossible to see on a topographical map.

There are apparent closed "loop" river-courses in the drainage network. But, in fact, some points in the loops are saddle points where two river-course segments start their flows in different directions.

River-course discontinuities

When analysing the results of the intermediate trials, river-course network discontinuities were observed. These discontinuities can be real (as in the case of having several basins instead of a single watershed) or artificial.

The discontinuity in a river-course network does not always imply a flow discontinuity because there are situations in which the runoff passes from one river-course network final point to another river-course segment through a triangle. This triangle will never be identified as a river-course because only those edges formed by two triangles with convergent slopes are identified as such. Thus, there may be flow continuity but not necessarily river continuity.

A discontinuity in a river-course network might be artificially built up because the triangles usually utilized are Delaunay triangles which are defined

BEST AVAILABLE

uter codes is 60 K. The first
54 In order to save RAM
four parts of the process, the
e, or to present them on the

ins obtained by means of the
ine visually from maps, and
ate shed, with the network
zed a different algorithm.
were detected, generating
previously known informa-
nown with their respective
basin is not shown with its

ared with those generated by
ere obtained (Figs. 7a and b).
river-course segments were
ork was compared with the
ere detected than could be
capability of the computer
when convergent slopes
nal slopes are impossible to

s in the drainage network.
oints where two river-course

trials, river-course network
es can be real (as in the case
shed) or artificial.
oes not always imply a flow
n the runoff passes from one
-course segment through a
a river-course because only
gent slopes are identified as
necessarily river continuity.
ght be artificially built up
triangles which are defined

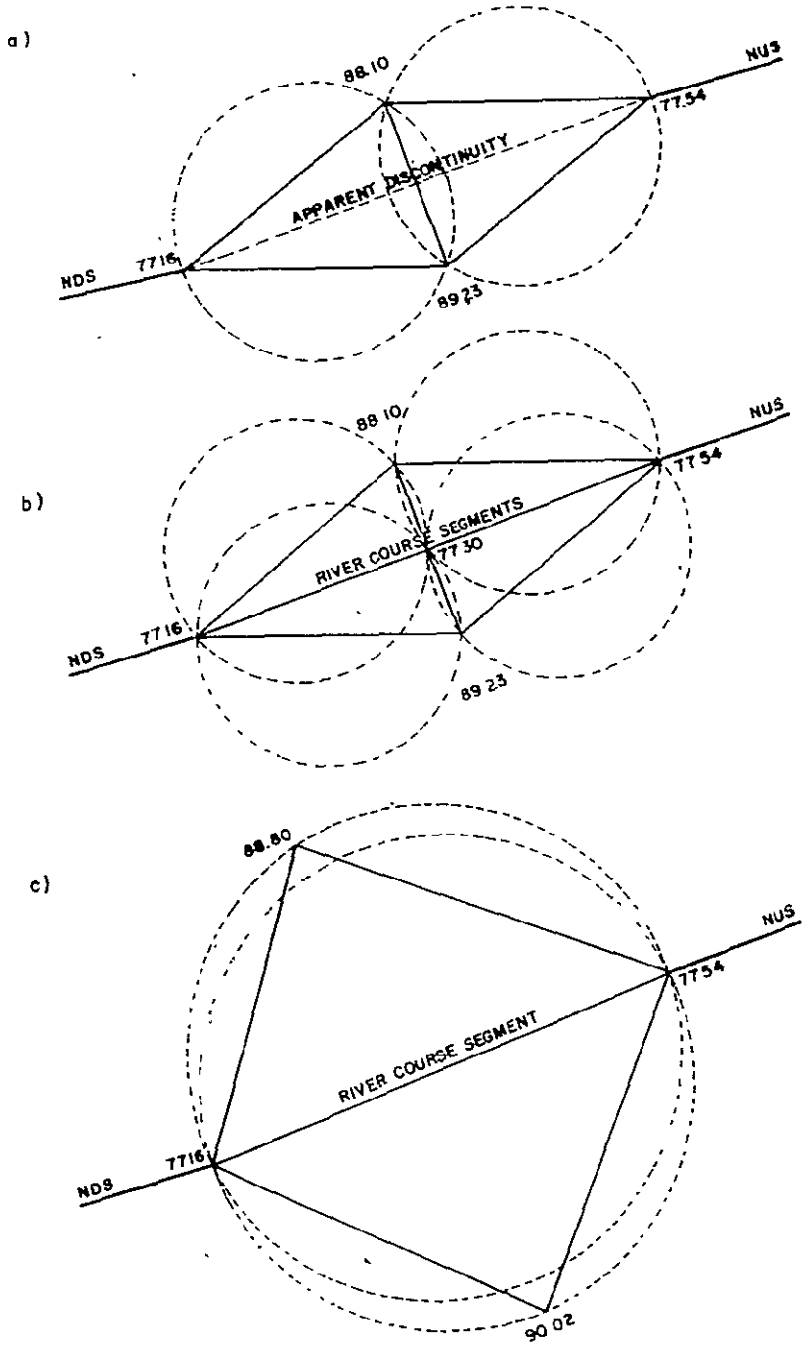


Fig. 8. Example of a river-course network discontinuity (a) and proposed solutions (b), (c) when utilizing Delaunay triangles

by a purely bi-dimensional criterion (the circle defined by its three vertices contains no other point of the network). This criterion does not take topographical elevations into account. In Fig. 8, four points of the model are represented and a river-course segment must exist between the two points lying at a lower elevation. The Delaunay triangles can be generated in such a way that the river-course segment does not coincide with the common edge of the two triangles (Fig. 8a). The insertion of an intermediate point (Fig. 8b) or the re-sampling of the topographical surface in other locations (Fig. 8c) can result in the coincidence of the river-course segment with the proper triangle edge and the discontinuity is eliminated. This problem suggests the importance of building up the triangle network with an interactive editor, in order to easily locate and correct these discontinuities.

CONCLUSIONS

Computer programs were developed in order to identify rivers, ridges and other features of the landscape, in DEMs. The programs assign a sequential number to each river-course segment that must be followed in order to route the runoff in the network when using a hydrological cascade. Likewise, they are capable of detecting the contributing area to each of the river-course segments, giving a similar sequential number to each triangle in this area.

The river-course and ridge networks, identified by means of the developed computer codes, provide more detail than the visually-identified networks.

Discontinuities in river-course networks may appear, but these discontinuities are either real or apparent. A real discontinuity occurs when two or more basins are included in the DEM. Apparent discontinuities may be attributed to the use of Delaunay triangles which are defined in the X–Y plane without taking into account the elevation Z. In order to avoid artificial discontinuities in the river-course networks, interactive editing of the Digital Elevation Model to facilitate adding or moving points is recommended.

ACKNOWLEDGEMENT

The writers are grateful to Dr. D.A. Woolhiser, from the ARS Aridland Watershed Management Research Center, Tucson, Arizona, for kindly providing the topographic data utilized. They also express their acknowledgement to Prof. Ulrich Schrader, Departamento de Idiomas, Colegio de Postgraduados, for his help in the writing of this paper in English. The comments and suggestions of our reviewers, which greatly contributed to improving the quality of our work, are also recognised.

REFERENCES

American Society of Agricultural Engineers, 1988. Modeling agricultural, forest, and rangeland hydrology Proc 1988 Int Symp, Chicago, Ill.

American Society of Photogrammetry, 1978. Proceedings of the Digital Terrain Models (DTM)

230

fin by its three vertices
eri n does not take topo-
points of the model are
tw n the two points lying
e g erated in such a way
h the common edge of the
liate point (Fig. 8b) or the
ca ns (Fig. 8c) can result
t pròper triangle edge
uggests the importance of
e e tor, in order to easily

ide ify rivers, ridges and
grams assign a sequential
fol wed in order to route
al scade. Likewise, they
each of the river-course
ch triangle in this area.
y eans of the developed
ally dentified networks.
ear, but these discontinui-
y o urs when two or more
ui s may be attributed to
in the X-Y plane without
id tificial discontinuities
ne gital Elevation Model
'ed.

, from the ARS Aridland
sor Arizona, for kindly
exp ess their acknowledge-
Idiomas, Colegio de Post-
in English. The comments
ntr uted to improving the

ricultural, forest, and rangeland

e I ital Terrain Models (DTM)

Symposium St Louis, Missouri, May 9 11.

Cline, A.K and Renka, R L, 1984. A storage-efficient method for construction of a Thiessen triangulation. Rocky Mount J. Math., 14(1): 119-139

Gold, C M, Charters, T.D. and Ramsden, J., 1977 Automated contour mapping using triangular element data structures and an interpolant over each triangular domain. Comput. Graphics, 11: 170-175

Junes, D A., 1985 Modelo de simulación para predicción de escurrimientos superficiales. Tesis de Maestria en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México.

Junkins, J.L, Miller, G.W. and Jancaitis, J R., 1973 A weighting function approach to modelling of irregular surfaces. J. Geophys. Res., 73(11): 1794-1803.

Lawson, C L., 1977. Software for C^1 surface interpolation. In: J.R Rice (Editor). Academic Press, New York, N.Y. pp. 161-194.

Palacios, O., 1984 El uso de modelos en irrigación y áreas afines. XVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Soc. Mex. Cienc. Suelo, Guadalajara, Mex.

Palacios, O., 1986. El uso de modelos digitales del terreno en la solución de algunos problemas hidrológicos. Memorias Primera Bienal Iberoamericana de Sistemas de Información Hidrica. Ezeiza, INCYTH-CIH, Bs AS., Argentina, Noviembre/10-14.

Palacios, O. and Cuevas, B., 1986. Automated river course, ridge and basin delineation from digital elevation data. J. Hydrol., 86· 299-314.

Peucker, T.K. and Douglas, D H., 1975. Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Comput Gr. Image Process., 4· 375-387.

Ribeiro, J.S., 1983 Desarrollo de un sistema gráfico computacional interactivo para el análisis topográfico del drenaje superficial. Tesis de Maestria en Ciencias Colegio de Postgraduados, México.

Rovey, E.W. et al, 1977. A distributed kinematic model of upland watersheds Hydrol. Pap., 93, Colorado State University, Fort Collins, Colo

Tarvydas, A., 1984. Terrain approximation by triangular facets ASP-ACSM 44th Annu. Meet., Washington, D.C., Tech. Pap, pp 524-532

Yaramanoglu, M., 1978. A finite element model for simulation of hydrographs from natural watersheds Ph.D. Thesis, University of Maryland, Md.

BEST
AVAILABLE

EOS

Transactions, American Geophysical Union

For speediest treatment of articles, meeting reports, and news items, send three copies of the double-spaced manuscript to one of the editors listed below and one copy to AGU, *Eos* Managing Editor, 2000 Florida Avenue N.W., Washington, DC 20009.

Editors:

William Casey (Volcanology, Geochemistry, and Petrology); Geochemistry Division 6233, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185; tel. 505-846-0196, [BCASEY/KOSMOS] TELEMAIL

Andrew F. Cheng (Solar-Planetary Relationships); Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins Road, Laurel, MD 20707, tel. 301-953-5415; [ACHENG/KOSMOS] TELEMAIL

Michael D. Fuller (Solid Earth Geophysics); Department of Geological Sciences, University of California, Santa Barbara, CA 93106; tel 805-961-3471

William Glen (History), U S Geological Survey, 345 Middlefield Road, MS 941, Menlo Park, CA 94025; tel. 415-329-5734

A. Ivan Johnson (Hydrology); 7474 Upham Court, Arvada, CO 80003; tel 303-425-5610, [AIJOHNSON/KOSMOS] TELEMAIL

Thorne Lay (Seismology), Department of Geological Sciences, University of Michigan, 1006 C C. Little Building, Ann Arbor, MI 48109–1063, tel 313-764-7385; [TLAY/KOSMOS] TELEMAIL

Peter J. Mouginis-Mark (Planetology); Department of Planetary Geosciences, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, tel 808-948-6490, [P.MOUGINIS MARK/OMNET] MAIL

Robin D. Muench (Ocean Sciences); SAIC, 13400B Northrup Way, Suite 36, Bellevue, WA 98005, tel 206-747-7152; [R.MUENCH/OMNET] MAIL

Bob E. Schutz (Geodesy), Department of Aerospace Engineering, WRW 402, University of Texas, Austin, TX 78712, tel 512-471-4267; [R SCHUTZ/OMNET] MAIL

James C. G. Walker (Atmospheric Sciences); Department of Geological Sciences, University of Michigan, 1006 C C Little Building, Ann Arbor, MI 48109–1063, tel 313-936-0503, [JWALKER/KOSMOS] TELEMAIL

A. F. Spilhaus, Jr. (Editor in Chief), AGU, 2000 Florida Avenue N.W., Washington, DC 20009, tel 202-462-6900; [FSPILHAUS/KOSMOS] TELEMAIL

Managing Editor, Janet W. Crampton, **News Writer** William Ward Maggs, **Copy Editor**, Susan M Bush, **Editorial Assistant**, Ingrid V. Tischer **Proofreader**, Catherine J Lohman, **Advertising Coordinator**, Karol B Snyder, **Makeup Staff**, Lailah Jochum Dae Sung Kim, Rina Parkhurst, Nancy V Sims

Editorial offices, 202-462-6900, 8 30 A M –5:00 P.M. Eastern Time. AGU fax, 202-328-0566

Officers of the Union

Don L Anderson, President; G. Brent Dalrymple, President-Elect, Marshall E Moss, General Secretary, Juan G Roederer, International Secretary; Peter S. Eagleson, Past President; A. F. Spilhaus, Jr., Executive Director; Waldo E. Smith, Executive Director Emeritus

Officers of the Sections (1988–1990)

Atmospheric Sciences Richard E Orville, *President*, Robert E Dickinson, *President-Elect*, William H. Beasley, *Secretary*

Geodesy Charles C Counselman III, *President*, David E Smith, *President-Elect*, Jean O Dickey, *Secretary*

Geomagnetism and Paleomagnetism Ronald T. Merrill, *President*, Rob Van der Voo, *President-Elect*, Susan L. Halgedahl, *Secretary*

Hydrology George F Pinder, *President*, Donald L Nielson, *President-Elect*, Karen L Prestegaard, *Secretary*

Ocean Sciences Barbara M. Hickey, *President*, Fred Noel Spiess, *President-Elect*, Constance A Sancetta, *Secretary*

Planetology Thomas B McCord, *President*; Torrence V. Johnson, *President-Elect*, Bruce M. Jakosky, *Secretary*

Seismology Robert M. Hamilton, *President*, Robert B Smith, *President-Elect*, Robert S. Crosson, *Secretary*

Solar-Planetary Relationships Christopher T. Russell, *President*, Bruce Tadashi Tsurutani, *President-Elect*; Vincent B. Wickwar, *Secretary, Aeronomy*, Daniel M. Baker, *Secretary, Magnetospheric Physics*, Melvyn L. Goldstein, *Secretary, Solar and Heliospheric Physics*

Tectonophysics Mark D Zoback, *President*, Wayne Thatcher, *President-Elect*; Stephen H. Kirby, *Secretary*

Volcanology, Geochemistry, and Petrology Robert N. Clayton, *President*, Bruce David Marsh, *President-Elect*, Timothy L Grove, *Secretary*

Copyright 1989 by the American Geophysical Union Material in this issue may be photocopied by individual scientists for research or classroom use. Permission is also granted to use short quotes, figures, and tables for publication in scientific books and journals For permission for any other uses, contact the AGU Publications Office

Views expressed in this publication do not necessarily reflect official positions of the American Geophysical Union unless expressly stated

AGU does not advocate positions on issues that extend beyond the norms of legitimate scientific debate.

AGU makes every effort to assure that its activities are open to scientists worldwide without regard to race, religion, political philosophy, ethnic origin, citizenship, or sex

Contents

The Voyager 2 Neptune Encounter	915
Classifieds	924
DELP Symposium Report	930
Geophysical Year	934
GAP	942
1989 Fall Meeting	
Map of San Francisco	984
Meeting Information	985
Meeting Summary Chart	986
Meeting Abstracts	
Union	999
Atmospheric Sciences	1005
Geodesy	1047
Geomagnetism and Paleomagnetism	1064
Hydrology	1077
Ocean Sciences	1128
Planetology	1170
Seismology	1186
SPR—Aeronomy (SA)	1234
SPR—Solar and Heliospheric Physics (SH)	1252
SPR—Magnetospheric Physics (SM)	1264
Tectonophysics	1299
Volcanology, Geochemistry, and Petrology	1379
Author Index	1425

Subscription price to members is included in annual dues ($20 per year) Information on institutional subscriptions is available on request.

Eos, Transactions, American Geophysical Union (ISSN 0096–3941) is published weekly by the American Geophysical Union, 2000 Florida Avenue N.W., Washington, DC 20009 Second-class postage paid at Washington, D C, and at additional mailing offices POSTMASTER Send address changes to *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2000 Florida Avenue N.W., Washington, DC 20009

Cover. The Great Dark Spot of Neptune. This picture shows Voyager's last face-on view of the Great Dark Spot The image was shuttered 28 hours before closest approach at a distance of 1.8×10^6 km The smallest structures that can be seen are of an order of 40 km The image shows feathery white clouds that overlie the boundary of the dark and light blue regions The pinwheel (spiral) structure of both the dark boundary and the white cirrus suggests a storm system rotating counterclockwise. Periodic small-scale patterns in the white cloud, possibly waves, are short-lived and do not persist from one Neptunian rotation to the next. This color composite was made from pictures taken by the narrow-angle camera through green and clear filters. Photograph P-34672, courtesy of the Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, Pasadena, Calif.

See "The Voyager 2 Neptune Encounter" by Bruce T. Tsurutani, page 916

The techniques have been used in a variety of applications, such as generation of parameters for surface water runoff models, analysis of geochemical stream sediment samples, calculation of drainage density, scale generalization of drainage networks, and hydrologic behavior of non-contributing areas. DEMs have been successfully processed for local, regional, and national-scale studies. This automated approach essentially provides three-dimensional parameters related to drainage gradients, slopes, aspects, volumes, shapes, and features for these applications.

H21D-3 0905h

River Networks and Landform Scale From DEM's

David G Tarboton, Rafael L Bras and Ignacio Rodriguez-Iturbe (Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139)

In rainfall runoff modeling the basic length scale associated with a river network, measured in terms of the drainage density, is fundamental for the correct interaction between hillslope and channel flow processes. Drainage density quantifies the dissection of the landscape by the drainage network. Channel networks with arbitrary drainage density can be extracted from DEM's using the technique of a contributing support area threshold to define the network. Here we discuss techniques to identify a physically justifiable length scale and corresponding support area to be used to extract the network. The basic idea is to test for a break in the scaling present in river networks. This break is interpreted as a basic scale where the nature of sediment transport processes changes from a hillslope regime to a channel regime. Channels are recognized as discontinuities due to instability in the landforming processes above the basic scale. Below this threshold scale the processes are stable resulting in stable hillslopes and a curtailing of the development of a drainage network.

H21D-4 0920h INVITED

Transformation of TIN DEM Data into a Kinematic Cascade.

Oscar Palacios and Baltasar Cuevas (CEHID, CP, Montecillo, Mex 56230 MEXICO)
(D A Woolhiser, USDA-ARS, Tucson, AZ-sponsor)

The TIN_DEM models are constructed from a set of points where the slope changes abruptly, usually with Delaunay triangles. The drainage network is identified by those edges where the neighboring triangular facets have converging slopes. The use of these models in hydrology has been limited by: a) the existence of fictitious discontinuities in the drainage network, and b) the need to determine a cascade of reaches, to identify the facets that contribute to each reach and to determine the cascade of these facets. We have developed an algorithm that allows addition or deletion of points, without total network reconstruction, with interactive editing of the TIN_DEM in order to eliminate drainage network discontinuities. A second algorithm specifies a kinematic cascade for the reaches. Starting from the facets forming each reach, the algorithm, going in an upstream (sometimes downstream) direction identifies those facets that form the contributing area. For each of these facets it calculates the fraction of the upstream neighbors from which the facet receives water. With this information the exact contributing area of each reach, as well as the cascade of contributing facets are determined. These and infiltration algorithms have been incorporated into an integrated system, called SHIFT, that calculates the runoff in a watershed model. SHIFT is demonstrated at a computer poster presentation at this meeting.

H21D-5 0935h

Routing on a Triangular Irregular Network (TIN) Using 2-D Kinematic Equations with Finite Elements.

David C Goodrich (USDA-ARS, 2000 E. Allen Rd., Tucson, AZ 85719 and Grad. Student, Dept. of Hydrology, Univ. of Arizona)
D A Woolhiser (USDA-ARS, Tucson, AZ)

Triangular Irregular Networks (TIN) offer efficient surface topographic representation and are easily derived from standard digital mapping products. A methodology and preliminary results are presented to route directly over a TIN using 2-D kinematic equations with finite elements to approximate the spatial derivatives. Two cases are examined to treat the time derivative. The first is a standard finite difference treatment and the second employs a self correcting Runge-Kutta time integration scheme. In our approach each TIN element is quadasected to produce 15 local finite elements over which the routing computation is performed. 2-D linear basis functions are maintained to handle arbitrary TIN element orientation but a rotation of the local computational axis along the gradient reduces the problem to one dimension within the TIN element. Processing is done TIN by TIN element much like a processing a cascade of 1-D overland flow planes. When flow convergence of two TIN elements occurs a channel is introduced and routing through it is accomplished using standard 1-D finite difference approximations to the kinematic equations. With a minor increase in computational complexity over 1-D finite difference schemes the 2-D methodology can be used directly on a TIN DEM without the usual problems associated with grid DEM routing and the large storage requirements of a contour based DEM.

H21D-6 0950h

Hydrologic Modelling on a Triangulated Irregular Network

D. R. Maidment (Dept of Civil Engineering, University of Texas, Austin Tx 78712, 512-471-4620, Bitnet: maidment@utaivc)
D. Djokic and K.G. Lawrence

Watersheds may be delineated on a triangulated irregular network by releasing a cloud of "marbles" over the terrain, one at the centroid of each triangle, and following their flow path along the line of steepest descent across triangles and along their edges to the terrain boundary. The stream network is formed as the connected set of all edges over which marbles roll. From a given point on the stream network, the watershed is that set of triangles whose marbles roll over that point, plus a small area of divided triangles along the two paths of steepest ascent from the given point to the watershed boundary on either side of the stream. Within the watershed so delineated, a finite element model has been created for the two-dimensional flow of shallow water over the TIN surface. This model is limited to regions where there are no dry elements and fairly mild slopes. The results are applied to simulate stormwater flow over urban building sites. Further research is needed into methods for establishing boundary conditions for finite element computation, and into methods for integrating TIN and other types of digital elevation data so that the flow of water from outside the immediate site area can be combined with that generated on the site itself.

H21D-8 1020h INVITED

Hydrologic and Digital Terrain Modelling Using Vector Elevation Data

I D Moore (Department of Agricultural Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108; 612-625-6770; BITNET GQN6073@UMNACVX)
R B Grayson (Centre for Environmental Applied Hydrology, The Univeristy of Melbourne, Australia 3052

TAPES_CON, Topographic Analysis Programs for the Environmental Sciences - CONtour version, partitions catchments into a series of interconnected elements using vector contour elevation data. The method is based on a "stream-tube" analogy and assumes that contour lines are equipotential lines and that water flows orthogonal to the equipotential lines along streamlines. This form of partitioning provides a "natural" structure on which to build hydrologic models and allows complex three-dimensional flow problems to be reduced to a series of coupled one-dimensional problems. A disadvantage of the method is that it requires an order of magnitude more points than grid-based methods to adequately define the topography. TAPES_CON provides estimates of several topographic attributes of each element and the downslope connectivity between adjacent elements. Two simple process oriented hydrologic models are presented to demonstrate how the TAPES_CON partitioning can be used to structure models for simulating the hydrology of three-dimensional terrain: a subsurface flow-saturation overland flow model and a Hortonian overland flow model. Observed and predicted runoff hydrographs at various locations within a small laboratory sized micro-catchment and small catchments in Australia and the United States are presented together with the dynamic expansion and contraction of runoff source areas.

H21D-9 1040h INVITED

Uniformly Gridded Digital Elevation Data as Input to Distributed-Type Hydrologic Models

T.W. Gardner (Department of Geosciences, Penn State University, University Park, PA 16802; 814-863-2474)
R.L. Day (Department of Agronomy, Penn State University, University Park, PA 1680[illegible]; [illegible]65-1615),
K.F. Connors (Office for Remote Sensing of Earth Resources Penn State University, University Park, PA 16802; 814-863-3530)
(sponsor: D. Goodrich 003450604)

Topography of the land surface is a necessary parameter in water routing components of nearly all hydrologic models. The representation of that landscape with digital elevation models (ie. uniform grid, irregular triangles, etc.) or within the hydrologic model imposes important constrains for the simulation of water routing and generation. This research explores the utility and limitations of uniformly gridded, digital elevation data in two distributed-type hydrologic models, SPUR and ANSWERS. SPUR requires a land surface subdivided into a stream network and contributing areas. The network must be subdivided into links with associated topographic properties (length, slope, width). Contributing area properties (area, ave. slope and length) subdivided by link into right and left lateral and upland must also be calculated. Algorithms that extract this data (except link width) have been developed where definition of first order tributaries is user specified. In those cases where average size of contributing area greatly exceeds grid size, the model does not fully utilize one distinct advantage of the gridded data - the delineation of an individual flow path for every cell within the basin. This is an important attribute of uniform gridded data especially where the landscape is "complex" relative to data resolution. This attribute is more fully utilized in ANSWERS where the land surface is represented by a uniform, square grid of user specified size and flow can be apportioned to (split between) neighboring cells as a function of slope aspect. Furthermore, subsequent overlay of uniform, gridded elevation data with other GIS data (ie. soil, vegetation) needed in water quality analysis is generally more computationally efficient relative to irregular triangles. However, as the landscape becomes more uniform relative to the grid resolution, the advantage of gridded data decreases. Yet, uniformly gridded data does provide organization of the landscape into hydrologically meaningful units based upon flow path delineation.

H21D-10 1100h

Effects of Resolution of Digital Elevation Model Data on a Topographically Based Hydrologic Model

D M Wolock and C V Price (Both at: USGS, 810 Bear Tavern Rd, W Trenton, NJ 08628; 609-771-3989)

The effects of the resolution of digital elevation model (DEM) data on hydrologic model predictions of streamflow, depth to water table, and flow path were determined for TOPMODEL, a topographically based hydrologic model. The influence of topography on watershed hydrology previously has been incorporated in TOPMODEL as the frequency distribution of ln(a/tanB), where ln is the Naperian logaritha, a is the upslope area per unit contour, and tanB is the slope. The mean, variance, and skewness of this distribution were derived from 1:24,000-scale and 1:250,000-scale DEMs for several areas in the Delaware River basin. The means of the ln(a/tanB) distributions were lower for the 1:250,000-scale DEMs than for the 1:24,000-scale DEMs. The variances and skewnesses of the distributions, in contrast, were similar at both scales.

A sensitivity analysis of TOPMODEL showed that model predictions are sensitive to the mean of the ln(a/tanB) distribution. Compared to the 1:24,000-scale DEMs, the means of the ln(a/tanB) distributions derived from 1:250,000-scale DEMs resulted in lower predicted depth to water table, higher predicted ratio of surface runoff to subsurface runoff, and higher predicted peak flow. These results suggest that the use of 1:250,000-scale DEMs to derive topographic parameters for TOPMODEL is likely to introduce model prediction error.

H21D-11 1115h

Utilization of DEM Data to Investigate Hillslope and Channel Responses

E F Wood (Water Resources Program, Princeton University, Princeton, NJ 08544; (609) 452-4675; Bitnet EFWOOD @ PUCC)
K J Beven (Institute of Environmental and Biological Sciences, University of Lancaster, LA1 4YQ UK; (0524) 65201 x4312; Bitnet ESA021 @ CENTI.LANCS.AC.UK)
M Sivapalan (Centre for Water Research, The University of Western Australia, Nedlands, Western Australia 6009)

The availability of DEM data allows for the development of distributed hydrologic models that better reflect small scale variability in topography, soils and rainfall, thus allowing for the investigation of channel and hillslope responses over a range of scales. A model that combines both hillslope and channel responses was developed utilizing the area, width and slope functions derived from DEM data. This model was

H

This page may be freely copied.

and better understood. A solute transport model to predict chromium(VI) movement through soil columns was developed and verified. Of particular interest was the behavior of chromium(VI) in the presence of phosphate, another adsorbing anion. The model was developed under the assumption of one-dimensional, steady-state saturated groundwater flow through a homogeneous porous medium. Sorption of chromium(VI) and phosphate were described as a physical non-equilibrium process (mobile and immobile water phases) using the competitive Langmuir equation. Numerical solutions of the transport equations were obtained by the partially implicit finite difference method.

Laboratory experiments were conducted to determine kinetic and equilibrium sorption parameters for the model. Computer simulations were fitted to experimental breakthrough curves using estimates for model parameters which could not be determined independently in experiments. Chromium(VI) breakthrough experiments were successfully modeled for varying chromium concentrations as well as for the case of phosphate competition. This study demonstrated that the use of phosphate as a desorption agent is a possible way of increasing chromium(VI) desorption rates and, consequently, the effectiveness of chromium removal from contaminated soils. The results are being extended to field conditions.

POSTER

H22A BH:Brooks TUES 1300h

Use of Digital Elevation Data in Hydrologic Models Posters

Presiding: D Goodrich, USDA/Agricultural Research Service; D Woolhiser, USDA/Agricultural Research Service

H22A-1 1300h POSTER

Generation of Digital Elevation Models from Contours and Comparison of Topographic Indices

S. Timmins, M.A. Huston, and R.B. Clapp (Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831)

Topographically-based hydrologic models generally require elevation date in the matrix form of a Digital Elevation Model (DEM), rather than as contour lines. We report on an efficient linear interpolation algorithm that calculates DEMs from elevation contours and break-lines along ridges and valley bottoms, which can be simply digitized from topographic maps of any scale. Interpolation between contours is performed along pseudo-flow lines perpendicular to the contours. The endpoints of these flow lines are selected by a very fast integer grid-searching algorithm. High resolution grids preserve the detail required for topographically-based hydrologic models and are computationally efficient. By appropriate choice of horizontal and vertical resolutions, the effects of restricting hydrologic flow direction to increments of 45° around each grid square can be minimized. Topographic analyzes can be performed over a range of scales appropriate to the resolution of the elevational data. Topographic analysis of DEMs calculated for Walker Branch Watershed and Melton Branch Watershed in eastern Tennessee will be presented and used to compare hydrologic indices computed by S. Jenson's contributing area technique and by K. Beven's log (a/tan b) technique.

Research sponsored by the Ecological Reseach Division, Office of Health and Environmental Research, U.S. Department of Energy, under Contract No. DE-AC05-84OR21400 with Martin Marietta Energy Systems, Inc. Research conducted on the Oak Ridge Ecological Research Park.

H22A-2 1300h POSTER

SHIFT: A Distributed Runoff Model using Irregular Triangular Facets.

Baltasar Cuevas and Oscar Palacios (CEHID, CP, Montecillo, Mex 56230 MEXICO) (D C Goodrich, USDA-ARS, Tucson, AZ-sponsor)

SHIFT (Sistema Hidrologico de Facetas Triangulares) is a computational system that allows for the: a) creation, edition and visualization of a watershed TIN_DEM, b) input and interpolation of soil, riverbed and rainfall data, and c) calculation and routing of runoff in all the facets and reaches. The TIN_DEM model is constructed from a set of points, where the slope changes abruptly. Afterwards the drainage network is automaticaly identified and an interactive editor allows addition or deletion of points to eliminate network discontinuites. Soil characteristics and rainfall data are interpolated by means of a procedure based on the minimization of the bending energy of a thin plate. In order to calculate and route the runoff, the system determines the routing sequence of river segments and for each one of them identifies the facets forming the contributing area and determines a cascade of overland flow planes. Then for each element and time interval the system calculates the infiltration and routes the resultant runoff by a numerical solution of the kinematic wave equations. This information is saved and the user can see the hydrograph for any facet or reach. The system will be demostrated on a personal computer during a poster presentation using data from an experimental watershed.

H22A-3 1300h POSTER

A Physically-Based Rainfall-Runoff Model Based on Basin Topography

Maria C Cabral, David Tarboton, and Rafael L Bras (Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139)

The physical characteristics of a river basin, in particular its topography and properties of the soil profile, represent determining factors in the basin's hydrologic response. Topography effects all mechanisms of runoff generation; in particular, hillsope concavity and convergence determine proneness to downslope development of saturated areas. We introduce a physically-based, deterministic, distributed rainfall-runoff model which incorporates basin topography using DEM's. The model accounts for the primary mechanisms of runoff generation; namely, saturation excess overland flow, infiltration excess overland flow, saturated interflow, and return flow. A kinematic-wave approximation is used to model the advance of the wetting front, and possible development of a zone of perched saturation, in one dimension, in each grid element within the DEM. Redistribution of moisture between elements downslope is accounted for.

We present results of the sensitivity of rainfall-runoff response to hillslope topographic configuration, and soil hydrologic properties with depth.

H22A-4 1300h POSTER

Digital Representation of Terrain for Distributed Hydrological Simulation

L.E. Band (Department of Geography, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 1A1: 416-978-4975, Bitnet: lband@utorgpu), D.L. Peterson (NASA/Ames Research Center, Moffet Field, CA.) and S.W. Running (School of Forestry, University of Montana, Missoula, Montana)

A large, comprehensive database of watershed physical attributes is used to parameterize a distributed soil moisture and forest evapotranspiration and productivity model. The database includes digital topographic, soils and vegetation information drawn from remotely sensed images, digitized maps and digital elevation models. The distributed simulation of hydrologic flux requires suitable generalization and representation of the information such that physically and spatially distinct watershed objects may be directly parameterized. The approach taken here is to extract functional terrain units (subcatchments and hillslopes) and estimate their joint parameter distributions by a combination of empirical analysis of available data and inference of unavailable data variability from knowledge of topographic structure and variability.

H22A-5 1300h POSTER

Hydrological Modeling on a TIN-based Surface

D M Theobald (Department of Geography, University of California at Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106; 805-961-8539; bitnet theo@topdog.Ucsb.EDU)

Topography plays an important role in determining the runoff characteristics of a landscape. The triangular irregular network (TIN) DEM has several advantages over both the more commonly used grid-based DEM, such as continuity and a higher accuracy in slope estimation; and also digitized contour lines, advantages being a smaller storage size and holding the geometry and topology of a surface true. Also, the geomorphology of a surface often organizes a watershed into natural units which have homogeneous runoff characteristics (i.e. similar vegetation, soils, etc.). Data on runoff parameters are frequently stored in a vector-based GIS and can be easily integrated with the TIN structure.

A method for the automated delineation of stream and basin networks on a TIN surface will be outlined. This network information can be used to facilitate quantitative analysis of hydromorphic parameters of a basin such as basin and stream order and drainage density.

H22A-6 1300h POSTER

A Contour-Based Procedure for Modelling Hillslope Hydrology in Complex Topography

W.R. Dawes, D.L. Shon, E.M. O'Loughlin, C.J. Wilson (ACCH, CSIRO, Division of Water Resources, GPO 1666, Canberra, ACT, 2601, AUSTRALIA)

A major problem in modelling transient hydrologic processes in complex topography is the computational effort associated with solving D.E.'s for water moving in three dimensions. A common strategy for simplifying the flow equations is to manually sub-divide the landscape into flow paths and solve for lateral surface and subsurface flow in one dimension. The effectiveness of this strategy is often seriously compromised by 1) poor estimation of the upslope contributing area of the flow paths and, 2) ill-defined hydrologic boundaries (watersheds). In addition, the amount of operator time required to process large catchments often prohibits routine applied use of predictive hydrologic models by service agencies.

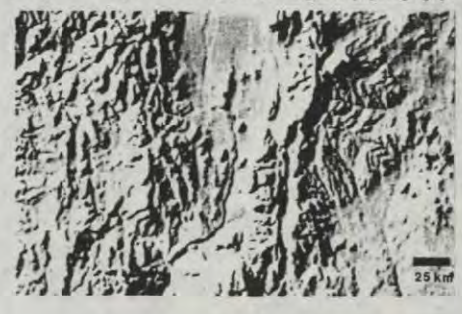
The shortcomings of this approach have been overcome by the implementation of an efficient, fully automated procedure which computes a network of elements aligned with the natural drainage of the landscape, and a hydrologically sound boundary, for the region of interest. The procedure uses topologically sound algorithms to handle such critical points and lines in the landscape as peaks, saddles, ridges, streams and confluences. Elements are bounded by contours and slope lines, and are arranged as bundles of flow tubes to allow valid one-dimensional routing of lateral subsurface and surface water. Contour input is supplied by Hutchinson's (1989) digital elevation model. The technique has been successfully applied to a wide range of landscapes, including catchments up to 700 ha in size. Calculation of a 5000 element network, including all internal connections, for a 260 ha catchment with 19 boundary, and 4 internal, peaks and saddles took less than 60 CPU s on a mid-range workstation.

H22A-7 1300h POSTER

Synoptic Topography From Digital Elevation Data

Richard J. Pike[1], Gail P. Thelin[2], and William Acevedo[2] (U.S. Geol. Survey: [1]Menlo Park, CA 94025; [2]Ames Research Center at Moffett Field, CA 94035)

Shaded-relief maps created by raster image-processing of very large digital-elevation models (computer method of Yoeli, 1967) contain much information for the regional analysis of hydrology, geomorphology, and tectonics. Such advantages of automated relief portrayal as broad areal coverage, topographic fidelity, speed, and simulation of terrain at any sun position are evident in two new images made by applying IDIMS software to DMATC-digitized contour maps. One, a revised 1:2,500,000-scale image of the conterminous U.S. (part of southern Rocky Mountains shown here), excels in depicting low-relief fluvial and glacial features of the midcontinent (12 million elevations at 800-m grid spacing; 0.32 mm/pixel picture resolution). A second image (1:500,000-scale; 9 million elevations at 75-m spacing; 0.14 mm/px resolution) emphasizes the view that rock structure and pre-Pleistocene erosion, not continental glaciation, had the greater impact on southern New England physiography.



This page may be freely copied.