

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
SUBDIRECCIÓN GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE POSGRADO

SIMULACION HIDROLOGICA Y DE EROSION DE SUELOS UTILIZANDO  
EL MODELO DISTRIBUIDO ANSWERS : APLICACION EN LA CUENCA  
DEL RIO PEJIBAYE, CARTAGO, COSTA RICA.

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico  
Académico del Programa de Estudios de Posgrado en  
Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro  
Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza,  
para optar al grado de :

*Magister Scientiae*

por :

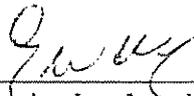
ROLANDO PORTILLA PASTOR

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza  
Turrialba, Costa Rica.

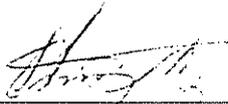
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

*MAGISTER SCIENTIAE*

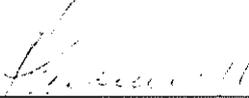
FIRMANTES:



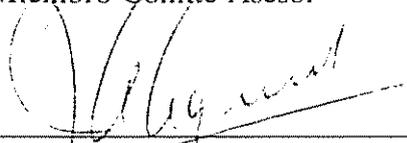
\_\_\_\_\_  
Gregorio Leclerck, Ph.D.  
Profesor Consejero



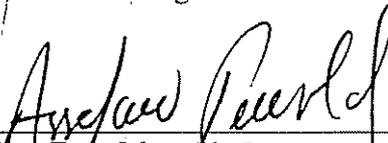
\_\_\_\_\_  
Sergio Velazquez, M.Sc  
Miembro Comité Asesor



\_\_\_\_\_  
Jorge Faustino, M.Sc  
Miembro Comité Asesor



\_\_\_\_\_  
Juan Antonio Aguirre, Ph.D.  
Jefe, Area de Postgrado



\_\_\_\_\_  
Assefaw Tewelde, Ph.D.  
Director, Programa de Enseñanza



\_\_\_\_\_  
Rolando Portilla P.  
Candidato

## DEDICATORIA

A MIS PADRES.

A TODOS AQUELLOS QUE LUCHAN POR LA PROTECCION Y  
CONSERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES EN EL PLANETA Y  
AQUELLOS QUE TRABAJAN POR HACER REALIDAD LA IDEA DE UN  
MUNDO DE PAZ Y DE AMOR.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento sincero a las siguientes personas e instituciones por su colaboración durante la ejecución de este trabajo de investigación.

Al profesor consejero Ph. D. Gregorio Leclerc por su valiosa orientación y ayuda durante todo el trabajo.

A los profesores M. Sc. Jorge Faustino y M. Sc. Sergio Velázquez por sus aportes en diversas etapas del trabajo.

Al Ph. D. Jean Collinet por su valiosa asesoría en materia de suelos.

Al personal de los Departamentos de Hidrología y Meteorología del ICE por las facilidades brindadas para la obtención de datos.

Al proyecto RENARM/CUENCAS. Fuente de beca.

## BIOGRAFIA

El autor nació en San José, Costa Rica el 23 de Febrero de 1959. Realizó sus estudios primarios en la Escuela Buenaventura Corrales entre 1966 y 1971 y los estudios secundarios en el Liceo José Joaquín Vargas Calvo entre 1972 y 1976.

En 1977 ingresa a la Universidad de Costa Rica donde obtiene la Licenciatura en Ingeniería Civil en el año de 1982.

Entre 1982 y 1984 labora para las empresas constructoras Carrez.S.A y LRH. Contratistas Generales en diversos proyectos de construcción.

En el año de 1984 ingresa al Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) donde labora como Ingeniero Supervisor de Proyectos hasta el año 1988.

En el año 1990 ingresa al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) donde trabaja como Ingeniero Civil en los proyectos hidroeléctricos P.A Fortuna y P.H Toro. A partir de Enero de 1993 ingresa al programa de posgrado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, obteniendo en Enero de 1995 el grado de Magister Scientiae.

## CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
BIOGRAFIA	v
CONTENIDO	vi
RESUMEN	x
SUMMARY	xii
INDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE CUADROS	xvi
ANEXOS	xvii

I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISION DE LITERATURA.....	6
2.1. Modelación hidrológica.....	6
2.2. Clases de modelos.....	7
2.2.1. Estructura del modelo y objeto de la modelación.....	10
2.2.1.1. Modelo de procesos individuales.....	10
2.2.1.2. Modelo de compomentes.....	11
2.2.1.3. Modelo integrado.....	11
2.2.1.4. Modelo global.....	11
2.2.2. El factor tiempo.....	12
2.2.2.1. Modelos estáticos.....	12
2.2.2.2. Modelos dinámicos.....	12
2.2.3. El valor cognoscitivo del modelo....	12
2.2.4. El carácter de los resultados obtenidos.....	13
2.2.5. El enfoque aplicado y los métodos de solución.....	13
2.2.6. Propiedades de la función de operación.....	14
2.3. Factores que intervienen en una modelación hidrológica y de erosión de suelos.....	16
2.3.1. Factores hidrológicos.....	16
2.3.2. Factores de erosión de suelos.....	19
2.4. Calibración y evaluación de modelos hidrológicos.....	23
2.4.1. Calibración.....	23
2.4.2. Evaluación.....	26
2.5. Criterios estadísticos para la evaluación de resultados.....	27
2.5.1. Calibración gráfica.....	27
2.5.2. Calibración numérica.....	28
2.6. Modelo USLE.....	32
2.7. Modelación hidrológica y Sistemas de Información Geográficos.....	35
2.7.1. Generalidades.....	35
2.7.2. Niveles de aplicación.....	36
2.7.2.1. Evaluación hidrológica.....	37

2.7.2.2.	Determinación de parámetros hidrológicos.....	37
2.7.2.3.	Modelación hidrológica dentro de los SIG.....	38
2.7.2.4.	Conexión SIG-Modelos hidrológicos.....	39
2.7.3.	Estructura de datos.....	40
2.7.4.	El futuro de la conexión SIG-Modelos hidrológicos.....	41
2.7.5.	Conclusiones.....	42
2.8.	Modelos de elevación digital.....	43
2.8.1.	Concepto general.....	43
2.8.2.	Tipos de estructuras en un modelo de elevación digital.....	44
2.8.3.	Análisis de datos de elevación.....	46
2.8.4.	Los parámetros del suelo y los modelos de elevación digital.....	46
2.9.	Comparación USLE-Modelos distribuidos para eventos.....	47
2.10.	Evolución en la modelación hidrológica.....	48
2.10.1.	Modelos empíricos y semiempíricos..	48
2.10.2.	Modelos agrupados y distribuidos..	49
2.10.3.	Información de campo.....	50
2.10.4.	Aplicación de los modelos hidrológicos y de erosión de suelos en Costa Rica.....	51
III.	MATERIALES Y METODOS.....	53
3.1.	Procedimiento general.....	53
3.2.	Modelo ANSWERS.....	53
3.2.1.	Generalidades y filosofía.....	53
3.2.2.	Consideraciones hidrológicas.....	55
3.2.3.	Ecuaciones matemáticas.....	56
3.2.3.1.	Infiltración.....	56
3.2.3.2.	Drenaje desde la zona de control.....	58
3.2.3.3.	Retención superficial.....	59
3.2.3.4.	Flujo base.....	60
3.2.3.5.	Escorrentía superficial....	60
3.2.3.6.	Separación de las partículas de suelo por efecto de la lluvia.....	62
3.2.3.7.	Separación de suelo por efecto de la escorrentía superficial.....	63
3.2.3.8.	Capacidad de transporte..	63
3.2.4.	Ventajas y limitaciones del modelo..	64
3.3.	Descripción de la unidad experimental.....	66
3.4.	Información básica para la aplicación del modelo.....	68
3.4.1.	Información requerida.....	68
3.4.2.	Fuentes de obtención de información	70
3.4.3.	Información de precipitación.....	71
3.4.3.1.	Registros de Precipitación	71
3.4.3.2.	Tormentas analizadas.....	74

3.4.4.	Información de suelos.....	74
3.4.4.1.	Parámetros de suelo.....	74
3.4.4.2.	Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.	
3.4.4.3.	Toma de muestras de suelo.	77
3.4.4.4.	Pruebas de laboratorio de suelos.....	77
3.4.4.5.	Mapa de suelos.....	79
3.4.5.	Información de infiltración.....	83
3.4.6.	Factor de erodabilidad del suelo USLE "K".....	87
3.4.7.	Información de cobertura vegetal y uso de la tierra.....	91
3.4.7.1.	Mapa de cobertura vegetal.	91
3.4.7.2.	Información de entrada....	91
3.4.8.	Información de canales naturales...	93
3.5.	Utilización de los Sistemas de Información Geográficos.....	96
3.5.1.	Sistema IDRISI.....	96
3.5.2.	Interface ANSWERS-IDRISI.....	96
3.6.	Modelo de elevación digital.....	98
3.7.	Esquema general del procedimiento.....	99
3.8.	Calibración del modelo.....	104
3.8.1.	Procedimiento general.....	104
3.8.2.	Calibraciones individuales.....	105
3.8.2.1.	Evento de baja.....	105
3.8.2.2.	Evento de alta.....	106
3.8.2.3.	Análisis de Sensibilidad..	106
3.8.2.4.	Evento de media.....	108
3.8.3.	Modelaciones integradas.....	108
3.8.4.	Cálculo de sedimentos totales.....	109
3.9.	Análisis estadístico.....	110
3.10.	Mapas de erosión y sedimentación.....	110
3.11.	Estudio comparativo de la erosión.....	110
3.12.	Modelación para diferentes escenarios....	111
3.13.	Evaluación del efecto del tamaño de pixel en la modelación.....	113
IV.	RESULTADOS.....	114
4.1.	Modelación inicial.....	114
4.2.	Modelaciones individuales para cada tormenta.....	117
4.2.1.	Ajuste estadístico.....	123
4.3.	Modelaciones integradas.....	130
4.4.	Estudio comparativo de la erosión.....	133
4.5.	Determinación de las zonas de máxima erosión.....	139
4.6.	Modelación para diferentes escenarios.....	140
4.7.	Análisis de sensibilidad.....	162
4.8.	Efecto del tamaño del pixel en la modelación.....	163
4.9.	Efecto de la red de drenaje en la modelación.....	169
V.	CONCLUSIONES.....	172

VI. RECOMENDACIONES.....	177
VII. BIBLIOGRAFIA.....	181
VIII. ANEXOS	
8.1. ANEXO 1.....	185
8.2. ANEXO 2.....	215
8.3. ANEXO 3.....	236

PORTILLA PASTOR, ROLANDO. 1994. Simulación hidrológica y de erosión de suelos utilizando el modelo distribuido ANSWERS : Aplicación en la cuenca del Río Pejibaye, Cartago, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 243 p.

Palabras claves: Manejo de cuencas, modelación, erosión de suelos, sedimentación, modelos distribuidos, calibración, Sistemas de Información Geográfico, USLE, escorrentia, concentración de sedimentos.

## RESUMEN

El mal manejo de las cuencas hidrográficas ha ocasionado un deterioro del recurso hídrico y un incremento del proceso erosivo de suelos.

La erosión de suelos constituye un fenómeno que afecta significativamente a muchas actividades productivas en los países latinoamericanos ocasionando repercusiones económicas importantes. Perdemos a tasas sumamente elevadas uno de nuestros recursos productivos mas valiosos. Es necesario por lo tanto buscar metodologías, técnicas y prácticas que contribuyan a una reducción de este fenómeno.

Dentro de este panorama, la aplicación de modelos hidrológicos y de erosión de suelos constituye una valiosa herramienta para la planificación de recursos hídricos y el manejo racional de recursos naturales.

El objetivo de esta investigación fué efectuar una modelación hidrológica y de erosión de suelos utilizando el modelo distribuido ANSWERS ( Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)

Los objetivos específicos del estudio fueron los siguientes:

1. Procurar la calibración del modelo ANSWERS utilizando información de campo de la cuenca.
2. Estimar las zonas productoras de erosión y sedimentación de suelos en la cuenca y cuantificar sus tasas correspondientes.
3. Efectuar una comparación entre el régimen de producción y arrastre de sedimentos entre la parte media y alta de la cuenca cubierta de bosque y de alta pendiente y la parte baja de relieve ondulado y sujeta a prácticas agrícolas.

La información para alimentar el modelo se obtuvo de diversas fuentes, principalmente : Estaciones fluviográficas y pluviográficas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), pruebas de laboratorio de suelos para muestras obtenidas en la cuenca, imágenes de satélite, así como información de fuentes bibliográficas relacionadas.

Los resultados obtenidos produjeron las siguientes conclusiones:

1. Los ajustes gráficos y numéricos obtenidos para las diferentes modelaciones efectuadas permiten concluir que es factible la calibración del modelo ANSWERS para la cuenca del río Pejibaye. Se obtuvieron buenos ajustes para caudales y sedimentos totales mientras que para concentración de sedimentos los ajustes obtenidos son en general pobres.
2. Por medio de mapas producidos se determinó la distribución espacial de la erosión y la sedimentación en la cuenca. Las zonas de máxima erosión y sedimentación se ubican en la parte baja de la cuenca.
3. Existen diferencias importantes entre el aporte de sedimentos de la parte alta de la cuenca (bosque) y la parte baja (zona intervenida). Las modelaciones efectuadas reflejan un aporte del bosque entre un 2.5 a un 11 % para los eventos considerados.

Como complemento a esta investigación y con el fin de evaluar el potencial de utilización del modelo para aplicaciones en el manejo de cuencas, se modelaron diferentes escenarios hipotéticos en los que principalmente se cambió el uso del suelo de zonas de bosque primario y secundario a distintos usos agrícolas. Los resultados reflejaron que este tipo de cambios produce modificaciones importantes en el régimen hídrico y en la producción y arrastre de sedimentos en la cuenca.

También se modeló la condición actual en la cuenca considerando que es sometida a prácticas de conservación de suelos. Los resultados reflejaron que las prácticas producirían una disminución importante en la producción de sedimentos, reduciéndose estas tasas en aproximadamente 25 % con respecto a la condición actual.

PORTILLA PASTOR, ROLANDO. 1994. Hydrologic and soil erosion Simulation utilizing the distributed model ANSWERS: Application in the Pejibaye river watershed, Cartago, Costa Rica. Mag.Sc Thesis. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 243p.

Key words : Watershed management, simulation, soil erosion, sedimentation, distributed models, calibration, Geographic Information Systems, USLE, Surface runoff, sediment concentration.

### ABSTRACT

Bad watershed management has caused hydrologic resource deterioration and an increased in the process of soil erosion.

Soil erosion is a phenomenon affecting many productive activities in Latin America, thus causing important economic repercussions. We lose one of our most productive resources at high rates. It is necessary to develop methodologies, techniques and practices which contribute to reduce this phenomenon.

The application of hydrologic and soil erosion models constitutes a valuable tool for planning of hidrologic resources and rational management of natural resources.

The overoll objective of this investigation was to put into effect a hidrologic and soil erosion model utilizing the distributed model ANSWERS ( Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation).

Specific research objectives were as follows:

1. To procure the calibration of the ANSWERS model utilizing watershed field data.
2. To locate zones producing erosion and soil sedimentation in the watershed with quantification of corresponding rates.
3. Compare the system producing and transporting sediments at the middle and upper parts of forest covered watershed on a steep incline to the system on the lower sloping relief subject to agricultural practices.

Data used for running model was obtained from varios sources, principally fluviografic and pluviografic seasons from ICE, laboratory experiments with soil samples from the watershed, satellite images and information from related bibliographic sources.

Research findings lead to the following conclusion:

1. Graphic and numerical adjustments obtained for the various simulations carried out lead to the conclusion that the calibration of the ANSWERS model is feasible for the Pejibaye watershed. Reliable adjustments were obtained for total sediment and flow although adjustments for sediment concentration were generally poor.
2. The spatial distribution of watershed erosion and sediment was determined by maps produced for the investigation. Zones of maximum erosion and sedimentation are located in the lower watershed.
3. Important differences exist between the sediment contribution of the high part of the watershed (forest) and the lower part (exploited zone). The simulations carried out reflect a contribution of the forest between 2.5 to 11 % for the storms considered.

As a complement to this investigation and with the goal of evaluating the potential use of the model for application in watershed management, different hypothetical settings were simulated. In these simulations, the principal change was in soil use in primary and secondary forest by different agricultural practices. The results indicate that these changes produce important modifications in the hydrologic systems and in the production and transport of sediments in the watershed.

Actual conditions in the watershed were also simulated since it is influenced by soil conservation practices. Results indicate that these practices can produce a significant reduction in sediment production, reducing these rates approximately 25 % with respect to actual conditions.

## INDICE DE FIGURAS

Figura N <sup>o</sup>		Pag
1	Clasificación de modelos.....	8
2	Procesos Hidrológicos considerados en el modelo.....	17
3	Producción y transporte de sedimento.....	22
4	Diagrama de flujo del modelo ANSWERS.....	57
5	Red de drenaje de la cuenca del río Pejibaye..	69
6	Estaciones pluviográficas y polígonos de Thiessen.....	72
7	Contorno de cuenca.....	76
8	Napa textural de suelos.....	81
9	Clases hidrológicas de suelos.....	84
10	Bandas de confiabilidad. Conductividad Hidráulica.....	88
11	Cobertura y uso de la tierra.....	92
12	Red de drenaje. Cuenca Río Pejibaye.....	95
13	Mapa de elevaciones.....	100
14	Mapa de pendiente.....	101
15	Mapa de aspecto.....	102
16	Esquema general del funcionamiento del modelo.	103
17	Resultado modelación inicial.....	116
18	Mejor ajuste gráfico. Evento de baja.....	120
19	Mejor ajuste gráfico. Evento de alta.....	122
20	Mejor ajuste gráfico. Evento de media.....	124
21	Distribución espacial de la precipitación total.....	136
22	Mapa de erosión. Evento 24/8/93.....	125
23	Mapa de erosión. Evento 21/9/82.....	126

24	Mapa de erosión. Evento 13/6/94.....	127
25	Escenario N° 1 (mapa).....	146
26	Escenario N° 2 (mapa).....	147
27	Escenario N° 3 (mapa).....	148
28	Escenario N° 4 (mapa).....	149
29	Escenario N° 5 (mapa).....	150
30	Escenario N° 6 (mapa).....	151
31	Escenario N° 7 (mapa).....	152
32	Condición actual (mapa).....	153
33	Condición actual (gráfico).....	154
34	Escenario N°1 (gráfico).....	155
35	Escenario N°2 (gráfico).....	156
36	Escenario N°3 (gráfico).....	157
37	Escenario N°4 (gráfico).....	158
38	Escenario N°5 (gráfico).....	159
39	Escenario N°6 (gráfico).....	160
40	Practicas de conservación(gráfico).....	161
41	Grafica con modelación para pixel de 16 has....	165
42	Gráfica con modelación para pixel de 1 ha.....	166
43	Mapa pixel de 16 has.....	167
44	Mapa pixel de 1 ha.....	168

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Pag.
Cuadro # 1.	Propiedades del suelo por sitio.....	78
Cuadro # 2.	Textura por sitios.....	80
Cuadro # 3.	Valores de USLE "K".....	90
Cuadro # 4.	Resultados Evento de Baja.....	119
Cuadro # 5.	Resultados Evento de Alta.....	121
Cuadro # 6.	Resultados Evento de Media.....	123
Cuadro # 7.	Resultados Set N° 5.....	131
Cuadro # 8.	Resultados Set N° 6.....	131
Cuadro # 9.	Resultados Set N° 7.....	132
Cuadro # 10	Resultados Set N° 8.....	132
Cuadro # 11	Resultados Set N° 9.....	133
Cuadro # 12	Estudio Comparativo Por Subcuencas. Sedimentos Totales.....	135
Cuadro # 13	Hietogramas Sintéticos.....	138
Cuadro # 14	Modelación de Escenarios.....	141
Cuadro # 15	Efecto del Pixel en la modelación.....	164
Cuadro # 16	Análisis Comparativo de Drenaje.....	171

## INDICE DE ANEXOS

	Pag
ANEXO 1.....	185
Figura N01. División de la Cuenca en elementos formando cuadrícula.....	186
Figura N02. Evento de Alta.Estudio Comparativo por Subcuencas.....	187
Figura N03. Evento de Media.Estudio Comparativo por Subcuencas.....	188
Figura N04. Evento de Baja.Estudio Comparativo por Subcuencas.....	189
Figura N05. Ajuste Estadístico. Evento 13/6/94.....	190
Figura N06. Ajuste Estadístico. Evento 24/8/93.....	191
Figura N07. Ajuste Estadístico. Evento 21/9/82.....	192
Cuadro N01. Información Básica Modelo ANSWERS.....	193
Cuadro #2A. Estación El Humo.Evento 24/8/93. Registro de Precipitación.....	195
Cuadro #2B. Estación Oriente-Taus.Evento 24/8/93. Registro de precipitación.....	196
Cuadro #2C. Estación Tábano-Gato. Evento 24/8/93 Registro de Precipitación.....	196
Cuadro #2D. Estación T.Seis-Destierro. Evento 24/8/93 Registro de Precipitación.....	197
Cuadro #2E. Estación El Humo. Evento 13/6/94. Registro de Precipitación.....	198
Cuadro #2F. Estación T.Seis-Destierro.Evento 13/6/94 Registro de Precipitación.....	199
Cuadro #2G. Estación Oriente-Taus. Evento 13/6/94 Registro de Precipitación.....	200
Cuadro #2H. Estación Tábano-Gato. Evento 13/6/94 Registro de Precipitación.....	200
Cuadro #2I. Estación El Humo. Evento 21/9/82 Registro de Precipitación.....	201

Cuadro #2J.	Estación Oriente Taus. Evento 21/9/82....	201
Cuadro #2K.	Estación Tábano-Gato.Evento 21/9/82. Registro de Precipitación.....	202
Cuadro #2L.	Estación T.Seis-Destierro.Evento 21/9/82 Registro de Precipitación.....	202
Cuadro #3.	Cálculo de los Períodos de Retorno por Evento.....	203
Cuadro #4.	Ubicación Geográfica de Sitios de Muestreo.....	204
Cuadro #5A.	Set N°1.....	205
Cuadro #5B.	Set N°2.....	206
Cuadro #5C.	Set N°3.....	207
Cuadro #5D.	Set N°4.....	208
Cuadro #5E.	Set N°5.....	209
Cuadro #5F.	Set N°6.....	210
Cuadro #5G.	Set N°7.....	211
Cuadro #5H.	Set N°8.....	212
Cuadro #5I.	Set N°9.....	213
Cuadro # 6	Rangos de Variación de Factores de Infiltración.....	214
<b>ANEXO 2.....</b>		<b>215</b>
Cuadro 1	Indices de Sensibilidad. Evento de Baja....	216
Cuadro 2	Indices de Sensibilidad. Evento de Alta...	217
Fig # 1	Indices Sens.Evento de Baja. Caudal Pico..	218
Fig # 2	Indices de Sensibilidad Evento de Baja. Conc.Sed.....	219
Fig # 3	Indices de Sensibilidad Evento de Baja. Sedim. Totales.....	220
Fig # 4	Indices Sens.Evento de Alta.Caudal Pico....	221
Fig # 5	Indices Sens.Evento Alta.Conc.Sedimentos...	222

Fig # 6	Indices Sensib.Evento Alta.Sedim.Totales...	223
Fig # 7	Caudal Pico vs Porosidad.....	224
Fig # 8	Caudal Pico vs Inf.Minima FC.....	225
Fig # 9	Caudal Pico vs Profundidad de Control.....	226
Fig # 10	Caudal Pico vs Humedad Antecedente.....	227
Fig # 11	Conc.Sed vs Inf.Minima FC.....	228
Fig # 12	Conc.Sed vs Humedad Antecedente.....	229
Fig # 13	Conc.Sed vs USLE "K".....	230
Fig # 14	Conc.Sed vs USLE "C".....	231
Fig # 15	Sedim.Totales vs Inf.Minima.....	232
Fig # 16	Sedim.Totales vs Humedad Antecedente.....	233
Fig # 17	Sedim.Totales vs USLE "K".....	234
Fig # 18	Sedim.Totales vs USLE "C".....	235
ANEXO 3.....		236

## I. INTRODUCCION.

El mal manejo de los recursos naturales en las cuencas hidrográficas de los países latinoamericanos, ha ocasionado entre otros problemas alteraciones hidrológicas y un incremento en la erosión de suelos.

Vemos así que la pérdida de cobertura boscosa de muchas tierras para dedicarlas a actividades agrícolas y ganaderas, sobre todo cuando esto ocurre en zonas de alta pendiente, ha fomentado el proceso erosivo de los suelos y una modificación estacional del régimen de caudales de los ríos.

Como consecuencia de esta acelerada erosión de tierras se pueden presentar consecuencias graves, entre ellas, una pérdida gradual de la capacidad productiva de la tierra, alteraciones en el régimen hídrico de las cuencas, sedimentación de embalses, pérdida de calidad de agua, alteraciones ecológicas y otras.

Quesada (1990), señala que dentro del sector agropecuario uno de los fenómenos que causa los problemas de mayor magnitud es la expansión de la frontera agrícola a expensas de la cobertura forestal en áreas frágiles, lo cual provoca erosión de suelos, que afecta la diversidad biológica, el desarrollo de los recursos hidráulicos aguas abajo, principalmente a causa de la sedimentación de embalses.

La erosión de suelos constituye por lo tanto un fenómeno

que afecta significativamente muchas actividades productivas, teniendo por lo consiguiente repercusiones económicas importantes.

Perdemos a tasas sumamente elevadas uno de nuestros recursos productivos más valiosos y es por lo tanto imprescindible buscar metodologías, técnicas y prácticas que conduzcan a una reducción sustancial de este fenómeno.

La aplicación de modelos de erosión de suelos como el sugerido en este proyecto permitiría simular el proceso escorrentía-erosión en una cuenca y a través de este determinar y cuantificar la producción y arrastre de sedimentos en las diferentes zonas de la misma incluyendo los cauces de los ríos. Esto convierte a los modelos en una valiosa herramienta ya que permite determinar también las zonas críticas en cuanto a producción de sedimentos y así con esto poder definir las acciones apropiadas para tratar de minimizar los efectos de la erosión o definir la estrategia para atacar los problemas en dichas áreas críticas.

Con base en la utilización de los modelos hidrológicos y de erosión de suelos se podría así establecer una priorización de zonas de erosión, lo cual permitiría la asignación de recursos económicos en una forma óptima, de modo que se atiendan en forma preferencial las zonas más afectadas o de mayor impacto.

Otra aplicación importante de este tipo de modelos es su utilización para la determinación de la vida útil de un embalse en un proyecto hidroeléctrico por medio de la

estimación de los volúmenes de sedimento que ingresan al mismo en un determinado período.

La modelación hidrológica y de erosión de suelos constituye por lo tanto un instrumento muy valioso para el manejo integrado de nuestras cuencas hidrográficas y el uso racional de nuestros recursos naturales, en especial el recurso suelo.

El objetivo general de esta investigación fué efectuar una simulación hidrológica y de erosión de suelos utilizando modelación espacial en la cuenca del Río Pejibaye en Cartago, Costa Rica . Se utilizó el modelo distribuido denominado ANSWERS ( Aereal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation).

Este trabajo constituye la primera aplicación de un modelo distribuido que se efectua en Costa Rica. En el se exploró el comportamiento del modelo para las condiciones fisiográficas y meteorológicas de la cuenca mencionada. Por tratarse de una primera aplicación, no se prestó mucho énfasis al proceso de calibración sino que se trató de abarcar los principales aspectos involucrados en su utilización para llegar a sugerencias o recomendaciones finales que sean tomadas en cuenta para trabajos futuros que involucren un nivel de detalle mayor.

Esta investigación debe verse como un trabajo pionero en este campo que no pretende ser definitivo ni concluyente, sino que abre una opción, un camino para continuar

investigando acerca de la utilización de modelos distribuidos como herramienta de apoyo para el manejo de cuencas hidrográficas.

Para cumplir con el objetivo general se definieron los siguientes objetivos específicos:

1. Procurar la calibración del modelo utilizando información de campo de la cuenca.
2. Estimar las zonas productoras de erosión y sedimentación de suelos en la cuenca y cuantificar sus tasas correspondientes.
3. Efectuar un análisis comparativo del régimen de producción y arrastre de sedimentos entre la parte media y alta de la cuenca, cubierta de bosque y la parte baja de la misma, sujeta a prácticas agrícolas y desarrollo urbano.

Las hipótesis relacionadas a estos objetivos son las siguientes:

1. El modelo "ANSWERS" puede ser calibrado en forma confiable para la simulación del proceso hidrológico y de erosión de suelos en la cuenca del Río Pejibaye.
2. El modelo "ANSWERS" puede utilizarse para representar en

forma apropiada la distribución espacial de los procesos de erosión y sedimentación en la cuenca del Río Pejibaye.

3. Existen diferencias significativas entre el régimen de producción y arrastre de sedimentos de la parte alta de la cuenca ( sector boscoso y de alta pendiente) y la parte baja de la misma ( zona agrícola y urbana , de relieve ondulado y plano).

Esta investigación se efectuó de Febrero a Noviembre de 1994, posterior a un trabajo de asistencia de investigación relacionado con el tema.

## II. REVISION DE LITERATURA.

### 2.1. Modelación hidrológica.

Podemos definir un modelo como una representación simplificada de un sistema real complejo. Una parcela experimental, una ecuación matemática que relaciona factores, son modelos.

En la ciencia, al plantear hipótesis y evaluarlas por medio de experimentos se están elaborando y validando modelos. Por ejemplo la representación gráfica de una curva de respuesta de un cultivo a un fertilizante representa un modelo. (Woolhiser, D.A y Brakiensiek, D.L. 1978).

Un sistema es un grupo de partes conectadas que forman un conjunto (Chow, V.T. et al., 1988).

A partir de esto, Arguello (1992) establece que un modelo es definido como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social al que es análogo en determinado sentido.

Los modelos hidrológicos pretenden representar el sistema definido por el ciclo hidrológico. El objetivo fundamental de un modelo hidrológico es obtener los valores de escurrimiento (parámetro desconocido) en función de los valores de la precipitación (valores conocidos).

Para realizar la representación del sistema, un modelo hidrológico se fundamenta en las características de humedad

del suelo, su sistema de drenaje y de percolación y en las características de evapotranspiración de la cuenca.

Woolhiser y Brakensiek (1982), afirman que los modelos hidrológicos representan el ciclo hidrológico en diferentes maneras. Las leyes de conservación de la masa, conservación de la energía y el momentum se incluyen en un set de principios teóricos usados para explicar el ciclo hidrológico. Uno o mas de estos principios conjuntamente con varias relaciones empíricas, constituyen la base de la mayoría de los modelos que se utilizan en cuencas pequeñas.

## 2.2. Clases de modelos.

Woolhiser y Brakensiek (1982), efectuaron la clasificación esquemática de modelos que se presenta en la figura N° 1.

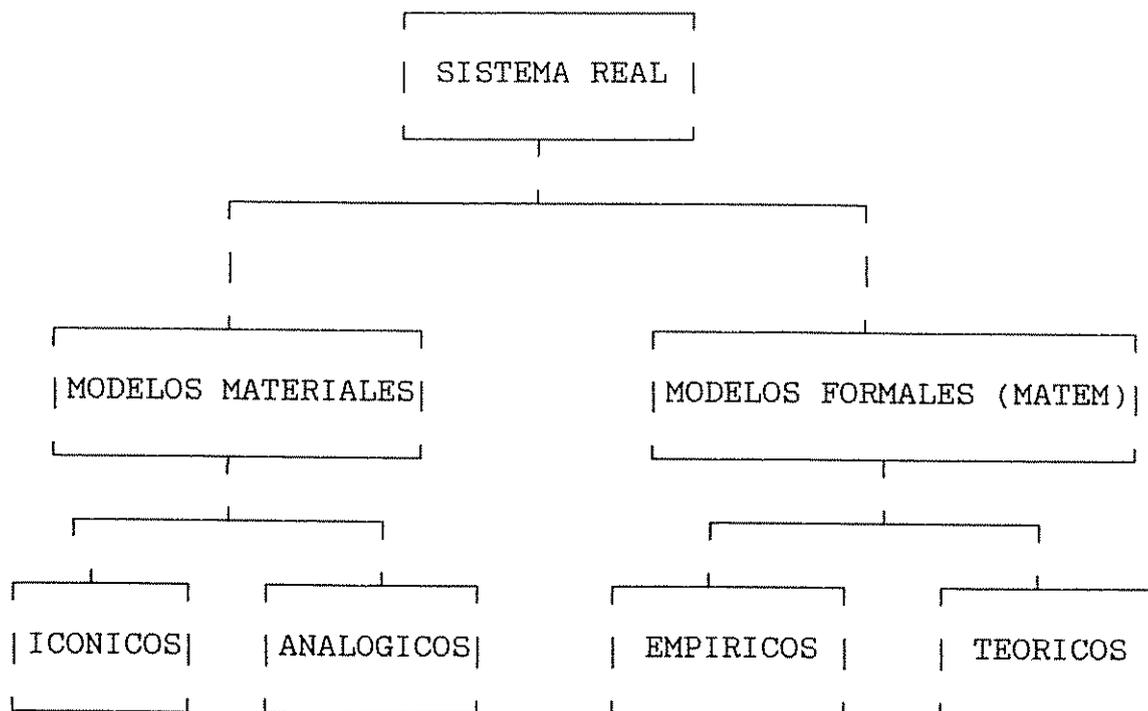


Figura Nº 1. Clasificación de Modelos.

De acuerdo a este criterio general podemos dividir a los modelos en dos grandes categorías : Modelos Formales y Modelos Materiales.

Un modelo formal o intelectual es una representación simbólica, usualmente matemática, de una situación idealizada que posee las propiedades estructurales mas importantes del sistema real.

Un modelo material es una representación física de un sistema complejo que se supone tiene propiedades similares a los del sistema prototipo.

Los modelos materiales se subdividen en icónicos o

analógicos. Un modelo icónico es una versión simplificada del sistema real. Este requiere por lo tanto el mismo tipo de materiales que el sistema real. Como ejemplo de este tipo de modelos se pueden mencionar los simuladores de lluvia, maquetas hidráulicas, lisímetros entre otros. ( Woolhiser, D.A y Brakensiek, D.l. 1982 ).

Los modelos analógicos consisten en dispositivos eléctricos o mecánicos contruidos de modo que sus componentes tengan características equivalentes a las del sistema real. Ejemplos de un sistema analógico pueden ser el flujo de agua representado por la corriente eléctrica en un circuito o la deflexión de una membrana representando el abatimiento del nivel freático.

Por su parte, los modelos formales o matemáticos pueden subdividirse en modelos teóricos o modelos empíricos.

Un modelo teórico incluye un grupo de leyes generales o principios teóricos y un grupo de postulados empíricos.

Un modelo empírico no considera las leyes generales y constituye en realidad una representación de datos.

Los modelos teóricos a menudo incluyen componentes empíricos. Así por ejemplo, los problemas de flujo de agua en cuencas pequeñas son generalmente descritas por la ecuación de conservación de la materia y de la conservación del momentum, la cual contiene un término hidráulico de carácter empírico. Asimismo, los problemas de flujo subterráneo utilizan una ecuación empírica, la ecuación de Darcy.

La teoría y el empirismo están tan mezclados actualmente que la mayoría de los modelos hidrológicos pueden considerarse como híbridos, es decir que involucran tanto componentes teóricos como empíricos. ( Woolhiser, D.A y Brakensiek, D.L. 1982 )

Todos los modelos formales en hidrología son modelos matemáticos. Zielinska (1976), citada por Wolhiser y Brakensiek (1982) propone clasificar los modelos matemáticos de acuerdo a los siguientes criterios:

### **2.2.1 Estructura del modelo y el objeto de la modelación**

Este primer criterio se relaciona con que proceso o procesos del ciclo hidrológico están incluidos en el modelo y cual es su nivel de abstracción. De acuerdo a esto, pueden identificarse 4 niveles:

#### **2.2.1.1. Modelo de procesos individuales**

Constituye una descripción matemática de solamente uno de los procesos físicos involucrados en el ciclo hidrológico. Un ejemplo de este tipo de modelos podría ser un modelo de evaporación a partir de una superficie libre del agua.

En este modelo de evaporación, la variable de salida podría ser la tasa de transporte de agua desde la superficie libre, mientras que las variables de entrada podrían ser la radiación neta, la velocidad del viento, el déficit de la

presión de vapor entre otros.

#### 2.2.1.2 Modelo de componentes

Este tipo de modelos, consisten en una serie de modelos de procesos individuales relacionados entre sí. Este modelo contiene además un componente que se encarga de distribuir el flujo de agua hacia los diferentes componentes en el orden apropiado.

Ejemplos de modelos de componentes podrían ser los de evapotranspiración, escorrentía directa, erosión y flujo subsuperficial. Un modelo de evapotranspiración por ejemplo, relacionaría modelos de procesos individuales que describan interceptación, evaporación en el suelo y en las plantas, movimiento de agua en el suelo, reacción de las plantas al stress entre otros.

#### 2.2.1.3. Modelo integrado.

Un modelo integrado consiste en un grupo de modelos de componentes conjuntamente con un operador que distribuye el flujo de agua a los componentes individuales en el orden apropiado.

#### 2.2.1.4. Modelo global.

Este tipo de modelos son alternativas de los modelos integrados. Su estructura es mucho más simple que en el modelo integrado. En él se supone que hay una función que relaciona un grupo de variables de entrada y de salida, en

vez de considerar vínculos o relaciones entre los modelos de componentes

### **2.2.2. El factor Tiempo.**

De acuerdo a este segundo criterio de clasificación, los modelos matemáticos pueden clasificarse en estáticos o dinámicos.

#### **2.2.2.1. Modelos estáticos.**

Los modelos estáticos no toman en cuenta el factor tiempo como una variable independiente. Ecuaciones empíricas o modelos de regresión en donde el tiempo no es considerado son ejemplo de este tipo de modelos.

#### **2.2.2.2. Modelos Dinámicos.**

Los modelos dinámicos describen el desempeño de un sistema a lo largo del tiempo . Requieren ecuaciones diferenciales con el tiempo como variable independiente de modo que pueden mostrar el comportamiento de la variable de respuesta a lo largo del tiempo.

### **2.2.3. El valor cognoscitivo del modelo.**

De acuerdo a este criterio, se clasifican los modelos en: Modelos de base física y modelos conceptuales.

Los modelos de base física son aquellos en los cuales

las leyes físicas involucradas y la estructura del modelo son bien conocidos y pueden ser descritos por ecuaciones físico-matemáticas.

Los modelos conceptuales son simplificaciones de sistemas en los cuales la estructura del modelo y las leyes físicas gobernantes se desconocen o bien son sumamente complicadas.

#### 2.2.4. El carácter de los resultados obtenidos.

De acuerdo a este criterio los modelos pueden clasificarse en modelos estocásticos o modelos determinísticos.

Un modelo estocástico es aquel en el que sus variables son aleatorias, con una distribución determinada de probabilidad.

Por otra parte, si las variables involucradas en el modelo se consideran no aleatorias, el modelo se considera determinístico.

#### 2.2.5. El enfoque aplicado y los métodos de solución.

Los sistemas en modelación pueden ser considerados como sistemas de "caja negra" o de "caja blanca". El enfoque de "caja negra" considera el sistema como un operador que transforma entradas en salidas, sin ocuparse de los procesos internos involucrados.

El enfoque de "caja blanca" por el contrario, considera que las leyes físicas y la naturaleza del sistema son conocidas y pueden sintetizarse dentro de un sistema de operación sin recurrir únicamente a datos de entrada y salida.

Krasovskia (1993) extiende la anterior clasificación definiendo los modelos de "caja gris", un punto intermedio entre los anteriormente mencionados, como aquellos en los que algunos detalles de como el sistema funciona son conocidos.

#### 2.2.6. Propiedades de la función de operación.

Bajo este último criterio, los modelos pueden clasificarse como lineales o no lineales, agrupados o distribuidos y estacionarios o no estacionarios.

Un modelo puede considerarse lineal desde dos puntos de vista: Puede ser considerado lineal desde el punto de vista de la teoría de sistemas si el principio de superposición es válido. Por otra parte un modelo puede ser lineal desde el punto de vista estadístico, es decir si existe linealidad en los parámetros que van a ser estimados.

Un modelo agrupado es aquel que no toma en cuenta explícitamente la variabilidad espacial de las variables de entrada y salida. Un modelo agrupado considera la cuenca como un todo y utiliza técnicas para obtener valores promedio que caractericen la influencia de distribuciones no uniformes

de cada parámetro (Beasley, D.B. 1984).

Los modelos agrupados son de las formas más simples de modelos. Un inconveniente en el uso de este tipo de modelos es que probablemente no es posible obtener un solo valor para un parámetro que varía espacialmente y que permita al modelo predecir la respuesta media del área modelada. La integración espacial a nivel de cuenca es difícil debido a la típica respuesta no lineal de una cuenca. ( Moore and Gallant, 1991, citado por Moore et al. 1991 )

Un modelo distribuido si considera la variación espacial de las variables de entrada, salida y parámetros involucrados.

La mayoría de los modelos distribuidos dividen el área de estudio en una cuadrícula procurando uniformidad de las variables o parámetros dentro de cada celda o pixel de dicha cuadrícula.

Es de esperar que la mayor representatividad espacial que realiza un modelo distribuido resulte en una mejor simulación del comportamiento de una cuenca hidrográfica.

Un modelo es estacionario si su forma y parámetros no varían con el tiempo, de otra manera es no estacionario.

## 2.3. Factores que intervienen en una modelación hidrológica y de erosión de suelos.

### 2.3.1. Factores Hidrológicos.

Beasley (1984), describe en forma cualitativa los procesos principales que intervienen en una modelación hidrosedimentológica ( ver figura Nº 2 ).

La fuente principal de agua que alimenta el ciclo hidrológico es la precipitación. Una vez que la precipitación inicia, parte de esta es interceptada por la vegetación hasta que el almacenamiento potencial por interceptación es completado.

Cuando la tasa de precipitación supera la capacidad de almacenamiento por interceptación, el agua llega al suelo y la infiltración se inicia.

El agua infiltrada puede tener varios destinos, si el nivel freático es superficial, de modo que exista transporte capilar hacia la superficie, se produce una constante evaporación. La vegetación también extrae agua del suelo y la evapora por medio de la transpiración ( Solís, H. 1993).

Debido a que la tasa de infiltración disminuye en forma exponencial al aumentar el almacenamiento de agua en el suelo, existe un punto en el que la tasa de precipitación supera a la suma de las tasas de interceptación e infiltración. Al ocurrir esto, el agua comienza a almacenarse en depresiones de la superficie del suelo.

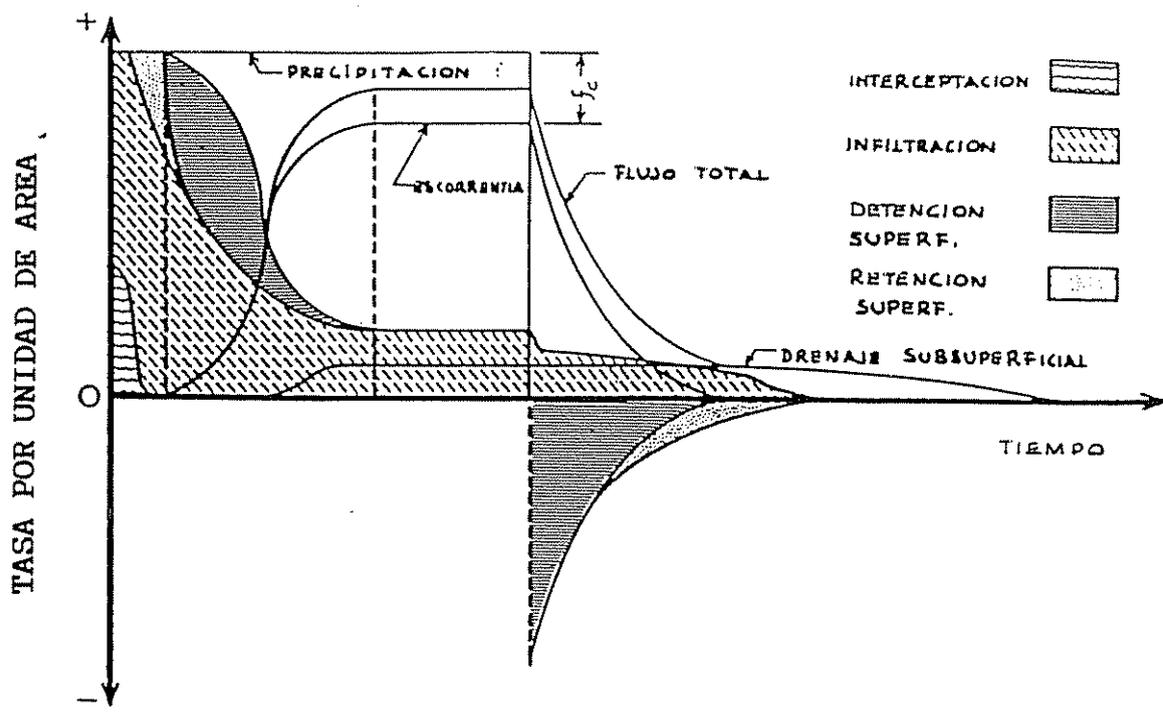


FIG Nº 2. PROCESOS HIDROLOGICOS CONSIDERADOS EN EL MODELO

Una vez que el agua revasa la capacidad de almacenamiento en depresiones, se inicia la escorrentía por los campos, la que es denominada detención superficial. El agua que escurre hasta formar cauces de agua se denomina escorrentía superficial.

El drenaje subsuperficial ocurre cuando la presión potencial del agua subterránea alrededor de una zona de drenaje excede la presión atmosférica.

Si la duración es prolongada y la intensidad de la lluvia suficientemente fuerte, se producirá un estado de infiltración estacionario.

Cuando la lluvia termina, la detención superficial comienza a disiparse hasta que la escorrentía finaliza al mismo tiempo.

Sin embargo, la infiltración continua hasta que no exista más agua acumulada en depresiones. El drenaje subsuperficial continúa hasta que no haya más agua alrededor de las zonas de drenaje.

De acuerdo a lo mencionado, podemos decir que los procesos hidrológicos principales que deben ser considerados en una modelación hidrológica son :

1. Precipitación.
2. Interceptación.
3. Infiltración.
4. Detención superficial.
5. Retención superficial.
6. Evaporación. ( modelación continua )

7. Drenaje subsuperficial.

8. Drenaje subterráneo.

### 2.3.2. Factores de Erosión de Suelos.

#### 2.3.2.1. Conceptos Básicos

La separación, el transporte y la deposición de las partículas son los procesos básicos que intervienen en la erosión de suelos.

La separación del suelo puede ocurrir por efecto del impacto de las gotas de lluvia contra el suelo o bien por causa de la escorrentía superficial sobre el terreno. La separación del suelo ocurre cuando las fuerzas erosivas de la escorrentía o de impacto de la lluvia superan la resistencia del suelo a la erosión.

De modo que puede producirse separación de partículas aún cuando no se esté produciendo escorrentía. La mayoría de las partículas separadas antes del inicio de la escorrentía son de nuevo depositadas y en cierta forma adheridas a la masa de suelo.

La separación de las partículas de suelo por causa de la escorrentía superficial ocurre cuando la fuerza cortante del flujo en la superficie supera las fuerzas gravitacionales y cohesivas del suelo. El hecho de que una partícula que ha sido separada del suelo sea transportada o no, dependerá de

la carga de sedimento en el flujo y de su capacidad de transporte de sedimento. (Beasley, D.B, 1984)

La deposición de las partículas de suelo ocurre cuando la carga de sedimento para un tipo de partícula excede la correspondiente capacidad de transporte.

Hidrologicamente, una cuenca puede ser conceptualizada como una área sujeta a escorrentía superficial, flujo en canales y componentes del flujo subsuperficial con los dos primeros como los principales en lo que a erosión y a sedimentación se refiere.

Aunque la escorrentía superficial usualmente es analizada como flujo laminar, en ocasiones se concentra en pequeños canales bien definidos denominados surcos. Cualquier erosión causada por este tipo de flujo en estos pequeños canales es denominada erosión en surcos. La erosión provocada en las áreas entre los surcos se denomina erosión entre surcos.

Cuando el flujo superficial no puede ser hidrológica o hidráulicamente tratado como escorrentía superficial, es considerado como flujo en canales. La erosión que ocurre en un canal se define y analiza como erosión en canales o cárcavas.

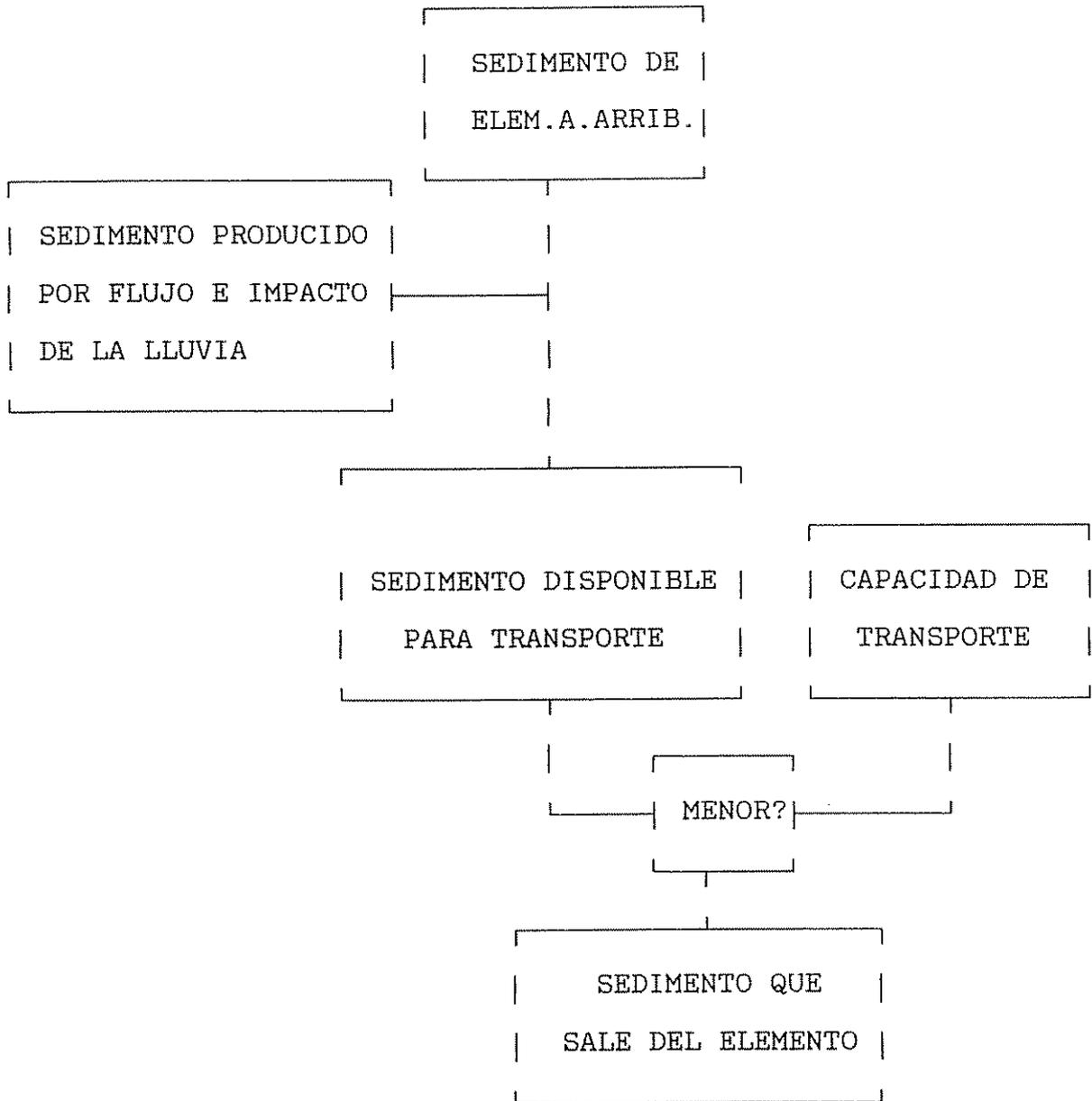
La erosión entre surcos es esencialmente independiente de la erosión en surcos, pero la erosión en surcos depende grandemente de la entrada de sedimentos desde las zonas entre surcos. Si la entrada de sedimentos desde las áreas entre surcos supera la capacidad de transporte del flujo en

los surcos, ocurrirá deposición. Si la entrada de sedimento es menor que la capacidad de transporte del flujo en los surcos y si la fuerza erosiva del flujo supera la resistencia del suelo en los surcos, se producirá la erosión en surcos.

La separación de las partículas de suelo es básicamente una función de las fuerzas erosivas de la lluvia y la escorrentía, la erosividad del suelo, la presencia de materiales que reduzcan la magnitud de las fuerzas erosivas y el tipo de manejo del suelo que se haga.

El transporte es básicamente una función de las fuerzas de transporte, la transportabilidad de las partículas de suelo y la presencia de materiales que reduzcan las fuerzas de transporte.

En un determinado segmento de una pendiente, si la cantidad de sedimento disponible para transporte por el proceso de separación de suelo es menor que la capacidad de transporte del flujo, entonces todo el sedimento disponible será transportado hacia otro segmento aguas abajo. Por otra parte, si la carga de sedimento disponible es superior a la capacidad de transporte del flujo, se presentará deposición y la capacidad de transporte controlará la carga de sedimento. La figura N<sup>o</sup> 3 muestra esquemáticamente lo explicado anteriormente y constituye en realidad una expresión gráfica de la ecuación de continuidad del flujo.



**Figura Nº 3. Producción y transporte de sedimento**  
( Foster, G.R 1982)

Foster, G.R (1982) menciona los siguientes procesos como algunos de los que afectan en mayor grado los procesos erosivos en las tierras altas:

1. Hidrología
2. Topografía.
3. Erodabilidad del suelo.
4. Transportabilidad del suelo.
5. Cobertura del suelo.
6. Incorporación de residuos.
7. Uso de la tierra.
8. Crecimiento radicular en el subsuelo.
9. Rugosidad de la superficie.

Menciona además que los principales factores que afectan la erosión en canales naturales son los siguientes:

1. Flujo que ingresa de áreas aguas arriba.
2. Erodabilidad del lecho del canal
3. Transportabilidad del suelo.
4. Estratos no erosionables.
5. Cobertura.
6. Estabilidad de las paredes del canal
7. Alineamiento del canal.

## **2.4 Calibración y evaluación de modelos hidrológicos**

### **2.4.1. Calibración**

La calibración es la comparación y el ajuste entre los valores obtenidos en una modelación y los valores

correspondientes del sistema real.

En la modelación hidrológica existen básicamente dos criterios de calibración: que los resultados de la modelación deben ajustarse a los valores observados o bien que los parámetros estimados sean consistentes con las características de la cuenca.

El proceso de calibración requiere de un procedimiento para evaluar el éxito de una calibración dada y otro procedimiento para el ajuste de los parámetros para la siguiente calibración.

El criterio para evaluar el éxito de una calibración puede ser un simple juicio de adecuación, alguna estadística seleccionada como medida de bondad de ajuste o alguna función de objetivos múltiples.

Por otra parte, el procedimiento de ajuste de los parámetros puede consistir en una determinación subjetiva de que cambio en los parámetros producirá el mejor resultado, un grupo de reglas derivadas de análisis de sensibilidad para los distintos parámetros o bien a una variación sistemática de los valores de los parámetros con base en un eficiente análisis de la superficie de respuesta.

Algunas de las estadísticas que pueden ser utilizadas para decidir si una calibración es aceptable son las siguientes:

1. Estadísticas obtenidas a partir de un grupo completo de flujos simulados, por ejemplo la suma de cuadrados mínimos de

las diferencias del flujo o caudal diario.

2. Estadísticas computadas a partir de solamente aquellos flujos de interés particular, por ejemplo la suma de cuadrados mínimos de los caudales diarios durante los periodos de bajo caudal.

3. Estadísticas de otro tipo de mediciones como el contenido de humedad o características conocidas de la cuenca.

4. Estadísticas acerca de los cambios en el flujo de un periodo al siguiente.

5. Magnitud y patrones de errores sistemáticos y aleatorios.

6. Análisis de sensibilidad sobre el impacto de condiciones iniciales desconocidas, errores en los registros de precipitación y evapotranspiración o de ecuaciones defectuosas en el modelo.

(Dawdy y Bergman, 1969 citado por James y Burges 1983).

Cualquiera de estas estadísticas puede seleccionarse como una guía para la aceptación de la calibración efectuada. Varias de ellas pueden también combinarse en una función objetivo.

No importa cual estadística o combinación de ellas se utilice, el objetivo de la calibración sera el minimizar errores, es decir, la diferencia entre los valores modelados y los observados.

Algunos parámetros del modelo es mejor obtenerlos a través de mediciones directas de campo en la cuenca antes de iniciar la calibración que por medio del criterio estadístico de la bondad de ajuste. El area de drenaje o la superficie

impermeable de una cuenca son ejemplos de este caso.

La persona que utiliza un modelo debe prestar especial atención a cuales parámetros serán medidos en la cuenca u obtenidos de información disponible y cuales serán estimados por medio del ajuste minimizando errores.

Debe considerarse el hecho de que actualmente pocos parámetros pueden determinarse directamente de mediciones de campo. A menos que se este modelando cuencas muy pequeñas, como es el caso de cuencas o parcelas experimentales, parámetros representativos correspondientes a la infiltración y el flujo subterráneo son prácticamente muy difíciles de obtener por medio de mediciones de campo. La enorme variabilidad espacial de estos factores hace que sea necesario utilizar promedios para representar estos procesos (James y Burges, 1983 ).

#### 2.4.2. Evaluación.

El punto básico en la evaluación o prueba de un modelo es determinar si los estimados hidrológicos ( error residual) obtenidos durante la calibración son aceptables.

El proceso básico en una evaluación consiste entonces en correr el modelo ya calibrado, para diferentes períodos de tiempo de los utilizados durante la calibración y evaluar los resultados.

Es usual evaluar un modelo con el mismo grado de error utilizado durante la calibración, pero también es probable

que un nuevo usuario decida considerar nuevas fuentes de error o utilizar diferentes estadísticas y de esta manera re-evaluar una calibración realizada. La aceptabilidad de los resultados de una calibración generalmente depende de si las deficiencias justifican un esfuerzo adicional para mejorar el modelo o la calibración.

Las principales causas de error que se presentan al evaluar un modelo pueden deberse a los siguientes factores:

1. Errores en los datos usados durante la calibración.
2. Utilización de un período de registro que no contiene suficientes eventos con los procesos físicos necesarios para calibrar los parámetros.
3. Poca representatividad en el modelo de los procesos que intervienen en la cuenca.
4. Insuficiente cantidad de datos de salida para la toma de decisiones.

## 2.5. Criterios estadísticos para la evaluación de resultados.

### 2.5.1. Calibración gráfica

Es recomendable que diferentes criterios de calibración sean usados. Las comparaciones gráficas son sumamente utilizadas, entre ellas se encuentran:

1. Comparación gráfica de series continuas en el tiempo de

flujos simulados contra flujos observados.

2. Comparación gráfica de series continuas en el tiempo de las diferencias entre valores simulados y observados.

3. Gráficas que muestren la relación entre valores observados en una eje del sistema cartesiano y los valores modelados en el otro eje. El método consiste en comparar el modelo de regresión para los valores observados en función de los simulados con respecto a la línea de 45 °. Con este sistema es posible determinar el ajuste que existe entre valores altos o valores bajos observados con respecto a los valores obtenidos, es decir si hay un buen ajuste general o si solamente las altas o bajas magnitudes presentan buen ajuste.

Dentro de este criterio es aplicable también la determinación del coeficiente de correlación lineal de Pearson como indicador del grado de ajuste entre valores modelados y observados.

Esta técnica es útil par determinar errores que talvez no sean detectables en los análisis de series en el tiempo.

### 2.5.2. Calibración Numérica

Diferentes tipos de estadísticas suministran medidas numéricas del grado de ajuste entre valores modelados y observados.

Basicamente, es posible calcular comparaciones para cada ítem o bien desarrollar estadísticas resumen para un

grupo de items.

Al evaluar resultados de una modelación hidrológica, usualmente se comparan series de valores en el tiempo. Dentro de esto, pueden considerarse algunas de las siguientes estadísticas:

1. Errores absolutos en las magnitudes de los valores, definidos por:

$$eA(i) = S(i) - R(i)$$

donde  $S(i)$  son los valores modelados y  $R(i)$  los valores observados.

2. Errores relativos en las magnitudes de los valores, definidos por:

$$eB(i) = ( S(i) - R(i) ) / R(i)$$

3. Errores relativos en las magnitudes de los valores con respecto a algun otro origen, definido por:

$$eC(i) = ( S(i) - R(i) ) / ( R(i) - g )$$

donde  $g$  es una constante igual al valor de la serie con relación a otro origen.

Otras estadísticas con respecto a cada item pueden ser la determinación de errores absolutos en las diferencias entre valores consecutivos en una serie o errores relativos entre diferencias de valores consecutivos.

A partir de las estadísticas antes mencionadas también pueden obtenerse estadísticas resumen como la media, la desviación standard o el coeficiente de correlación serial de cada serie de valores en el tiempo.

Otro método comunmente usado es el cálculo de la suma de cuadrados de las diferencias de los diferentes errores antes mencionados.

En todas las estadísticas antes mencionadas, todos los parámetros se aproximan a 0 en la medida en que el mejor ajuste entre las dos series de valores es obtenido.

Mc Cuen y Snyder (1975), citado por James y Burges , (1983) proponen ponderar el coeficiente de correlación de Pearson con las desviaciones standards como un índice simple para comparar hidrogramas de eventos específicos. Si  $R(i)$  son valores obtenidos del hidrograma para algún incremento de tiempo y  $S(i)$  los correspondientes valores simulados, el momento de Pearson estaría dado por la siguiente expresión:

$$r = \frac{1}{N} \sum \left[ \left( \frac{Ri - \bar{R}}{Sr} \right) \left( \frac{Si - \bar{S}}{Ss} \right) \right]$$

donde  $\bar{R}$  y  $\bar{S}$  son las medias y  $Sr$  y  $Ss$  son las desviaciones estandar de  $N$  valores para los hidrogramas observados y simulados respectivamente.

El momento pesado es  $c \cdot r$  donde  $c = S_s/S_r$  si  $S_s < S_r$  y  $c = S_r/S_s$  si  $S_s > S_r$ . El momento pesado es entonces menor que el momento de Pearson y se aproxima a la unidad cuando el ajuste es perfecto entre los valores modelados y los observados.

Otro criterio estadístico bastante utilizado es el coeficiente de Nash Sutcliffe, definido de la siguiente forma :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_c)^2}{\sum(Q_o - mQ_o)^2}$$

donde :

$R^2$  es el coeficiente de Nash Sutcliffe.

$Q_o$  es el caudal observado en el intervalo de tiempo.

$Q_c$  es el caudal simulado en el intervalo de tiempo.

$mQ_o$  es la media de los caudales observados.

El mejor ajuste es obtenido en la medida que el coeficiente se aproxima a la unidad.

Aunque lo ideal es utilizar diferentes criterios en la evaluación de una determinada calibración, debe procurarse no agregar criterios que no contribuyan a mejorar el análisis.

## 2.6. Modelo "USLE".

El método que a la fecha ha sido utilizado en Costa Rica para la cuantificación de la pérdida de suelo es la USLE ( Universal Soil Loss Equation ) o Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, formulada por Wischmeier y Smith en el año 1962.

Este es un modelo estadístico y consiste en una regresión múltiple de 5 factores que intervienen en el fenómeno de erosión : clima, tipo de suelo, pendiente, cobertura del suelo y prácticas de manejo. El modelo es multiplicativo y estima las tasas de pérdida de suelo anuales como valor promedio de un período representativo de varios años.

Sin embargo, la utilización cada vez mas generalizada de este modelo ha dado como resultado que en ocasiones se haya utilizado erróneamente, ignorándose la fuente experimental de la que proceden los coeficientes y las tablas empíricas que permiten su utilización, o bien por tratar de evaluarse con la ecuación tasas de erosión no debidas a los procesos superficiales como movimientos en masa, erosión en los cauces etc. (González de Tanago, 1991)

En Costa Rica, es posible que las aplicaciones de la ecuación que se hayan hecho estén sobreestimando las tasas de pérdida de suelos, debido principalmente a que los estudios no se han apegado a los supuestos iniciales del modelo. González de Tanago (1991) señala que el hecho de que no

todos los usuarios de la USLE han leído el manual original de Wischmeir y Smith hace que se desconozcan las grandes limitaciones del modelo que utilizan y los errores en su aplicación, no tanto por el modelo en sí como por tratar de utilizarlo en casos muy ajenos a los que la USLE trata de simular.

Sin embargo, Vahrson (1992) señala a partir de investigaciones efectuadas por la Escuela de Ciencias Geográficas de la UNA en Puriscal:

1. A pesar de que se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo de la manera más apropiada, es decir obteniéndose los datos necesarios para la determinación de cada factor en el campo mismo y a la escala mas recomendada ( nivel de hectárea ), los resultados obtenidos continuan siendo muy elevados y de dudosa veracidad puesto que no corresponden a la magnitud encontrada en el trabajo de comprobación.

2. Uno de los grandes limitantes de la USLE es que asume que siempre ocurre pérdida de suelo, es decir es incapaz de reconocer áreas donde se depositan sedimentos producto del transporte por escorrentía. El modelo parte del hecho de que nunca hay sedimentación, sino solamente pérdida de material.

3. La causa de resultados inapropiados en países tropicales es debida principalmente a que el modelo USLE fué

desarrollado y calibrado para otras condiciones de clima, pendiente, topografía, suelos y uso del suelo, diferentes a las que se encuentran en los trópicos.

Por otra parte, Dourojeanni y Paulet (1967) destacan el carácter universal de la USLE al afirmar que : " Actualmente los numerosos desarrollos recientes, han conducido a una ecuación más refinada que no tiene restricciones geográficas y que es aplicable en todos los lugares donde sea posible evaluar los factores individuales".

Otros autores como Renard et al (1994), destacan la importancia y ventajas de la RUSLE ( versión revisada de la USLE). Señala que la RUSLE es científicamente superior a la USLE en muchos aspectos y puede a través del refinamiento en el cálculo de los factores de la ecuación, llegar a obtener mejores resultados y disminuir las limitaciones del modelo original.

González de Tanago (1991) manifiesta también que es necesario seguir reconociendo a las expresiones empíricas de la USLE y RUSLE un valor insustituible y mantenido en la era en que se imponen los modelos con base física, como herramientas prácticas y muy útiles para la gestión del control de la erosión.

De Roo (1993) con base en un estudio efectuado para comparar 4 modelos a saber: USLE, MMF (Morgan/Morgan/Finney), KINEROS y ANSWERS concluye en primer término que las correlaciones obtenidas con respecto a valores observados es

muy bajo para todos los modelos analizados pero que las correlaciones entre los valores modelados (correlación entre modelos) es alta. Esto lo lleva a concluir que a pesar de las ventajas teóricas que los modelos distribuidos de base física como ANSWERS y KINEROS presentan como es el caso de proveer hidrogramas, mapas de erosión, prácticas de conservación etc, los resultados cuantitativos de estos modelos no son significativamente mejores que los resultados de modelos simples de erosión como la USLE o MMF.

Puede verse que las opiniones a favor o en contra de la USLE son variadas y por lo tanto la polémica y la investigación continuarán.

En todo caso, la idea de esta investigación no es llegar a determinar la inaplicabilidad de la USLE ni tampoco establecer un modelo sustituto. La idea es explorar el potencial de utilización de los modelos hidrológicos y de erosión de suelos del tipo distribuido estableciendo las bases para que futuras investigaciones continúen el trabajo y se encarguen de evaluar su utilización como una herramienta útil para estimar la pérdida de suelo en el largo plazo.

## **2.7. Modelación Hidrológica y Sistemas de Información Geográficos.**

### **2.7.1. Generalidades**

Los Sistemas de Información Geográficos suministran una

representación de las características espaciales del planeta mientras que la modelación hidrológica se ocupa del flujo superficial y subterráneo del agua en el mismo. Obviamente existe una conexión muy estrecha entre estas dos áreas.

La modelación hidrológica ha tenido mucho éxito en el pasado ocupándose de la variación temporal, y modelos con cientos de intervalos de tiempo son comunes, sin embargo la representatividad espacial del área de estudio en los modelos ha sido relativamente cruda. En muchos casos, los modelos hidrológicos suponen una distribución espacial uniforme de las propiedades o consideran una serie de unidades espaciales dentro de las cuales las propiedades son uniformes. Los sistemas de información geográficos ofrecen un gran potencial para incrementar el grado de definición en estas unidades espaciales, en cuanto a número, topología y descripción.

El vínculo entre los modelos hidrológicos y los sistemas de información geográficos también ofrece el potencial de incorporar procesos hidrológicos a escala regional o continental los cuales no han sido modelados en forma conveniente.

### **2.7.2. Niveles de aplicación.**

Existen diferentes niveles de aplicación para la vinculación entre los modelos hidrológicos y los sistemas de información geográficos. Entre ellos están: Evaluación

hidrológica, determinación de parámetros hidrológicos, modelación hidrológica dentro de los SIG y conexión de los SIG con modelos hidrológicos.

#### 2.7.2.1. Evaluación Hidrológica

Por evaluación hidrológica se entiende el mapeo de factores hidrológicos que sean pertinentes a alguna situación, usualmente como un medio para la evaluación de riesgos.

Como ejemplo de este tipo de aplicación se puede mencionar el uso de mapas de contaminación potencial de aguas subterráneas, los cuales miden la facilidad con que el agua subterránea se contaminaría si una fuente de contaminantes es colocada en el punto de análisis, en comparación con otras zonas.

Este tipo de modelos utilizando SIG no tienen leyes físicas explícitas involucradas pero constituyen índices ponderados de la influencia de varios factores.

#### 2.7.2.2. Determinación de parámetros hidrológicos.

La determinación de parámetros hidrológicos es usualmente la área más activa en la que los SIG se relacionan con la hidrología.

El objetivo es la determinación de los parámetros que se utilizarán en los modelos hidrológicos por medio del análisis

de características del relieve y la cobertura vegetal. De este modo, características como la pendiente de la superficie, la longitud de los canales, el aspecto, el uso de la tierra y las características del suelo están empezando a ser extraídas a partir de modelos obtenidos a partir de SIG, como los modelos de elevación digital.

### 2.7.2.3 Modelación Hidrológica dentro de los SIG.

Es posible hacer alguna modelación hidrológica directamente dentro de los SIG, en la medida en que la variable tiempo no sea necesaria. Este es el caso en el que se consideran promedios anuales de variables, como flujos anuales o cargas anuales de contaminantes. Es posible entonces implementar modelos en los que los flujos o las cargas totales se calculen como flujos por unidad de área multiplicado por las unidades de área que tenga la cuenca.

Es posible también utilizar ecuaciones más complicadas, como aquellas de cargas de contaminantes obtenidas de análisis de regresión, donde las variables independientes de las ecuaciones de regresión son convertidas a mapas y entonces las cargas son obtenidas a partir de la combinación matemática a través de superposición de las diferentes variables independientes (Maidment, 1991).

#### 2.7.2.4. Conexión SIG - Modelos Hidrológicos

Esta es un área de investigación activa especialmente en el campo de aguas subterráneas.

Consiste en la fusión de los modelos hidrológicos y los sistemas de información geográficos en un solo modelo.

El mayor logro en esta fusión de SIG y los modelos hidrológicos es el hecho de que los SIG proveen una base de datos digital que representa la superficie del terreno y que puede ser usada para formar los datos de entrada para la modelación hidrológica. Esto evita el tener que medir o planimetrar los datos de mapas. Además los SIG pueden actuar como un ambiente de despliegue para la salida de datos de los modelos hidrológicos.

De esta manera es factible efectuar entre otras cosas dentro de un solo modelo la entrada de datos por medio de imágenes, el cálculo de los parámetros necesarios para la operación del modelo, la operación del modelo en sí y el despliegue de imágenes de salida .

Los SIG proveen la tecnología para almacenar y manipular la información espacial relacionada que es demandada por los modelos hidrológicos. ( Moore, I.D. 1991 )

La tecnología SIG ha sido integrada con un gran número de modelos de escorrentía superficial y subsuperficial en los últimos años.

Sin embargo, existen también algunos problemas al aplicar estos sistemas integrados de análisis a procesos

superficiales y subsuperficiales, entre estos se pueden mencionar los siguientes: incompatibilidades entre el modelo y la estructura de base de datos, efectos de escala y exactitud en la base de datos del SIG, incompatibilidades potenciales entre las escalas de muchos modelos de base física y las limitaciones en la modelación debido a la falta de datos de propiedades de suelos a la escala apropiada. ( Maidment, D.R. 1991)

### 2.7.3. Estructuras de Datos.

Si dos programas de computo van a ser interconectados fundamental que haya coincidencia entre las diferentes secciones de su estructura de datos. En el enlace de SIG y modelos hidrológicos, estas estructuras de datos comunes involucran la representación de la superficie y el subsuelo. Se sugiere que los SIG presenten 6 estructuras de datos fundamentales y 3 estructuras básicas. El punto, la línea y el polígono como estructuras básicas y 3 estructuras derivadas de estas : la cuadrícula, la red triangular irregular (Triangular irregular network o TIN) y la red.

Cualquiera de estas estructuras de datos son bien conocidas y han sido ampliamente utilizadas en modelación hidrológica.

#### 2.7.4. El Futuro de la Conexión SIG-Modelos Hidrológicos.

Es claro que el futuro de los modelos que combinen SIG y modelos hidrológicos es sumamente amplio. Existe la posibilidad de desarrollar nuevos modelos que representen mejor los fenómenos hidrológicos o modelar procesos que no ha sido posible modelar en el pasado.

A continuación se mencionan brevemente algunos campos futuros donde existe la posibilidad de aplicar esta nueva tecnología integrada.

1. Distribución espacial de las propiedades en una cuenca. Una mayor representatividad es obtenida por medio del diseño de modelos hidrológicos basados en coberturas por medio de polígonos georeferenciados para los suelos y la cobertura vegetal en vez de suponer valores promedio para las diferentes propiedades.

2. Mejor interacción de los procesos superficiales y subsuperficiales.

Ha sido tradicional hasta la fecha que los modelos hidrológicos de flujo superficial presenten un componente débil o muy simplificado de los procesos de flujo subsuperficial. Por otra parte, los modelos de flujo subterráneo modelan pobremente o restan importancia a los procesos superficiales.

Es necesario por lo tanto, procurar un vínculo entre

ambos enfoques ,considerando un punto de vista global o sistémico. Es en este nivel donde el papel de los SIG puede resultar sumamente relevante.

Es claro que los enfoques que analizan el agua superficial y la subterránea no son mas que dos partes de la misma pintura, muy útiles en muchas formas, pero ultimamente no tan satisfactoriamente debido a que no están interconectadas.

Otros campos de aplicación de esta tecnología podrían ser en la hidrología regional y global así como en la determinación de los patrones espaciales de sequías. (Maidment, D.R. 1991)

#### 2.7.5. Conclusiones.

Maidment (1991) concluye que el agua en la tierra es tan extensa, su movimiento tan complejo y tanto de lo que ocurre en la hidrología esta determinado por los ambientes por los que el agua pasa, que la interconexión entre los sistemas de informacion geográfico y los modelos hidrológicos tiene el potencial para hacer lo que hacemos actualmente con mayor rapidez y eficiencia y abrir nuevas áreas de estudio que hasta la fecha estuvieron inaccesibles.

Probablemente es cierto que el factor que mayormente limita la utilización de modelos hidrológicos no es la habilidad para caracterizar matematicamente los procesos

hidrológicos, o para resolver las ecuaciones resultantes, sino la habilidad para especificar en forma precisa los valores de los parámetros que representan el ambiente. Los sistemas de información geográfico son una gran ayuda para superar esta limitante.

## 2.8. Modelos de elevación digital.

### 2.8.1. Concepto general.

La topografía de una cuenca juega un papel fundamental en los procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos que actúan en determinado relieve. La distribución espacial de los atributos topográficos puede ser considerada como una medida indirecta de la variabilidad espacial de estos procesos.

Una gran variedad de sistemas de información geográficos han sido desarrollados con el fin de almacenar información topográfica como datos básicos en el análisis de problemas de recursos hídricos y biológicos. Además, la topografía puede ser utilizada para desarrollar estructuras más realistas para los modelos hidrológicos y de calidad de agua, los que tomen en cuenta en forma directa la influencia de la topografía en el comportamiento hidrológico.

Los modelos de elevación digital son los elementos básicos utilizados en la topografía de cuencas.

Un modelo de elevación digital es un arreglo ordenado de números que representan la distribución espacial de elevaciones sobre un nivel arbitrario de referencia en el terreno. Constituyen un subgrupo de sistemas más generales, como son los modelos digitales terrestres ( Digital Terrain Models o DTMs ), los cuales pueden definirse como arreglos ordenados de números que representan la distribución espacial de atributos terrestres. (Moore, I.D. 1990)

### 2.8.2. Tipos de estructuras en un modelo de elevación digital.

Existen tres formas principales de estructurar una red de datos de elevación, estas son:

#### 1. Red cuadrangular o sistema Raster.

La red es formada por líneas igualmente espaciadas y el área dentro de cada cuadrado es descrita en términos de las coordenadas del punto central.

A pesar de ser la estructura más utilizada por su facilidad de implementación también presenta algunos inconvenientes como el hecho de no poder representar adecuadamente cambios bruscos en las elevaciones, el tamaño de las celdas de la red afecta la eficiencia del modelo y presenta patrones de flujo en las partes altas que en ocasiones no son del todo realistas.

## 2. Red triangular irregular ( Triangular irregular network TIN)

Consiste en una red de elementos triangulares formados a partir de la unión de puntos ubicados en los picos o valles del relieve. Con este sistema algunos de los problemas debido a variaciones violentas en las elevaciones pueden ser evitados debido a que la red de drenaje seguiría la pendiente de los planos o las líneas de bordes entre los triángulos.

Una de las más útiles características de este tipo de redes es la habilidad de definir canales en términos de los bordes entre triángulos. Esto permite una descripción más continua de la red de canales en conjunto con la topografía del sitio.

## 3. Redes basadas en líneas de contorno o Sistema Vectorial.

En este sistema, los contornos son representados digitalmente como un grupo de vectores de elevación común. Cuando un mapa completo es almacenado en esta forma digital, se denomina un gráfico de líneas digitales ( Digital line graph o DLG).

La mayor parte de los sistemas de información geográfico disponibles tienen la habilidad de efectuar transformaciones entre sistemas raster, TIN o vectoriales.

### 2.8.3. Análisis de los datos de elevación.

El método mas comunmente usado para la estimación de atributos topográficos consiste en el ajuste de superficies a los datos de elevación utilizando interpolaciones lineales o no lineales.

Dentro de esto, una gran variedad de metodos existen para el ajuste de superficies a los datos de campo . Algunos de estos son: Estadísticas Kriging , métodos de interpolación local, promedios móviles e interpolación utilizando métodos de diferencias finitas (Moore, I.D. 1991).

### 2.8.4. Los parámetros de suelo y los modelos de elevación digital.

Una de las aplicaciones más útiles de los modelos de elevación digital es su utilización como base para la obtención de parámetros de suelo que servirán para alimentar modelos hidrológicos.

Se han efectuado numerosos intentos para relacionar propiedades del suelo, clases de erosión y productividad a su posición en el relieve . Moore ( 1991) menciona diferentes trabajos efectuados para relacionar por ejemplo contenido de materia orgánica , profundidad del horizonte A, PH o retención de humedad a la posición en el perfil. Además otros autores han procurado correlacionar un grupo de

características de profundidad del suelo, como profundidad del horizonte A, con la pendiente, aspecto, curvatura, elevación y longitud de flujo.

A partir de la obtención de expresiones empíricas o teóricas que relacionen características de suelos con características fisiográficas será posible utilizar los modelos de elevación digital para obtener mapas que reflejen la variabilidad espacial de los diferentes parámetros de suelo. De este modo será posible obtener por ejemplo mapas de capacidad de infiltración o capacidad de campo del suelo a partir de un modelos de elevación digital. Esta capacidad sin lugar a dudas representaría un logro muy importante para la implementación de modelos hidrológicos.

## 2.9. Comparación USLE - Modelos Distribuidos para Eventos.

Una de las principales aplicaciones que podría darse a los modelos hidrológicos y de erosión de suelos de tipo distribuido para eventos es su utilización para la estimación de la tasa anual de producción de sedimentos en una cuenca. Esto permitiría efectuar una comparación con los resultados obtenidos para la misma región utilizando la USLE ( Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ).

Para efectuar esta comparación sería necesario modelar para todas las tormentas de un año y sumar las cargas de sedimentos producidas para cada tormenta. Logicamente sería necesario buscar un año que sea representativo de las

condiciones hidrológicas promedio en la cuenca o bien analizar un período de varios años automatizando la entrada de datos para poder modelar todas las tormentas correspondientes al período.

Otra posibilidad sería modelar para la tormenta con período de retorno que sea representativa de la producción anual de sedimentos para la cuenca en análisis.

De Roo (1993) efectuó este tipo de estudios en Holanda para las cuencas Etzenrade , Catsop y Yendacott. El estudio estimó la tasa anual de sedimentos como la suma de las producciones individuales de cada una de las tormentas de un año.

## 2.10. Evolución en la modelación hidrológica

### 2.10.1. Modelos empíricos y semiempíricos

El mayor conocimiento que se ha dado de los mecanismos de los procesos de erosión ha permitido evolucionar desde los modelos empíricos, con rangos de aplicación para las zonas donde se deducen las relaciones empíricas, hacia los modelos con base física, de aplicación mucho mas generalizada ( Gonzalez de Tanago, 1991 ).

Un punto intermedio entre estas dos clases de modelos lo constituyen los modelos semiempíricos. Estos, a pesar de estar basados en ciertas leyes físicas , como la ecuación de continuidad del flujo, utilizan ecuaciones de tipo empírico

para describir otros fenómenos como la separación del suelo ( erosión ) , la retención de humedad y la infiltración entre otros.

La tendencia actual en la utilización de modelos de erosión se dirige al uso de modelos físicos, con los cuales se evite la dependencia de factores obtenidos experimentalmente en otras latitudes.

Sin embargo; estos modelos de base física tienen el inconveniente de requerir por su complejidad inherente, de una gran cantidad de información de entrada y la determinación de otros parámetros de tipo físico, lo cual dificulta su aplicación práctica.

Considero que a nuestro nivel aún no estamos preparados para la aplicación generalizada de modelos de tipo físico y debemos de continuar trabajando con modelos de tipo empírico o semiempírico, adaptando estos a nuestras condiciones

#### **2.10.2. Modelos agrupados y distribuidos.**

En un modelo agrupado, se intenta evaluar el impacto de variables espacialmente distribuidas por medio del cálculo de un valor representativo, como un promedio pesado por ejemplo, para toda el área. El diseñador de modelos intenta entonces condensar todas las influencias de factores no uniformes espacialmente, en coeficientes matemáticos equivalentes.

Un modelo de parámetros distribuidos por el contrario, intenta evaluar la influencia de esta distribución espacial

de los parámetros incorporándolos en los algoritmos del programa de simulación de la cuenca. Un modelo distribuido incorpora así la influencia de variables distribuidas espacialmente ( topografía, suelos, uso de la tierra etc ) en forma interna dentro de los algoritmos que explican los procesos físicos. Esto produce indudablemente resultados más acordes con la realidad y una mejor exactitud.

Los modelos distribuidos poseen entonces un gran potencial para efectuar una simulación más exacta del comportamiento del proceso escorrentía-erosión. Otra ventaja es su inherente habilidad para simular condiciones en todos los puntos de la cuenca y obtener también un volumen de información de salida mucho mayor.

### 2.10.3. Información de campo.

Un aspecto sumamente importante que debe de considerarse al aplicar este tipo de modelos es la posibilidad de incorporar datos de campo en el análisis, es decir debe de procurarse hasta donde sea posible la calibración del modelo con la información recogida en campo.

González de Tanago ( 1991 ) señala con respecto a esto que la investigación y la aplicación de los modelos de erosión debe centrarse en la creación de series de datos observados en contraste con los simulados, sin los cuales nunca será posible conocer el procedimiento o metodología mas adecuada a nuestras condiciones de clima,suelo,

relieve, vegetación y uso del suelo. La labor según ella debe ser la de crear parcelas y cuencas experimentales donde se midan las pérdidas de suelo en ladera y la llegada de sedimentos a los cauces, representativas de cada una de las condiciones más frecuentes de nuestra geografía.

Es por ello que uno de los objetivos de este estudio es efectuar la calibración del modelo con base en datos de campo de estaciones fluviográficas.

#### 2.10.4. Aplicaciones de los Modelos Hidrológicos y de Erosión de Suelos en Costa Rica.

A pesar de que existen muchos y diferentes modelos hidrológicos y de erosión de suelos disponibles ( AGNPS, SEM, CREAMS, EUROSEM, MIKE 11 entre otros ) las aplicaciones que se han hecho de ellos en Costa Rica han sido mínimas.

Practicamente se están dando los primeros pasos en este campo. Cabe destacarse la labor que la Escuela de Ciencias Geográficas de la UNA realiza, sobre todo con el modelo WEPP ( Water Erosion Prediction Project ) y los esfuerzos del CATIE para aplicar el modelo USLE a nivel de pixel utilizando Sistemas de Información Geográficos.

En cuanto a aplicaciones del modelo ANSWERS en otros países, se puede destacar los trabajos de Beasley (1982) aplicando el modelo en Indiana, Estados Unidos así como los trabajos de De Roo (1993) validando el modelo para cuencas en Holanda.

Con el presente estudio se pretende efectuar un aporte importante a este difícil campo y participar activamente como pioneros en la utilización de modelos espaciales de simulación de los procesos hidrológicos y de erosión de suelos en Costa Rica.

### III. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Procedimiento General.

Este estudio se basó principalmente en la utilización del modelo hidrológico y de erosión de suelos denominado ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation).

Las fuentes de información para alimentar el modelo fueron tanto la información existente en la literatura pertinente como los resultados de pruebas de laboratorio, efectuadas a partir de muestras de campo. La información de precipitación se obtuvo de los registros de estaciones en la cuenca.

La calibración del modelo se realizó con base en información de estaciones de medición existentes en la cuenca.

La aplicación del modelo se realizó en la cuenca del río Pejibaye, la cual constituye la unidad experimental.

#### 3.2. Modelo ANSWERS

##### 3.2.1. Generalidades y filosofía.

ANSWERS es un modelo matemático determinístico que intenta simular el comportamiento de una cuenca donde predomina el uso agrícola, durante e inmediatamente después

de una tormenta. Fué desarrollado por los Doctores David B. Beasley y Larry F.Huggins en los Estados Unidos.

Considerando la clasificación de modelos presentada en el punto 2.2 podemos considerar a ANSWERS como un modelo formal o matemático del tipo semiempírico. Constituye también un modelo integrado, dinámico, de base física, determinístico, de "caja gris", no lineal y distribuido.

Una característica fundamental del modelo es su carácter espacial o distribuido, lo que permite incorporar la influencia de variables distribuidas espacialmente dentro de los algoritmos matemáticos del modelo.

La cuenca que va a ser modelada debe ser dividida en una serie de elementos cuadrados de manera que se forme una cuadrícula que comprende toda la región en estudio ( Fig # 1 del anexo Nº 1 ). Para cada elemento, son asignadas una serie de variables, correspondientes a información del tipo de suelo presente en el elemento, condiciones de uso de la tierra, condiciones topográficas entre otras. Esto permite simular apropiadamente cualquier variabilidad de condiciones dentro de la cuenca.

Los elementos individuales formados actúan también como un sistema compuesto debido a que la información topográfica asignada a cada elemento determina la dirección del flujo en forma consistente con la topografía de la cuenca modelada.

El vínculo que permite una respuesta compuesta de esta colección de elementos independientes es la ecuación de continuidad, es decir la ley de la conservación de la masa.

De esta manera, la interacción entre los elementos ocurre debido a que las salidas de un elemento ( flujo, sedimentos etc ) constituyen las entradas a los elementos adyacentes.

### 3.2.2. Consideraciones hidrológicas.

Los procesos hidrológicos constituyen la fuerza motora del modelo. Estos procesos para los cuales relaciones matemáticas han sido incorporadas dentro del modelo se muestran en la figura Nº 2. Se consideran entre ellos la precipitación, la interceptación por vegetación, el almacenamiento en depresiones, la infiltración, el escurrimiento superficial, el flujo en canales y el flujo subterráneo principalmente.

La erosión del suelo, el transporte y la deposición de sedimento están íntimamente relacionados a los procesos hidrológicos en una cuenca.

La producción de sedimentos en un área es modelada por medio de ecuaciones que consideran la separación de las partículas de suelo debido a dos factores :

- a) Separación por el impacto de las partículas de lluvia.
- b) Separación por escorrentía superficial.

La erosión ocurre aunque no exista escorrentía superficial. De modo que la mayor parte de las partículas de

suelo separadas antes del inicio de la escorrentía son depositadas y reincorporadas de nuevo a la masa de suelo. La separación de partículas por el proceso de escorrentía ocurre cuando la fuerza cortante actuando sobre el suelo en la superficie, es suficiente para superar las fuerzas gravitacionales y cohesivas de las partículas.

El suelo erosionado en un elemento, combinado con el sedimento que ingresa de elementos adyacentes constituye la cantidad de material disponible para ser potencialmente desplazado según la dirección de flujo, hacia otros elementos.

El que una partícula de suelo separada se mueva hacia otros elementos dependerá de la carga de sedimento presente en el flujo y de su capacidad de transporte de sedimento.

La figura N° 4 muestra en forma de diagrama de flujo la manera en que el modelo considera las diferentes relaciones y procesos involucrados.

### 3.2.3. Ecuaciones matemáticas.

#### 3.2.3.1 Infiltración.

El modelo utiliza la ecuación de infiltración de Holtan modificada por Huggins y Monke (Holtan citado por Beasley 1984). La mayor ventaja de este modelo de infiltración es la utilización de la humedad del suelo en lugar del tiempo, como variable independiente.

La tasa de infiltración es calculada por la siguiente

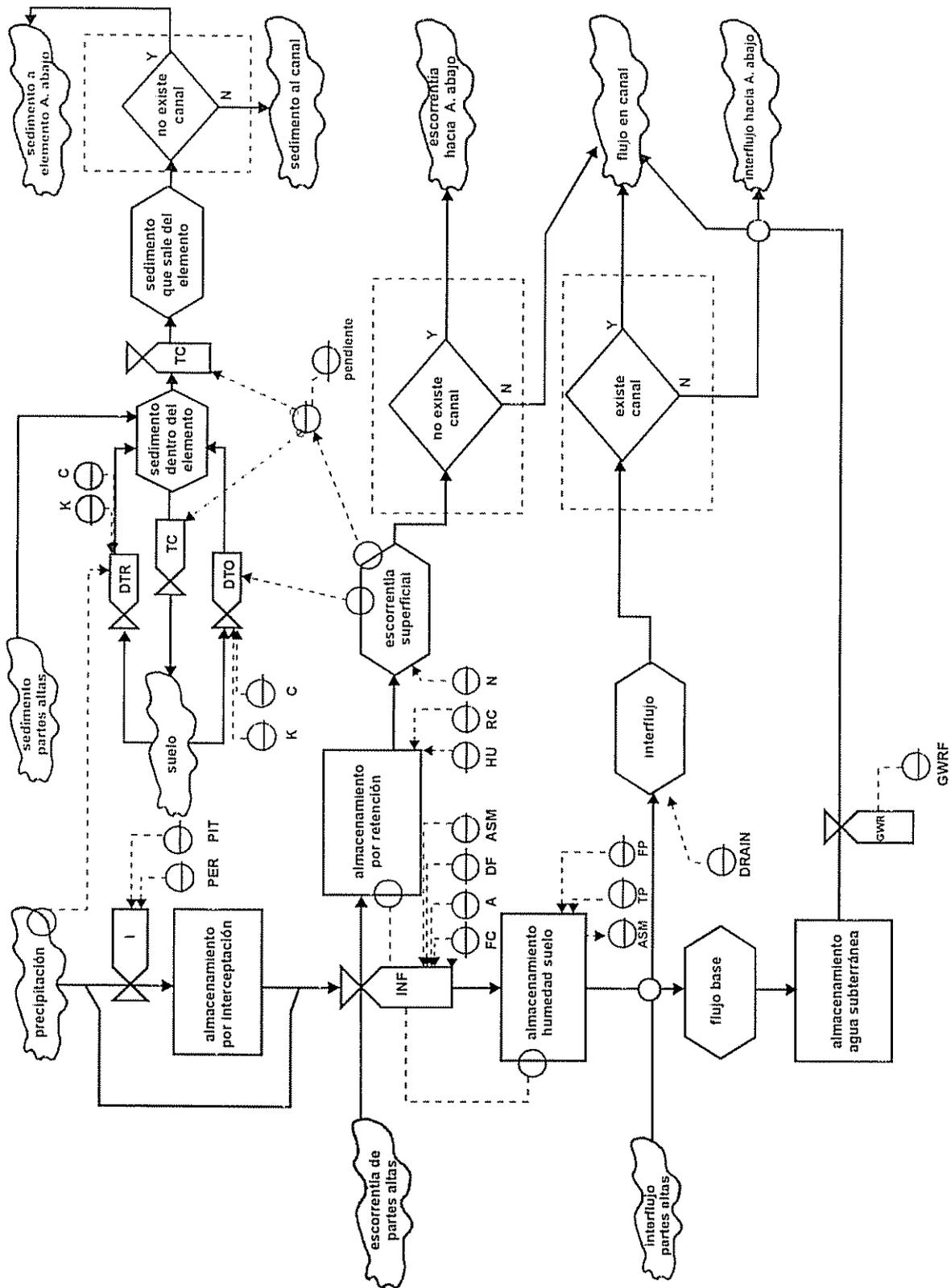


Fig N° 4. Diagrama de flujo del modelo Answers (De De Roo, 1993)

expresión:

$$f = FC + A * \left( \frac{PIV}{TP} \right)^P$$

donde : f = tasa de infiltración ( mm/hr)

FC = tasa de infiltración en estado estacionario  
(mm/hr)

A = Máxima tasa de infiltración en exceso sobre  
FC (mm/hr)

PIV = Volumen de agua que es almacenado en la zona  
de control antes de que ocurra saturación.

TP = Porosidad total ( % de la saturación ) en la  
zona de control.

P = Coeficiente adimensional que relaciona la tasa  
de disminución de la infiltración con el  
incremento de la humedad del suelo.

### 3.2.3.2 Drenaje desde la zona de control.

El movimiento del agua desde la zona de control está en función del contenido de humedad en esa zona. Pueden presentarse así dos condiciones :

1. Cuando la humedad de la zona de control es menor que la capacidad de campo del suelo, no hay drenaje desde la zona de control.

2. Cuando la humedad de la zona de control excede la capacidad de campo del suelo, el agua drena de esta zona de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$DR = FC * \left( 1 - \frac{PIV^3}{GWC} \right)$$

Donde DR = Tasa de drenaje desde la zona de control.

PIV = Volúmen de aguas que puede ser almacenado en la zona de control antes de que ocurra la saturación.

GWC = Capacidad de la zona de control ( Porosidad total - Capacidad de campo )

### 3.2.3.3. Retención superficial.

La retención superficial es un componente que tiene un profundo efecto en la escorrentía y las características de drenaje. Huggings y Monke citado por Beasley (1984), utilizando diferentes superficies desarrollaron una relación que describe el potencial de almacenamiento de una superficie como función de la profundidad del agua en la zona de microdepressiones. La forma de esta ecuación que ANSWERS utiliza es :

$$DEP = HU * RC * \left( \frac{1}{RC} * H \right)$$

donde DEP = volumen de agua almacenada, en unidades de profundidad.

H = Altura del agua sobre un nivel de referencia.

HU = Máxima altura de microrelieves.

RC = Un parámetro que describe la frecuencia de la rugosidad de la superficie , varía entre 0 y 1. Entre mayor sea el valor, mayor es la sinuosidad de la superficie.

#### 3.2.3.4. Flujo base.

El flujo de agua subterránea hacia los canales es simulado en forma muy somera en el modelo ANSWERS.

Toda el agua infiltrada que supera la zona de control se supone que ingresa en un depósito o almacenamiento subterráneo desde donde es aportada a los segmentos de canales en forma proporcional al volúmen almacenado. Esta tasa de aporte a los canales es un dato de entrada al modelo el cual puede ser usado para calibración.

#### 3.2.3.5. Escorrentía superficial.

La respuesta compuesta de los diferentes elementos se establece por medio de la ecuación de continuidad, que indica que:

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$

donde I = Caudal de entrada a un elemento producto de la lluvia y elementos adyacentes.

Q = Caudal de salida del elemento.

S = Volúmen de agua almacenado en el elemento.

t = Tiempo.

Esta ecuación se resuelve por medio de la ecuación de Manning, la cual establece:

$$V = \frac{R^{2/3} * Sf^{1/2}}{n}$$

donde:

V = Velocidad del flujo ( m/seg)

R = Radio Hidráulico (m)

Sf = Pendiente.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

La escorrentía sobre los elementos en el modelo se da acorde con la dirección de la máxima pendiente o aspecto. Si el aspecto no es igual a uno de los ejes principales, el flujo superficial es dividido a los elementos adyacentes de acuerdo al siguiente criterio:

La fracción del flujo que va hacia el elemento adyacente en la fila es :

$$RFL = \frac{\text{tang} ( \text{ANG} )}{2} \quad \text{si } \text{Ang} < 45$$

$$RFL = 1 - \frac{\text{tang} ( 90 - \text{ANG} )}{2} \quad \text{si } 45 < \text{ANG} > 90$$

donde ANG es el ángulo que la línea de pendiente forma con el eje y.

El resto del flujo va hacia el elemento adyacente en la columna.

Los elementos de canal actúan como elementos ordinarios con la diferencia de que todo el flujo que ingresa al elemento es transportado hacia el siguiente elemento de canal en la red de flujo.

### 3.2.3.6. Separación de las partículas de suelo por efecto de la lluvia.

Esta separación es calculada por la ecuación propuesta por Meyer y Wischmeier (1969) citado por Beasley (1984):

$$DETR = 0.108 * C_m * K * A_i * R^2$$

donde : DETR = Tasa de separación por lluvia ( Kg/min).

$C_m$  = Factor de cobertura y manejo de la tierra.

Producto de los factores C\*P de la USLE.

$K$  = Factor de erodabilidad del suelo de la USLE

( Unidades Inglesas ).

$A_i$  = Incremento de área (  $m^2$  ).

$R$  = Intensidad de la lluvia durante el intervalo de tiempo (  $mm/min$  ).

### 3.2.3.7. Separación del suelo por efecto de la escorrentía superficial.

Es calculada utilizando la ecuación de Meyer y Wischmeier modificada por Foster en 1976 (Meyer y Wischmeier citado por Beasley (1984)).

$$DETF = 0.90 * C_m * K * A_i * SL * Q$$

donde  $DETF$  = Tasa de separación de partículas por escorrentía (  $Kg/min$  )

$SL$  = Pendiente ( % )

$Q$  = Caudal por unidad de ancho (  $M^2/min$  )

$C_m$  = Factor C\*P de la USLE.

$K$  = Factor de erodabilidad de la USLE ( Unidades inglesas ).

$A_i$  = Incremento de área (  $m^2$  ).

### 3.2.3.8. Capacidad de transporte.

Las ecuaciones para el transporte de sedimentos que ANSWERS utiliza están basadas en los trabajos de Yalin y en

parte en observaciones de Beasley . Estas son :

$$TF = 161 * SL * Q^{0.5} \quad \text{si} \quad Q < 0.046 \text{ m}^2/\text{min}.$$

$$TF = 16320 * SL * Q^2 \quad \text{si} \quad Q > 0.046 \text{ m}^2/\text{min}.$$

donde TF es es la tasa de transporte potencial de sedimento en Kg/min-m.

#### 3.2.4. Ventajas y limitaciones del modelo.

Las principales ventajas de la utilización de este modelo son las siguientes :

1. Su carácter distribuido aumenta la exactitud de la modelación y el volúmen de resultados.
2. Constituye un modelo basado en la ecuación de continuidad del flujo lo que permite obtener resultados mas de acuerdo a las condiciones naturales reales de la cuenca.
3. El modelo permite simular condiciones en todos los puntos de la cuenca. Esta habilidad para predecir que está pasando a lo largo de toda la cuenca incrementa notoriamente la cantidad y la utilidad de la información obtenida. Esto

permite a la vez simular procesos que cambian tanto espacial como temporalmente, como es el caso de la precipitación..

4. ANSWERS permite la incorporación de relaciones desarrolladas en cuencas experimentales o parcelas para con base en ellas realizar predicciones de producciones a nivel de cuenca. Es mucho mas sencillo formular el proceso que está siendo modelado estableciendo ecuaciones independientes aplicables a un solo punto, permitiendo que el subsecuente proceso de integración incorpore los efectos de variabilidad espacial y temporal, en lugar de desarrollar ecuaciones promedio que comprendan toda la cuenca.

5. Desde un punto de vista práctico, los modelos de parámetros distribuidos han llegado a ser aplicables solamente debido al desarrollo de las técnicas de computación. Este avance permite utilizar el enfoque de modelo distribuido sin que esto involucre una pérdida de tiempo o un costo adicional.

6. El modelo incorpora el proceso de sedimentación como un componente importante lo cual permite determinar dentro de la cuenca zonas de erosión y zonas de deposición de sedimentos.

7. ANSWERS permite considerar prácticas de conservación en los elementos de la cuenca que así sean definidos. De este modo, cambios en el uso de la tierra o técnicas de arado o de manejo que califiquen como Mejores Prácticas de Manejo

(BMP`S) pueden ser modeladas facilmente con ANSWERS.

La principal limitación de la aplicabilidad de ANSWERS para las condiciones tropicales puede ser su carácter empírico lo cual podría hacer difícil la obtención de resultados adecuados al extrapolar hacia condiciones de aplicación fuera de las regiones geográficas o de los rangos de valores donde se calibraron los parámetros originalmente.

Adicional a las ventajas mencionadas podemos agregar que ANSWERS ha sido escogido también por requerir poca información de datos de entrada en comparación con otros modelos.

### 3.3. Descripción de la unidad experimental.

La subcuenca del río Pejibaye forma parte de la cuenca del río Reventazón, está ubicada en la provincia de Cartago, en las estribaciones de la Cordillera de Talamanca.

Posee una área de 250 km<sup>2</sup>. El río principal es el Pejibaye, que posee una longitud de cauce de aproximadamente 32 km. Su caudal promedio anual es de 31 m<sup>3</sup>/seg ( en la estación Oriente ).

La forma de la cuenca es semi-alargada.

Las elevaciones en la cuenca varían entre 580 y 2660 msnm. La elevación media es de 1287 msnm.

La precipitación promedio oscila entre 2800 y 8000 mm, por lo que se considera una de las regiones más lluviosas de Costa Rica.

La zona presenta una serie de fallas de corrimiento por lo que la actividad tectónica es sumamente vigorosa y activa.

La cuenca ha tenido diferentes fases de ocupación que van desde la ocupación de empresas extranjeras en 1918 hasta parcelaciones de poblaciones en 1983.

Tanto la parte alta y media de la cuenca están cubiertas de bosque primario. En la parte baja se desarrollan cultivos como caña de azúcar, café, pastos y algunas zonas se mantienen en "barbecho". Aquí se ubican también las poblaciones de Pejibaye, Taus y el Humo.

Según Maldonado (1986) citado por Mora (1987), ninguno de estos cultivos presenta niveles de rendimiento elevados debido a que no se tienen las condiciones óptimas climáticas o edáficas para su desarrollo.

La cuenca del río Pejibaye fue escogida para efectuar este estudio debido principalmente a que cuenta con dos estaciones fluviográficas, una ubicada en Taus y la otra en Oriente y una buena cobertura de estaciones pluviográficas y pluviométricas. Todas estas estaciones pertenecen al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Otra razón para esta escogencia es el tamaño de la cuenca. Se escogió una cuenca cuyo tamaño no fuese sumamente

grande, esto para evitar tener que recopilar información de campo de muchas zonas y tener que invertir tiempo excesivo en trabajos de digitalización, preparación del mapa de elevación digital y otros.

Cabe destacarse que este estudio se efectuó considerando la cuenca hasta la estación Oriente ( ver fig # 5 ), para abarcar así un área de 223 km<sup>2</sup>, esto debido a que esta es la última estación fluviográfica existente en la cuenca antes de la confluencia con el río Reventazón y es donde podríamos obtener datos que permitan la calibración del modelo.

Uno de los objetivos de la investigación fué establecer diferencias entre la producción y arrastre de sedimentos en una cuenca cubierta de bosque y una cuenca intervenida, sujeta a uso agrícola principalmente. La cuenca del río Pejibaye se presta para este objetivo ya que la cobertura de la misma hasta la estación Taus es prácticamente bosque natural mientras que a partir de esta estación y hasta Oriente, el uso es predominantemente agrícola ( caña, café y pasto). La idea fué entonces aplicar el modelo a ambas condiciones de cobertura y efectuar comparaciones entre los resultados.

### **3.4. Información básica para la aplicación del modelo.**

#### **3.4.1. Información requerida.**

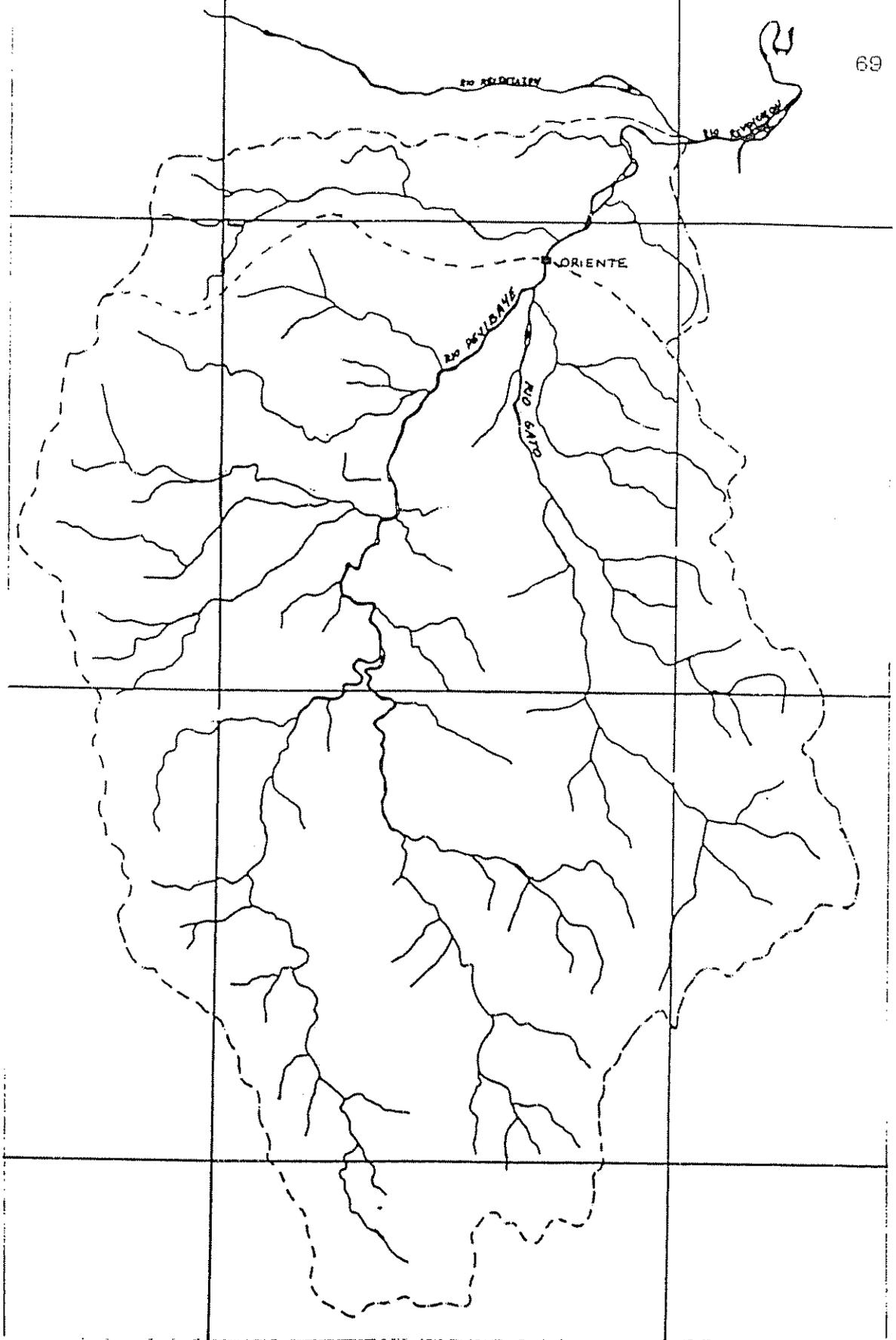


FIGURA Nº 5 RED DE DRENAJE DE LA CUENCA DEL RIO PEJIBAYE

El modelo ANSWERS trabaja con 1 archivo de datos de entrada que está separado en dos partes: Un archivo de información general sobre la cuenca y un archivo de información para los elementos individuales que componen la misma.

El archivo de información general sobre la cuenca agrupa información referente a los siguientes temas :

1. Información de encabezado.
2. Información de Precipitación.
3. Información de Suelos.
4. Información de Uso de la Tierra y Cobertura Vegetal.
5. Información sobre canales naturales ( red de drenaje ).

Aparte de esto, se requiere introducir información referente a cada uno de los elementos o pixeles componentes de la cuenca. Para ello se utiliza el archivo de información de los elementos individuales en el cual para cada elemento se asignan valores como pendiente, dirección de pendiente, tipo de suelo, tipo de cobertura entre otros.

El cuadro # 1 del anexo 1 muestra un detalle de los archivos tanto de información general como de los elementos individuales y las variables que los conforman.

### **3.4.2. Fuentes de obtención de Información.**

El cuadro Nº 1 del anexo 1 muestra los principales

parámetros requeridos como datos de entrada y su correspondiente fuente de información. Como puede verse, la información de suelos se obtuvo básicamente de pruebas de laboratorio o mediciones de campo o literatura disponible. La información referente a uso de la tierra se obtuvo de la literatura al respecto.

Cabe destacarse también la importancia que el modelo de elevación digital desempeñó para la obtención de algunos datos de entrada como son las pendientes y la dirección de pendiente de cada elemento .

### 3.4.3. Información de Precipitación.

#### 3.4.3.1. Registros de Precipitación.

Los registros de precipitación para cada una de las tormentas utilizadas en la modelación se obtuvieron de las bandas de los pluviógrafos instalados por el Instituto Costarricense de Electricidad ( ICE ) en la cuenca del Río Pejibaye. Se utilizaron las estaciones: El Humo y Oriente (registros diarios) y Taus, Tábano, El Gato, T-Seis y Destierro (registros mensuales). La figura N<sup>o</sup> 6 muestra la ubicación de estas estaciones.

En vista de que la versión actual del modelo ANSWERS acepta un máximo de 4 estaciones de precipitación, fué necesario agrupar las 7 estaciones en 4. Para ello se unieron algunos registros de precipitación de las estaciones formando

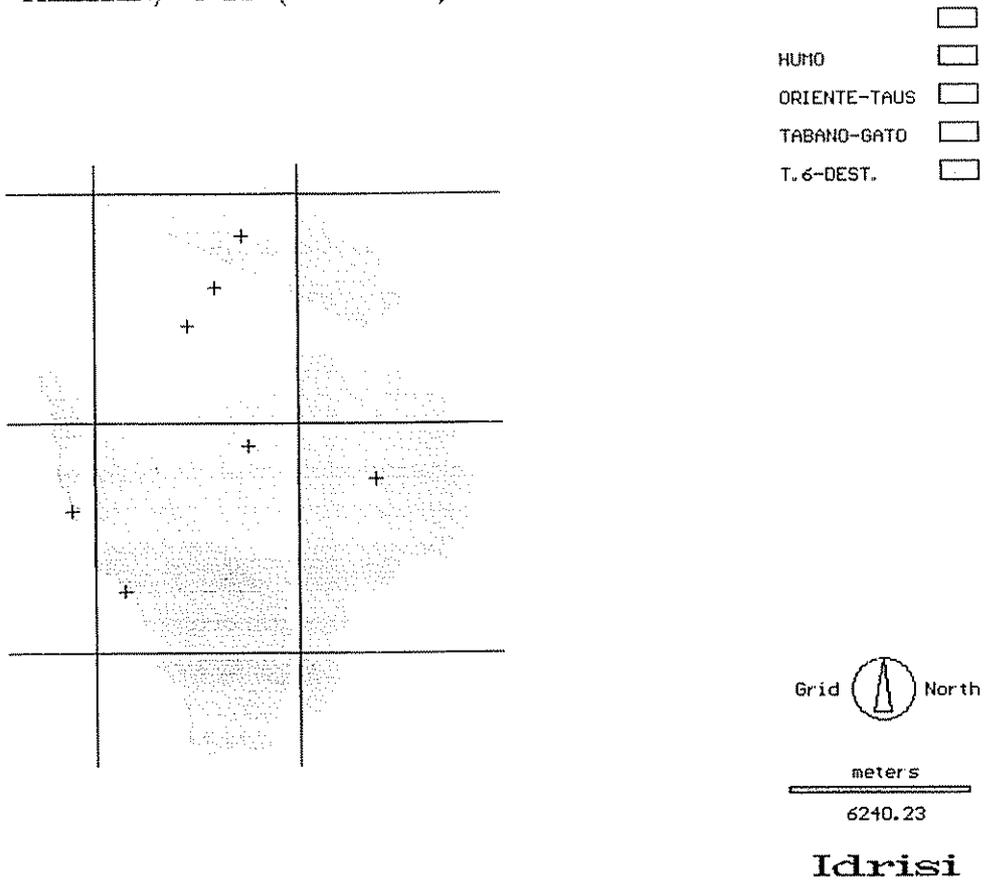


Figura No. 6. Estaciones pluviográficas y poligonos de Thiessen

pares para que al final resultaran 4 registros, a saber:

El Humo.

Oriente-Taus.

Tábano-El Gato.

T.Seis-Destierro.

Una vez unidos los registros de cada par de estaciones en intervalos de tiempo comunes, se calculó el volumen de precipitación promedio para cada intervalo considerado, a partir del cuál se obtuvo la intensidad de precipitación promedio para las estaciones consideradas. Los cuadros N<sup>o</sup> 2A a 2L del anexo 1, presentan los datos de precipitación agrupados para las diferentes estaciones. Los datos de entrada al modelo son las dos últimas columnas, el tiempo acumulado y la intensidad de precipitación para cada intervalo.

Con esta agrupación se pretendió lograr una cobertura más uniforme de estaciones sobre la cuenca en relación a la producida al considerar solamente 4 estaciones.

La distribución espacial de la precipitación se efectuó utilizando el método de los Polígonos de Thiessen. Se aplicó Thiessen para las 7 estaciones antes mencionadas, para posteriormente agrupar los polígonos de manera que resultaran finalmente 4 zonas de influencia. El cálculo de los polígonos de Thiessen se hizo inicialmente en forma manual y posteriormente se efectuó por medio de un módulo del Sistema de Información Geográfico "IDRISI". Los resultados fueron muy similares. La Figura N<sup>o</sup> 6 muestra el mapa final

de zonas de influencia de la precipitación obtenido en la forma antes indicada.

### 3.4.3.2. Tormentas analizadas

Se utilizaron 3 tormentas en el análisis:

Evento del 24/8/93 con un caudal pico de 103 m<sup>3</sup>/seg.

Evento del 13/6/94 con un caudal pico de 228 m<sup>3</sup>/seg.

Evento del 21/9/82 con un caudal pico de 389 m<sup>3</sup>/seg.

Para mayor facilidad estableceremos una clasificación arbitraria y denotaremos de ahora en adelante a estas tormentas como: tormenta de baja intensidad (24/8/93), tormenta de intensidad media (13/6/94) y tormenta de alta intensidad (21/9/82).

Los períodos de retorno para estos eventos fueron determinados utilizando la fórmula de Weibull . El cuadro N<sup>o</sup> 3 del anexo 1 muestra el ajuste gráfico efectuado.

### 3.4.4. Información de suelos

#### 3.4.4.1. Parámetros de suelo.

Los parámetros de suelo requeridos por el modelo que han sido obtenidos por medio de pruebas de laboratorio a partir de muestras de campo son las siguientes:

Densidad aparente.

Densidad de partícula.

Textura.

Capacidad de Campo a 0.33 atm.

Profundidad de la zona de control de la infiltración (obtenida por medición directa en campo).

Con la densidad aparente y la de partícula se calculó la porosidad total del suelo.

#### 3.4.4.2. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

La ubicación de los sitios de muestreo de suelos estuvo determinada sobre todo por la dificultad de acceso que presenta la cuenca hacia sus partes media y alta.

Se procuró hasta donde fué posible, sobre todo en la parte baja, de lograr una buena cobertura de sitios de muestreo. En la parte alta, la topografía tan escarpada y la falta de senderos hizo que los sitios de muestreo que se ubicaron fueran muy pocos. La figura N<sup>o</sup> 7 muestra la ubicación de estos sitios.

Todos los sitios de muestreo ,exceptuando T-6 y GA-5 fueron georeferenciados con el uso de un GPS ( Global Positioning System o Sistema de Posicionamiento Global). Este sistema permite la referenciación de puntos sobre la superficie de la tierra con ayuda de satélites.

En el cuadro N<sup>o</sup> 4 del anexo 1 se pueden ver las

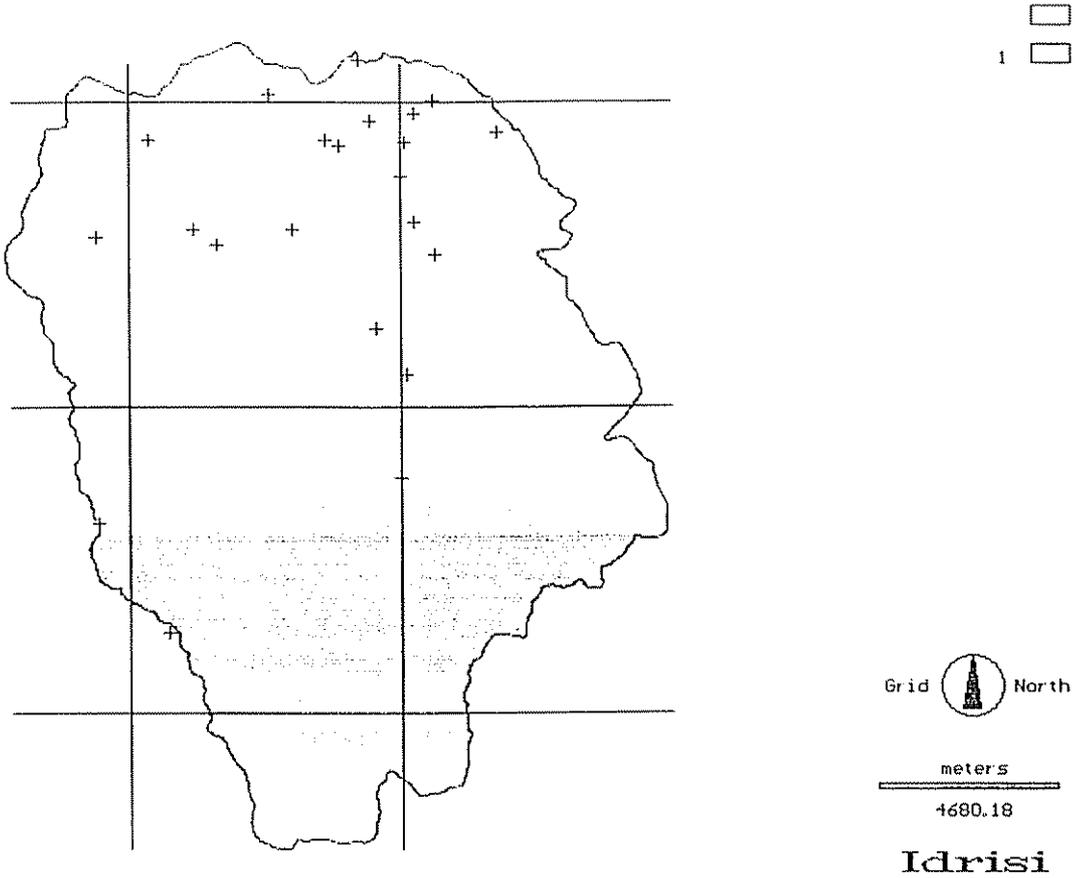


Figura No. 7 Contorno de cuenca

coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.

#### 3.4.4.3. Toma de muestras de suelos.

Se tomaron por lo general 3 muestras por sitio. La toma de muestras de suelo se efectuó por los métodos tradicionales: se utilizó un barreno para la toma de muestras para análisis de textura y densidad de partícula y muestreadores de anillo para la capacidad de campo y la densidad aparente.

#### 3.4.4.4. Pruebas de laboratorio de suelos.

Las pruebas mencionadas fueron efectuadas en el Laboratorio de Suelos del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Todas las pruebas para los parámetros mencionados en el punto 3.4.4.1 se realizaron según lo recomendado por Forsythe (1992) .

El cuadro N<sup>o</sup> 1 muestra los valores promedio de 3 repeticiones para cada sitio, obtenidos para los parámetros de densidad aparente, densidad de partícula y capacidad de campo.

La profundidad de control de la infiltración se determinó según lo recomienda Beasley (1981), considerando que esta varía entre un 25 a un 75 % de la profundidad del horizonte A. Las profundidades del horizonte A en los diferentes sitios fueron medidas en campo y a partir de estas

Cuadro # 1. Propiedades del Suelo por Sitio.

SITIO	IDENTIFICADOR	COBERTURA VEGETAL	DENS.APAR gr/cm <sup>3</sup>	DENS.PART. gr/cm <sup>3</sup>	POROSIDAD % VOL	CAP.CAM % SAT.
TUCURRIQUE	TU.1	PASTO	0.98	2.57	61.86	65.82
GATO	GA.1	CANAL	1.885	2.59	58.11	81.38
GATO	GA.2	CAFE	1.01	2.53	60.08	82.16
GATO	GA.3	PASTO	0.73	2.47	70.45	59.18
GATO	GA.4	CAFE	0.98	2.53	61.26	76.84
BAJOS.HUMO	B.HUM	PASTO-ARBOL.	0.51	2.21	76.92	53.32
TAUSITO	TAUSITO1	PASTO-MACAD.	0.45	1.98	77.27	76.07
LA SELVA	SELVA1	PASTO	0.82	2.58	68.22	69.56
TAUS	MP1	PASTO	0.54	2.34	76.92	59.18
T.SEIS	T.SEIS	BOSQUE PRIM.	0.47	2.43	80.66	67.8

se estimaron las profundidades de control de la infiltración. Se inició la modelación con un valor de un 50 % de la profundidad del horizonte A.

#### 3.4.4.5. Mapa de suelos.

El primer paso para la definición de un mapa de suelos para la zona fué la elaboración de un mapa textural de suelos. Para ello se utilizó la información de las pruebas de laboratorio de textura efectuadas en los sitios de muestreo que se presentan en la Fig N<sup>o</sup> 7. Se trabajó con 3 o 4 repeticiones por cada sitio de muestreo, definiéndose una textura predominante por cada sitio .

El cuadro N<sup>o</sup> 2 muestra los resultados de porcentajes de arena, limo y arcilla y la textura promedio obtenidos para cada uno de los sitios de muestreo considerados.

Posteriormente, utilizando el comando Thiessen del programa IDRISI fué posible establecer áreas de influencia para cada uno de los sitios de muestreo, en forma similar a como se determinan las áreas de influencia para las estaciones de precipitación. Las áreas con texturas iguales fueron agrupadas para definir nuevas áreas que constituyeron las clases texturales de suelo dentro de la cuenca. La figura N<sup>o</sup> 8 muestra el mapa con las clases texturales mencionadas.

Para obtener el mapa de suelos se agruparon las clases texturales de acuerdo al criterio de clasificación de grupos hidrológicos de suelos que se menciona en Young et all

Cuadro # 2. Textura por sitios

SITIO	IDENTIF.	PORC. PROMEDIO			TEXTURA PROM.	CLASE HIDR.
		%ARENA	%LIMO	%ARCILLA		
TAUSITO	TAUSITO	77.4	12.9	35.5	FRANCO-ARENOSO	A
SELVA	SELVA	33	31	35	FRANCO-ARCILLOS	C
HUMO	HUM	26.6	25	48.4	ARCILLOSO	D
BAJOS HUMO	B.HUM	73	12	15	FRANCO ARENOSO	A
EL GATO	GA-5	39	20	41	ARCILLOSO	D
DESTIERRO	DES	21.9	55.3	22.65	FRANCO-LIMOSO	C
T.SEIS	T.6	65.6	22	12.4	FRANCO-ARENOSO	A
EST.GATO	E.GATO	30.5	38.6	30.8	FRANCO-ARCILL.	C
TAUS	MP-1	58.18	18.6	23.3	FRANCO ARC-AREN.	A
TAUS	MP-2	31.1	29.5	39.4	ARCILLOSO	D
EL GATO	MP-3	30	23.9	46.1	ARCILLOSO	D
TABANO	TA-1	47.7	24	28.3	FRANCO ARC-AREN.	A
TABANO	TA-2	68.7	20.3	32.9	FRANCO ARENOSO	A
EL GATO	GA-1	37.3	38.3	24.4	FRANCO	B
EL GATO	GA-2	47.2	32.13	20.67	FRANCO	B
EL GATO	GA-3	21.2	22.13	56.67	ARCILLOSO	D
EL GATO	GA-4	34	29.1	36.9	FRANCO-ARCILL.	C
EL HUMO	GATO MD	30	26	44	ARCILLOSO	D
TUQUORRIQUE	TU-1	23.3	24	52.7	ARCILLOSO	D
RIO CACAO	CAC-1	26	31.4	42.6	ARCILLOSO	D
LA MARTA	MA-1	22.9	35.3	41.8	ARCILLOSO	D
LA MARTA	MA-3	33.1	30	36.9	FRANCO ARCILL.	C

# MAPA TEXTURAL DE SUELOS

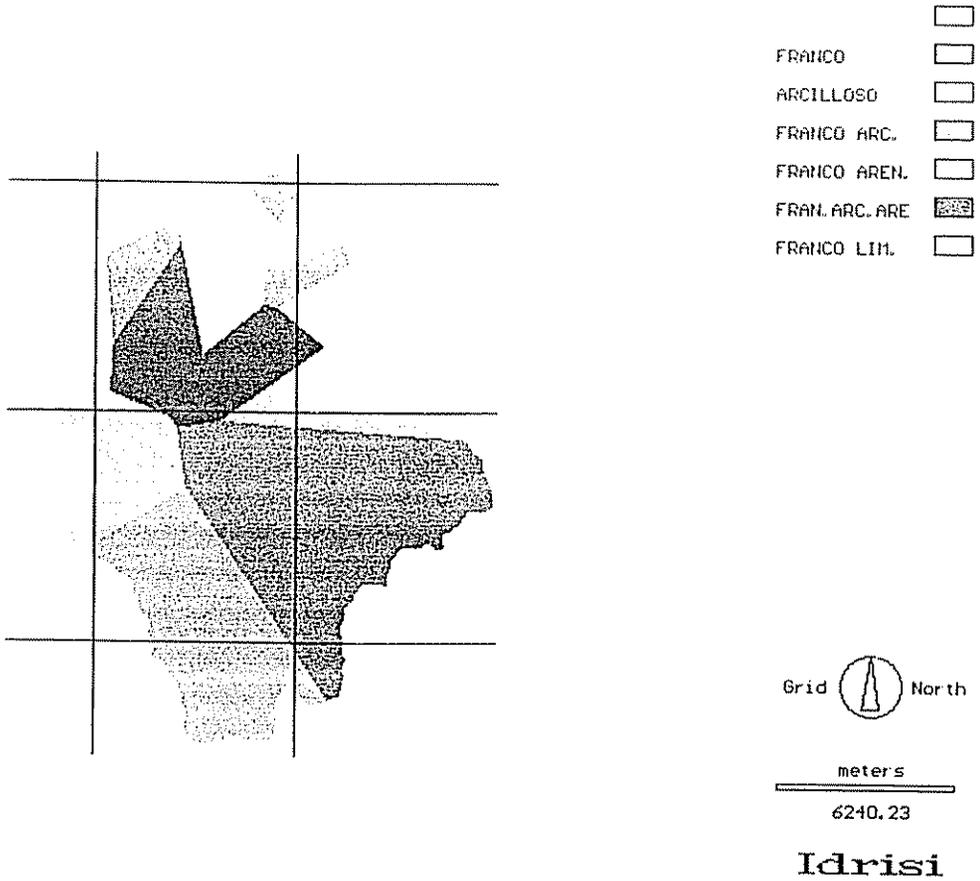


Figura No. 8 Mapa textural de suelos

(1987).

1. Suelo tipo D

Comprende:

suelos arcillosos

2. Suelo tipo C

Comprende:

suelos franco arcillosos

franco arcillosos a franco arcillo limosos.

franco limosos

franco limosos a franco arcillo limosos

3. Suelo tipo B

Comprende :

suelos franco arenosos

franco arenosos a francos

franco a arenoso y gravosos

franco

franco a franco limoso

franco a franco arcilloso

franco a arcillo limoso

4. Suelo tipo A

Comprende:

Arenas a arenas francas.

Para este estudio, con el fin de tener un número mayor de grupos de suelos, se consideraron los suelos con componente arenoso es decir los franco arenosos y los franco arcillo arenosos como una categoría aparte que se denominó clase A.

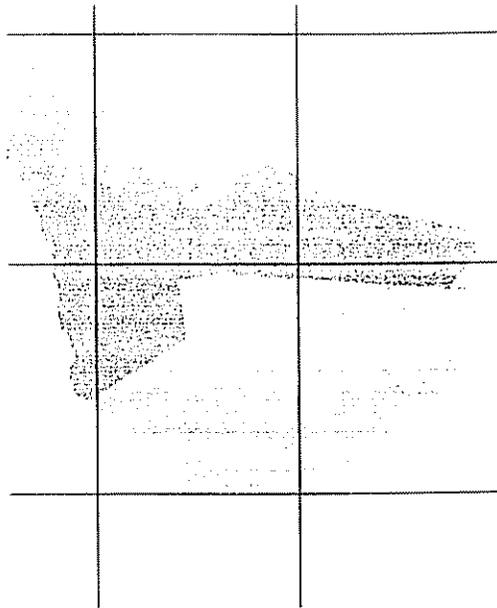
Este procedimiento de reasignación de clases se efectuó también utilizando IDRISI. El mapa final de clases hidrológicas de suelos se presenta en la figura Nº 9.

#### 3.4.5. Información de infiltración.

La alta variabilidad temporal y espacial que presenta este proceso hace que sea prácticamente imposible lograr una buena representación del mismo a través de pruebas de campo.

Pruebas de infiltración efectuadas por diferentes investigadores reflejan la dificultad de obtener resultados satisfactorios para el fenómeno de la infiltración.

Amezquita (1974), trabajando en suelos de la zona de Turrialba, Costa Rica, efectuó pruebas de infiltración con infiltrómetro de anillos concéntricos. Obtuvo coeficientes de determinación  $r^2$  de 0.234 para la serie Instituto y de 0.34 para la serie Colorado, en cuanto a la relación entre velocidad de infiltración y tiempo. Por su parte Berru (1978), efectuó pruebas similares en La Suiza de Turrialba y obtuvo resultados entre 0.62 y 0.80 para el coeficiente de determinación en la relación velocidad de infiltración versus tiempo.



- S1. CLASE B
- S2. CLASE D
- S3. CLASE C
- S4. CLASE n



meter s  
62+0. 23

**Idrisi**

Figura No 9 Clases hidrológicas de suelos

En general, la mayoría de autores (Amezquita (1974), De Roo (1993) ), coinciden en que es sumamente difícil tratar de representar en forma adecuada por medio de pruebas de campo un fenómeno tan variable como la infiltración.

Es por ello que para este trabajo no se efectuaron pruebas de infiltración de campo. Se prefirió recopilar los resultados que se han efectuado a la fecha en suelos similares a los existentes en la cuenca del río Pejibaye y a partir de ahí deducir expresiones matemáticas para representar el fenómeno o establecer rangos de variación según ciertos criterios.

Específicamente se tomó la información de los trabajos de Berru (1980) , Amezquita (1974), Molero (1972) y Mora (1987).

A partir de esta información, se calcularon rangos para los valores de infiltración en estado estacionario (FC) y para la tasa máxima (A) según la clase textural del suelo considerado. Es claro que la tasa de infiltración depende de una gran cantidad de factores y no solamente de la textura del suelo. Sin embargo para efecto de obtener valores iniciales de infiltración para la modelación se simplificó el problema determinando rangos de variación en función solamente de la textura del suelo.

El cuadro N°6 del anexo presenta los valores obtenidos. Estos valores, sin que se pretenda puedan ser considerados como de aplicación generalizada o como rangos estrictos de variación, fueron utilizados nada más como una referencia importante para determinar los valores de

infiltración iniciales a utilizar durante la modelación. Estos valores fueron modificados conforme se fué avanzando con el proceso de calibración.

Paralelamente a este análisis, y con base en los resultados de pruebas de conductividad hidráulica saturada efectuados por Amezquita (1974), se construyó con ayuda del programa SAS ( Statistical Analisis Systems ) un modelo de regresión múltiple que relacionara en primera instancia la conductividad hidráulica saturada con la porosidad, porcentaje de arenas y porcentaje de arcilla del suelo.

El modelo de regresión incorpora resultados de 84 ensayos de conductividad hidráulica saturada de la zona superficial del suelo ( primeros 30 cm en promedio ).

Al construir con SAS este modelo de regresión múltiple resultaron ser no significativas las variables porcentaje de arcilla y de arena por lo que finalmente se decidió eliminar estas variables y utilizar un modelo de regresión simple que relacionara conductividad hidráulica con porosidad del suelo.

Se probaron varios modelos: lineales, cuadráticos y cúbicos. Sin que resultaran diferencias sustanciales entre uno y otro, el modelo que mejor aproxima resultó ser el cuadrático.

La ecuación obtenida fué la siguiente:

$$CH = 67.21846157 - 2.5279622 * POR + 0.02413308 * (POR)^2$$

donde: CH = Conductividad Hidráulica saturada en m/día  
 POR = Porosidad Total (% del volúmen)

El modelo es altamente significativo con una significancia de 0.0001 . Sin embargo el valor de  $r^2$  es de apenas 0.32 , es decir apenas un 32 % de la variación es explicada por el modelo.

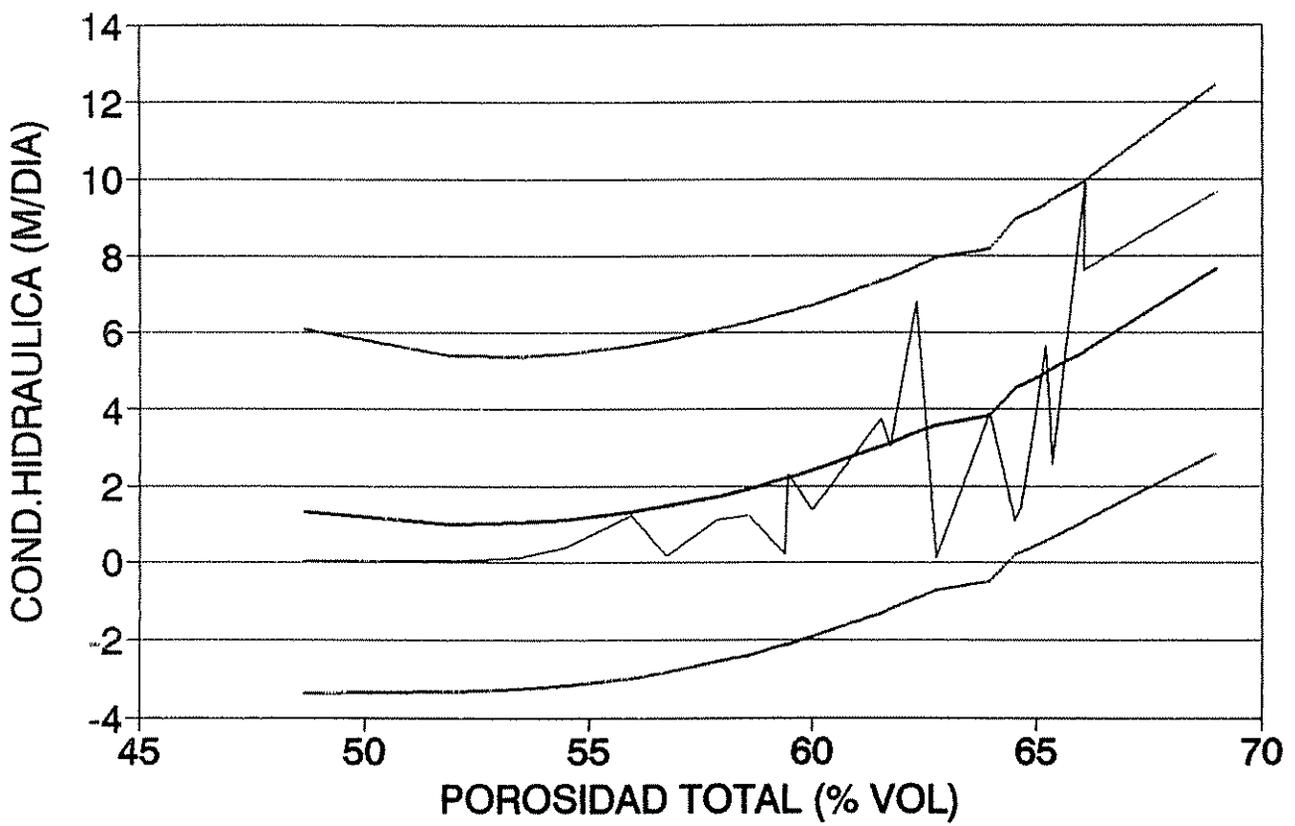
A partir de este modelo, se determinaron los rangos de confiabilidad para un 95 % de probabilidad . Estos se muestran en la figura N° 10. Puede notarse la gran variabilidad de los valores obtenidos. Estos rangos de variación permitieron ubicar mejor los valores de conductividad hidráulica (FC) que se utilizaron en la modelación.

#### 3.4.6. Factor de erodabilidad del suelo. USLE "K".

Para la determinación del factor de erodabilidad del suelo se utilizó la ecuación de predicción propuesta por Paulet (1967). Esta ecuación fué obtenida con base en análisis de correlación múltiple efectuados para 8 suelos de los Estados Unidos.

La ecuación utilizada relaciona las variables independientes densidad aparente, porcentaje de arena y porcentaje de limos de la siguiente forma :

$$K = 0.010356 - 0.0378082 * A_o + 0.00232882 * L + 0.323545 * Da.$$



— OBSERV.    — MODEL.    — LIMITE SUP.    — LIMITE INF.

Figura # 10. Bandas de Confiabilidad. Conductividad Hidraulica

donde :

K = Factor de Erodabilidad del suelo.

Ao = Porcentaje de arena ( 10 cm de suelo superficial).

L = Porcentaje de limo ( 10 cm de suelo superficial ).

Da = Densidad aparente en gr/cm<sup>3</sup> ( 10 cm superficiales ).

Los valores de Ao, L y Da para los distintos tipos de suelos considerados en la modelación se obtuvieron a partir de una textura media para el tipo de suelo en consideración.

Se obtuvieron así inicialmente porcentajes promedio de arenas, limos y arcillas a partir de las diferentes repeticiones utilizadas en cada sitio de muestreo. Con estos valores y con la densidad aparente obtenida a partir de muestras de campo ( Ver cuadro N<sup>o</sup> 3 ), se calcularon valores del coeficiente de erodabilidad por sitio de muestreo. Una vez hecho esto, se calculó un valor de K promedio para cada tipo de suelo.

El cuadro N<sup>o</sup> 3 muestra los valores promedio obtenidos para cada sitio de muestreo y los valores de K promedio por tipo de suelo considerado.

Los valores obtenidos se consideran altos en relación a los señalados por la escasa literatura existente al respecto para suelos nacionales. Mora (1987) obtuvo valores de K para la cuenca del río Pejibaye que varían entre 0.0135 y 0.0317 ( sistema métrico ).

Sin embargo, para efecto de esta modelación, se decidió iniciar con los valores obtenidos para paulatinamente, si

Cuadro # 3. Valores de USLE K

CLASE HIDROL.	SITIO	D.APAR. gr/cm <sup>3</sup>	%ARENA	%LIMO	USLE K		K.PROM.
					S.M	S.I	S.I
A	B.HUM	0.51	73.3	11.5	0	0	0.004
	TAUSITO	0.45	77.4	12.9	0	0	
	MP1	0.54	54.8	20	0.024	0.019	
	T.SEIS	0.47	63.7	21.9	0	0	
B	GA1	1.09	37.3	38.3	0.31	0.24	0.21
	GA2	1.01	47.2	32.1	0.233	0.18	
C	GA4	0.98	34	29.1	0.267	0.21	0.19
	SELVA1	0.82	32.5	32	0.227	0.17	
D	TU1	0.98	23.3	24	0.295	0.228	0.195
	GA3	0.73	23.9	22.6	0.209	0.162	

SM : Sistema metrico

SI : Sistema Ingles

fuese necesario ajustar los mismos en la medida en que se avanzara con las calibraciones.

### 3.4.7. Información de cobertura vegetal y uso del suelo.

#### 3.4.7.1. Mapa de cobertura vegetal.

El mapa de cobertura vegetal se confeccionó a partir de una imagen de satélite LADSAT del año 1992 para la zona.

El mapa se obtuvo por medio de una clasificación no supervisada de la imagen de satélite utilizando el programa IDRISI (análisis cluster). Este mapa puede apreciarse en la figura N° 11.

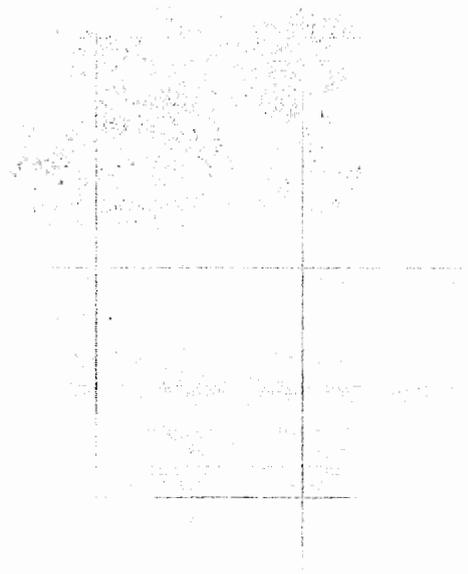
#### 3.4.7.2. Información de Entrada.

La información que requiere el modelo ANSWERS en relación a la cobertura vegetal se obtuvo en su mayoría del manual del mismo modelo principalmente por la falta de información existente en este aspecto para regiones tropicales.

Los valores del factor de erosividad relativa "C" de la USLE para iniciar la modelación se obtuvieron de Mora (1987) y Vahrson (1992) .

El cuadro N° 5A del anexo 1 (set N° 1), muestra los valores iniciales utilizados para las diferentes coberturas consideradas.

# COBERTURA Y USO DE LA TIERRA



- CANA
- CAFE
- PASTO
- ARB. AISL.
- BOSQUE SEC.
- BOSQUE PRIM.



6240.23  
meters

**Idrisi**

Figura No. 11. Cobertura y uso de la Tierra

### 3.4.8. Información de canales naturales.

La información requerida por el modelo como datos de entrada en cuanto a la red de drenaje se limita al ancho de cada segmento de canal y el valor correspondiente del coeficiente de rugosidad de Manning.

En vista de que en la cuenca del río Pejibaye no existe información topográfica en detalle como perfiles transversales, salvo en los dos sitios donde se ubican las estaciones fluviográficas del ICE, no fué posible determinar los anchos de todos los cauces en la cuenca. Fué necesario entonces estimar los anchos de los canales con base en algunas mediciones efectuadas durante las visitas de campo a la misma ayudándose también con algunos otros criterios hidrológicos como el número de orden de los cauces. Por medio de esto fué posible ubicar en un mapa diferentes segmentos en la red con sus correspondientes anchos de canal.

Otro criterio que se utilizó fué el del número de celdas que drenan hasta un punto determinado de la red. El programa PCI permite calcular a partir del modelo de elevación digital cual es el número de celdas que están drenando hasta determinado punto. De esta manera el programa permite mostrar en la pantalla la variación en la tonalidad o intensidad del brillo de los canales a medida que el número de elementos que drenan va aumentando o disminuyendo. Esto nos da una idea de la magnitud del cauce o bien del caudal que transporta. Estableciendo clases para estas tonalidades, es posible así

tener diferentes rangos para las magnitudes de flujo en los canales y definir segmentos dentro de la red de flujo con magnitudes de flujo similares. Estos segmentos pueden ser mas facilmente relacionados con anchos de canal.

La figura N<sup>o</sup> 12 muestra la red de drenaje obtenida con el procedimiento mencionado.

Dos detalles importantes en la definición de esta red son en primer lugar la necesidad de que exista conectividad entre todos los elementos de la red de drenaje, de lo contrario el programa marcará error. El otro aspecto se refiere a que ningún elemento de canal puede llevar pendiente 0 y en caso que sea necesario, puede asignársele un valor muy bajo como 0.01.

Los valores de la "N" de Manning para cada segmento de canal considerado se obtuvieron de Chow (1982) con base en información de las características de los canales obtenida durante las giras de campo a la cuenca.

El cuadro N<sup>o</sup> 5A del anexo 1 presenta los valores de anchos de canales y coeficientes de rugosidad utilizados como datos iniciales en la modelación.

Como complemento a esta investigación se evaluó el efecto que la red de drenaje tiene en los resultados de la modelación. Para ello, se procedió a modelar para una tormenta determinada con y sin red de drenaje y se compararon los resultados. Estos pueden verse en el capítulo 4.

# RED PRINCIPAL DE DRENAJE

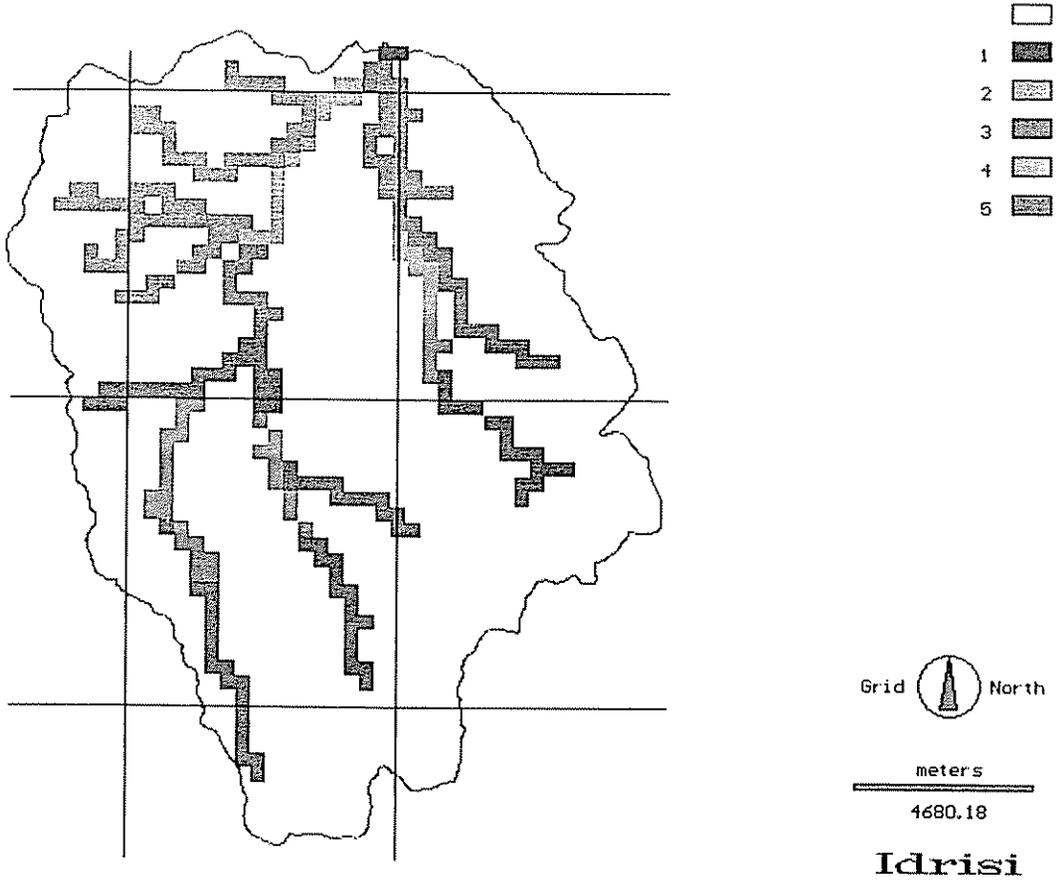


Figura No. 12. Red de Drenaje. Cuenca Río Pejibaye

### 3.5. Utilización de los Sistemas de Información Geográficos.

#### 3.5.1. Sistema IDRISI.

Para este estudio se utilizó el Sistema de Información Geográfico denominado IDRISI. IDRISI es un sistema tipo cuadrícula ( raster ) y está compuesto de aproximadamente 100 módulos de programa que pueden unirse a través de un sistema de menú.

En IDRISI los fenómenos espaciales son analizados por medio de los archivos de imagen. Estos son cuadrículas a las cuales se asignan valores numéricos para registrar la condición o carácter en cada punto del terreno.

El programa IDRISI se utilizó para confeccionar diferentes mapas que fueron utilizados durante esta investigación.

Por ser ANSWERS un programa que trabaja en base a un sistema de cuadrícula, resultó especialmente aplicable la utilización de un sistema como IDRISI, que opera de la misma manera.

#### 3.5.2. Interface ANSWERS-IDRISI.

ANSWERS requiere introducir información para cada uno de los elementos o pixeles que componen la cuenca. En el formato de entrada que presenta el modelo original, es necesario introducir la información elemento por elemento. Esto hace que , sobre todo cuando el tamaño del pixel seleccionado es

pequeño, la cantidad de información a introducir se vuelva inmanejable en forma manual.

Pensando en facilitar la entrada y salida de datos del programa ANSWERS, el Dr Gregorio Leclerk, confeccionó una interface o vínculo entre los dos programas. Esta interface efectúa la lectura de los mapas de suelos, cobertura vegetal y red de drenaje que se construyen en IDRISI y los convierte directamente al formato de entrada tabular que requiere ANSWERS. Este programa creado, además de representar una enorme ventaja para la entrada de datos al programa, también otorga una gran versatilidad al sistema, al permitir modelar diferentes escenarios con solo modificar los mapas originales de IDRISI, sin tener que ir a los elementos individuales a modificar valor por valor. De este modo, cambios en el uso del suelo, en los límites de los tipos de suelos, en las direcciones de la red de flujo o en la distribución espacial de la precipitación por ejemplo pueden modificarse directamente y fácilmente en los mapas confeccionados (asignando valores a polígonos y no a píxeles), los cuales serán leídos posteriormente por la interface y traducidos directamente al formato de entrada. Esto sin lugar a dudas permite que un modelo como ANSWERS cobre gran versatilidad para el procesamiento de información espacial reforzando su importancia en el manejo de cuencas hidrográficas y de los recursos hídricos.

La confección de esta interface representó sin duda un apoyo importante en esta investigación y demuestra una vez

mas la importancia de vincular modelos hidrológicos con sistemas de información geográficos.

### 3.6. Modelo de elevación digital.

El primer paso en la confección del modelo de elevación digital consistió en la obtención de las curvas de nivel a escala 1:50000 para la cuenca del Río pejibaye registradas digitalmente por medio de un "scanner". Estas curvas fueron suministradas por el proyecto SISVAH (Sistema de Información sobre Vivienda y Asentamientos Humanos) de la Fundación Costa Rica-Canadá para la Vivienda.

Una vez hecho esto, se procedió a la asignación de atributos de elevación a cada una de las curvas registradas. Esto se realizó con ayuda del programa AUTOCAD. Como parte de esto y utilizando el mismo programa se unieron las interrupciones y se corrigieron errores o irregularidades en las curvas registradas con el "scanner."

El siguiente paso consistió en unir las diferentes ventanas ya asignadas y corregidas para así tener el mapa completo de la zona del Pejibaye. Finalmente, y utilizando el programa PCI, se procedió a construir el modelo de elevación digital para la zona.

El mapa final de elevaciones obtenido puede apreciarse en la figura N° 13. Este mapa fué la base para la obtención de los mapas de pendientes y de aspecto utilizados en la interface como datos de entrada al modelo y los cuales pueden

verse en las figuras N<sup>o</sup> 14 y N<sup>o</sup> 15.

### 3.7. Esquema general del procedimiento.

La Fig # 16 muestra un esquema que explica en términos generales los principales componentes involucrados en la aplicación del modelo ANSWERS. Inicialmente debe construirse el archivo de información general para la cuenca : encabezado, precipitación, suelos, cobertura y red de drenaje. Este archivo contiene todos los parámetros que pueden ser asignados a los diferentes elementos individuales.

A este nivel es que el aporte de los Sistemas de Información Geográfico ( SIG ) y de la interconexión SIG-Modelos Hidrológicos llega a ser importante. Por medio de los SIG es posible construir diferentes mapas conteniendo cada uno de ellos la información correspondiente a cada una de las variables del archivo de elementos individuales, así por ejemplo se pueden tener mapas de pendiente, tipo de suelos, uso de la tierra, red de drenaje, elevaciones etc.

Por medio de la interfase entre los dos sistemas (ANSWERS-IDRISI) se puede traducir esta información de los diferentes mapas creados al archivo de elementos individuales del programa ANSWERS. Esto facilita enormemente la entrada de datos al programa.

La fase siguiente es la aplicación del modelo y la comparación de los resultados obtenidos con la información observada en campo.

# MAPA DE ELEVACIONES

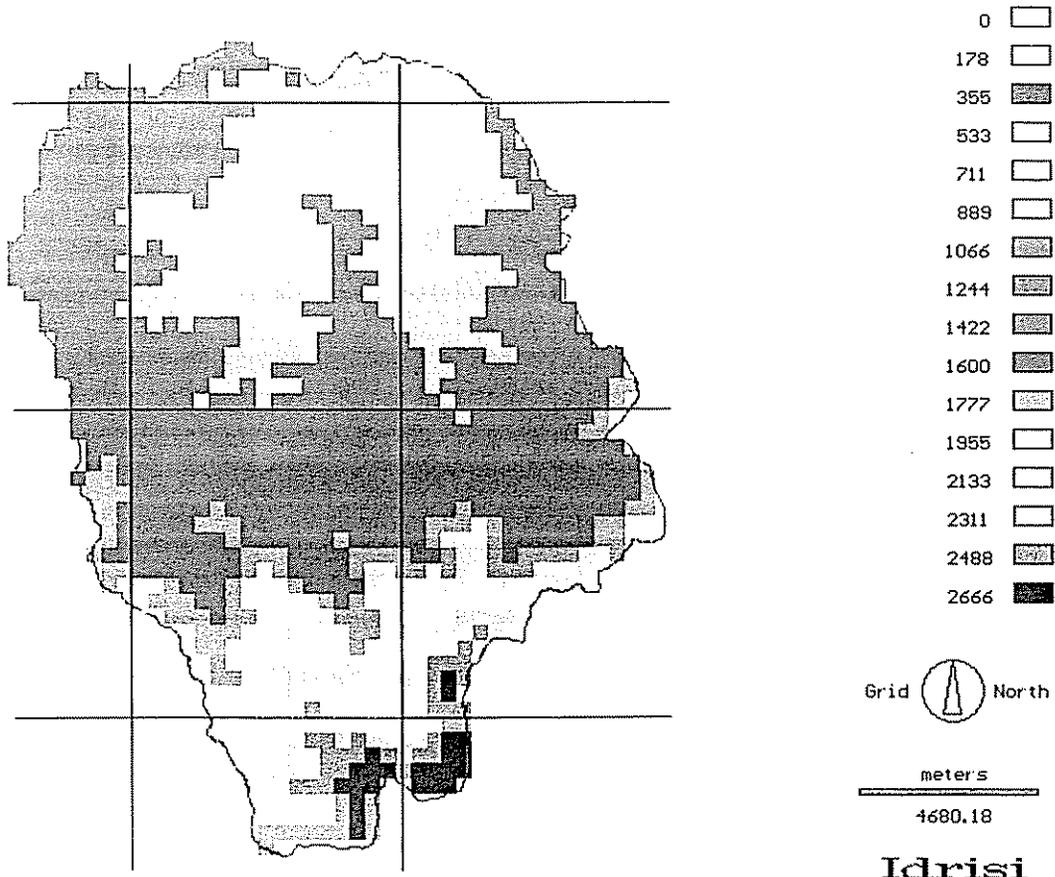


Figura No. 13. Mapa de elevaciones

PENDIENTE ( % \*10 )

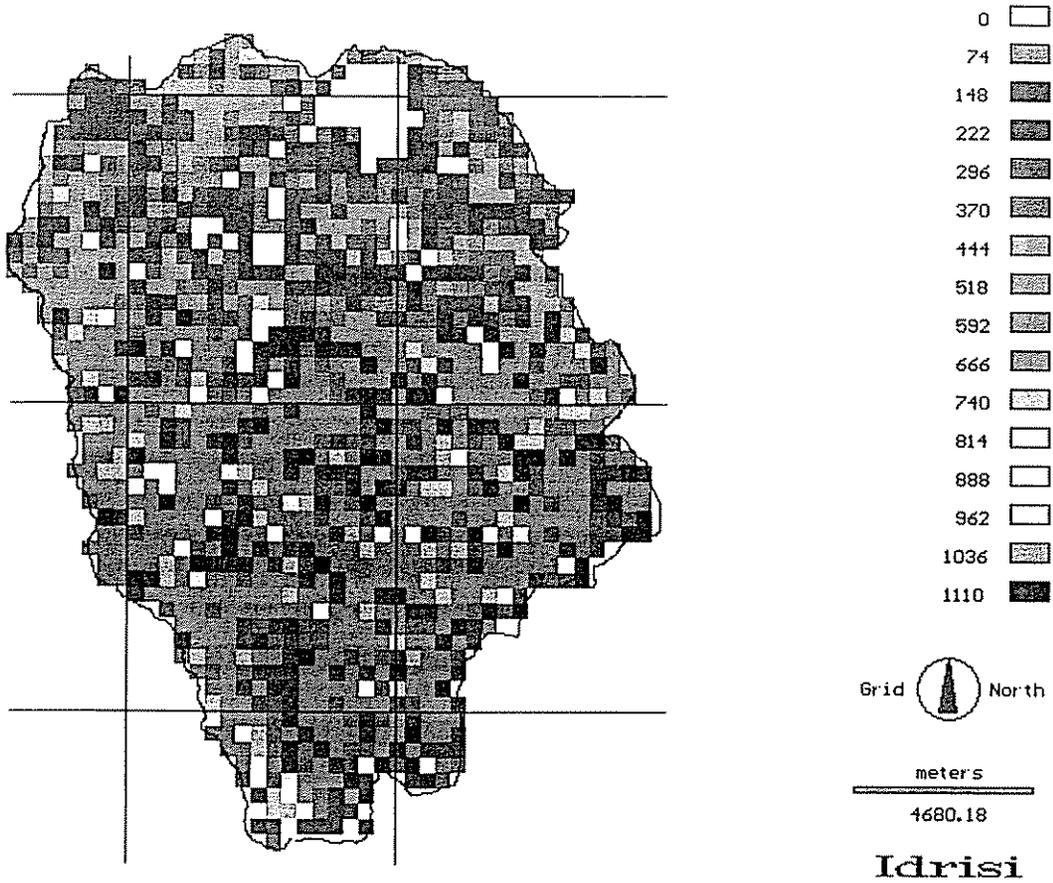


Figura No. 14. Mapa de pendiente

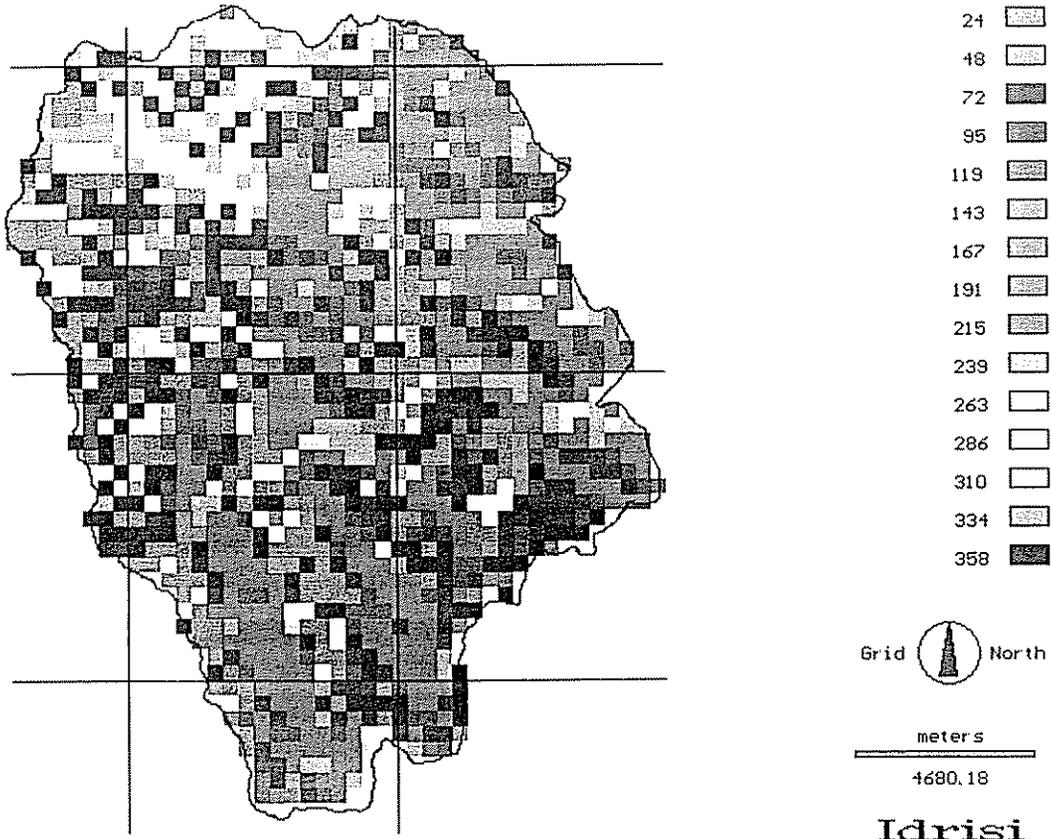
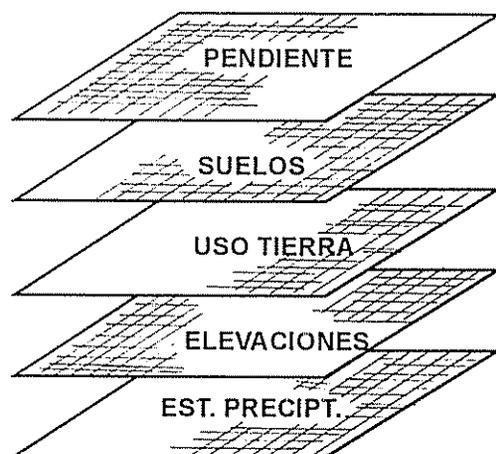
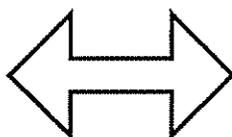
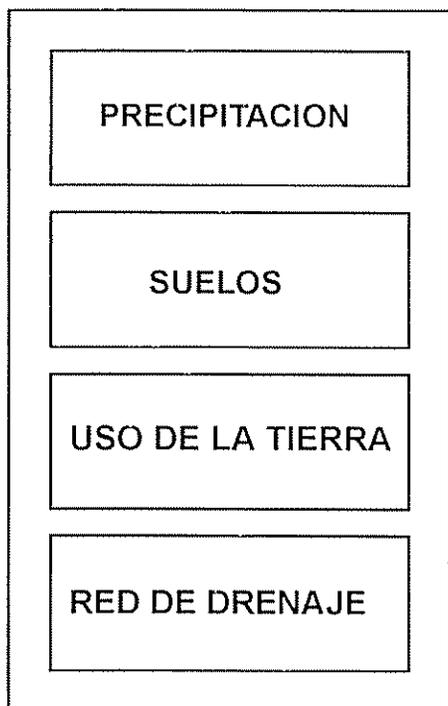


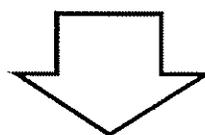
Figura No. 15. Mapa de aspecto

ARCHIVO  
INFORMACION  
GENERAL

ARCHIVO  
ELEMENTOS 103  
INDIVIDUALES  
(SIG)

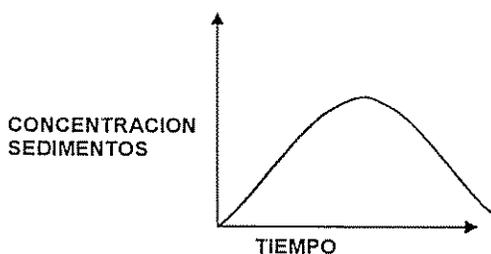
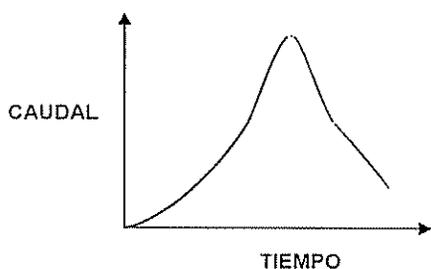
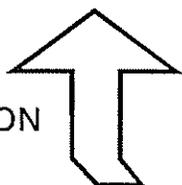


MODELO

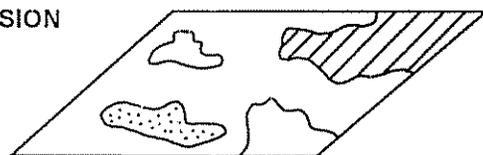


SALIDAS

CALIBRACION



MAPA DE  
EROSION



MAPA DE  
SEDIMENTACION

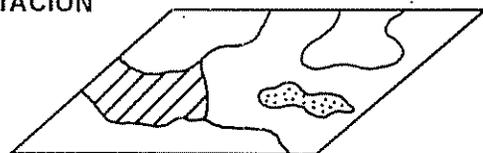


Fig N° 16. Esquema general del funcionamiento del modelo Answers.

De acuerdo al ciclo presentado en la Fig N° 16 puede decirse que el procedimiento empleado involucra en cierta forma el concepto de prueba y error al partir de parámetros iniciales e ir ajustándolos paulatinamente hasta lograr el ajuste esperado entre los datos de campo y la información de salida del modelo.

### 3.8. Calibración del modelo.

#### 3.8.1. Procedimiento general

La metodología general consistió en efectuar calibraciones individuales para la tormentas de baja, media y alta procurando la menor diferencia posible entre cada set de parámetros obtenido para cada calibración. A este nivel se utilizó el ajuste visual entre curvas modeladas y observadas.

Una vez logrados los mejores ajustes individuales, se procedió a procurar obtener modelaciones integradas, es decir, obtener sets de parámetros que pudiesen ajustar razonablemente las variables de respuesta para las 3 condiciones (baja, media y alta) o bien para la condición media y alta por separado y para la condición de baja por separado.

Se determinó el ajuste de las mejores modelaciones con respecto a los valores observados por medio del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson.

La resolución espacial utilizada en las modelaciones de

calibración fué de 400\*400 m.

### 3.8.2. Calibraciones individuales.

#### 3.8.2.1. Evento de baja.

La calibración del modelo se inició con el evento del 24/8/93. Este puede considerarse un evento de baja a mediana intensidad, con un caudal pico de 103 m<sup>3</sup>/seg.

La primera modelación se efectuó con los parámetros que fueron obtenidos en los distintos análisis y métodos presentados en este capítulo. El set de parámetros utilizados para esta modelación inicial puede verse en el cuadro Nº 5A del anexo 1.

Una vez efectuada esta calibración inicial, se procedió a efectuar paulatinamente el ajuste de las curvas de caudales y sedimentos modificando los parámetros de entrada al modelo. El ajuste de estas curvas en esta etapa se efectuó inicialmente por tanteo y error utilizando el mejor criterio y algunas referencias como el trabajo de De Roo (1993) en el que efectúa un estudio de sensibilidad para la aplicación del modelo en Holanda.

Los parámetros que en esta primera etapa fueron modificados en la calibración fueron principalmente los siguientes : factores de infiltración FC, DF, A, humedad antecedente ASM, factor de aporte de agua subterránea GRF y factores "K" y "C" de la USLE.

### 3.8.2.2 Evento de alta.

Una vez logrado este ajuste inicial para una tormenta de baja intensidad, se procedió a modelar con los parámetros obtenidos, para un evento de alta intensidad. Se modeló así para la tormenta del 21/9/82, la cual presenta un caudal pico de 389 m<sup>3</sup>/seg.

Fué necesario de nuevo ajustar algunos parámetros para lograr el mejor ajuste para esta tormenta.

### 3.8.2.3. Análisis de sensibilidad

Como parte del proceso de calibración y con el fin de poder lograr un mejor ajuste entre curvas observadas y modeladas, se procedió a efectuar un análisis de sensibilidad para tormentas altas y otro para tormentas bajas.

En este, se evaluó la sensibilidad del modelo a la variación de algunos de los principales parámetros de entrada. Específicamente se utilizaron los siguientes parámetros.

Porosidad Total ( TP)

Capacidad de Campo (FP)

Capacidad de infiltración estacionaria (FC)

Diferencia entre la tasa máxima y FC (A)

Profundidad de control de la infiltración (DF).

Exponente en la ecuación de infiltración (P)

Humedad Antecedente (ASM)  
Erodabilidad del suelo ( USLE K )  
Erosividad Relativa ( USLE C )  
Factor de forma de la superficie ( RC)  
Altura de rugosidad ( HU)  
Coeficiente de rugosidad de Manning (N).  
Interceptación Potencial (PIT)

Las variables independientes que se evaluaron en este análisis de sensibilidad fueron 5 :

Caudal pico del hidrograma.

Tiempo al pico.

Caudal pico de concentración de sedimentos

Tiempo al pico de sedimentos.

Carga total de sedimentos transportada.

El análisis consistió en variar cada uno de los parámetros de acuerdo a lo que se conoce de sus rangos de variación en la realidad y determinar por medio de la modelación el efecto que esta modificación tuvo en las cinco variables independientes antes mencionadas.

Para determinar cuáles fueron las variables independientes ante las cuales el modelo presentó mayor sensibilidad se utilizó la variable normalizada. Es decir, se dividió cada valor de la variable entre el promedio aritmético de modo que se eliminará así el efecto de unidades y pudiera con estas calcularse un índice de sensibilidad que

permitiera efectuar comparaciones entre la sensibilidad de las distintas variables.

Para efectuar esta comparación, se utilizó la pendiente de la regresión lineal obtenida con las variables dependiente e independiente normalizadas. Los cuadros N<sup>o</sup> 1 y N<sup>o</sup> 2 del anexo 2 presentan los índices de sensibilidad obtenidos utilizando las variables normalizadas antes explicadas.

Como complemento a estos resultados, se prepararon gráficas que muestran las variaciones y que permitieron estimar la magnitud de los cambios que se produjeron en las variables de respuesta al modificar cada una de las variables independientes. Algunas de las gráficas utilizadas se muestran en las figuras N<sup>o</sup> 7 a N<sup>o</sup> 18 del anexo 2.

#### 3.8.2.4. Evento de media

Una vez logrado el mejor ajuste para las dos tormentas mencionadas, se procedió a evaluar la calibración efectuada modelando para una tormenta de mediana intensidad. Se modeló así para el evento del 13/6/94 en la estación de Oriente, el cual presenta un caudal pico de 228 m<sup>3</sup>/seg.

#### 3.8.3 Modelaciones integradas.

En esta etapa de la investigación, se procuró obtener un

set de parámetros que pudieran ajustar simultáneamente, las 3 tormentas consideradas, o bien al menos un set que ajustara las tormentas de media y alta y otro para el ajuste de las tormentas de baja.

En esta etapa, se utilizó toda la experiencia e información obtenida en las modelaciones individuales efectuadas así como en el análisis de sensibilidad para procurar el objetivo mencionado.

#### **3.8.4. Cálculo de sedimentos totales**

Un elemento importante para la calibración fue la obtención de los datos observados de concentración de sedimentos y de sedimentos totales. Estos se obtuvieron de las curvas observadas en la estación fluviográfica del ICE en Oriente.

El cálculo de los totales de sedimentos en la estación de Oriente se efectuó por medio de integración numérica de la curva de concentración de sedimentos con respecto al tiempo.

En vista de que el programa ANSWERS no considera el flujo inicial existente en el canal antes del inicio de la tormenta, fué necesario ajustar las curvas de concentración de sedimentos observadas eliminando de estas el flujo inicial.

### 3.9. Análisis estadístico.

El análisis estadístico en este proyecto de investigación comprendió principalmente el análisis de la información resultante de la salida del programa de computo. Se efectuó con el fin de comparar estadísticamente los valores modelados como caudales y concentración de sedimentos con los valores de campo que se tienen para estas variables. Para este efecto se utilizaron análisis de correlación entre valores modelados y valores observados.

### 3.10. Mapas de Erosión y Sedimentación.

Con el fin de poder determinar la distribución espacial de la erosión y la sedimentación en la cuenca y estimar las zonas de máxima erosión y deposición, se construyeron utilizando los archivos de salida del modelo ANSWERS, mapas de erosión y sedimentación para las tormentas consideradas en esta investigación. Los mismos pueden verse en el capítulo 4. Todos estos mapas se construyeron por medio de un programa preparado por el Dr Gregorio Leclerc, que permite tomar las salidas del modelo ANSWERS y producir con estos, mapas de erosión y sedimentación.

### 3.11 Estudio Comparativo de la Erosión

Con el fin de comparar el aporte de sedimentos

provenientes de la parte alta de la cuenca (sector boscoso) y la parte baja (sector intervenido) se calculó la erosión producida en dos subcuencas en la parte boscosa, estas fueron : La subcuenca hasta antes de la confluencia del río Pejibaye con el río Taus, y la subcuenca hasta la confluencia de los ríos Gato y La Marta. Denominaremos a estas subcuencas como Taus y La Marta.

Para definir la erosión en estas subcuencas se utilizó el módulo EXTRACT de IDRISI aplicado sobre el mapa de erosión y sedimentación de suelos obtenido a partir de la salida de ANSWERS. De esta manera se pudo obtener el total de erosión neta (Erosión - Deposición) para cada una de las subcuencas mencionadas. Sumando estas dos cantidades se obtuvo la erosión total producida por el bosque en la cuenca. Esta cantidad fue comparada con la erosión producida en la zona intervenida de la cuenca. Los resultados pueden verse en el capítulo Nº 4.

### **3.12. Modelación para diferentes escenarios.**

Una vez obtenido resultados satisfactorios en cuanto a la calibración del modelo se intentó evaluar su potencial para simular diferentes escenarios en la cuenca del río Pejibaye.

Para ello se simularon 7 condiciones hipotéticas en la cuenca, vinculadas con el buen o mal manejo de los recursos

naturales que se de en la misma. Los escenarios considerados fueron:

- a.) Condición actual de la cuenca.
- b.) Cuenca 100% cubierta de bosque primario ( Condición inicial antes de la intervención)
- c.) Conversión de zonas de bosque primario y secundario actuales a zonas de pasto bien manejado.
- d.) Conversión de zonas de bosque primario y secundario actuales a pasto mal manejado.
- e.) Conversión de bosque primario y secundario actuales a zonas de cultivo permanente.
- f.) Conversión de bosque secundario actual a pasto mal manejado.
- g.) Conversión de bosque secundario actual a pasto bien manejado.
- h.) Condición actual bajo prácticas de conservación de suelos.

Para cada simulación se obtuvieron las curvas de caudales y de totales de sedimentos. Se efectuó con ellos una comparación con respecto a la condición actual. Esta puede verse en el capítulo de Resultados.

### 3.13. Evaluación del efecto del tamaño de pixel en la modelación.

Con la finalidad de determinar el efecto que el tamaño del pixel o elemento tiene en los resultados de la modelación, se procedió a modelar para un mismo evento con dos tamaños de pixel. Se utilizaron tamaños de 16 has y de 1 ha.

La modelación se efectuó para la tormenta del 13/6/94 (evento de media) utilizando los parámetros obtenidos en el set N<sup>o</sup> 9 que se presenta en el punto N<sup>o</sup> 4.3 en el capítulo de Resultados y en el cuadro N<sup>o</sup> 5I del anexo 1.

Se obtuvieron las gráficas y los mapas correspondientes a cada modelación, los cuales se presentan en el capítulo 4.

#### IV. RESULTADOS

Para efectuar la calibración se utilizaron 3 tormentas registradas por el ICE en la estación de Oriente. Estos eventos fueron :

Evento del 24/8/92 con un período de retorno menor de 1 año, evento del 13/6/94 con un período de retorno de 1.07 años y el evento del 21/9/82 con un período de retorno de 2.80 años.

Se inició la modelación con la tormenta del 24/8/93. Una vez calibrado el modelo para esta, se procedió a calibrar para las tormentas del 21/9/82 y del 13/6/94. La calibración se efectuó inicialmente por separado, es decir obteniendo un set de parámetros para cada tormenta. Posteriormente se procedió a integrar los resultados, obteniendo set de parámetros de carácter general.

El criterio inicial de ajuste para las distintas modelaciones consistió en ajuste visual entre curvas modeladas y observadas. Una vez obtenido un ajuste visual satisfactorio para los eventos de baja, media y alta, se calcularon índices de bondad de ajuste estadístico para cada una de ellas.

##### 4.1. Modelación inicial.

La primera modelación en esta investigación se efectuó con los parámetros que se obtuvieron de los distintos análisis y estudios presentados en el capítulo de Materiales

y Métodos.

El set de parámetros utilizados en esta primera modelación, denominado Set Nº 1, se presenta en el cuadro Nº 5A del anexo.

Se modeló inicialmente para el evento del 24/8/93. Los resultados y las curvas obtenidas pueden observarse en la figura Nº 17.

En general puede decirse que se obtuvo una buena aproximación al valor de los caudales observados. Sin embargo no hay ninguna respuesta de la cuenca en cuanto a sedimentos se refiere. La razón de esto se debe a una sobreestimación inicial de las tasas de infiltración en la cuenca lo cual reduce la escorrentía superficial y por lo consiguiente la capacidad del flujo de separar partículas y arrastrar sedimentos.

Se determinó que el rango de valores de infiltración FC que se manejaron en esta primera modelación estaban completamente afuera de los rangos que se requiere utilizar en el modelo para producir una respuesta de sedimentos. Fué necesario entonces restringir este rango a valores de la tasa mínima FC entre 0 y 25 mm/hora.

Es posible que estos valores esten subestimando la tasa real de infiltración en la cuenca, sobre todo si se considera los reportes de la literatura para zonas tropicales en los cuales resultados de pruebas efectuadas con infiltrómetro de anillos concéntricos (Amezquita ,1974) o pruebas de conductividad hidráulica saturada (Mora ,1978), reflejan por

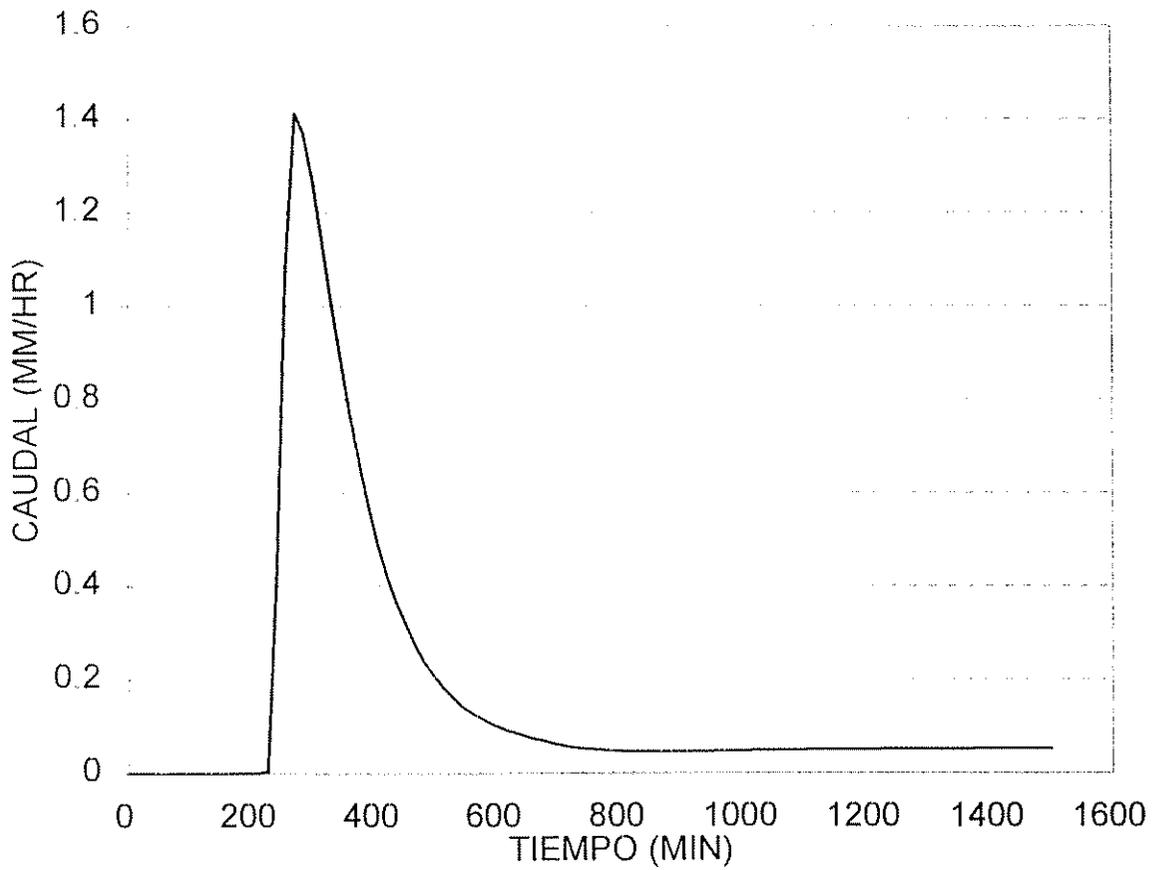


Figura # 17 Resultado Grafico de Primera Modelacion

lo general rangos de valores muy superiores a los requeridos por el modelo. Sin embargo, con el fin de poder efectuar la calibración de sedimentos, fué necesario trabajar con el rango de valores antes mencionado.

#### 4.2. Modelaciones individuales para cada tormenta.

Las siguientes etapas en la modelación consistieron en ajuste de las curvas obtenidas para cada tormenta por medio de la variación de diferentes parámetros de entrada de modo que dicho ajuste fuera mejorando paulatinamente.

Aunque la modelación hidrológica y de sedimentos debe realizarse paralelamente, puede mencionarse como criterio general el hecho de que es conveniente procurar un buen ajuste de caudales para una vez logrado este posteriormente terminar de ajustar la curva de sedimentos.

Esto es posible sobre todo variando los factores K y C de la USLE ( ver análisis de sensibilidad) para efectuar ajustes de la curva de concentración y la carga total de sedimentos sin alterar las curvas de caudales ya calibradas.

En esta etapa de la investigación se procedió por lo tanto a efectuar variaciones en los diferentes parámetros de entrada para ir mejorando el ajuste de las curvas. Los principales parámetros que se variaron fueron:

Los valores de infiltración FC y A.

La humedad antecedente ASM.

La profundidad de control de la infiltración DF.

La tasa de control del flujo subterráneo GRF.

Los coeficientes de rugosidad en los campos y canales N.

El coeficiente de interflujo TD.

Los valores C y K de la USLE.

En general se trató de mantener sin variación aquellos parámetros que fueron obtenidos por medio de pruebas de laboratorio como la porosidad o la capacidad de campo . Otros parámetros como las tasas de interceptación PIT, los porcentajes de cobertura PER o el factor de frecuencia de la rugosidad RC tampoco fueron modificados con respecto al set N01.

Los parámetros que controlan el flujo subterráneo (GRF) y el interflujo (TD) se mantuvieron bajos con el fin de evitar el levantamiento de la recesión en el hidrograma. Esto pareciera indicar que el aporte de la cuenca por interflujo y flujo subterráneo es bajo.

Los mejores ajustes obtenidos pueden verse en las figuras N0 18 , 19 y 20 conjuntamente con los hietogramas promedio para cada evento.

En la tormenta de baja se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro N0 4.

Cuadro N° 4. Resultados Evento de Baja.

	OBSERV.	MODEL.	ERROR REL %
CAUDALPICO (MM/HR)	1.2	1.24	3.33
CONC.SED.PICO(PPM)	5239	4634	11.5
TOTALSEDIM.(KG)	1569360	1525263	2.81
ESCORRENTIA (MM)	-	4.4	

Nota: Los valores de caudales se expresan en mm/hr por ser esta la forma de salida del Programa ANSWERS. El factor para convertir a m<sup>3</sup>/seg en esta cuenca es de 62.19.

Las curvas para la tormenta de baja presentan un ajuste aceptable para caudales sin embargo presentan un desfase en el tiempo al pico para la concentración de sedimentos de aproximadamente 4 horas con respecto al pico observado. No fué posible por mas intentos que se efectuaron poder hacer coincidir estas curvas en el evento de baja.

La modelación refleja un buen ajuste para el total de sedimentos transportado a la estación de Oriente con una diferencia de tan solo un 2.81 % con respecto al valor observado.

El set de parámetros obtenido al calibrar el evento de baja es el set N°2. (ver cuadro N°5B, anexo 1)

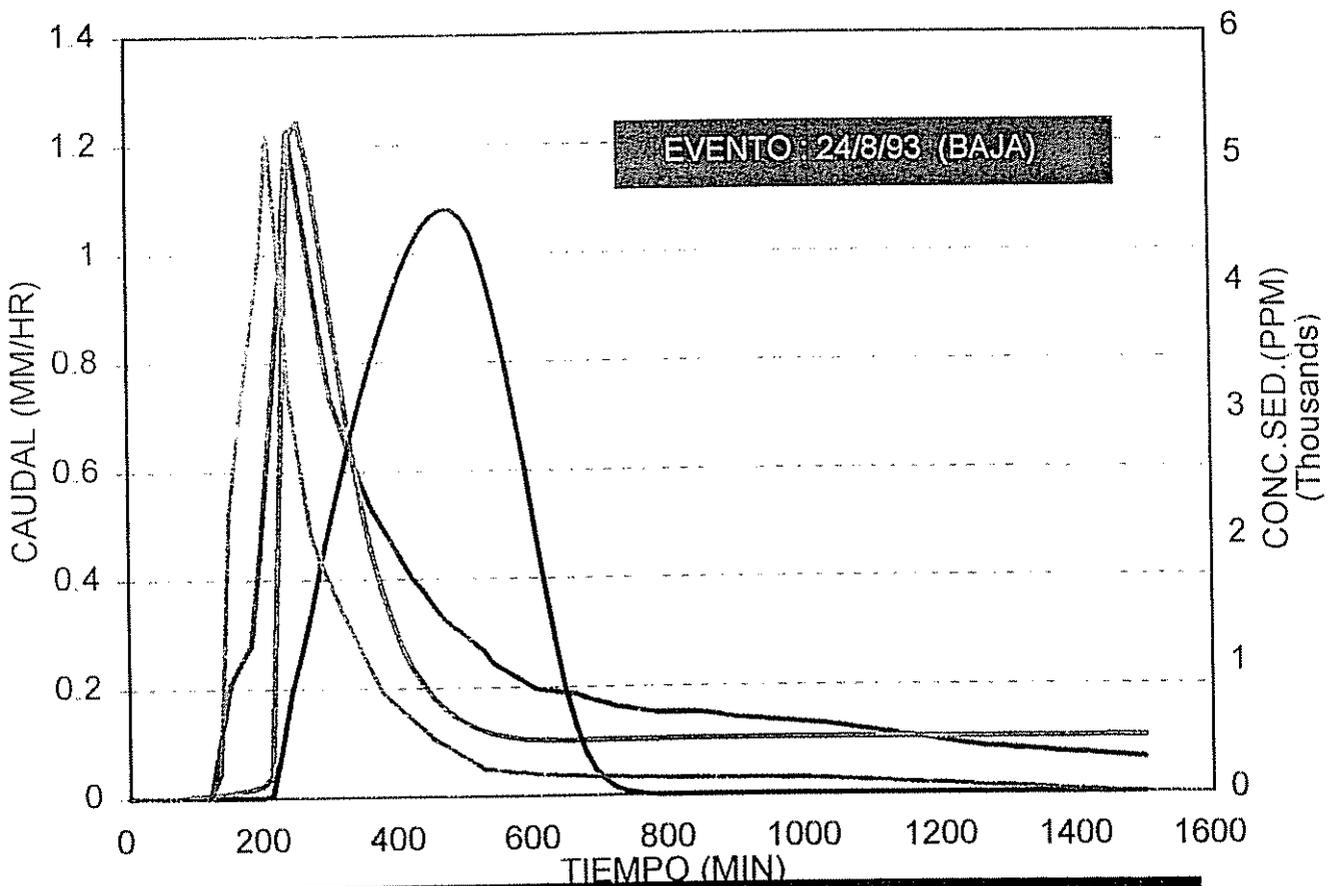
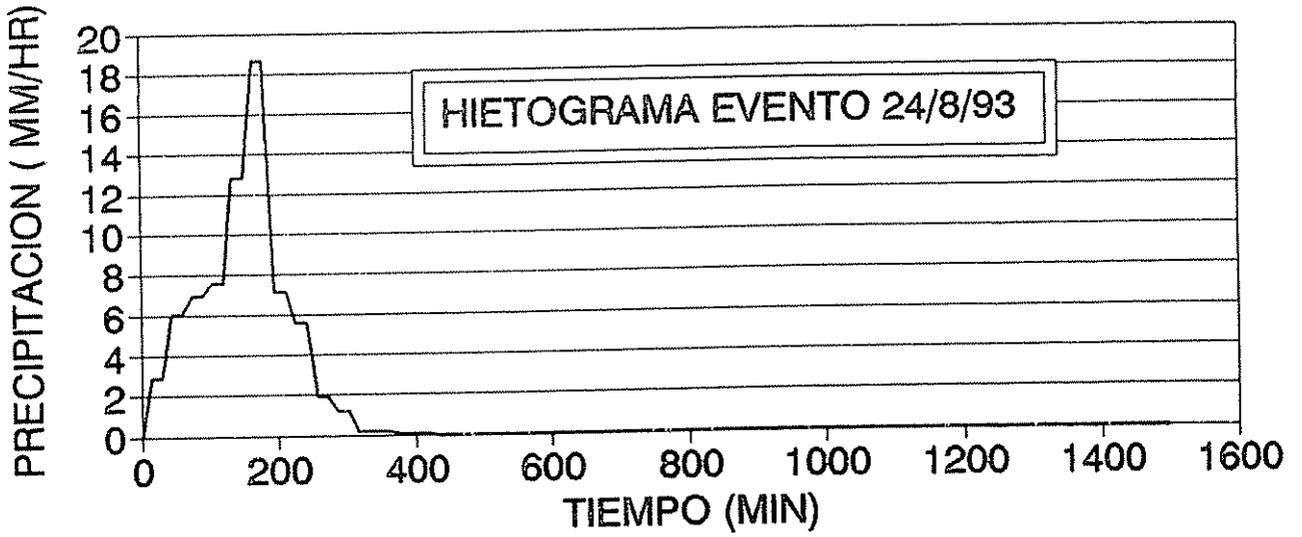


Figura # 18. Mejor Ajuste Grafico . Evento de Baja.

— Q.OBS. — Q.MOD. — C.S.MOD — C.S.OBS

La modelación con mejor ajuste individual para el evento de alta (21/9/82) presentó los resultados que se aprecian en el cuadro N° 5.

Cuadro N° 5. Resultados Evento de Alta.

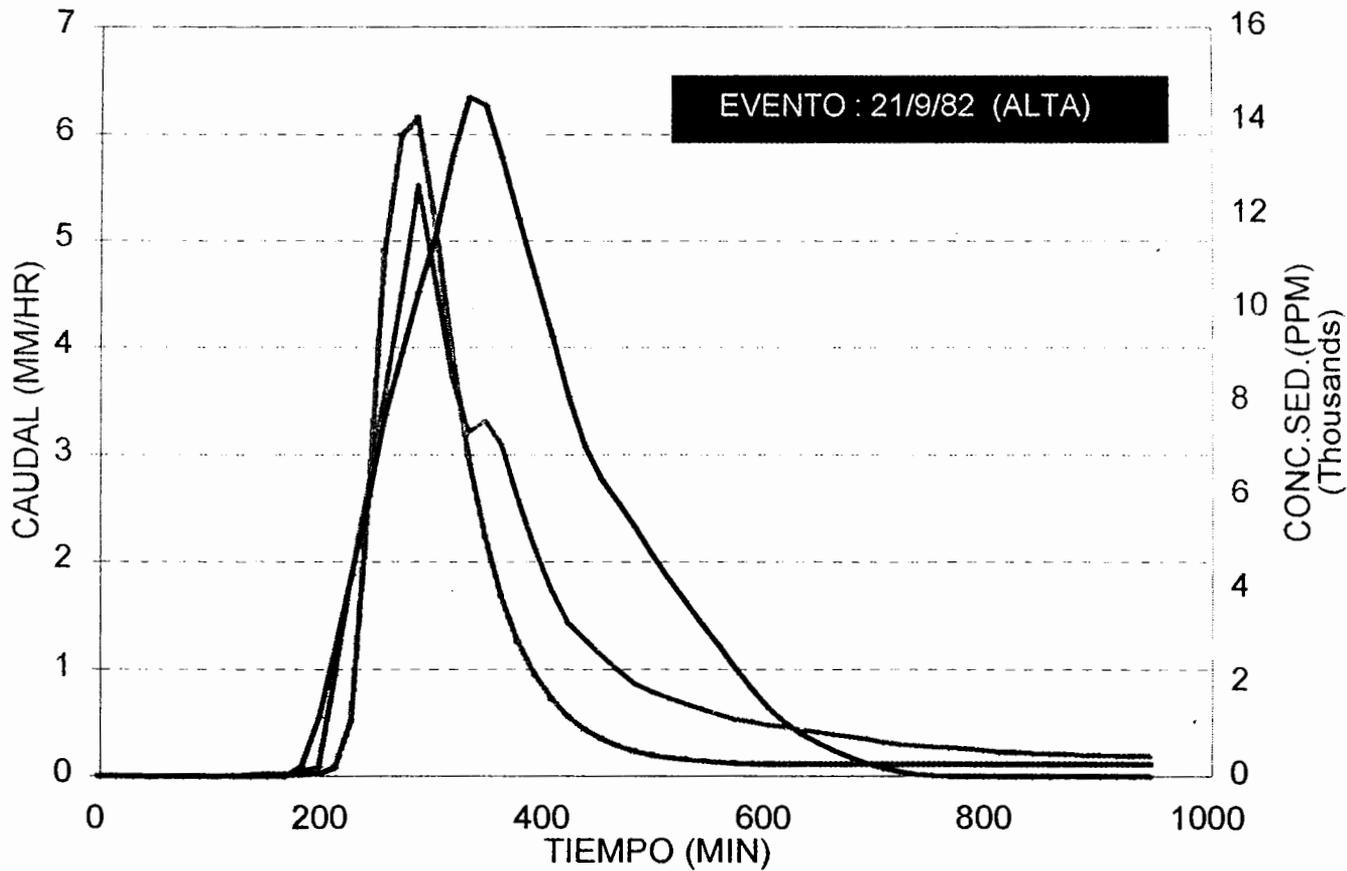
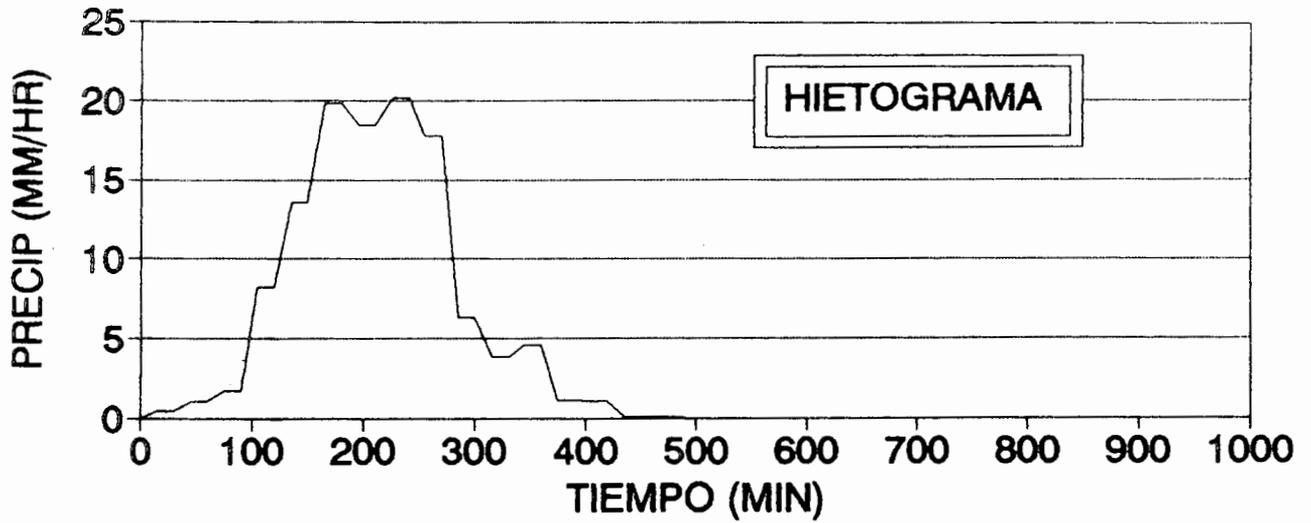
	OBSERV.	MODEL.	ERROR REL%
CAUDAL PICO (MM/HR)	5.53	6.15	11.2
CONC.SED.PICO (PPM)	-	14494	-
TOTAL SEDIMEN. (KG)	-	24493900	-
ESCORR. TOTAL (MM)	-	12.29	-

Las curvas con el mejor ajuste individual para esta tormenta se muestran en la figura N° 19 .

Una vez más el ajuste de caudales es aceptable. No es posible emitir criterio sobre la curva de concentración de sedimentos ya que no existen valores observados para la misma.

El set de parámetros para la calibración del evento de alta es el set N° 3 , que se presenta en el cuadro N° 5C del anexo 1.

La mejor calibración para el evento de media (13/6/94) presentó los resultados que se muestran en el cuadro N° 6.



**Figura # 19. Mejor Ajuste Grafico. Evento de Alta.**

— Q.ANSWERS — Q.OBS. — C.SED MOD.

Cuadro Nº 6. Resultados Evento de Media.

	OBSERV.	MODEL.	ERROR REL %
CAUDAL PICO (MM/HR)	3.32	3.51	5.72
CONC.SED PICO (PPM)	13470	6346	52.90
SEDIM. TOTALES (KG)	12021343	11750000	2.26
ESCORR. TOTAL (MM)	-	17.665	-

La figura Nº 20 presenta el mejor ajuste para la tormenta de media (13/6/94).

El set de parámetros Nº 4 es el mejor set obtenido para el ajuste individual de tormentas de mediana intensidad (ver cuadro Nº 5D, anexo 1)

La distribución espacial de la erosión y la sedimentación para cada evento puede verse en las figuras Nº 22,23 y 24.

#### 4.2.1. Ajuste estadístico.

El ajuste estadístico no se utilizó para optimizar la calibración sino para obtener una medida de la bondad de ajuste para las mejores modelaciones en cada evento.

El ajuste entre curvas observadas y modeladas se efectuó calculando dos indicadores : el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el coeficiente de McCuen y

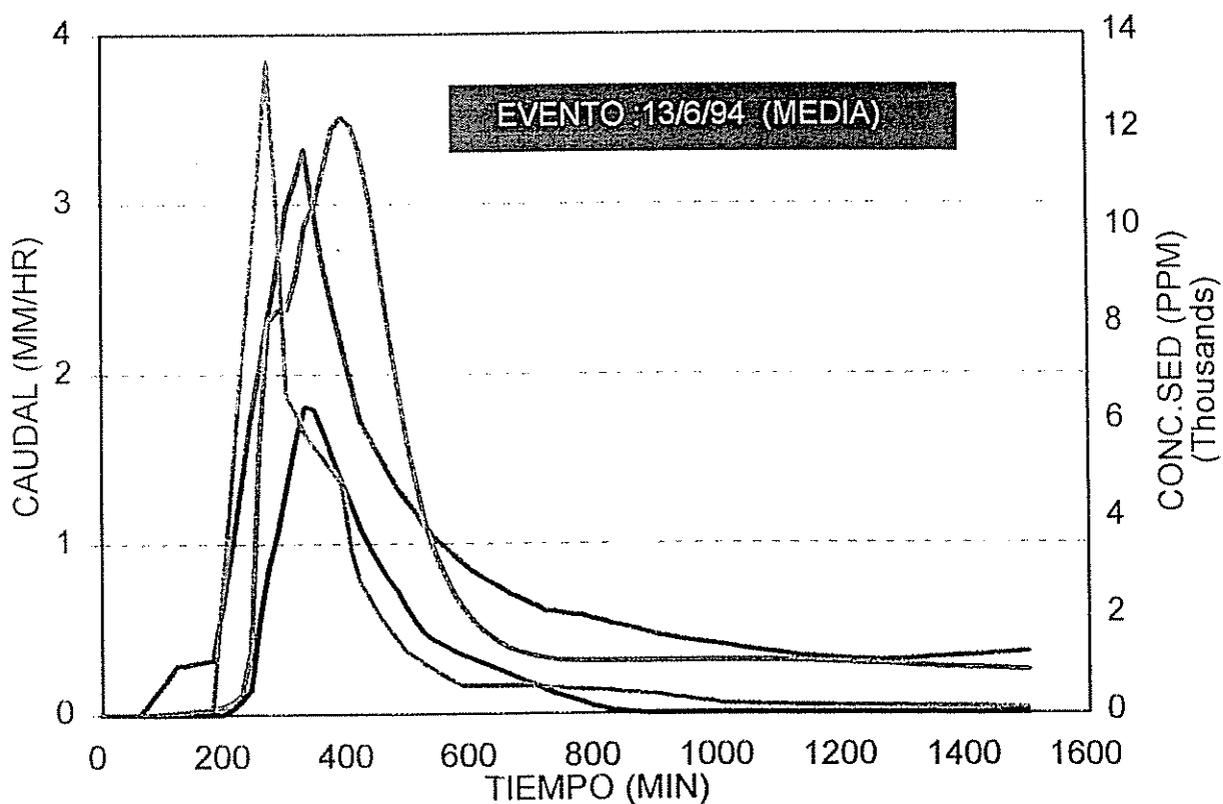
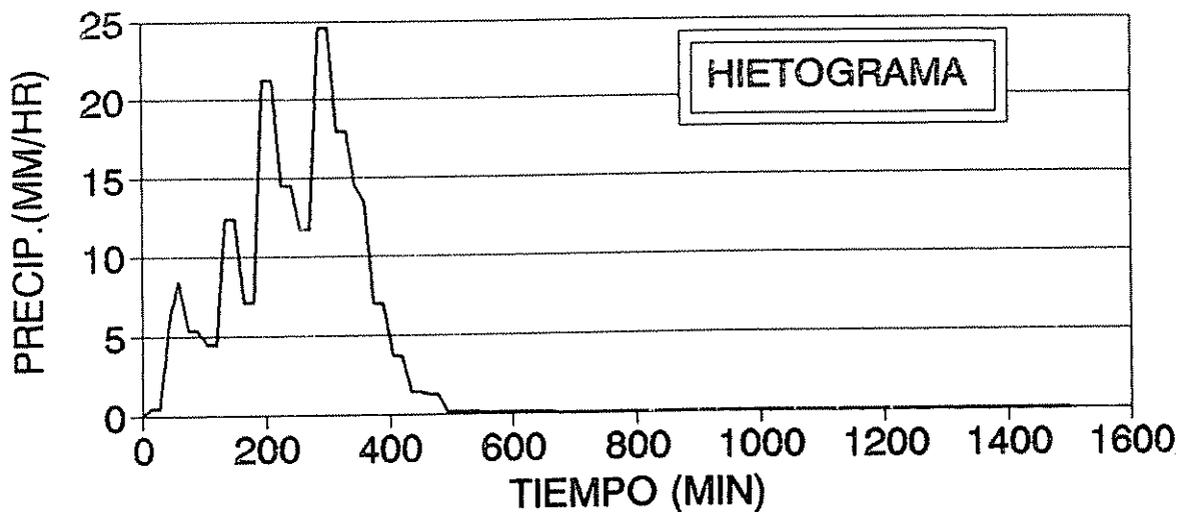


Figura # 20. Mejor Ajuste Grafico. Evento de Media.

— Q.OBS. — Q.MODEL. — C.S.MOD. — C.S.OBS

# EVENTO DEL 24/8/93 (BAJA)

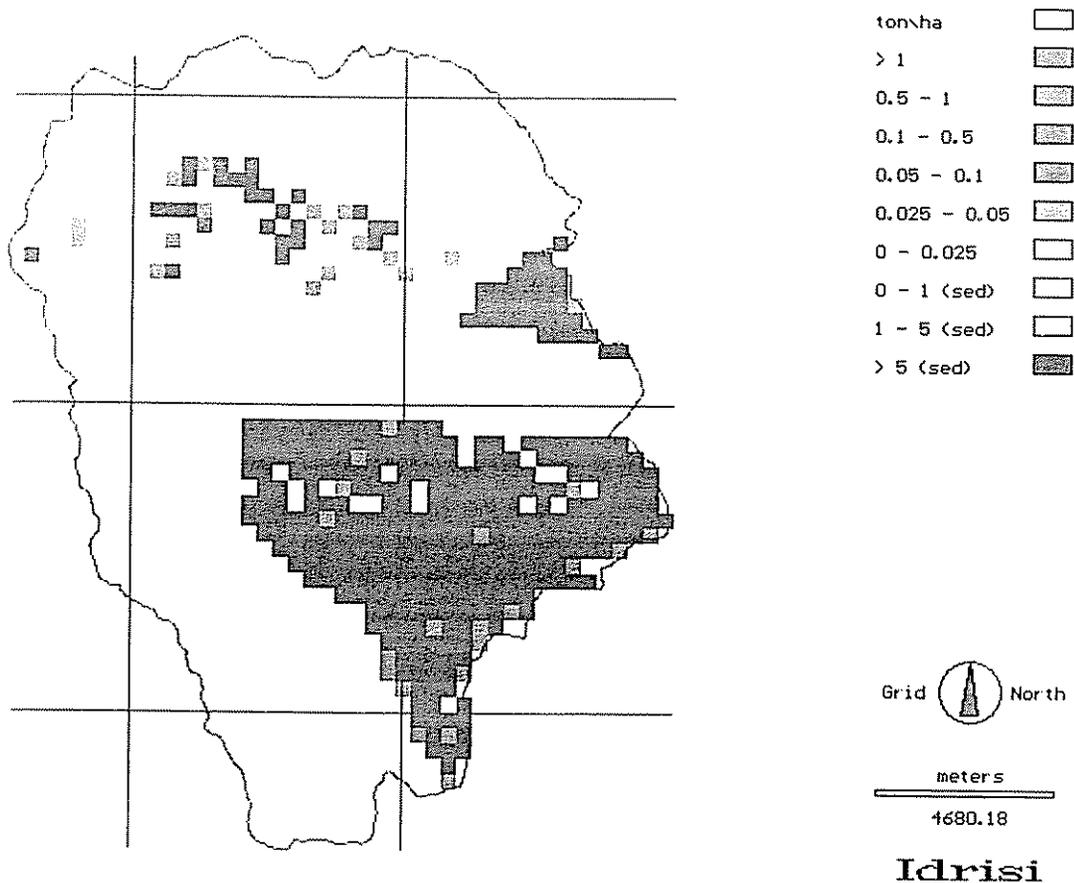


Figura No. 22. Mapa de erosión. Evento 24/8/93

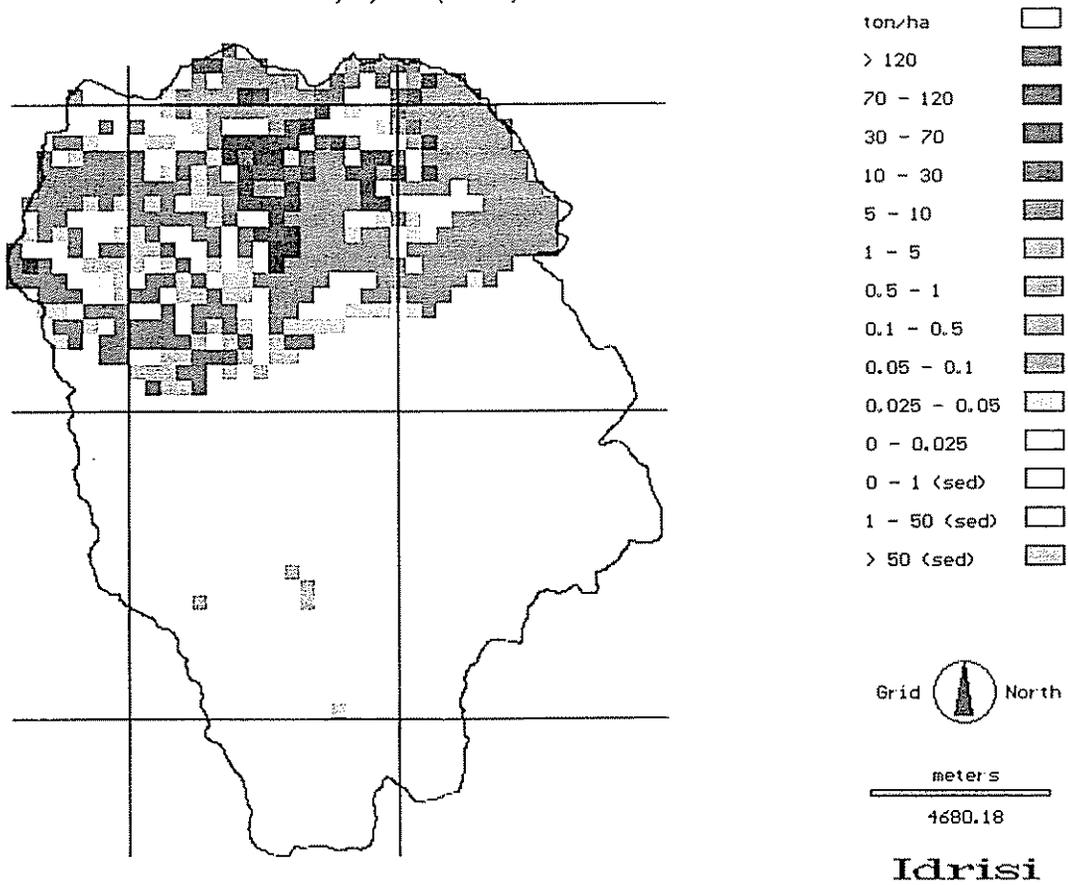


Figura No. 23. Mapa de erosión. Evento 21/9/92

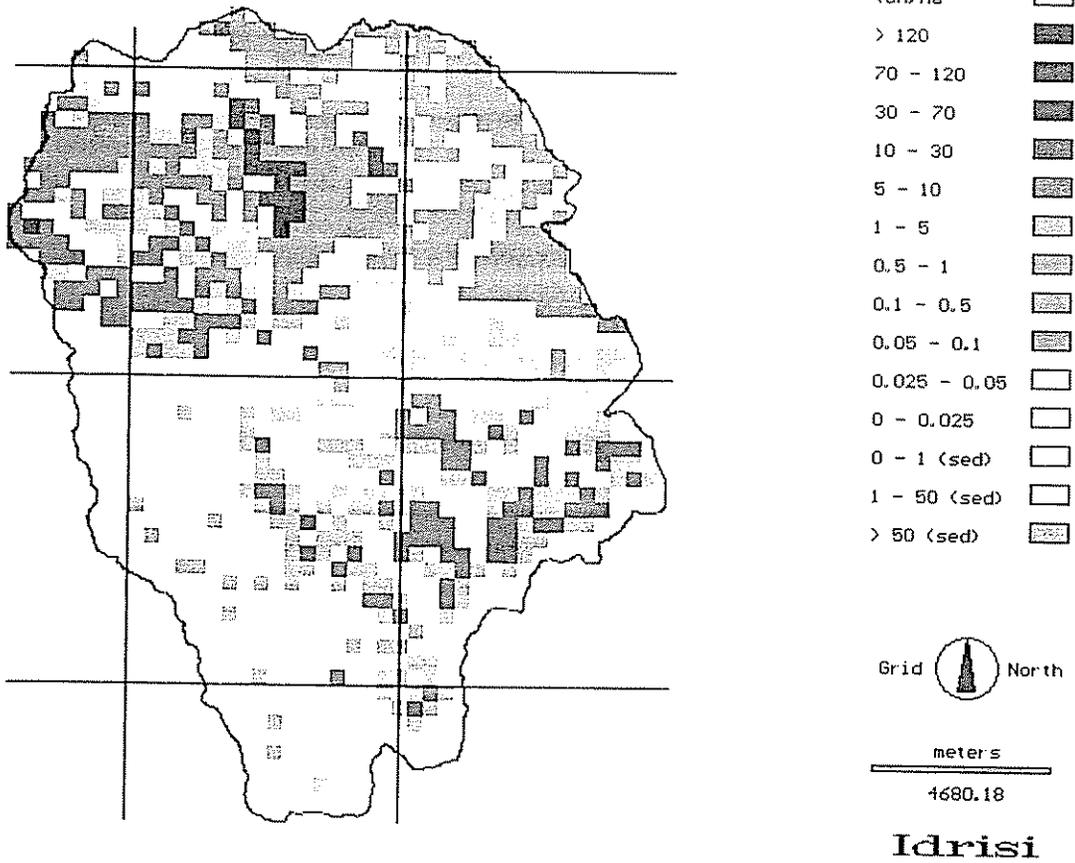


Figura No. 24. Mapa de erosión. Evento 13/6/94

Snyder. Los resultados obtenidos para los mejores ajustes son los siguientes:

EVENTO	CAUDALES		CONC. SEDIM.	
	PEARSON	McCUEEN	PEARSON	McCUEEN
ALTA	0.92	0.82	-	-
MEDIA	0.89	0.70	0.65	0.41
BAJA	0.89	0.86	0.10	0.07

Las curvas para el ajuste gráfico obtenidas con los correspondientes valores de  $r$  se pueden ver en las figuras N<sup>o</sup> 5,6 y 7 del anexo 1.

Los rangos de confiabilidad obtenidos para el coeficiente de correlación de Pearson ( 95 % de confiabilidad) son los siguientes:

#### 1. Caudales.

Evento de Alta  $r = [ 0.87 , 0.95 ]$

Evento de Media  $r = [ 0.84 , 0.92 ]$

Evento de Baja  $r = [ 0.84 , 0.92 ]$

#### 2. Concentración de Sedimentos.

Evento de Media  $r = [ 0.52 , 0.75 ]$

Evento de Baja  $r = [ 0.097 , 0.29 ]$

No se pudo encontrar ningún criterio específico de aceptación para valores del coeficiente de correlación en cuanto a caudales o concentración de sedimentos. Sin embargo en general se acepta que valores del coeficiente  $r$  superiores a 0.8 pueden considerarse como aceptables. De acuerdo a esto, los valores del coeficiente de correlación obtenidos para caudales pueden considerarse como satisfactorios mientras que los obtenidos para evaluar concentración de sedimentos son menos satisfactorios.

De Roo (1993) obtuvo para la cuenca Etzenrade en Holanda valores del coeficiente de Pearson para los hidrogramas que variaron entre 0.27 y 0.97 con un valor promedio de 0.72. Obtuvo también valores del coeficiente de McCuen entre 0.04 y 0.50 con una media de 0.23.

Es claro que los valores obtenidos para la cuenca del río Pejibaye en cuanto a caudales, aunque con un número menor de tormentas analizadas, son superiores a los obtenidos por De Roo.

En cuanto a concentración de sedimentos, De Roo (1993) concluye que la simulación de las curvas de concentración de sedimentos es extremadamente difícil. Aunque obtuvo algunas correlaciones significativas, la mayor parte de las modelaciones resultaron un orden de magnitud superiores a los valores observados. En el caso de la cuenca del Pejibaye, los valores bajos obtenidos para los índices de ajuste de las concentraciones de sedimentos, sobre todo en cuanto a la tormenta de baja, parecen confirmar esta dificultad.

#### 4.3. Modelaciones integradas.

Uno de los objetivos de esta sección del estudio fué procurar una calibración de tipo general, la cual pudiese aplicarse a eventos de diferente intensidad. Con el fin de lograr esto, se utilizó la información y la experiencia obtenida en las calibraciones individuales mencionadas en el punto 4.2 para obtener un set de parámetros que tuvieran un carácter mas general.

No fué posible sin embargo obtener un solo set de parámetros que pudiesen efectuar un buen ajuste simultáneo de las curvas de las tres tormentas aquí consideradas.

En vista de que la curva que mayor dificultad presenta para su ajuste es la curva de concentración de sedimentos, se decidió efectuar la calibración solo ajustando caudales y sedimentos totales.

Se obtuvieron sets que ajustan aceptablemente eventos de mediana y alta intensidad y otro que ajusta bastante bien los eventos de baja. Algunos set de parámetros permiten un ajuste general pero con errores importantes en las predicciones en ocasiones para tormentas de alta o en ocasiones de baja. Los resultados obtenidos se pueden ver en los cuadros N<sup>o</sup> 7 a N<sup>o</sup> 11 que se presentan a continuación.

##### 1. Set N<sup>o</sup> 5 .

Se obtuvieron los siguientes resultados :

Cuadro N° 7. Resultados con Set N° 5.

EVENTO	C.OBS	C.MODEL	DIF. %	C.T.OBS	C.T MOD	DIF.%
BAJA	1.20	0.70	71.4	1567115	619737	152.9
MEDIA	3.32	3.58	7.83	12021343	9313927	22.5
ALTA	5.53	6.15	11.2	-	16551050	-

Este set efectua un mal ajuste para eventos de baja y un ajuste aceptable para eventos de media y de alta.

## 2. Set N° 6 .

Cuadro N° 8. Resultados Set N° 6.

EVENTO	C.OBS	C.MOD.	DIF.%	CT OBS	CT MOD	DIF.%
BAJA	1.2	1.24	3.3	1567115	1499824	4.48
MEDIA	3.32	5.19	56.3	12021343	14399510	19.8
ALTA	5.53	6.91	24.9	-	21016119	-

Este set presenta las siguientes características:

1. Buen ajuste en eventos de baja.
2. Errores relativos de 25 a 56 % en caudales de media y de alta y de aproximadamente 20 % en sedimentos para eventos de media.

## Set Nº 7.

Permite ajustes para eventos de media y de alta.

Cuadro Nº 9. Resultados Set Nº 7.

EVENTO	C.OBS.	C.MOD.	DIF. %	CT OBS	CT MOD.	DIF. %
MEDIA	3.32	3.58	7.8	12021343	10972960	8.72
ALTA	5.53	6.15	11.2	-	17681950	-

Este set tiene las siguientes características:

1. Buen ajuste para caudales y sedimentos totales en eventos de media y alta.
2. Buen poder predictivo general.

## Set Nº 8.

Cuadro Nº 10. Resultados Set Nº 8.

EVENTO	C.OBS	C.MOD	DIF. %	CT. OBS	CT.MOD	DIF.%
MEDIA	3.32	2.82	15.0	12021343	8187440	31.9
ALTA	5.53	5.56	0.54	-	13897000	-

El set Nº 8 presenta las siguientes características :

1. Buen ajuste para caudales de muy alta intensidad (mayores de 300 m<sup>3</sup>/seg).

2. Diferencias de 15% y de 32 % en predicción de caudales y sedimentos totales respectivamente para eventos de media.

Set Nº 9.

Cuadro Nº 11. Resultados Set Nº 9.

EVENTO	C.OBS	C.MOD	DIF %	CT.OBS.	CT.MOD.	DIF %
MEDIA	3.32	3.58	7.8	12021343	12379690	2.98
ALTA	5.53	6.15	11.2	-	24493900	-

Las características principales del set Nº9 son :

1. Buen ajuste para caudales y sedimentos en eventos de alta y de media.
2. Mejor ajuste de la curva de concentración de sedimentos con respecto a los otros sets.

#### 4.4. Estudio comparativo de la erosión.

Con el fin de comparar el aporte de sedimentos provenientes de la parte alta de la cuenca (sector boscoso) y la parte baja (sector intervenido) se calculó la erosión producida en dos subcuencas en la parte boscosa, estas fueron : La subcuenca hasta antes de la confluencia del río Pejibaye con el río Taus, y la subcuenca hasta la confluencia de los ríos Gato y La Marta. Denominaremos a estas subcuencas

como Taus y La Marta.

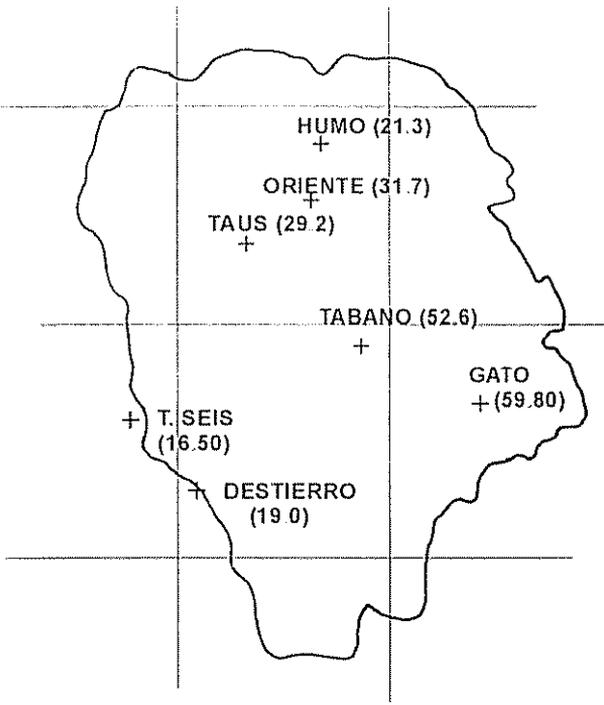
Para definir la erosión en estas subcuencas se utilizó el módulo EXTRACT de IDRISI aplicado sobre el mapa de erosión y sedimentación de suelos obtenido a partir de la salida de ANSWERS. De esta manera se pudo obtener el total de erosión neta (Erosión - Deposición) para cada una de las subcuencas mencionadas. Sumando estas dos cantidades se obtuvo la erosión total producida por el bosque en la cuenca. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro N° 12.

Puede notarse que en la tormenta de alta , un 2.54 % es aportado por el bosque y un 8.05 % en la tormenta de media. Contrario a este porcentaje tan bajo, la tormenta de baja refleja que un 97.3 % de la erosión es producida en el bosque.

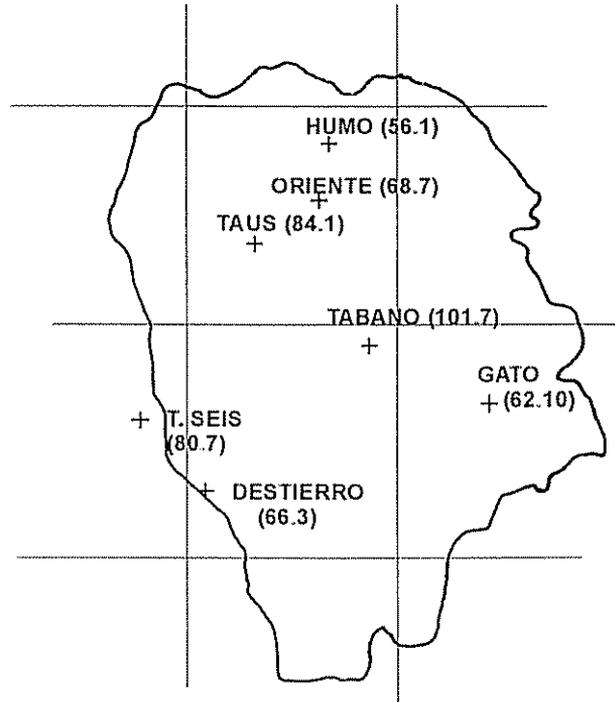
Es importante mencionar que aunque no fué parte de esta investigación evaluar esto, probablemente exista bastante correlación entre la distribución espacial de la erosión y la distribución espacial de la precipitación. La Figura N° 21 presenta la distribución de la precipitación total en la cuenca para las tres tormentas consideradas en este estudio. Es claro, sobre todo para la tormenta de baja, que existe una concentración de la precipitación total en la parte alta, en las estaciones de Tábano y Gato, lo cual, según puede apreciarse en los mapas de erosión para la tormenta de baja, puede producir concentración del proceso de erosión en esas zonas.

Cuadro # 4. Estudio Comparativo por Subcuencas.  
Sedimentos Totales

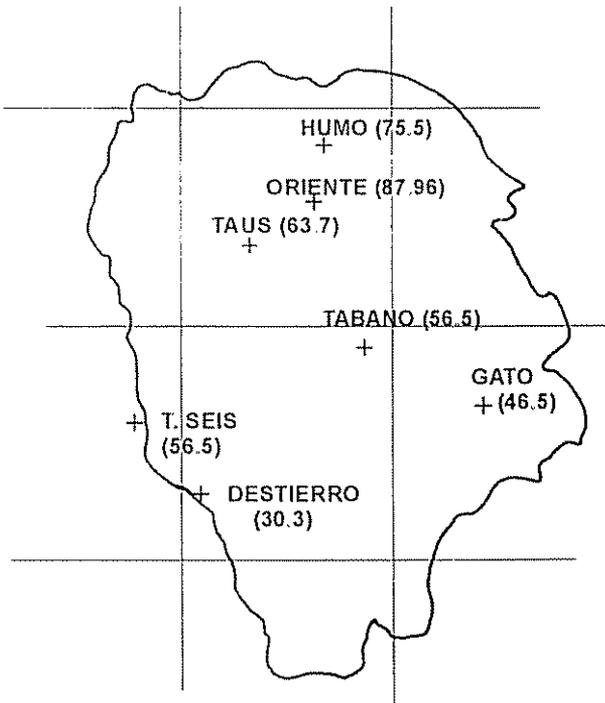
EVENTO	TOTAL ORIENTE Kg	TAUS Kg	MARTA Kg	TAUS+MARTA Kg	T+M/ORIENTE %
ALTA	24717984	266736	361856	628592	2.54
MEDIA	12471344	442480	561232	1003712	8.05
BAJA	1569360	775648	751232	1526880	97.3
ALTA(SIN1)	49098848	1648528	2603904	4252432	8.68
BAJA (SIN2)	1071552	72176	45824	118000	11.01
ALTA (SIN3)	10888400	455168	536256	991424	9.11



**EVENTO BAJA (24/8/93)**



**EVENTO MEDIA (13/6/94)**



**EVENTO ALTA (21/9/82)**



metros

6240.23  
Escala gráfica

Datos de precipitación total en mm.  
entre paréntesis

**Fig N° 21. Distribución espacial de la precipitación total.**

Esto puede explicar, que prácticamente la totalidad de los sedimentos en la tormenta de baja se producen en las subcuencas bajo cobertura boscosa.

Por otra parte, en la tormenta de alta, también se produce una concentración de los totales de precipitación en la parte baja de la cuenca, concentrando así también los máximos de erosión en estas zonas.

Con el fin de aislar el efecto de la heterogeneidad en la distribución espacial de la precipitación sobre el aporte de sedimentos, se procedió a modelar considerando hietogramas de precipitación uniforme para todas las estaciones. Se utilizaron los hietogramas hipotéticos denominados SIN1, SIN2 y SIN3 que aparecen en el cuadro N<sup>o</sup> 13. Los resultados obtenidos se aprecian en el cuadro N<sup>o</sup> 12.

Puede verse como en los tres casos considerados, el aporte del bosque a la erosión total en la cuenca es relativamente bajo, variando este entre un 8.66 a un 11.01 %

La tormenta de baja está aportando en esta condición un 11.01 % del total de erosión. Esto hace pensar que si existe un efecto de heterogeneidad en la distribución espacial de la lluvia, lo cual provocó el resultado tan alto (97.3%) de aporte del bosque en el caso de la tormenta de baja observada. Esto, sin embargo debería ser demostrado evaluando un mayor número de tormentas observadas.

Las curvas para los eventos observados analizados se muestran en las figuras 2,3 y 4 del anexo 1.

Cuadro # 13. Hietogramas Sinteticos

TIEMPO ACUM MIN	PRECIP. MM/HR	PRECIP MM/HR	PRECIP. MM/HR
	SIN1	SIN2	SIN3
0	0	0	0
30	2	10	1
60	6	3	3
90	8	4	4
120	10	5	5
150	14	7	10
180	25	15	20
210	35	20	27
240	45	25	30
270	30	12	18
300	20	8	14
330	10	5	7
360	6	3	3
390	1	1	1
420	0.5	0.5	0.5
1500	0	0	0

#### 4.5. Determinación de zonas de máxima erosión.

Por medio del análisis de los mapas de erosión obtenidos (Figuras Nº 22 a Nº 32 ), puede verse que a excepción de la tormenta del 24/8/93, las máximas erosiones se producen en la parte baja de la cuenca (zona intervenida). Estas constituyen, según el alcance de esta investigación, las zonas de máxima erosión en la cuenca del río Pejibaye.

No debe olvidarse también que algunos eventos, sobre todo los de baja intensidad, podrían concentrar procesos erosivos en algunas otras zonas de la cuenca y producir máximos en otras zonas diferentes de la parte baja. Tal fué el caso de la tormenta de baja considerada en este estudio.

Las zonas de deposición para las 3 tormentas se ubican como es de esperar en la parte baja y plana de la cuenca.

Considero que es importante, con el fin de tener un panorama más completo para definir zonas de máxima erosión y deposición, ampliar el estudio considerando mayor número de eventos. Es definitivo que tres tormentas no son suficientes para este objetivo y solamente permiten dar una idea muy general de la ubicación de estas zonas.

Puede concluirse sin embargo que el modelo es apropiado para determinar la distribución espacial de la erosión y la sedimentación en la cuenca analizada.

#### 4.6. Modelación para diferentes escenarios.

Como complemento a esta investigación se modelaron los siguientes escenarios :

1. Cuenca 100% cubierta de bosque.
2. Cambio de uso de bosque primario y secundario existente a pasto mal manejado.
3. Cambio de uso de bosque primario y secundario existente a pasto bien manejado.
4. Cambio de uso de bosque primario y secundario existente a café.
5. Cambio de uso de bosque secundario actual a pasto mal manejado.
6. Cambio de uso de bosque secundario actual a pasto bien manejado.
7. Modelación considerando aplicación de prácticas de conservación en las zonas agrícolas (  $P=0.70$  )

Para efectuar estas modelaciones se utilizó el set de parámetros N<sup>o</sup>9 , que fué el que mejor ajuste presentó para la tormenta de media.

Las figuras N<sup>o</sup> 33 a 40 y el cuadro N<sup>o</sup> 14 muestran los resultados gráficos y numéricos obtenidos.

Las figuras N<sup>o</sup> 25 a 32 presentan la distribución espacial de la erosión para cada condición.

Cuadro # 14. Modelacion de Escenarios.

ESCENARIO	CAUDAL PICO MM/HR			C.SED PICO PPM			SED.TOTAL KG		
	COND. ACTUAL	MODEL. ESCEN	DIFER. %	COND. * ACTUAL	MODEL. ESCEN	DIFER. %	COND. ACTUAL	MODEL. ESCEN	DIFER. %
ESC.1 BOSQUE.P	3.32	3.51	5.7	6346	832	86.89	12021343	1757047	85
ESC.2 B.P-PASTOm	3.32	4.74	42.7	6346	31238	392.2	12021343	88598140	637
ESC.3. B.P-PASTOb	3.32	4.74	42.7	6346	7785	22.7	12021343	17573430	46.2
ESC.4. B.P-CAFE	3.32	3.98	19.8	6346	21137	233	12021343	54056740	349.6
ESC.5. B.S-PASTOm	3.32	3.51	5.7	6346	29367	362.8	12021343	53699680	346.7
ESC.6. B.S-PASTOb	3.32	3.51	5.7	6346	8024	26.4	12021343	14888930	23.8
ESC.7.ACTUAL-PRACT	3.32	3.51	5.7	6346	4672	26.3	12021343	8974199	25.3

\* REPRESENTA LA MODELACION PARA LA CONDICION ACTUAL

BP : BOSQUE PRIMARIO

BS : BOSQUE SECUNDARIO

PASTOm : PASTO MAL MANEJADO

PASTOb : PASTO BIEN MANEJADO

### Escenario N°1

Representa la condición original de la cuenca antes de producirse ninguna intervención.

Se produce una disminución evidente del total de erosión y las concentraciones de sedimentos. La erosión total se reduce en un 85 % mientras que el pico de concentración de sedimentos disminuye un 87%.

Es notorio también el efecto amortiguador del bosque en los grandes picos en la curva de concentración de sedimentos.

Por otra parte, la variación del pico de caudales al considerarse bosque en la parte baja es de apenas un 5.7 %.

### Escenario N° 2.

Contempla el cambio de uso del suelo de las zonas que actualmente se encuentran bajo cobertura de bosque primario o secundario a una condición de pasto mal manejado. Según puede verse en el cuadro N°14 esta variación provocaría un incremento del caudal pico en un 42.7% y un aumento de un 392.2 % en la concentración máxima de sedimentos.

Asimismo, la carga total de sedimentos aumentaría en casi 8 veces con respecto a la condición actual

Es evidente el efecto multiplicador que se produce, tanto en caudales como en sedimentos, el remover la cobertura boscosa de la parte alta y sustituirla por un pasto mal manejado. Esto refleja la importancia que para la cuenca tiene, tanto desde el punto de vista hidrológico como de

erosión de suelo, la cobertura de bosque de la parte alta.

### Escenario N° 3.

Se consideró la misma situación anterior pero con un pasto de buena condición y manejo. Esta situación de mejor manejo se modeló considerando un factor C de la USLE mas bajo en estas áreas.

Esta nueva condición provocaría un aumento del pico de sedimentos en un 23 % aproximadamente y un aumento de los sedimentos totales en un 46.2 %.

Se nota claramente una reducción significativa en el aporte de sedimentos con respecto a la condición de un pasto mal manejado.

### Escenario N°4.

Contempla la modificación del uso del suelo de bosque primario y secundario existentes a cultivo con café. Según puede verse en el cuadro N° 14, este cambio provocaría un incremento en el pico de caudal en un 19.8% y un aumento en aproximadamente 3 veces el pico de concentración de sedimentos. Además los sedimentos totales aumentarían en casi 5 veces en relación a lo que se produce en la condición actual.

Puede notarse también como el hecho de introducir cultivo en la parte alta de la cuenca provoca una variación en la curva de concentración de sedimentos, volviéndose esta más achatada.

Una vez más, puede verse como un cambio del uso del suelo en la parte alta, sobre todo cuando no se efectúa un buen uso del suelo ( $C=0.30$ ), incrementa notoriamente los totales de sedimentos, las concentraciones de los mismos y en menor medida el caudal pico del hidrograma.

#### Escenario N°5.

Considera el cambio de las zonas existentes de bosque secundario en la cuenca a pastos mal manejados.

La variación en el pico de caudales ante esta modificación es de apenas un 5.7 %.

Se produciría también un aumento de aproximadamente 5 veces en el total de sedimentos con respecto a la situación actual, y un incremento igual para la concentración pico de sedimentos.

Cabe destacarse el aumento tan grande que se produce en la carga total de sedimentos, al removerse la cobertura boscosa de una área relativamente pequeña.

#### Escenario N°6.

Considera el cambio de uso de bosque secundario a pasto bien manejado.

Los cambios son menores que en el caso de un cambio de cobertura a pasto mal manejado. Se produce un aumento de un 23.8 % en el total de sedimentos y de un 26.4 % en el máximo de la curva de concentración de sedimentos.

Los resultados de esta modelación reflejan una vez más la importancia que tiene un buen manejo de las zonas de pasto en el control de la erosión en una cuenca.

#### Escenario Nº 7.

En esta modelación se consideró que la cuenca en su condición actual se somete a prácticas de manejo en las zonas agrícolas y ganaderas. Se consideró un valor  $P=0.70$  para las prácticas de conservación según la USLE, es decir que se supone que las prácticas reducirán en un 30% la erosión.

Los resultados de la modelación mostraron que se produciría una disminución de un 25.3 % en el total de sedimentos y un reducción de un 26.3% en el pico de concentración de sedimentos.

CUENCA 100 % BOSQUE PRIMARIO

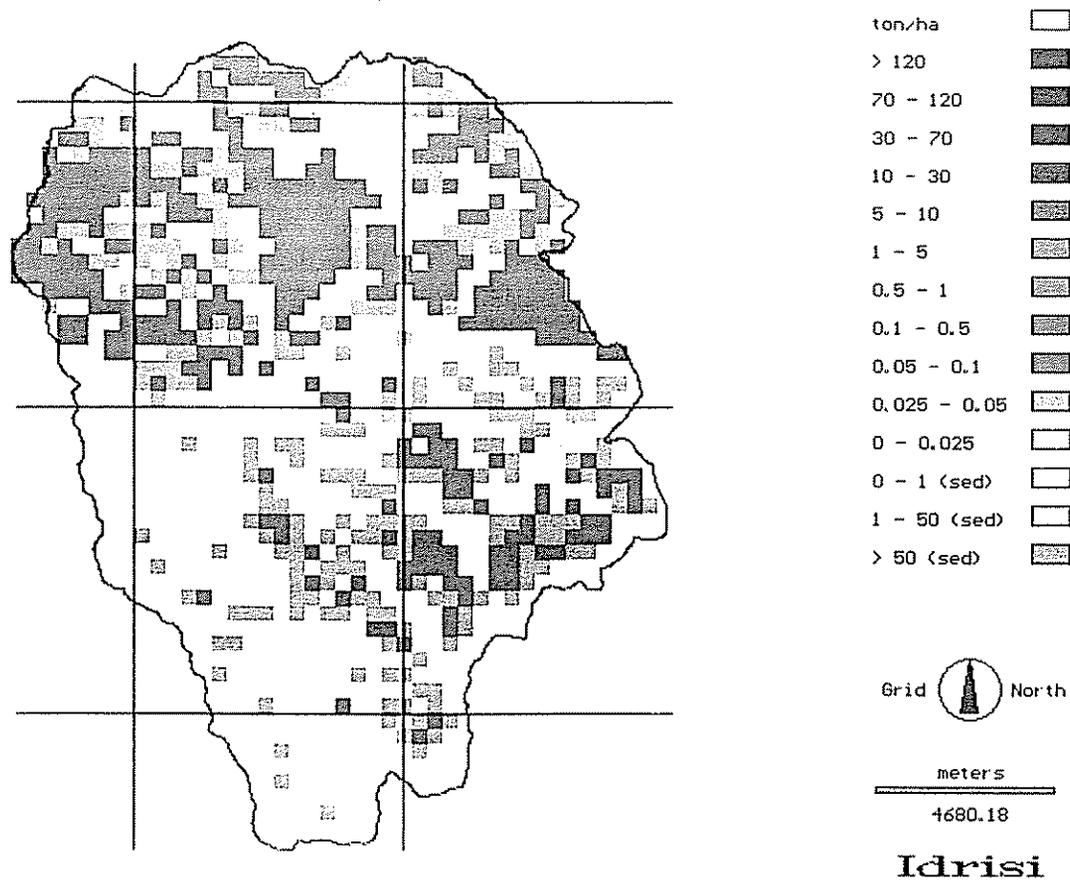


Figura No. 25. Escenario No. 1

EROSION-SEDIM (BOSQUE PRIM A PASTO M)

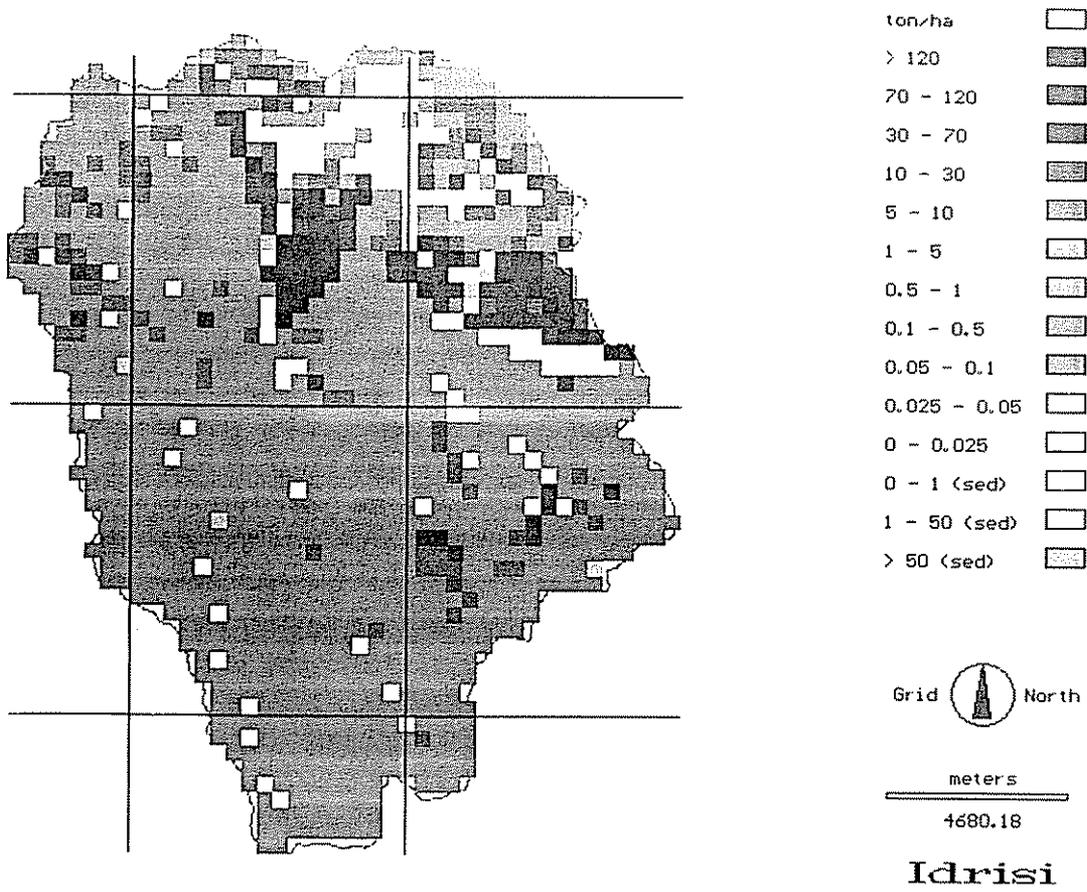
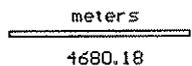
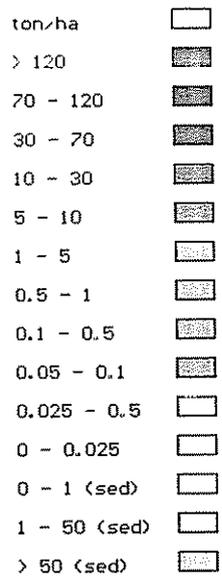
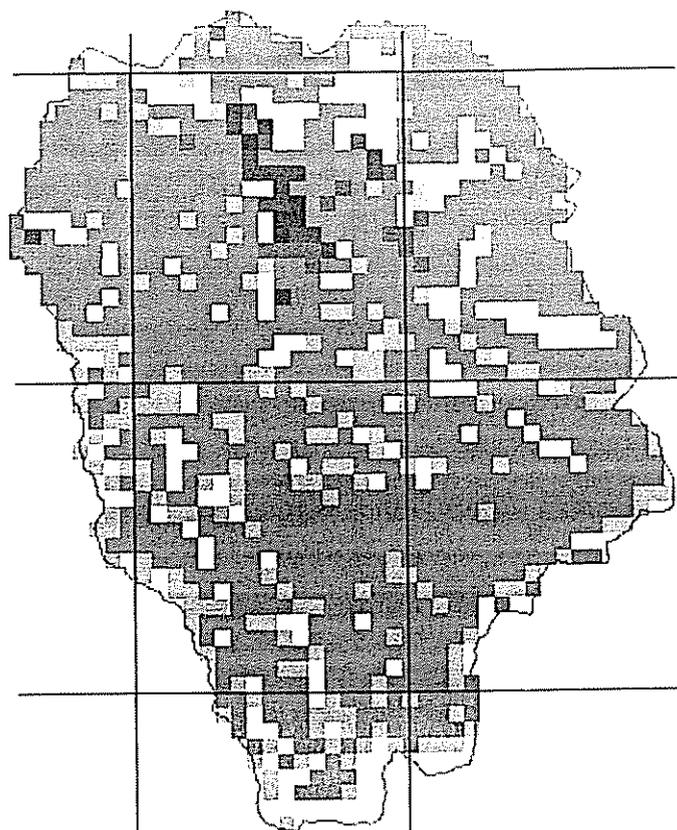


Figura No. 26. Escenario No. 2

EROSION-SEDIM (B.PRIM A PASTO B)



**Idrisi**

Figura No. 27. Escenario No. 3

EROSION Y SED. ( BOSQUE A CAFE )

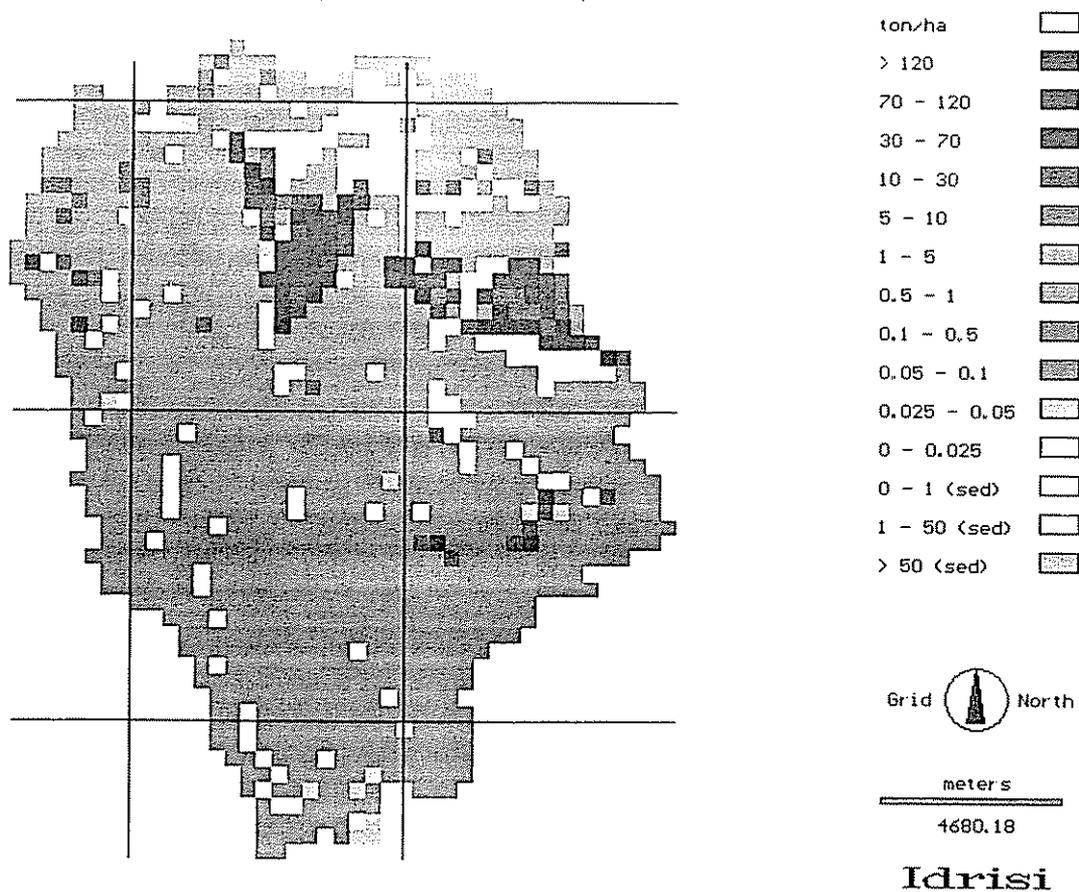
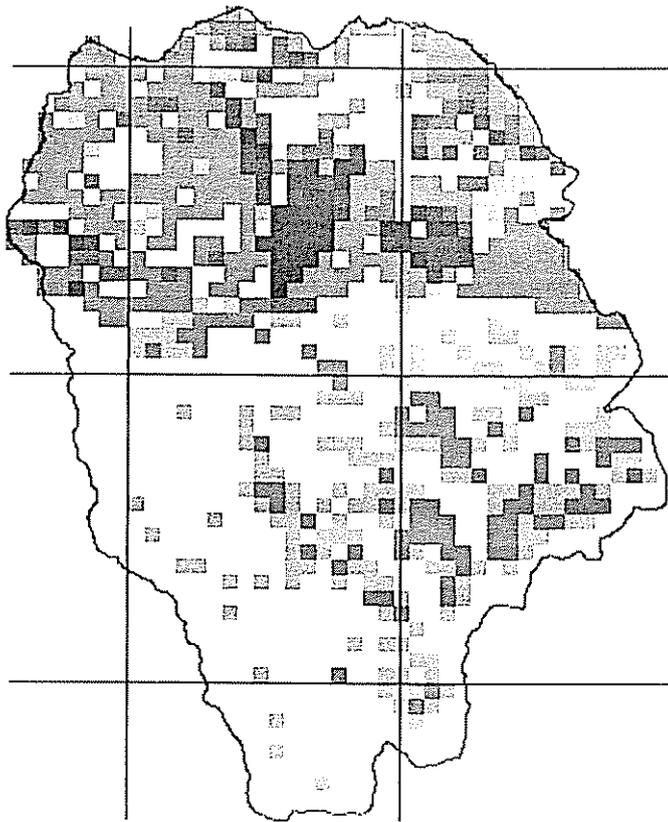


Figura No. 28. Escenario No. 4

MAPA EROSION-SEDIMENTACION (B.SEC-PASTO)



- ton\ha
- >120
- 70 - 120
- 30 - 70
- 10 - 30
- 5 - 10
- 1 - 5
- 0.5 - 1
- 0.1 - 0.5
- 0.05 - 0.1
- 0.025 - 0.05
- 0 - 0.025
- 0 - 1 (sed)
- 1 - 50 (sed)
- > 50 (sed)



meters  
4680.18

**Idrisi**

Figura No. 29 Escenario No. 5

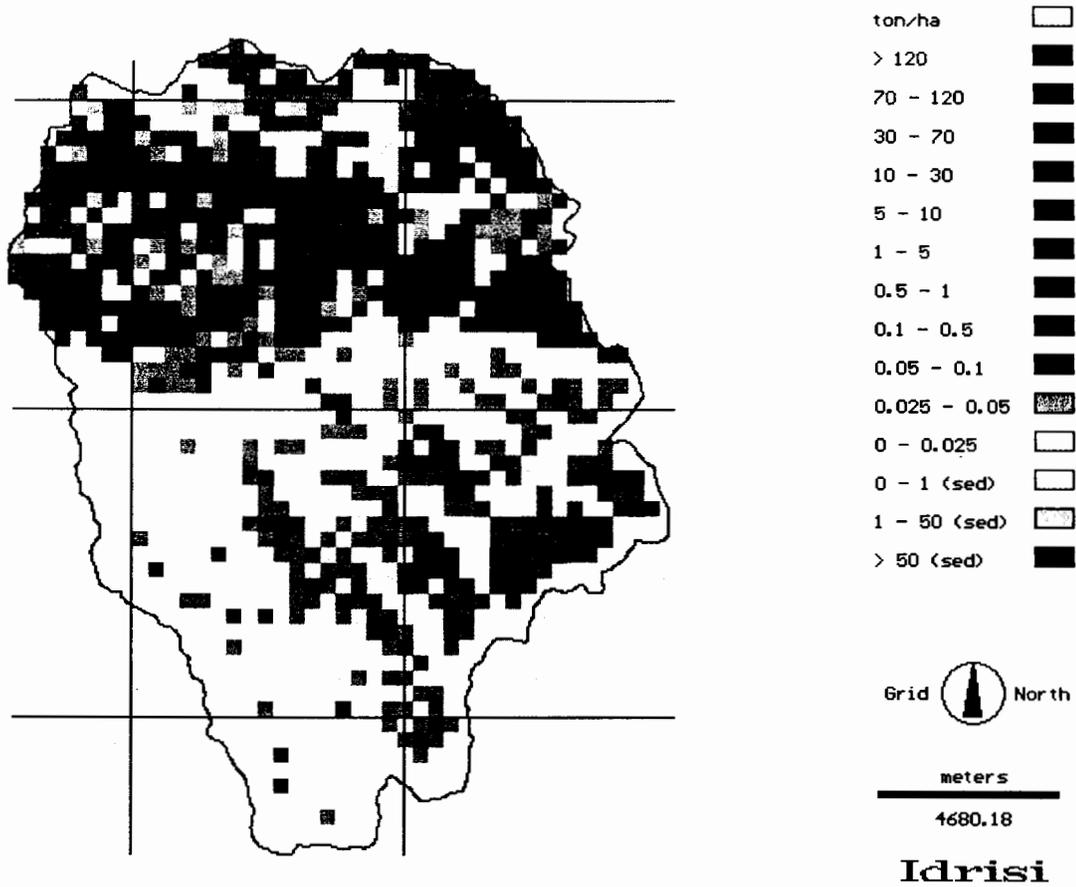


Figura No. 30 Escenario No. 6

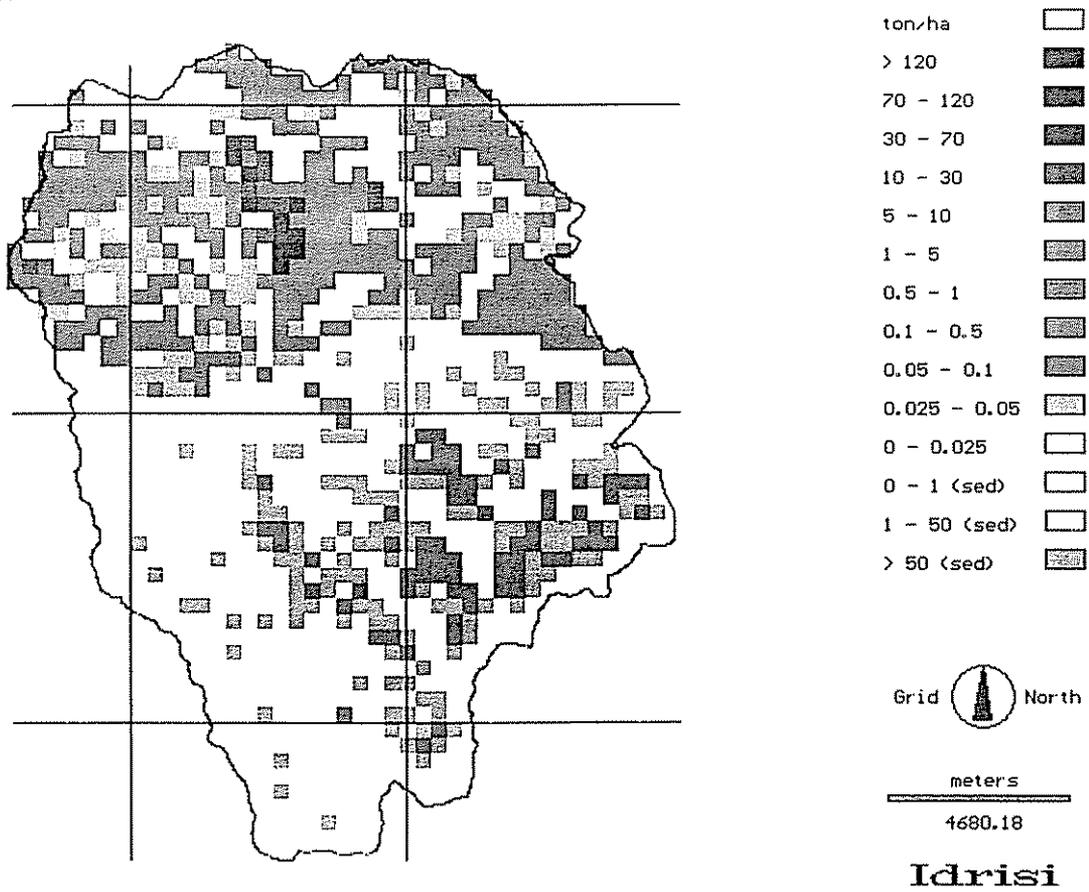


Figura No. 31 Escenario No. 7

# EROSION-SEDIM CONDICION ACTUAL

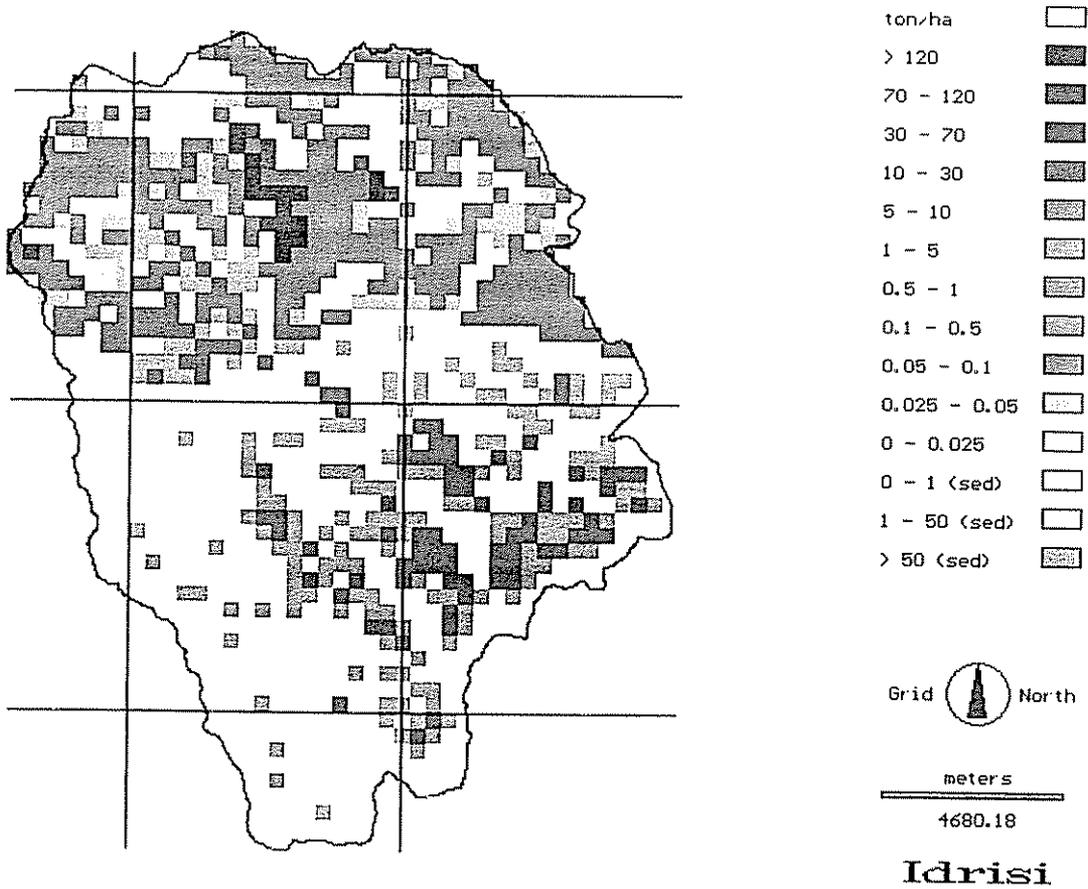


Figura No. 32 Condición actual

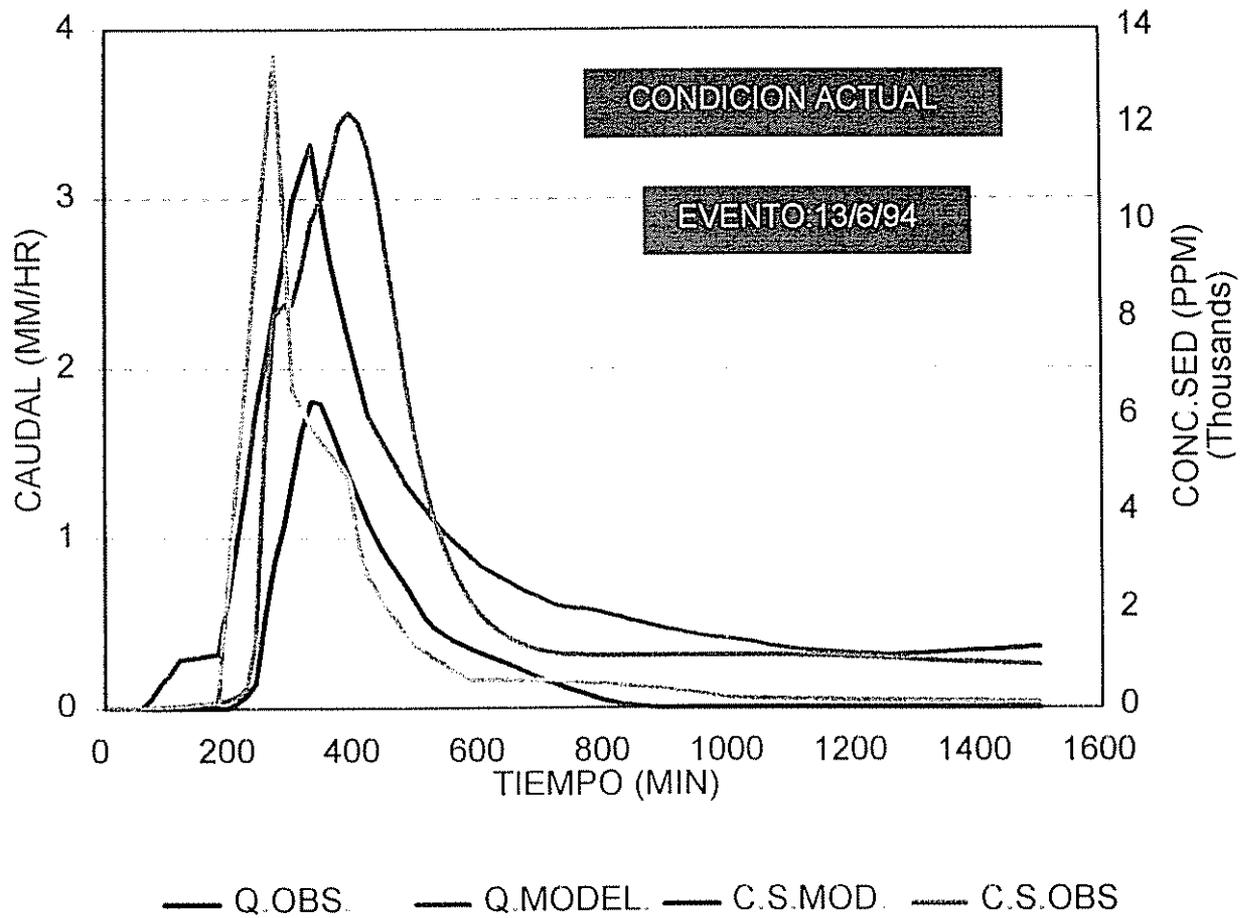


Figura # 33 . Condicion Actual.

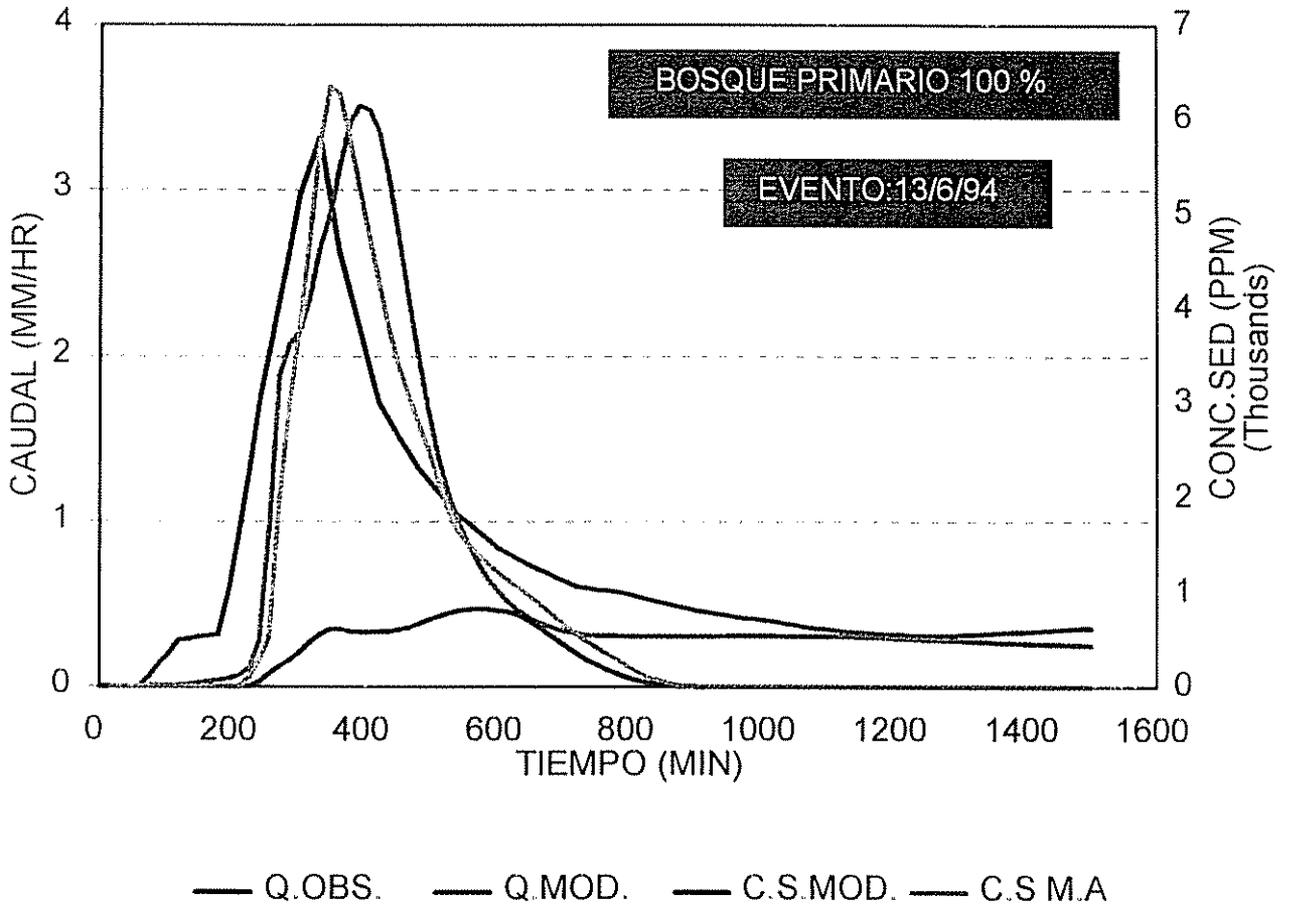


Figura # 34 . Escenario # 1.

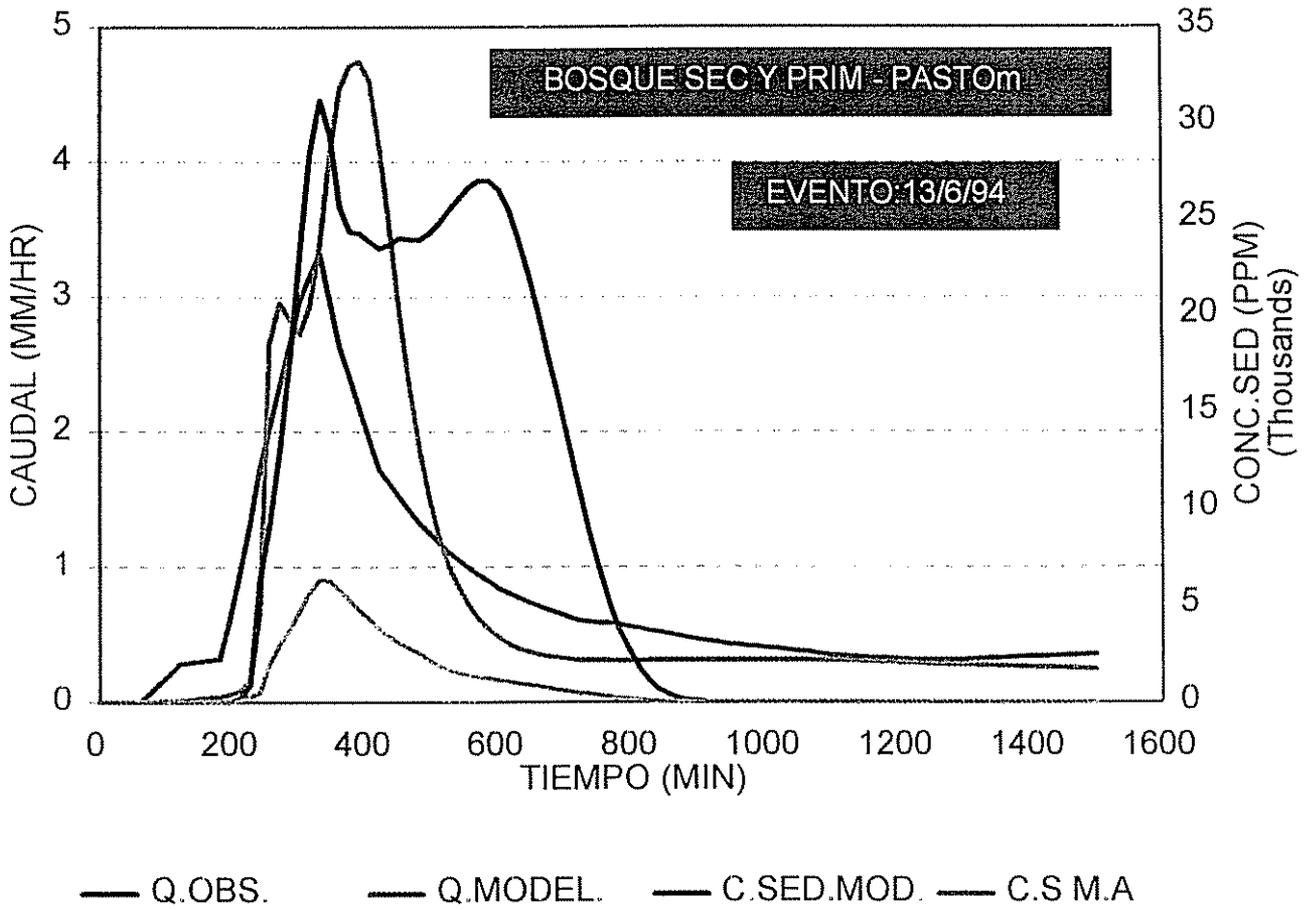
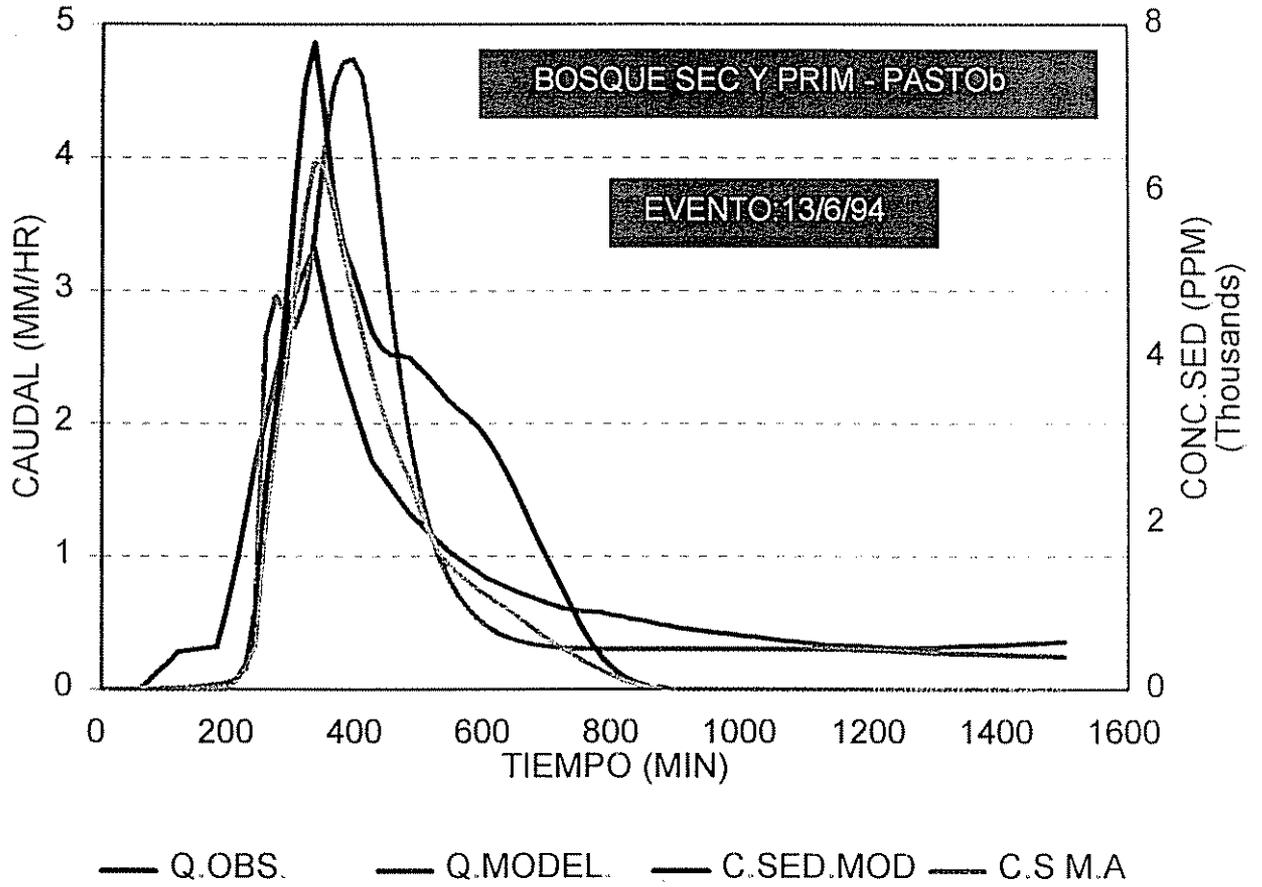
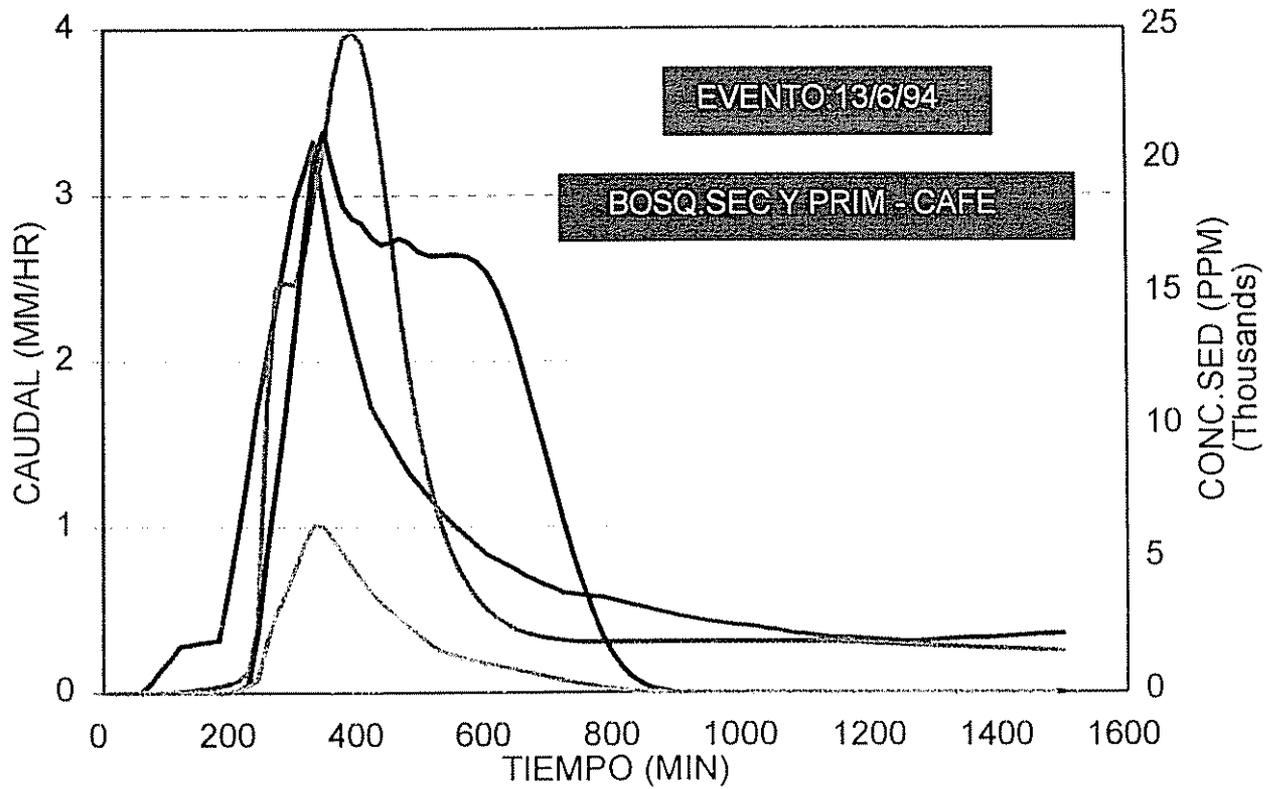


Figura # 35. Escenario # 2.



**Figura # 36. Escenario #3.**



— Q.OBS.      — Q.MODEL.      — C.SED MOD.      — C.SED OBS

Figura # 37. Escenario # 4

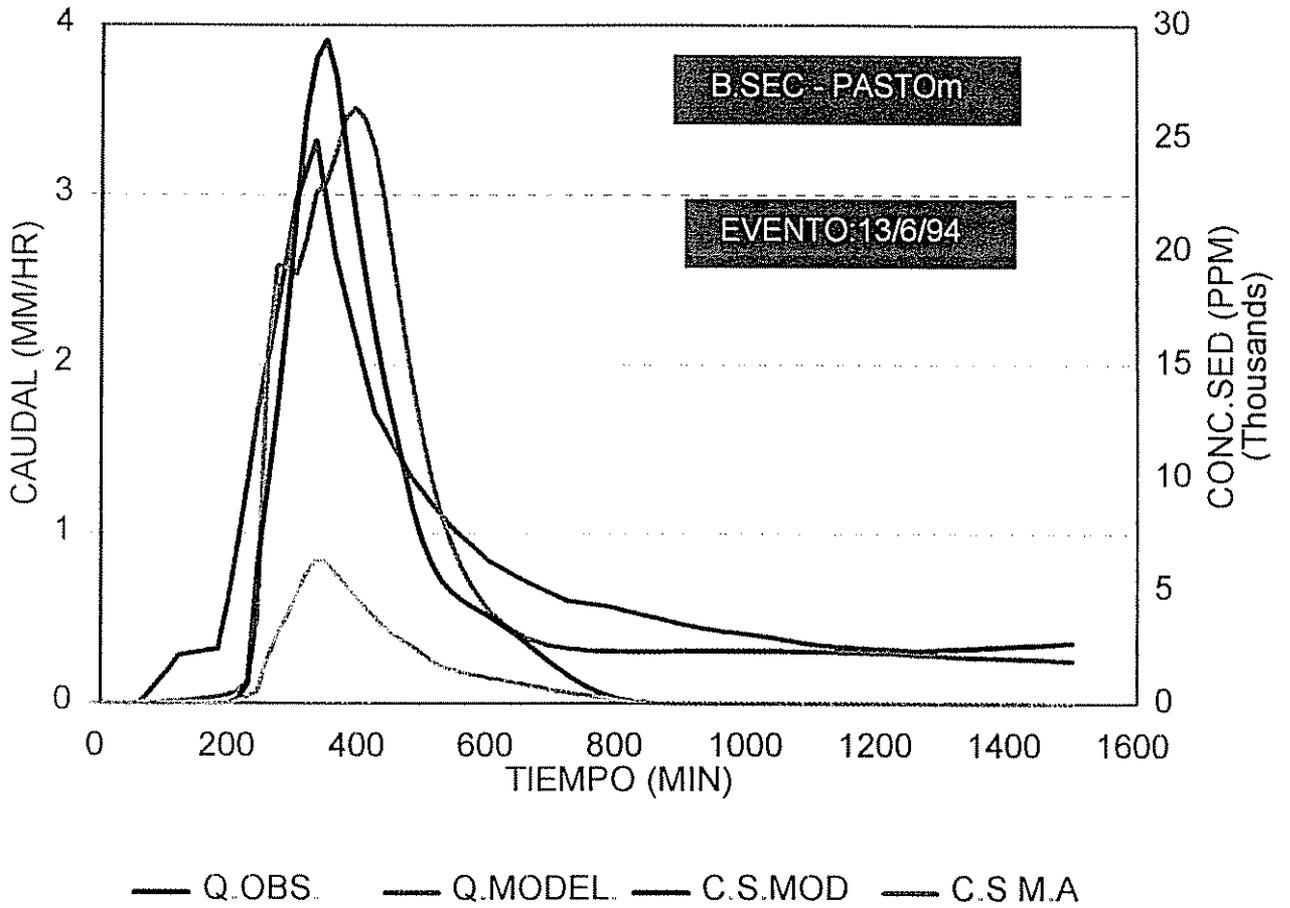


Figura # 38 . Escenario # 5

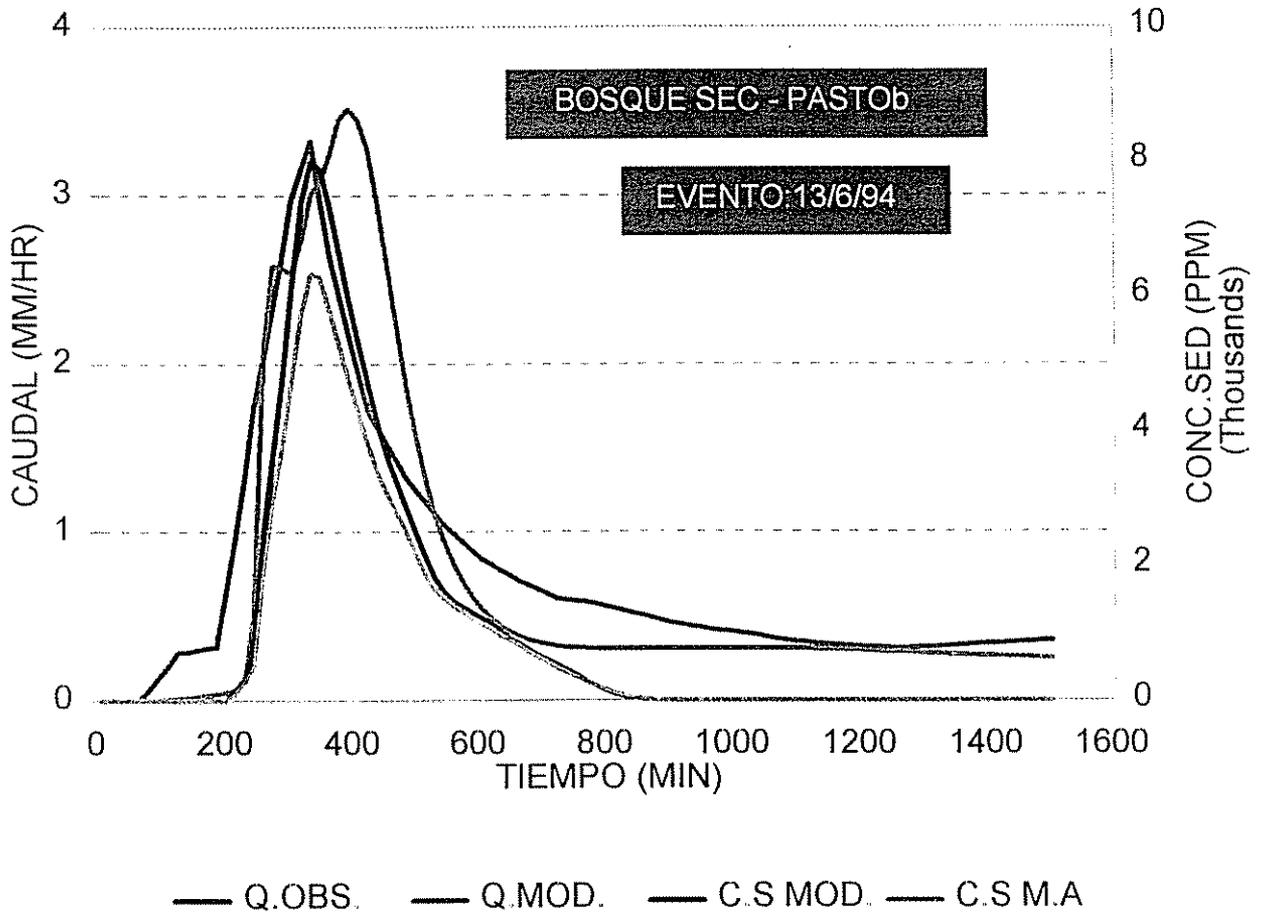


Figura # 39 .Escenario # 6

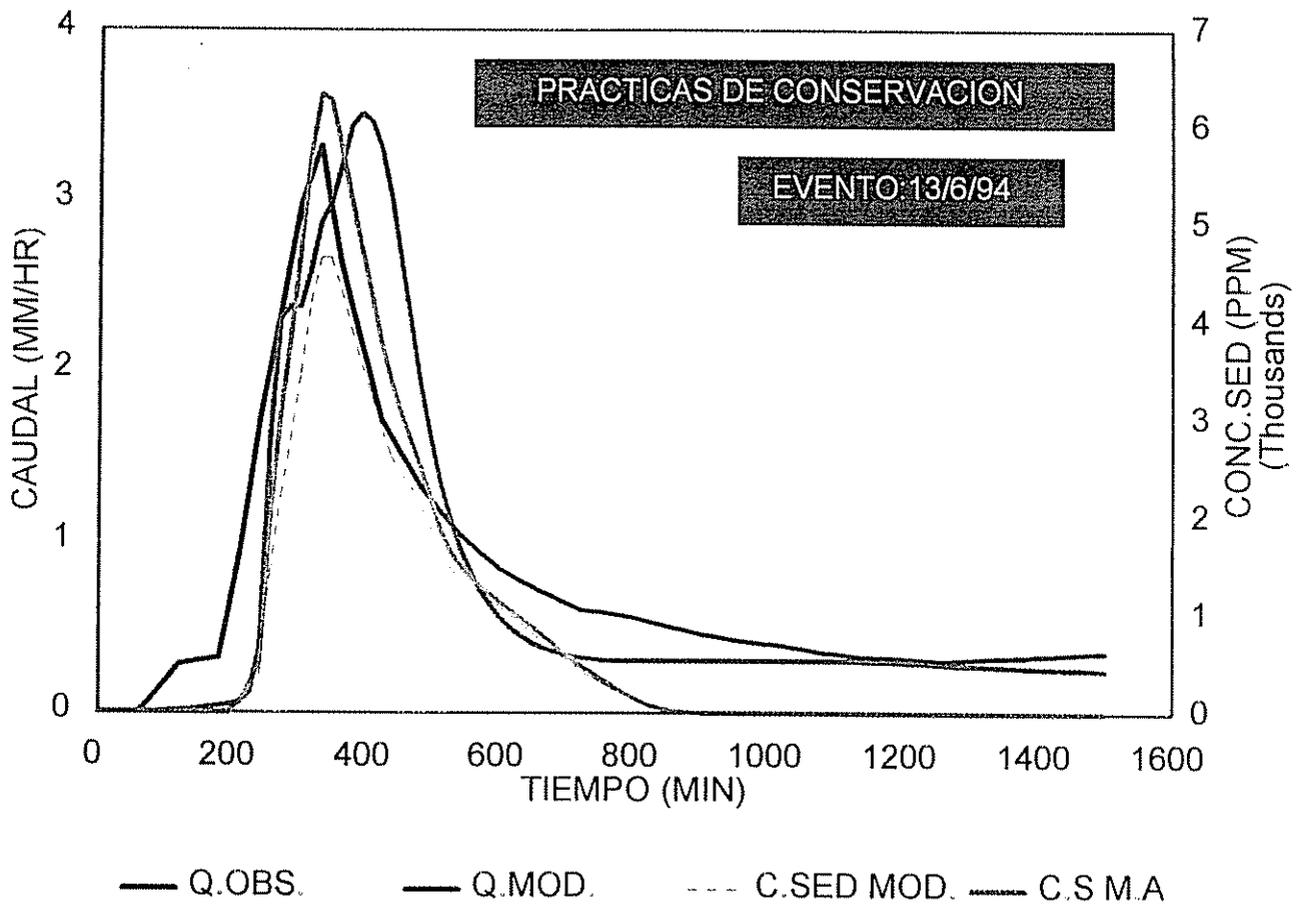


Figura # 40 . Practicas de Conservacion.

#### 4.7 Análisis de sensibilidad.

Los índices de sensibilidad obtenidos para los parámetros analizados se pueden ver en los cuadros N° 1 y N° 2 del anexo N° 2. Asimismo, las figuras N° 1 a N° 6 del mismo anexo muestran en resumen, los índices por cada una de las variables de respuesta consideradas. Las figuras N° 7 a N° 18 del mismo presentan las gráficas con las variables normalizadas para algunos de los principales parámetros.

Los resultados obtenidos reflejan que en general los parámetros a los cuales el modelo presenta mayor sensibilidad son los siguientes:

##### A. Para Caudal Pico.

Porosidad Total (TP), Infiltración Mínima (FC), Profundidad de Control de la Infiltración (DF) y Humedad Antecedente (ASM):

##### B. Para Concentración de Sedimentos.

Infiltración Mínima (FC), Profundidad de Control de Infiltración (DF), USLE "K" y "C" y Humedad Antecedente (ASM).

##### C. Para Total de Sedimentos.

Porosidad Total (TP) , Infiltración Mínima (FC), Profundidad de Control (DF) , USLE "K" y "C" y Humedad Antecedente (ASM):

Es claro que se prestó la mayor atención a estos parámetros durante la modelación ya que por medio de ellos se pudieron efectuar los principales ajustes en la calibración.

#### 4.8 Efecto del tamaño del pixel en la modelación.

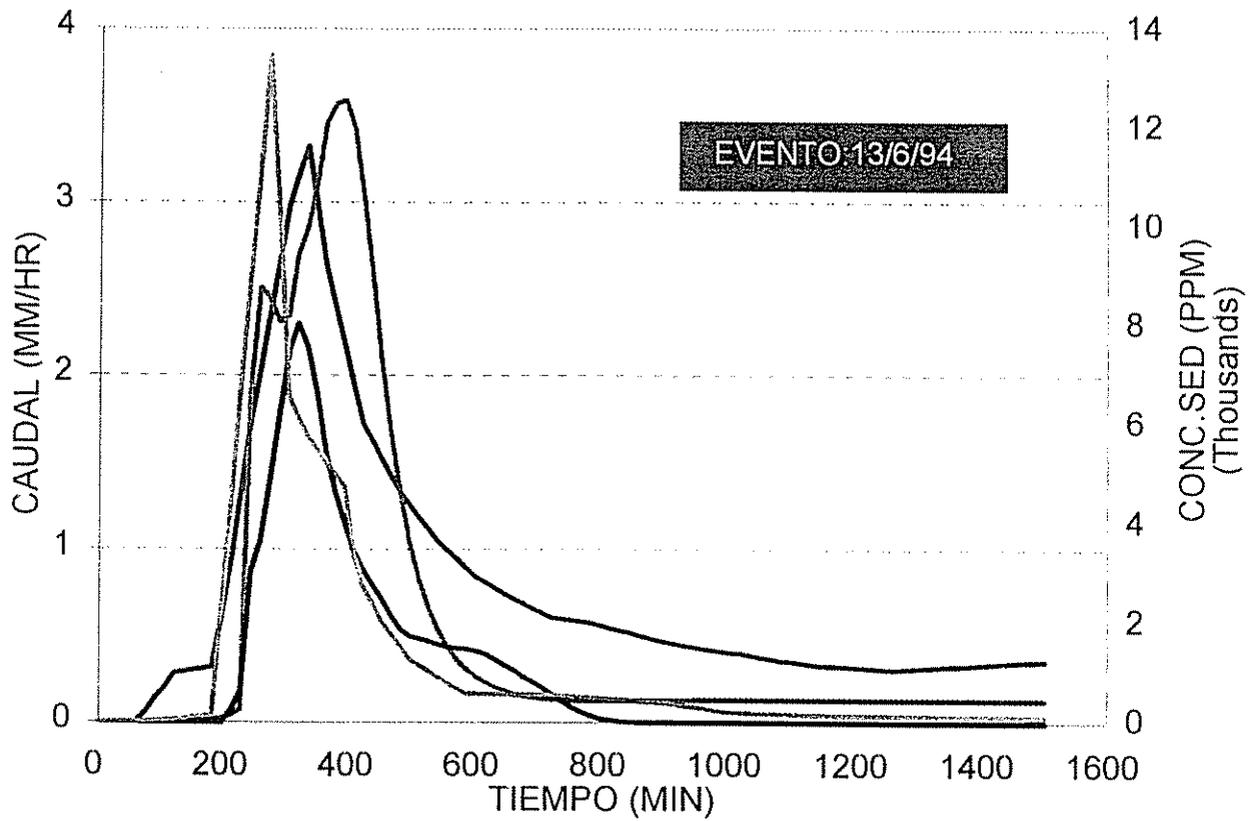
El cuadro Nº 15 presenta los resultados obtenidos modelando para un pixel de 16 ha inicialmente y posteriormente reduciendo el tamaño a 1 ha. Puede verse como la disminución en el pixel produjo un aumento importante en algunas de las variables de respuesta, sobre todo en el caudal pico ( 33.3 % de diferencia), la escorrentía (23.6%) y el total de sedimentos (40.7%). La concentración de sedimentos aumentó ligeramente para un 13.7 % de diferencia mientras que el tiempo al pico de sedimentos no varió.

Las curvas obtenidas (Figuras Nº 41 y Nº 42 ) reflejan que la modelación para un pixel de 1 ha asentúa el primer pico de caudales e incrementa la magnitud de los valores en el hidrograma. Por otra parte, a pesar de que la modelación con un pixel de menor tamaño incrementa el pico de concentración de sedimentos, este aún es bastante inferior al pico observado (Diferencia de aproximadamente 3800 PPM).

Los mapas obtenidos para cada condición (fig.Nº 43 y 44), reflejan como es de esperar un mayor detalle en la definición del patrón de erosión al considerar el pixel de 1

Cuadro # 15. Efecto del Pixel en la Modelacion.

	TAMANO PIXEL		DIFER (%)
	PIXEL DE 16 HA	PIXEL DE 1 HA	
CAUDAL PICO (MM/HR)	3.58	5.36	33.2
TIEMPO PICO (MIN)	390	375	3.8
CONC.SEDIM. (PPM)	8060	9165	13.7
TIMPO PICO SED(MIN)	315	315	0
TOTAL SEDIMEN. (KG)	12379690	17428970	40.7
ESCORRENTIA (MM)	14.38	17.78	23.6



— Q.OBS. — Q.MODEL. — C.S.MOD. — C.S.OBS

Figura # 41. Grafica con Modelacion para Pixel de 16 has

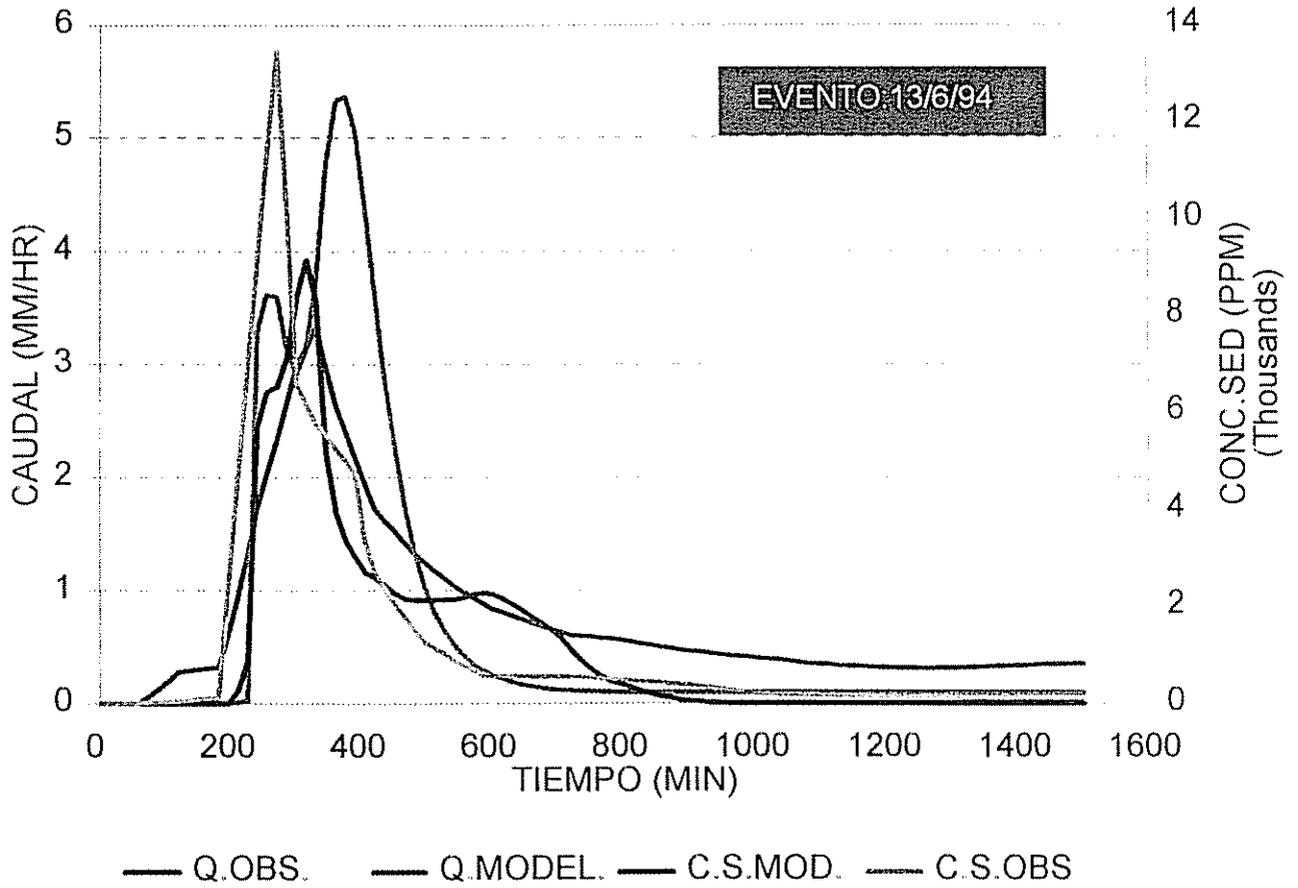


Fig # 42. Grafica con Modelacion para Pixel de 1 ha.

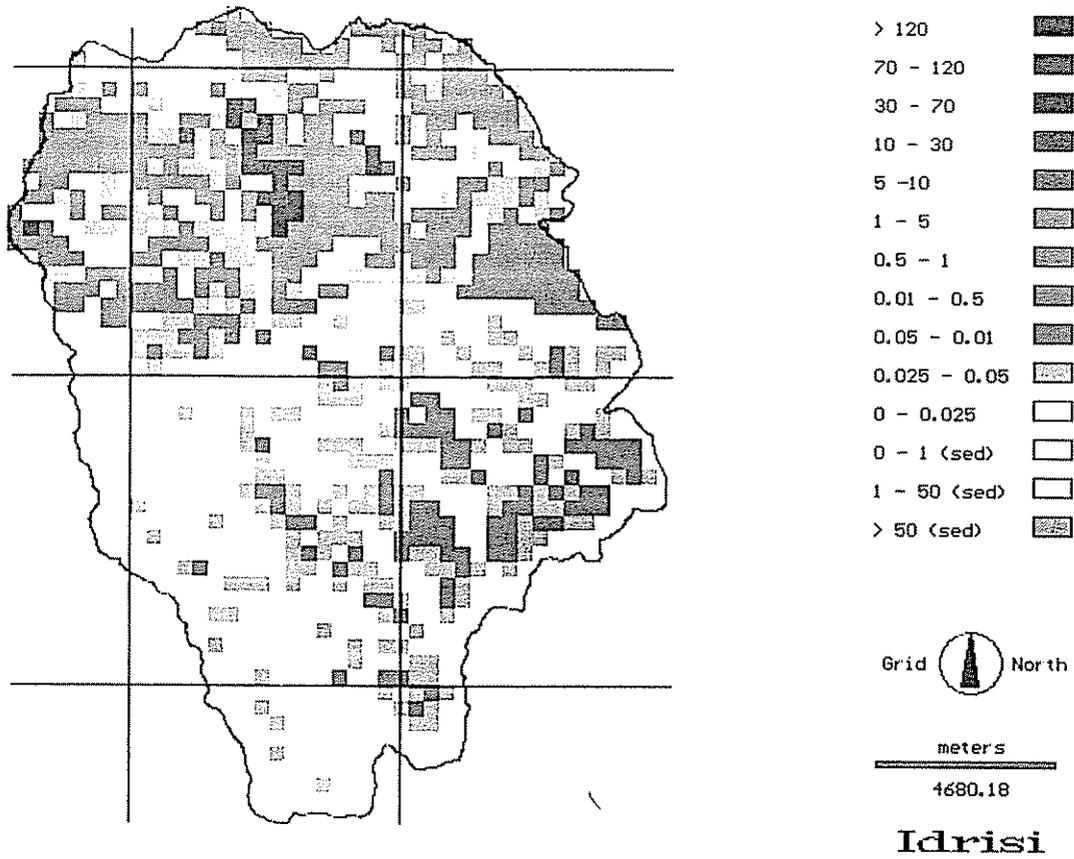


Figura No. 43 Modelación para pixel de 16 has

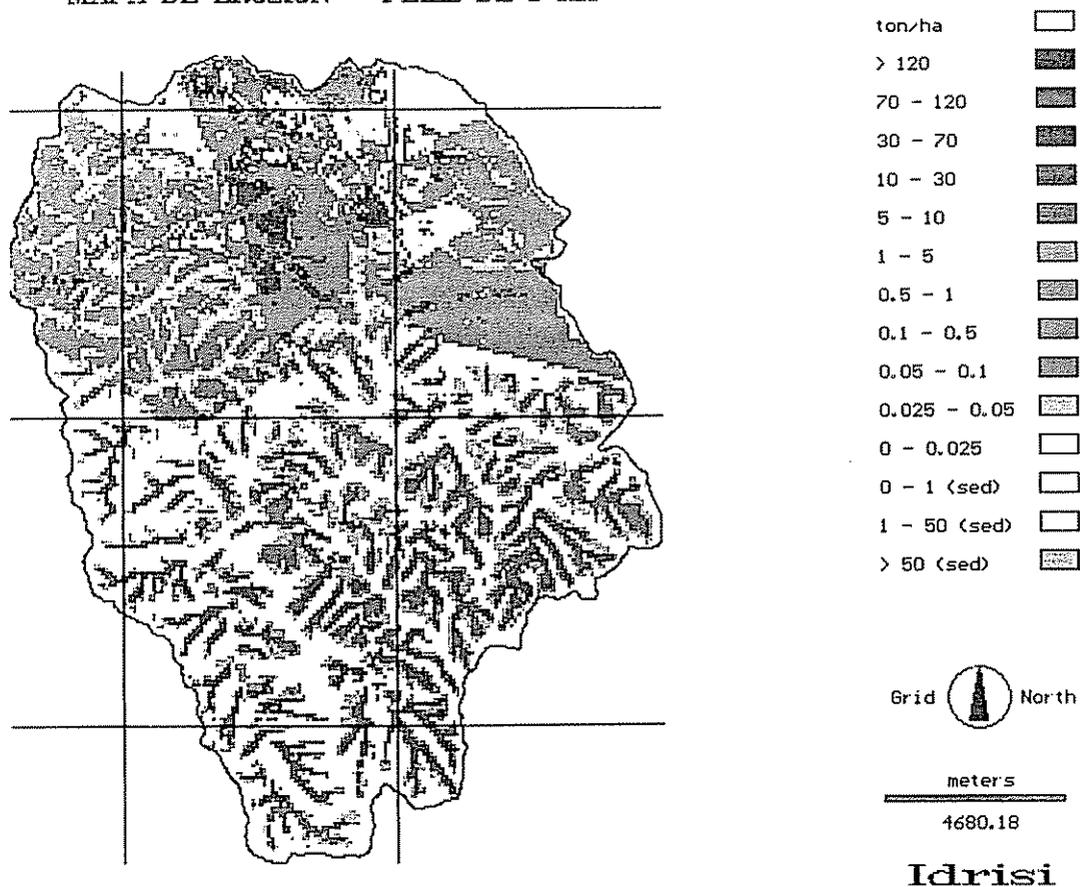


Figura No. 44 Modelación para pixel de 1 ha

ha. Algunas zonas en este mapa aparecen con tasas de erosión mayores a las presentadas considerando un pixel de 16 has.

Los resultados obtenidos reflejan la importancia del tamaño de pixel a la hora de utilizar el modelo. Es probable, de acuerdo a lo obtenido, que el pixel de 16 has utilizado en el desarrollo de esta investigación constituya un nivel de resolución espacial muy grueso para modelar los diferentes procesos involucrados en una cuenca de relieve tan irregular como la cuenca del Río Pejibaye.

Esto, sin embargo debería ser demostrado calibrando el modelo para un pixel de menor tamaño y para diferentes eventos, comparando así con los resultados obtenidos en este estudio.

Un aspecto importante es que la utilización de un pixel de 1 ha en vez de 16 has, implica un aumento del tiempo de modelación de 15 minutos a aproximadamente 16 horas, utilizando una IBM 386 y 2 hr utilizando una Pentium. Esto hace que para efectos de calibración, donde deben analizarse varios eventos y múltiples posibilidades, la utilización de un pixel tan pequeño resulte de poca aplicación práctica.

#### **4.9. Efecto de la red de drenaje en la modelación.**

El efecto que tiene la red de drenaje en los resultados de la modelación se estudió efectuando para el evento del 13/6/94 (media) una modelación con la red drenaje completa y otra eliminando completamente dicha red. Los resultados

obtenidos se muestran en el cuadro N<sup>o</sup> 16. Las diferencias obtenidas son radicales. Es evidente que la red de drenaje en una cuenca permite la evacuación rápida del flujo y los sedimentos produciendo así picos en los hidrogramas. Sin la existencia de esta red de drenaje, el flujo superficial es sumamente lento con lo cual para el tiempo de modelación considerado, no se producen picos importantes en los hidrogramas de respuesta y los totales de sedimentos transportados hasta la salida de la cuenca se mantienen bajos.

La utilización de una red de drenaje representativa de las condiciones reales en la cuenca es entonces sumamente importante para obtener buenos resultados en la modelación.

Cuadro # 16. Analisis Comparativo de Drenaje

VARIABLE	MODELACION CON RED DE DRENAJE	MODELACION SIN RED DE DRENAJE
CAUDAL PICO MM/HR	3.51	* 0.0522
TIEMPO PICO (MIN)	3.9	ND
CONC.SED. (PPM)	6346	2563
TIEMPO PICO SEDI MIN	330	285
TOTAL SEDIM. (KG)	11750080	14056
ESCORRENTIA (M)	17.6	0.928

\* Caudal maximo a los 1500 min

ND : No definido

## V. CONCLUSIONES

1. Los mejores ajustes individuales se obtuvieron con los sets de parámetros N<sup>o</sup> 2 , 3 y 4, para las tormentas de baja, alta y media respectivamente( ver anexo N<sup>o</sup> 1). Estos grupos de parámetros, son el resultado final de la variación efectuada entre ellos hasta alcanzar un ajuste satisfactorio entre las curvas modeladas y observadas.

Los errores relativos oscilan entre un 3.3 y un 11.2 % para los caudales pico , entre un 11.5 y un 52.9% para los picos de sedimentos y entre un 2.26 y un 2.81 % para los totales de sedimentos.

Los márgenes de error obtenidos pueden considerarse en general como bajos.

Por otra parte, los valores obtenidos del coeficiente de correlación de Pearson como medida de ajuste entre curvas observadas y modeladas oscilan entre 0.89 y 0.92 para caudales y entre 0.10 y 0.65 para la curva de sedimentos. Estos valores ,sobre todo para caudales,pueden considerarse aceptables .

De acuerdo a lo anterior, puede afirmarse entonces que es factible la calibración del modelo ANSWERS para la cuenca del río Pejibaye.

2. No fué posible obtener un set de parámetros que efectue el ajuste para tormentas de alta, media y baja intensidad

simultáneamente. Sin embargo, el set de parámetros Nº 9 permite un ajuste adecuado para eventos de media y de alta. Los errores relativos obtenidos para este caso fueron de un 7.8 % en caudales y 2.98 % en sedimentos totales para la tormenta de media y de un 11.2 % en caudales para la tormenta de alta.

Por otra parte el set de parámetros Nº 6 permite un buen ajuste para tormentas de baja intensidad con errores relativos de 3.3 y 4.5 % en caudales y sedimentos totales respectivamente. Al utilizar este set de parámetros para calibrar tormentas de alta o de media se obtuvieron errores relativos de un 24.9% a un 56.3 % en caudales y de un 19.8 % en sedimentos totales.

3. Por medio de los mapas de erosión obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, se determinó la distribución espacial de la erosión y sedimentación en la cuenca. A partir de esto se estimaron las zonas de máxima erosión y sedimentación en la cuenca del río Pejibaye. Estas zonas se ubican en la parte intervenida de la cuenca, sujeta a uso agrícola, ganadero o a desarrollo urbano principalmente. Las tasas de erosión máximas encontradas pueden considerarse como bajas y no representan actualmente una pérdida de suelo importante.

4. Existen diferencias importantes entre el aporte de sedimentos de la parte de la cuenca bajo cobertura boscosa

natural y la parte intervenida de la misma.

Las modelaciones efectuadas durante esta investigación reflejan un aporte del bosque de un 2.5 a un 11 % al total de sedimentos producido para las tormentas de diferente intensidad investigadas.

De acuerdo a estos resultados, la mayor parte de los sedimentos totales producidos durante una tormenta ( aprox. un 92 % en promedio ), se producen en la zona intervenida de la cuenca.

5. La modelación de los escenarios efectuada refleja las siguientes conclusiones :

Tanto para evitar aumento de caudales pico como para evitar aumento en las concentraciones o totales de sedimento, es fundamental el efecto que tiene la cobertura boscosa de la parte alta de la cuenca. Cambios en el uso del suelo en esta zona ocasionarían modificaciones importantes en el régimen hídrico y en la producción de sedimentos.

Esto se refleja claramente en las modelaciones efectuadas, donde un cambio total en el uso del suelo de bosque primario y secundario a pasto mal manejado produjo aumentos en los caudales pico de un 42.7 % y de un 392 % en el valor pico de la curva de concentración de sedimentos. Asimismo, los totales de sedimento aumentaron en casi 8 veces con respecto

a la condición actual.

La disminución en cuanto a caudales y sedimentos es notoria al sustituirse la condición anterior por un pasto bien manejado.

El cambio de uso de bosque primario y secundario a café sin prácticas de conservación también provocaría incrementos importantes en los valores de caudales y sedimentos. Según la modelación, este tipo de cambio provocaría un incremento de un 19.8 % en el pico de caudales y un aumento de 3 veces en el pico de concentración de sedimentos. Además, los totales de sedimentos aumentarían en 7 veces con respecto a la condición actual.

La modelaciones de escenarios efectuadas, también señalan que el bosque secundario existente, que constituye la zona de bosque que soporta la mayor presión para una eventual modificación a corto plazo del uso del suelo, también juega un papel importante como regulador de caudales y sedimentos en la cuenca. Esto se reflejó al modelar un cambio del bosque secundario en la cuenca a un pasto mal manejado. Los resultados muestran que se produciría un incremento de aproximadamente 5 veces la tasa actual de concentración de sedimentos y de sedimentos totales, no presentándose variación importante en los picos de caudales. Por otra parte, el cambio a un pasto bien manejado reflejó incrementos de un 26 % en las tasas de concentración de sedimentos y de

23.8 % en los sedimentos totales.

La utilización de las prácticas de conservación de suelos en la cuenca producen una disminución importante en las tasas de producción de sedimentos. Según la modelación efectuada, la utilización de prácticas disminuye en un 25.3 % los totales de sedimentos y en un 26.3 % los picos de concentración de sedimentos, con respecto a la condición sin prácticas de conservación.

## VI. RECOMENDACIONES.

1. Es necesario evaluar la utilización del modelo ANSWERS para la estimación de las tasas anuales de sedimentos producidas en una cuenca hidrográfica.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que es factible la calibración del modelo para condiciones tropicales. Esto puede servir como base y estímulo para efectuar nuevas investigaciones que permitan extrapolar los resultados para eventos a resultados para periodos largos como un año.

La metodología para lograr esto podría consistir en definir un año hidrológico típico para la cuenca y modelar para todas las tormentas de ese año o bien modelar para cierto número de tormentas, correspondientes a rangos predefinidos.

Considero que los resultados de esta investigación, aunque no pueden considerarse definitivos, si abren una puerta a la investigación y evaluación del potencial del uso de los modelos distribuidos hidrológicos y de erosión de suelos en el manejo de los recursos naturales.

2. Es necesario mejorar la información existente en cuanto a suelos en nuestro país si se quiere hacer un uso ágil del modelo.

El tiempo requerido para la obtención de todos los parámetros de suelo requeridos por el modelo es significativo.

Es necesario estudiar la posibilidad de utilizar las

características fisiográficas de modelos de elevación digital como aspecto o pendiente, como fuente de obtención de parámetros de suelo como porosidad, capacidad de campo, infiltración etc. Se podría pensar en realizar estudios detallados de suelos en cuencas o subcuencas específicas y por medio de modelos de elevación poder generalizar la información a nivel nacional o regional. De esta manera podría tenerse en forma relativamente simple, una base de datos adecuada para la utilización de este tipo de modelos.

3. En toda utilización del modelo, debe darse prioridad en la investigación a los parámetros que resultaron con una sensibilidad mayor en el análisis de sensibilidad.

Aunque esta sensibilidad podría variar para otras cuencas con condiciones de suelo, cobertura y régimen de precipitación diferentes, los resultados obtenidos en el estudio realizado, pueden servir como una referencia importante general para enfatizar en estos parámetros en la fase de campo y no perder recursos ni tiempo en variables que no afectarán en forma relevante el resultado final de la modelación.

Puede concluirse que de acuerdo al estudio de sensibilidad efectuado, la utilización del modelo ANSWERS en cuencas similares a la del río Pejibaye debe dar prioridad a la obtención lo más exacta posible de los siguientes parámetros :

Porosidad Total (TP), Infiltración Mínima (FC), Profundidad de Control de la Infiltración (DF), Humedad Antecedente

(ASM), Factores USLE "K" y "C".

4. Debido a atrasos en el mecanismo de los pluviógrafos mensuales, la información de las bandas no permite precisar en ocasiones la hora exacta de inicio de la tormenta. Esto representa un grave inconveniente para la modelación con ANSWERS, donde desfases en los registros pluviográficos pueden ocasionar variaciones importantes en la respuesta del modelo.

Es importante entonces hasta donde sea posible utilizar información de pluviógrafos diarios o bien localizar alguna estación con pluviógrafo diario cercana que sirva para relacionar la información de los pluviografos mensuales y poder así comparar los tiempos de inicio.

Es claro que el uso generalizado de estaciones telemétricas en las cuencas evitará los problemas antes mencionados.

5. Para cuencas grandes (mayores de 120 has), deben modificarse los códigos fuente del programa ANSWERS para que permita más de 4 estaciones de precipitación. Esta es una limitante importante ya que obliga a relizar estudios como el efectuado en este trabajo para promediar estaciones con la consiguiente pérdida de representatividad espacial de la precipitación.

6. Es importante efectuar un estudio similar al efectuado pero contemplando un mayor número de eventos, a fin de

evaluar el ajuste estadístico de los resultados y determinar la confiabilidad estadística de la utilización del modelo.

## BIBLIOGRAFIA.

- AMEZQUITA COLLAZOS, E. 1974. Estudios hidrológicos y edafológicos para conservación de aguas y suelos en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 212 p.
- APOLO BERRU, W.A. 1980. Evaluación de la escorrentía superficial y la erosión en un pastizal con árboles aislados en la Suiza, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba. Costa Rica. CATIE. 69 p.
- ARGUELLO, G.E. 1992. Modelación Hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del río Virilla, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 128 p.
- BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F. 1981. Answers Users Manual. 2 ed. Indiana. USA, Agricultural Engineering Department Publication. 55 p.
- BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. 1982. Modelling sediment yields from agricultural watersheds. Journal of soil and water conservation (EE.UU) 37(2):113-117
- CHOW, V.T. 1964. Handbook of applied hidrology. New York, EE.UU, Mc Graw Hill. 2930 p.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. 1988. Applied Hidrology. New York, McGraw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. 572 p.
- CLARKE, R.T. 1973. Mathematical models in hidrology. Roma, Italia, FAO. 282p.
- DE ROO, A.P.J. 1993. Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems: Validity and applicability of the ANSWERS model in two catchments in the loess area of South Limburg (The netherlands) and one in Devon (UK). Utrech, Netherlands., 295 p.

- DOUROJEANNI, R.; PAULET, M. 1967. La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de las tierras agrícolas : Estudio del factor de las lluvias en el Perú. Lima, Perú. Universidad Agraria, Facultad de Ingeniería Agrícola. 78 p.
- FOSTER, G.R. 1982. Modelling the erosion process. In Hidrologic Modelling of Small Watersheds. Ed. by C.T. Haan; H.P. Jhonson; D.L. Brakiensiek. EE.UU. American Society of Agricultural Engineers. p 297-380.
- FORSYTHE, W. 1972. Manual de laboratorio de física de suelos. Turrialba, Costa Rica., IICA. 216 p.
- FLEMING, G. 1979. Deterministic model in hidrology. Roma, Italia, FAO. 80p.
- GONZALEZ DEL TANAGO, M. 1991. La ecuación universal de pérdida de suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología (España) 5:13-50.
- HAAN, C.T, ed. 1982. Hidrologic modelling of small watersheds. Michigan, USA., American Society of Agricultural Engineers. 533p.
- JAMES, D.J.; BURGESS, S.J. 1992. Selection, calibration, and testing of hidrologic models. In Hidrologic Modelling of Small Watersheds. Ed. by C.T. Haan; H.P Jhonson; D.L. Brakensiek. EE.UU. American Society of Agricultural Engineers. p. 437-472.
- MAIDMENT, D.R. 1991. GIS and hidrologic modelling. sl,se. 22 p.
- Presentado en : International Symposium/Workshop on GIS and Environmental Modelling. ( 1,1991, Boulder, Colorado, EE.UU )
- MALDONADO, T. 1986. La colonización del área de Taque-Taque, el uso de la tierra y los sistemas agroforestales. Reserva Forestal Río Macho, Costa Rica. Análisis y Perspectivas. Tesis Nag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR/CATIE. 193p.

- MOLERO, A. 1972. La dinámica del agua y del espacio aéreo en las capas superficiales de dos suelos de Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, Costa Rica., CATIE. 188 p.
- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A.R. 1990. Digital terrain modelling : A review of hidrological, geomorfological and biological applications. Hidrological Processes (EE.UU) 5:3-30.
- MOORE, I.D.; TURNER, A.K.; WILSON, S.K.; JENSON, L.E., BAND, L.E. 1991. GIS and land surface-subsurface process modelling. EE.UU. 36 p.
- Presentado en : International Conference/Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modelling. ( 1,1991, Boulder, Colorado,EE.UU ).
- MORA C, I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal ( EUPS ): Aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejibaye, Vertiente Atlántica, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 174 p.
- PAULET I, M. 1967. Determinación de la erodabilidad del suelo en función de algunas de sus propiedades. Lima, Perú. 75 p.  
Separata de : Anales Científicos de la Universidad Agraria. Perú. 5(1,2)
- QUESADA, C. 1990. Estrategia de conservación para el desarrollo sostenible de Costa Rica. San José, Costa Rica, Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas. 162 p.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; YODER, D.C.; McCOOL, D.K. 1994. RUSLE revisited: Status, questions, answers and the future. Journal of Soil and Water Conservation (EE:UU) 49(3):213-220.
- fuente 5.*  
SOLIS, H. 1993. Cap 1.Ciclo Hidrológico In Apuntes de clase del curso de Hidrología. Turrialba, C.R., CATIE, 3 p.

- VAHRSON, W. 1992. La ecuación universal de pérdida de suelo ( USLE ): Un modelo que sobreestima la tasa de pérdida de suelo. IN Congreso Nacional de Recursos Hidráulicos (4.,1992,San José). 1992. San José, Costa Rica.
- VELAZQUEZ, S. 1993. Sistema de Información Geográfica: Manual de IDRISI. 1 ed. Turrialba. Costa Rica, Proyecto RENARM/MANEJO DE CUENCAS. CATIE. 143p.
- KRASOVSKIA, I. 1993. Modelling soil erosion. Uppsala, Sweden. AB Hydroconsult. 64 p.
- YOUNG, R.; ONSTAD, CH.A.; BOSCH, D.D.; ANDERSON, W.P. 1987. AGNPS, Agricultural Non Point Source Pollution Model : A Watershed Analysis Tool. EE.UU, United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Conservation Research Report No 35. 75 p.
- WOOLHISER, D.A.; BRAKENSIEK, D.L. 1982. Hidrologic system synthesis. In Hidrologic Modelling of Small Watersheds. Ed. by C.T. Hann; H.P. Jhonson; D.L. Brakensiek. EE.UU., American Society of Agricultural Engineers. p. 3-16.

**ANEXO 1**

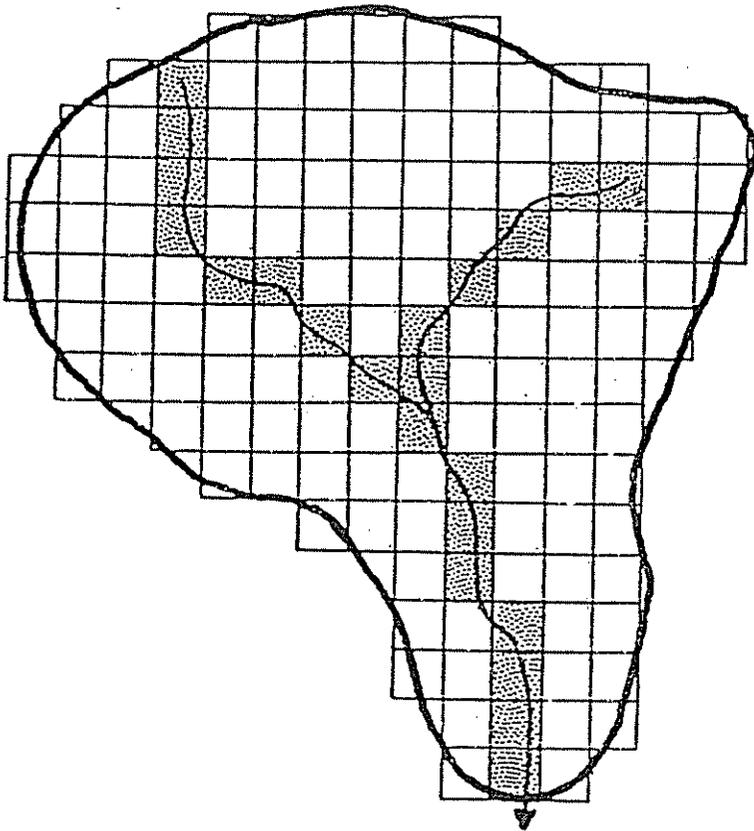


FIG. Nº1. DIVISION DE LA CUENCA EN ELEMENTOS FORMANDO CUADRICULA.

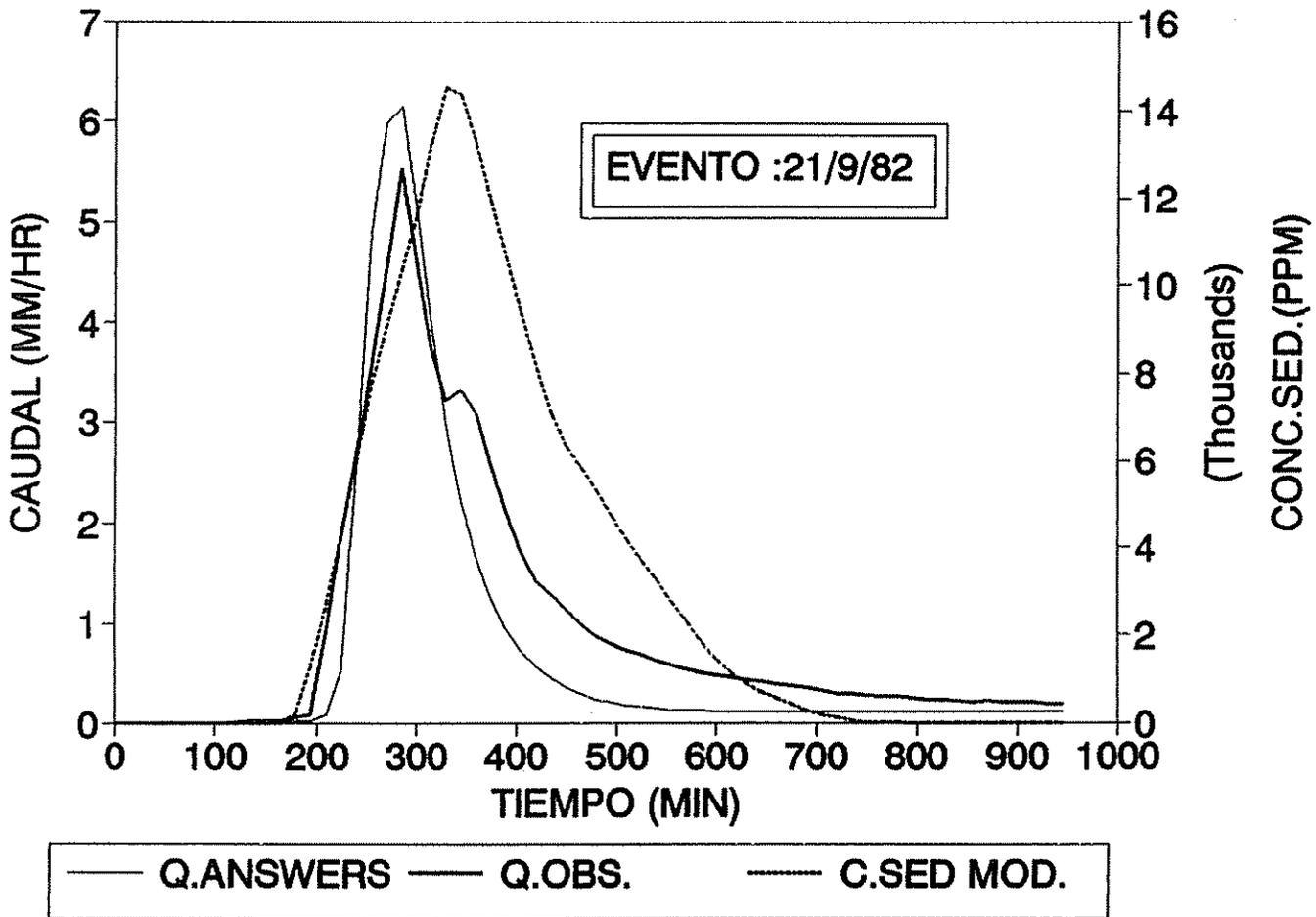


Figura # 2. Evento de Alta. Estudio Comparativo por Subcuencas

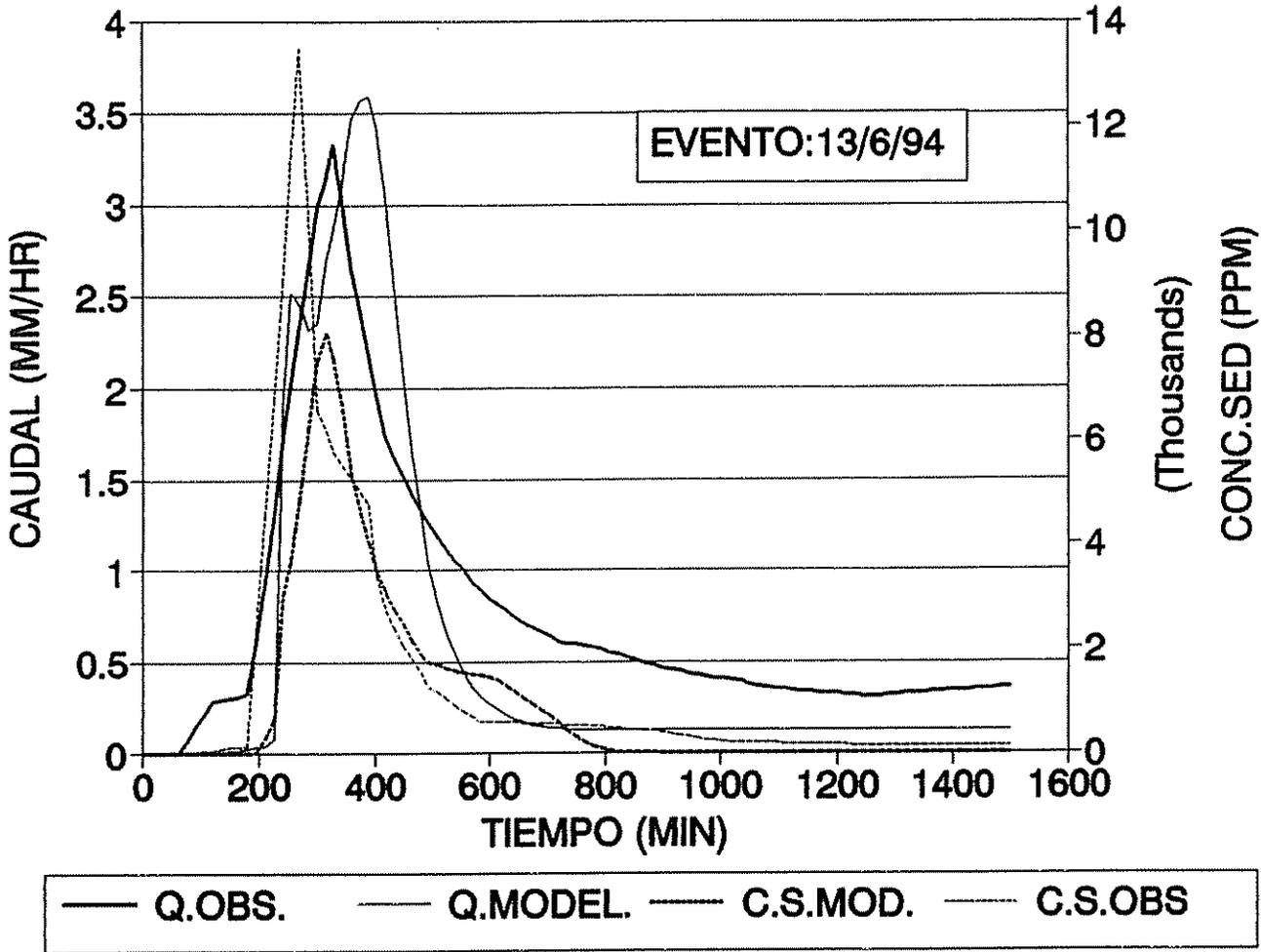


Figura # 3. Evento de Media. Estudio Comparativo por Subcuencas

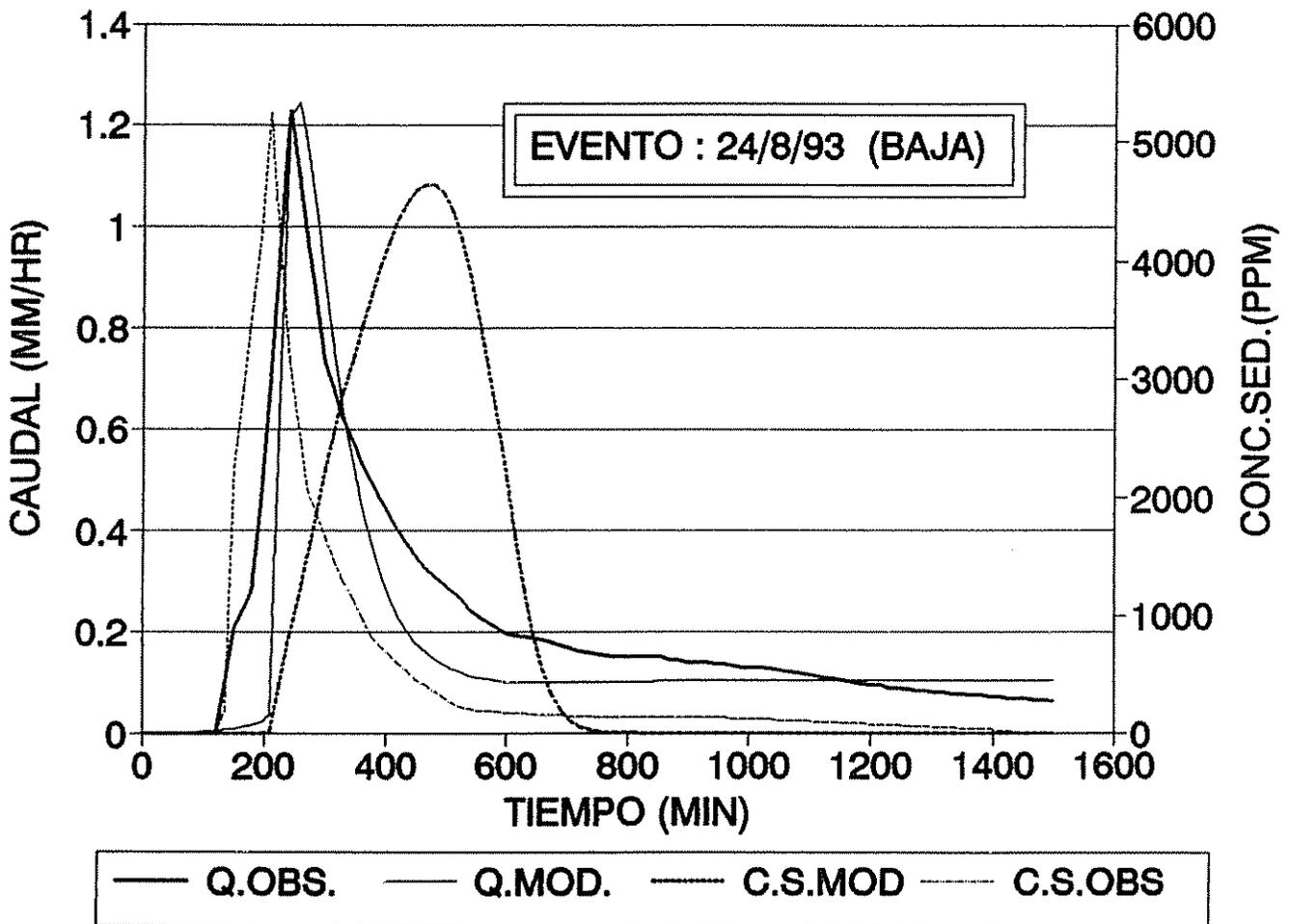


Figura # 4. Evento de Baja. Estudio Comparativo por Subcuencas

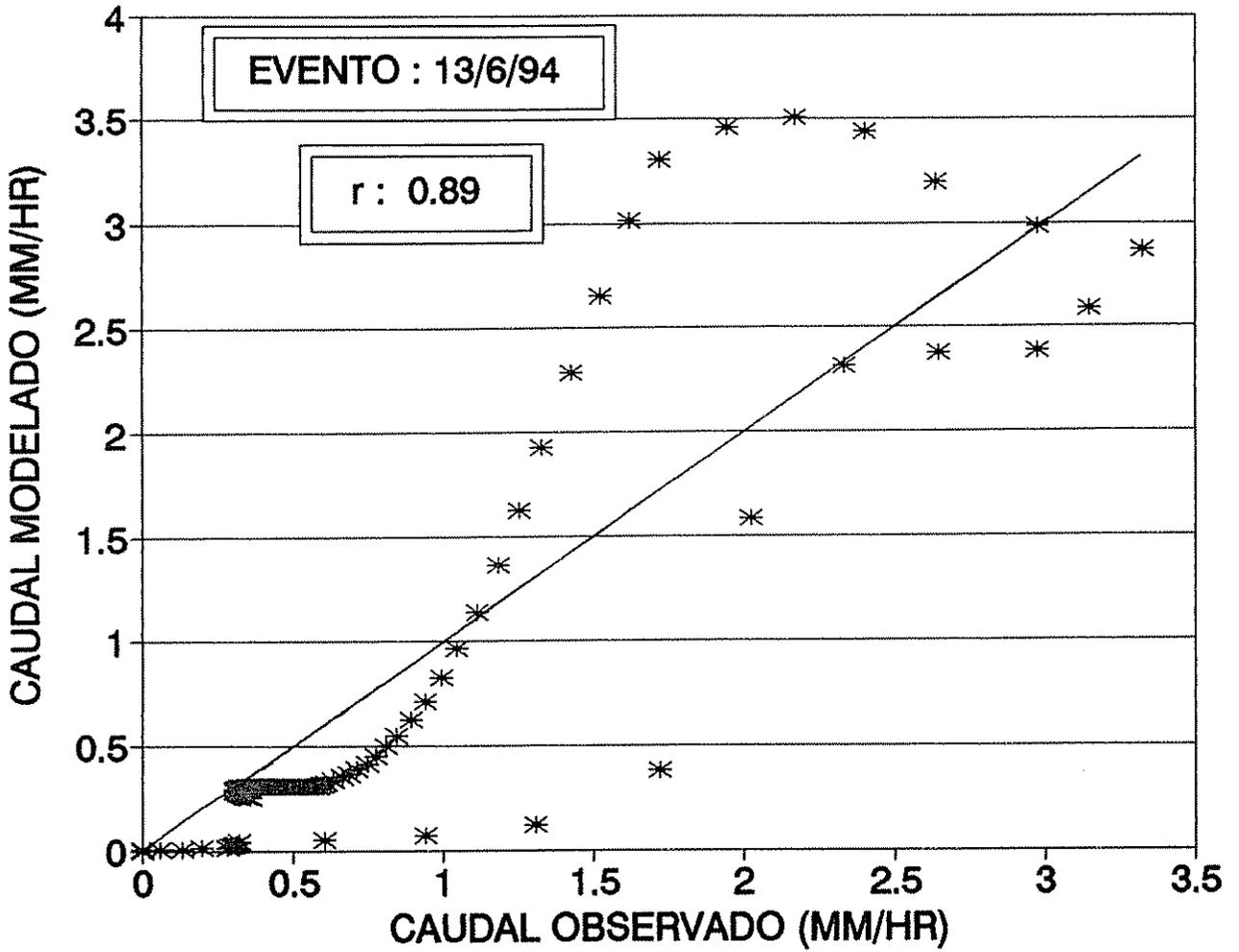


Figura # 5. Ajuste Estadístico. Evento 13/6/94

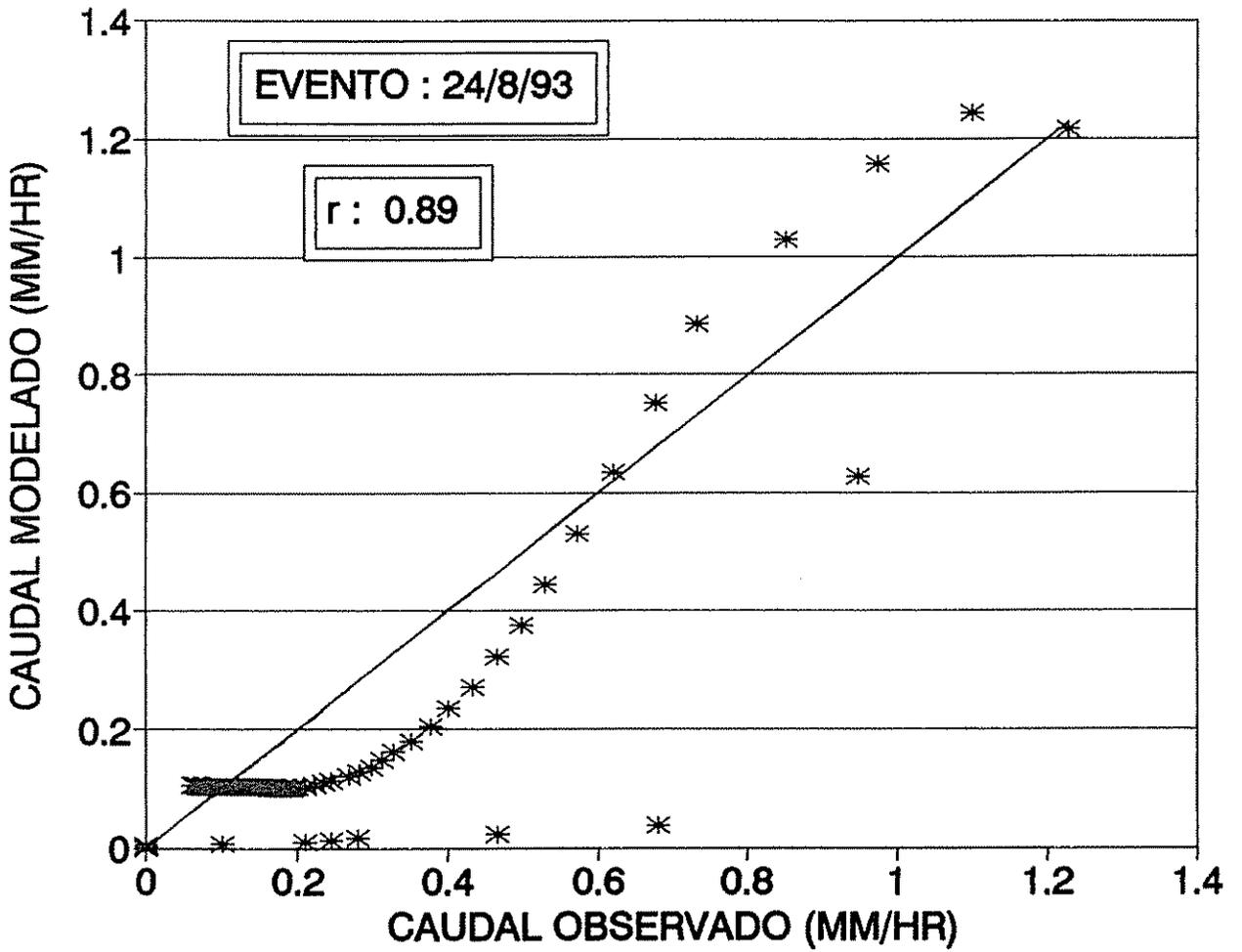


Figura # 6 . Ajuste Estadístico. Evento 24/8/93

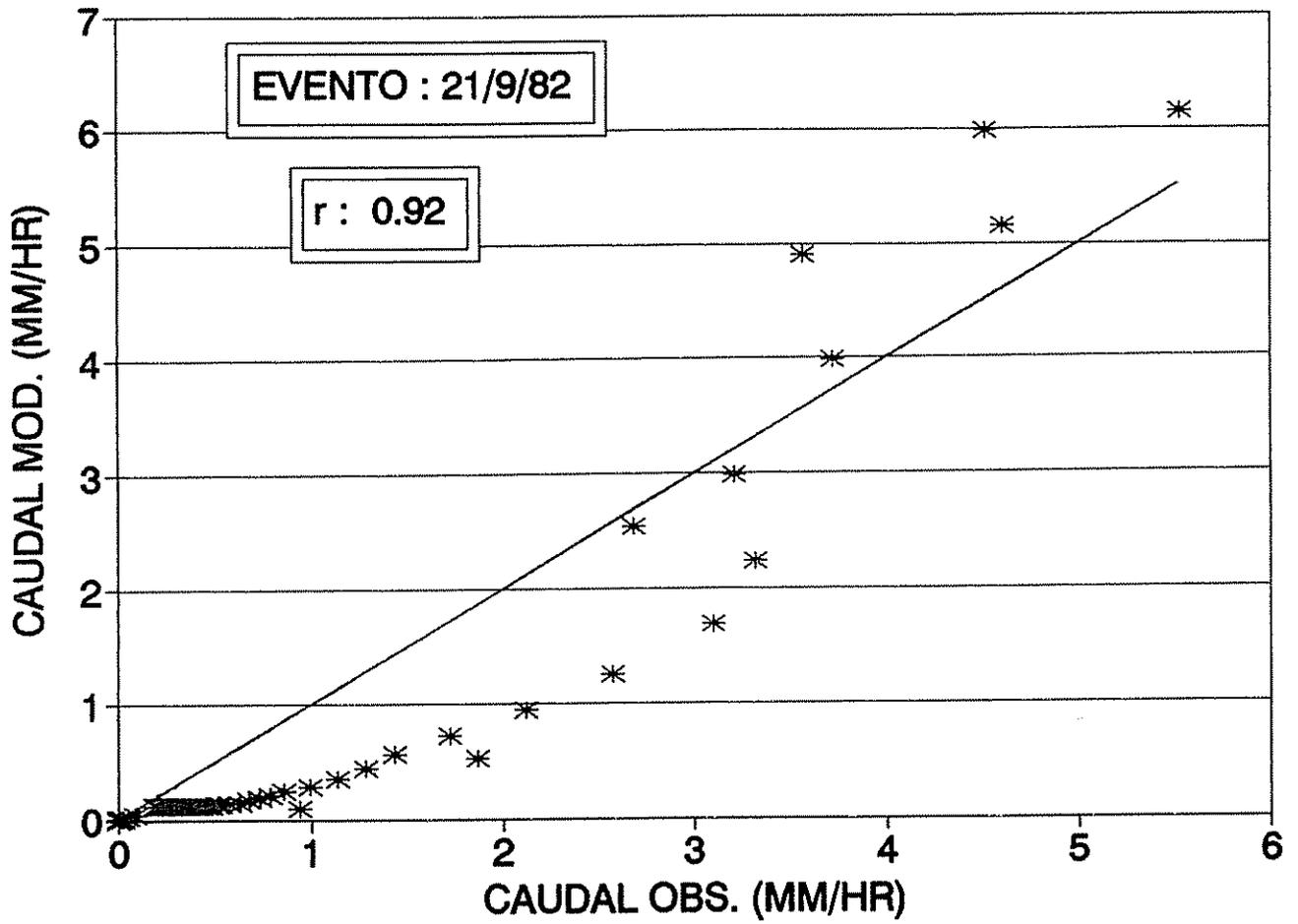


Figura # 7. Ajuste Estadístico. Evento 21/9/82

Cuadro Nº 1. Información Básica Modelo ANSWERS.

## 1. INFORMACION DE SUELOS

PARAMETRO	DEFINICION	FUENTE
TP	POROSIDAD TOTAL	PRUEBA LAB. SUELOS.
FP	CAPACIDAD DE CAMPO	PRUEBA LAB. SUELOS
FC	TASA INFILTR. FINAL	LITERATURA
A	DIF. TASA MAX-FINAL	LITERATURA
P	EXPONENTE EC. INFILTR.	LITERATURA
DF	PROF. ZONA CONTROL	MEDICIONES EN CAMPO
ASM	HUMEDAD ANTECEDENTE	CAP. CAMPO CALCULADA
K	FACTOR "K" USLE	PRUEBA LAB. Y LITERAT.

## 2. INFORMACION USO DE LA TIERRA.

PARAMETRO	DEFINICION	FUENTE
PIT	VOL. INTERCEPTAC. POTENC.	LITERATURA
PER	PORC. CUBIERTO USO.	LITERATURA
RC	FACTOR DE FORMA	LITERATURA
HU	MAX. ALTURA RUGOSIDAD	LITERATURA
N	COEF. RUGOSIDAD MANNING	LITERATURA
C	FACTOR DE COBERTURA	LITERATURA.

## 3. INFORMACION ELEMENTOS DE CANAL.

PARAMETRO	DEFINICION	FUENTE
--	ANCHO DE CANAL	MEDICIONES CAMPO
--	"N" MANNING	LITERATURA

## 4. INFORMACION DE ELEMENTOS INDIVIDUALES

DEFINICION	FUENTE
NUMERO DE FILA	--
NUMERO DE COLUMNA	--
PENDIENTE	MODELO ELEVACION DIGITAL
DIRECCION DE MAX.PENDIENTE	MODELO ELEVACION DIGITAL
IDENTIFICADOR TIPO CANAL	RED DE DRENAJE
IDENTIFICADOR TIPO SUELO	MAPA DE CLASES DE SUELOS
IDENTIF.TIPO COBERTURA	MAPA DE COBERTURA
IDENTIF.ESTACIONPLUVIOGRAFICA	MAPA CON ESTACIONES PLUV.
PENDIENTE CANAL	MODELO DE ELEVACION

Cuadro # 2A. Estacion El Humo. Evento 24/8/93  
Registro de Precipitacion

	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
HORA	HUMO		POND.	MIN	MM/HR
*11:00				0	0
*11:30	0		0	30	0
*12:00	0.9		0.9	60	1.8
*12:30	1		1	90	2
*13:00	1.3		1.3	120	2.6
*13:30	3.5		3.5	150	7
*13:40	3.3		3.3	160	19.8
*14:00	27		27	180	8.1
*14:10	2		2	190	12
*14:20	1		1	200	6
*14:30	1		1	210	6
*15:00	2.9		2.9	240	5.8
*15:30	1.1		1.1	270	2.2
*16:00	0.2		0.2	300	0.4
*16:30	0.1		0.1	330	0.2
*17:00	0.1		0.1	360	0.2
*17:30	0.1		0.1	390	0.2
*18:00	0.1		0.1	420	0.2
*19:00	0		0	480	0

Cuadro # 2B. Estacion Oriente-Taus. Evento 24/8/93  
Registro de Precipitacion

HORA	PRECIPIIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	TAUS	ORIENTE	POND.	MIN	MM/HR
*11:00				0	0
*11:30	1.9	0.9	1.57	30	3.14
*12:00	2	1.8	1.93	60	3.86
*12:30	0.6	0.5	0.57	90	1.14
*13:00	2.2	1.2	1.87	120	3.74
*13:30	4.4	2.5	3.77	150	7.54
*14:00	12.5	19.9	14.9	180	29.8
*14:30	2.3	2.2	2.27	210	4.54
*15:00	2.6	2.4	2.53	240	5.06
*15:30	0.7	0.9	0.77	270	1.54
*16:00	0	0.3	0.1	300	0.2
*19:00	0	0	0	480	0

Cuadro # 2C. Estacion Tabano-Gato. Evento 24/8/93  
Registro de Precipitacion

HORA	PRECIPIIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	TABANO	GATO	POND.	MIN	MM/HR
*11:00				0	0
*11:30	7.6	0	2.87	30	5.74
*12:00	11.3	3.5	6.45	60	12.9
*12:30	4.2	8.6	6.94	90	13.88
*13:00	11.4	4	6.8	120	13.6
*13:30	8	13	11.1	150	22.2
*14:00	4.5	16	11.65	180	23.2
*14:30	2.3	7	5.22	210	10.44
*15:00	2.3	3.5	3.05	240	6.1
*15:30	0.8	1.7	1.36	270	2.72
*16:00	0.2	1.8	1.19	300	2.38
*17:00	0	0.5	0.31	360	0.31
*19:00	0	0.2	0.12	480	0.06

Cuadro # 2D. Estacion T Seis-Destierro.

Registro de Precipitacion. Evento 24/8/93

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	T.6	DESTIE.	POND.	MIN	MM/HR
*11:00				0	0
*11:30	0	0	0	30	0
*12:00	0.1	0	0	60	0.2
*13:00	4.7	5.5	5.24	120	5.24
*14:00	7	6.9	6.93	180	6.93
*15:00	3.3	5.9	5.07	240	5.07
*16:00	1.2	0.6	0.79	300	0.79
*17:00	0.2	0	0.06	360	0.06
*18:00	0	0.1	0.07	420	0.07
*19:00	0	0	0	480	0

Cuadro # 2E. Estacion El Humo. Evento 13/6/94  
Registro de Precipitacion

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	HUMO		POND.	MIN	MM/HR
*13:00	0		0	0	0
*13:30	0		0	30	0
*13:40	2		2	40	12
*13:50	21		21	50	126
*14:00	4.4		4.4	60	26.4
*14:30	1.8		1.8	90	3.6
*15:00	1.6		1.6	120	3.2
*15:30	1.6		1.6	150	3.2
*16:00	1.3		1.3	180	2.6
*16:30	14		14	210	28
*17:00	9.3		9.3	240	18.6
*17:30	7.8		7.8	270	15.6
*18:00	5.2		5.2	300	10.4
*18:30	3.5		3.5	330	7
*19:00	1.7		1.7	360	3.4
*19:30	1.5		1.5	420	3
*20:00	0.3		0.3	420	0.6
*22:00	0		0	540	0

Cuadro # 2F. Estacion T.Seis-Destierro  
 Evento 13/6/94. Registro de Precipitacion

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	T.6	DEST.	POND.	MIN	MM/HR
*13:00		0	0	0	0
*13:30		0	0	30	0
*14:00		0	0	60	0
*14:30		0	0	90	0
*15:00		2.9	2.9	120	5.8
*15:30		8.8	8.8	150	17.6
*16:00		7.5	7.5	180	15
*16:30		2.5	2.5	210	5
*17:00		2.7	2.7	240	5.4
*17:30		0.7	0.7	270	1.4
*18:00		5.4	5.4	300	10.8
*18:30		14	14	330	28
*19:00		11.6	11.6	360	23.2
*19:30		5.5	5.5	390	11
*20:00		2	2	420	4
*21:00		2.2	2.2	480	2.2
*22:00		0.5	0.5	540	0.5

Cuadro # 2G Estacion Oriente Taus Evento 13/6/94

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	ORIENTE	TAUS	POND	MIN	MM/HR
*13:00	0		0	0	0
*13:30	1		1	30	2
*14:00	9		9	60	19
*14:30	2		2	90	4
*15:00	1.8		1.8	120	3.6
*15:30	1		1	150	2
*16:00	5.2		5.2	180	10.4
*16:10	10		10	190	60
*16:30	7		7	210	21
*16:40	2.9		2.9	220	17.4
*17:00	9.9		9.9	240	29.7
*17:30	4.5		4.5	270	9
*17:50	5.4		5.4	290	16.2
*18:00	2		2	300	12
*18:10	2		2	310	12
*18:30	2		2	320	6
*19:00	2		2	360	4
*19:30	0.6		0.6	390	0.4
*20:00	0.2		0.2	420	0.1
*21:00	0.1		0.1	480	0.1

Cuadro 2H Estacion Tabano-Gato Evento 13/6/94

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	TABANO	GATO	POND.	MIN	MM/HR
*13:00	0	0	0	0	
*14:00	0	0	0	60	0
*14:30	13.5	0	5.1	90	0
*15:00	6.2	0	2.35	120	0.002
*15:30	2.8	14.2	9.88	150	0.74
*16:00	0.7	1.2	1.01	180	7.18
*16:30	0.9	2.8	2.08	210	6.78
*17:00	18.3	0.4	7.17	240	20.8
*17:30	12.5	2.5	6.34	270	41.64
*18:00	30.9	10	17.9	300	49.3
*18:30	8.1	13	11.15	330	26.64
*19:00	2.2	9	6.42	360	8.24
*19:30	4	3	3.39	390	3.06
*20:00	1.4	2.9	2.33	420	0.68
*21:00	0.2	2.7	1.75	480	0.52
*22:00	0	0.2	0.12	540	0.3
*24:00	0	0.1	0.06	660	0.04

## Cuadro # 2i Estacion El Humo Evento 21/9/82

## Registro de Precipitacion

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	HUMO		POND.	MIN	MM/HR
*14:00	0		0	0	0
*14:30	0		0	30	0
*15:00	3.2		3.2	60	6.4
*15:30	4.2		4.2	90	8.2
*16:00	2.6		2.6	120	5.2
*16:30	4.6		4.6	150	9.2
*17:00	12.9		12.9	180	25.8
*17:30	17.7		17.7	210	35.4
*18:00	19.5		19.5	240	39
*18:30	7.7		7.7	270	15.4
*19:00	2.2		2.2	300	4.4
*19:30	0.4		0.4	330	0.8
*20:00	0.35		0.35	360	0.7
*20:30	0.15		0.15	390	0.3
*21:00	0		0	420	0

## Cuadro 2j Estacion Oriente-Taus Evento 21/9/82

HORA	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
	ORIENTE	TAUS	POND.	MIN	MM/HR
*14:00				0	0
*14:30	0		0	30	0
*15:00	0.001		0.001	60	0.002
*15:30	0.37		0.37	90	0.74
*16:00	3.59		3.59	120	7.18
*16:30	3.39		3.39	150	6.79
*17:00	10.4		10.4	180	20.8
*17:30	20.82		20.82	210	41.64
*18:00	24.65		24.65	240	49.3
*18:30	18.32		18.32	270	36.64
*19:00	4.12		4.12	300	8.24
*19:30	1.53		1.53	330	3.06
*20:00	0.34		0.34	360	0.68
*20:30	0.26		0.26	390	0.52
*21:00	0.15		0.15	420	0.3
*21:30	0.02		0.02	450	0.04

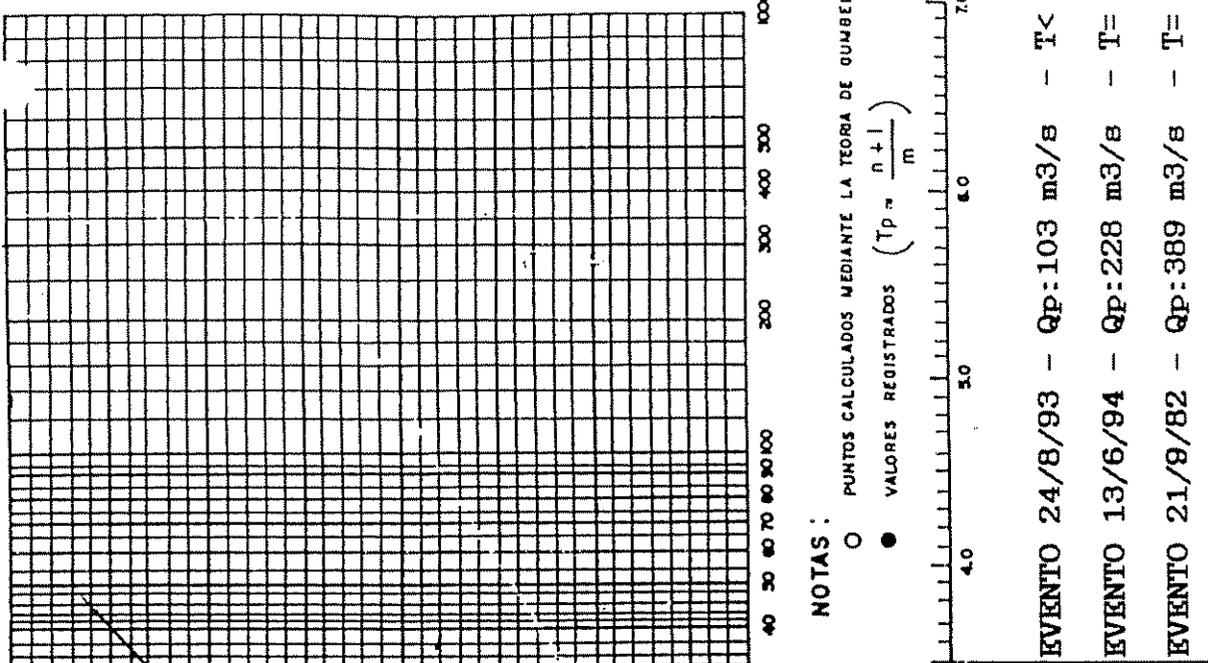
## Cuadro # 2K Estacion Tabano-Gato Evento 21/9/82

## Registro de Precipitacion

	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
HORA	GATO	HUMO	POND	MIN	MM/HR
*14:00	0		0	0	0
*14:30	0		0	30	0
*15:00	0		0	60	0
*15:30	0		0	90	0
*16:00	0		0	120	0
*16:30	2.8		2.8	150	5.6
*17:00	11.6		11.6	180	23.2
*17:30	3.2		3.2	210	6.4
*18:00	3		3	240	6
*18:30	8.8		8.8	270	17.6
*19:00	4.8		4.8	300	9.6
*19:30	4		4	330	8
*20:00	5.8		5.8	360	11.6
*21	2.4		2.4	420	2.4
*22	0.1		0.1	480	0.1

## Cuadro # 2L Estacion T Seis-Destierro Evento 21/9/82

	PRECIPIT. MM		PROM.	T.ACUM	PRECIP.
HORA	T.6	DEST.	POND.	MIN	MM/HR
*14:00				0	0
*14:30	0.4	1.3	1.013	30	2.03
*15:00	0	0	0	60	0
*15:30	1.4	0	0.45	90	0.9
*16:00	13	12	12.31	120	24.62
*16:30	34.2	11	18.4	150	36.8
*17:00	5.8	4	4.57	180	9.14
*17:30	1.4	1.3	1.33	210	2.66
*18:00	0.15	0.4	0.32	240	0.64
*18:30	0.15	0.2	0.18	270	0.36
*19:00	0	0.1	0.1	300	0.2
*19:30	0	0	0	330	0



NOTAS :

- PUNTOS CALCULADOS MEDIANTE LA TEORIA DE GUMBEL
- VALORES REGISTRADOS  $(T_p = \frac{n+1}{m})$

EVENTO 24/8/93 - Qp:103 m3/s - T< 1  
 EVENTO 13/6/94 - Qp:228 m3/s - T= 1.07  
 EVENTO 21/9/82 - Qp:389 m3/s - T= 2.80

Cuadro # 4. Ubicacion Geografica de Sitios de Muestreo

SITIO	ID.	COORD. Y	COORD. X	METODO
GATO	GA-1	199665	570312	GPS
GATO	GA-2	198922	570065	GPS
GATO	GA-3	200022	570842	GPS
GATO	GA-4	199478	569167	GPS
TAUS	MP-1	196219	565201	GPS
TAUS	MP-2	196632	567168	GPS
GATO	MP-3	198035	569959	GPS
RIO CACAO	CAC-1	200164	566559	GPS
TUCURRIQUE	TUQ-1	201096	568870	GPS
LA MARTA	MA-1	195963	570856	GPS
LA MARTA	MA-3	196842	570329	GPS
EL HUMO	GATO-MD	198808	568368	GPS
TAUSITO	TAUSITO	196419	562144	GPS
LA SELVA	SELVA-1	196631	564602	GPS
EL HUMO	HUM-1	198970	568015	GPS
BAJOS HUMO	B.HUM	198970	563454	GPS
TABANO	TA-1	194013	569308	GPS
TABANO	TA-2	192847	570133	GPS
EST.GATO	E.GATO	190113	569956	GPS
DESTIERRO	DES	186077	563989	GPS
T-SEIS	T-6	188931	562185	H.C
EL GATO	GA-5	199200	572500	H.C

H.C : DE HOJA CARTOGRAFICA

Cuadro Nº 5A. Set Nº 1.

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	150.0	40.0	110.0	150.
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	450.0	120.0	190.0	450.
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
K	USLE "K"	S.I	0.21	0.195	0.191	0.01

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 9.55 MM/DIA

FRACCION DE APORTE AL FLUJO SUBTERRANEO = 0.005

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CAÑA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.15	0.30	0.40	0.04	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

## Cuadro N° 5B. Set N°2

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	8.80	8.80	8.80	8.80
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.20	0.02

COEFICIENTE DE INTEFLUJO = 2.0 MM/24 HR

FRACCION DE APORTE AL FLUJO SUBTERRANEO = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CAÑA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.15	0.30	0.40	0.04	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

Cuadro Nº 5C. Set Nº 3.

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	11.0	11.0	11.0	11.0
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.02	0.02

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 2.0 MM/DIA

FRACCION DE APOORTE AL FLUJO SUBTERRANEO = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CANA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.15	0.30	0.40	0.04	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

Cuadro N° 5D. Set N° 4.

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	10.50	10.50	10.50	10.5
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.02	0.02

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 6.40 MM/HR

FRACCION DE APORTE AL FLUJO SUBTERRANEO = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CANA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.15	0.15	0.12	0.12	0.15	0.20
C	USLE "C"	--	0.15	0.30	0.40	0.05	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.048	0.051	0.058	0.058	0.078

## Cuadro Nº 5E. Set Nº 5

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	11.0	11.0	11.0	11.0
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.21	0.02

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 2.0 MM/DIA

FRACCION DE APOORTE AL FLUJO SUBTERRANEO = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CAÑA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.05	0.30	0.02	0.02	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

Cuadro Nº 5F. Set Nº 6.

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	8.80	8.80	8.80	8.80
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.21	0.02

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 2.0 MM/HR  
 FRACCION DE APORTE AL AGUA SUBTERRRANEA = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CANA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.05	0.30	0.02	0.02	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

Cuadro Nº 5G. Set Nº 7.

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	11.0	11.0	11.0	11.0
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.24	0.08

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 2.0 MM/HR

FRACCION DE APORTE AL AGUA SUBTERRRANEA = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CAN#	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.05	0.30	0.02	0.02	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

## Cuadro Nº 5H. Set Nº 8

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	12.5	12.5	12.5	12.5
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.24	0.08

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 2.0 MM/HR

FRACCION DE APOORTE AL AGUA SUBTERRRANEA = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CAÑA	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.05	0.30	0.02	0.02	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

## Cuadro Nº 5I. Set Nº 9

## INFORMACION DE SUELOS

IDENTIF.	DEFINICION	UN.	S1	S2	S3	S4
TP	POROSID.TOTAL	% VOL	59.0	66.0	65.0	78.0
FP	CAPACID.CAMPO	% SAT	82.0	63.0	73.0	64.0
FC	TASA INFILTR.	MM/HR	11.0	11.0	11.0	11.0
A	DIFER.MAX-FC	MM/HR	40.0	40.0	40.0	40.0
P	EXPON.EC.INFIL	--	0.60	0.75	0.65	0.55
DF	PROF.CONTROL	MM	200.0	138.0	100.0	115
ASM	HUMEDAD ANTEC.	% SAT	90.0	69.0	80.0	70.0
K	USLE "K"	S.I	0.40	0.40	0.02	0.02

COEFICIENTE DE INTERFLUJO = 2.0 MM/HR  
 FRACCION DE APORTE AL AGUA SUBTERRRANEA = 0.0002

## INFORMACION DE USO DE LA TIERRA

IDEN	DEFINICION	UN	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CROP	IDENTIFIC.	--	CANÁ	CAFE	PAST	ARB.	B.SE	B.PR
PIT	VOL.INTERC	MM	0.80	0.90	0.40	1.00	2.00	2.50
PER	PORC COBER	%	0.75	0.70	1.00	0.90	1.00	1.00
RC	FACT.FORMA	--	0.65	0.65	0.50	0.50	0.55	0.60
HU	ALT.RUGOSID.	MM	76.0	70.0	38.1	40.0	63.5	76.2
N	"N" MANNING	--	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.15
C	USLE "C"	--	0.15	0.30	0.40	0.05	0.01	0.01

## INFORMACION DE RED DE DRENAJE

DEFINICION	UN	CAN 1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5
ANCHO CANAL	M	25.0	45.0	15.0	8.0	5.0
"N" MANNING	--	0.025	0.025	0.030	0.050	0.050

Cuadro # 6. Rangos de Variacion de Factores de Infiltracion

		RANGOS DE VARIACION	
AUTOR	TEXTURA SUELO	FC (MM/HR)	I <sub>max</sub> (MM/HR)
BERRU (1980)	ARCILLOSO	[ 30 , 50 ]	[ 120 , 200 ]
	FRANCO ARCILLOS	110	300
AMEZQUITA (1974)	ARCILLOSO	[100 , 400 ]	[ 800 , 1200 ]
	FRANCO ARCILLOS	[ 20 , 160 ]	[ 300 , 400 ]
MOLERO (1972)	FRANCO	[ 0 , 300 ]	[ 480 , 810 ]
	ARCILL Y F.ARCILL.	[ 0 , 48 ]	[ 60 , 120 ]
MORA (1978)	ARCILLOSO	40	
	FRANCO	108	
	FRANCO LIMOSO	226	

**ANEXO 2**

Cuadro # 1. Indices de Sensibilidad. Evento de Baja

VARIABLE	IDENT.	CAUD.PICO	CONC.SED	TOTAL SED.	TIEMPO PICO	T.PICO.SED
POR.TOTAL	TP	-0.877	-0.456	-0.948	TPn < 1, 0 TPn > 1, 0.238	TPn < 1, -0.298 TPn > 1, 0.34
CAP.CAMPO	FP	0.375	0.421	0.78	0	0
MAX.TASA	A	-0.163	-0.087	-0.244	An < 1, 0.212 An > 1, -0.212	0
INF.ESTAC.	FC	FCn < 1, -2.85 FCn > 1, -0.134	FCn < 1, -3.98 FCn > 1, -0.26	FCn < 1, -4.38 FCn > 1, -0.06	FCn < 1, 0.163 FCn < 1, 1.24	FCn < 1, -0.45 FCn > 1, -2.02
EXPON.INF.	P	0.321	0.189	0.491	Pn < 1, 0 Pn > 1, -0.161	PN < 1, 0 PN > 1, 0.096
PROF.INF.	DF	-1.031	-1.085	-1.215	0.158	DFn < 1, 0 DFn > 1, 0.096
HUM.ANTEC.	ASM	2.64	1.586	2.979	-0.528	0
USLE "K"	K	0	0.999	0.999	0	0
USLE "C"	C	0	0.928	0.96	0	0
RUGOSIDAD	RC	-0.3	-0.583	-0.923	RCn < 1, 0 RCn > 1, 0.136	-0.193
COEF.RUG.	N	-0.599	-0.351	-0.582	Nn < 1, 0.269 Nn > 1, 0	0.16
AGUA SUBT.	GRF	0.109	-0.318	0	GRFn < 1, 0 GRFn > 1, 0.055	GRFn < 1, -0.146 GRFn > 1, -0.035
INTERFLUJO	TD	0.279	-0.531	0	0	-0.155
INTERCEP.	PIT	-0.06	-0.029	-0.063	0	PIT < 1, -0.076 PITn > 1, 0.038
N° MANNING	M	-0.106	-0.139	0	0.188	0.173

El subíndice n indica que la variable es normalizada.

Cuadro # 2. Indices de Sensibilidad. Evento de Alta

VARIABLE	IDENT.	CAUDAL PICO	CONC.SED	TOTAL SEDIM.
POROS.TOTAL	TP	-0.462	-0.186	-0.584
CAP.CAMPO	FP	0.279	0.125	0.412
INF.MAX	A	-0.145	-0.069	-0.257
INFILESTAC.	FC	-0.975	-0.74	-1.596
EXP.INFILTR.	P	0.214	0.135	0.422
PROF.INFILTR.	DF	-0.495	-0.058	-0.538
HUMEDAD ANT.	ASM	1.036	0.245	1.227
USLE "K"	K	0	0.971	0.98
USLE "C"	C	0	0.893	0.958
FREC.RUGOSID.	RC	-0.041	RCn < 1, -0.015 RCn > 1, -0.30	-0.253
COEF.RUGOSID	N	-0.567	RCn < 0.85, -0.163 RCn > 0.85, 0.176	-0.611
AGUA SUBTERR	GRF	0.0298	-0.116	0
INTERFLUJO	TD	0.061	-0.152	0
INTERCEP.POT.	PIT	-0.023	-0.005	-0.028
N° MANNING	M	-0.033	-0.151	0

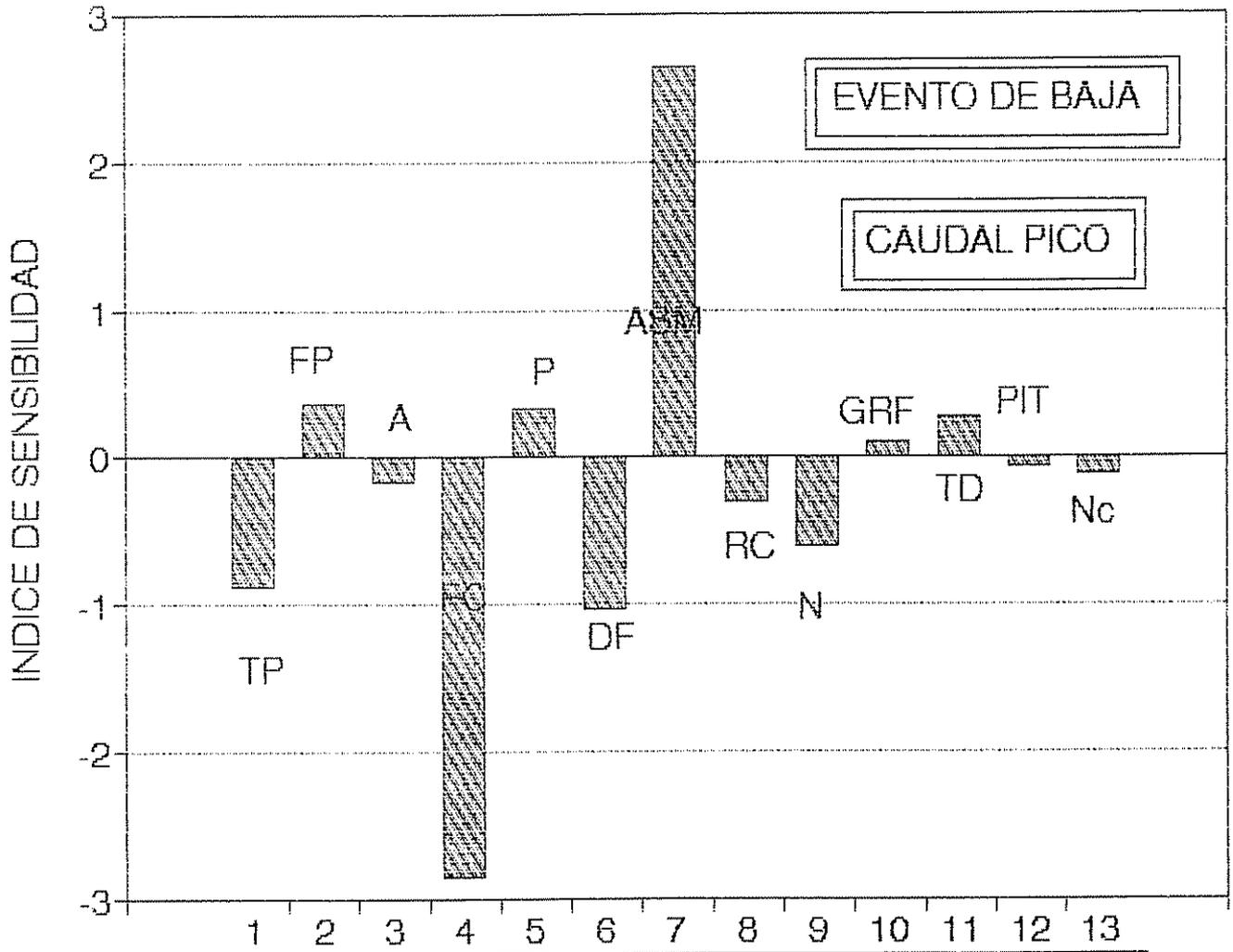


Fig # 1. Indices Sens. Evento de Baja . Caudal Pico.

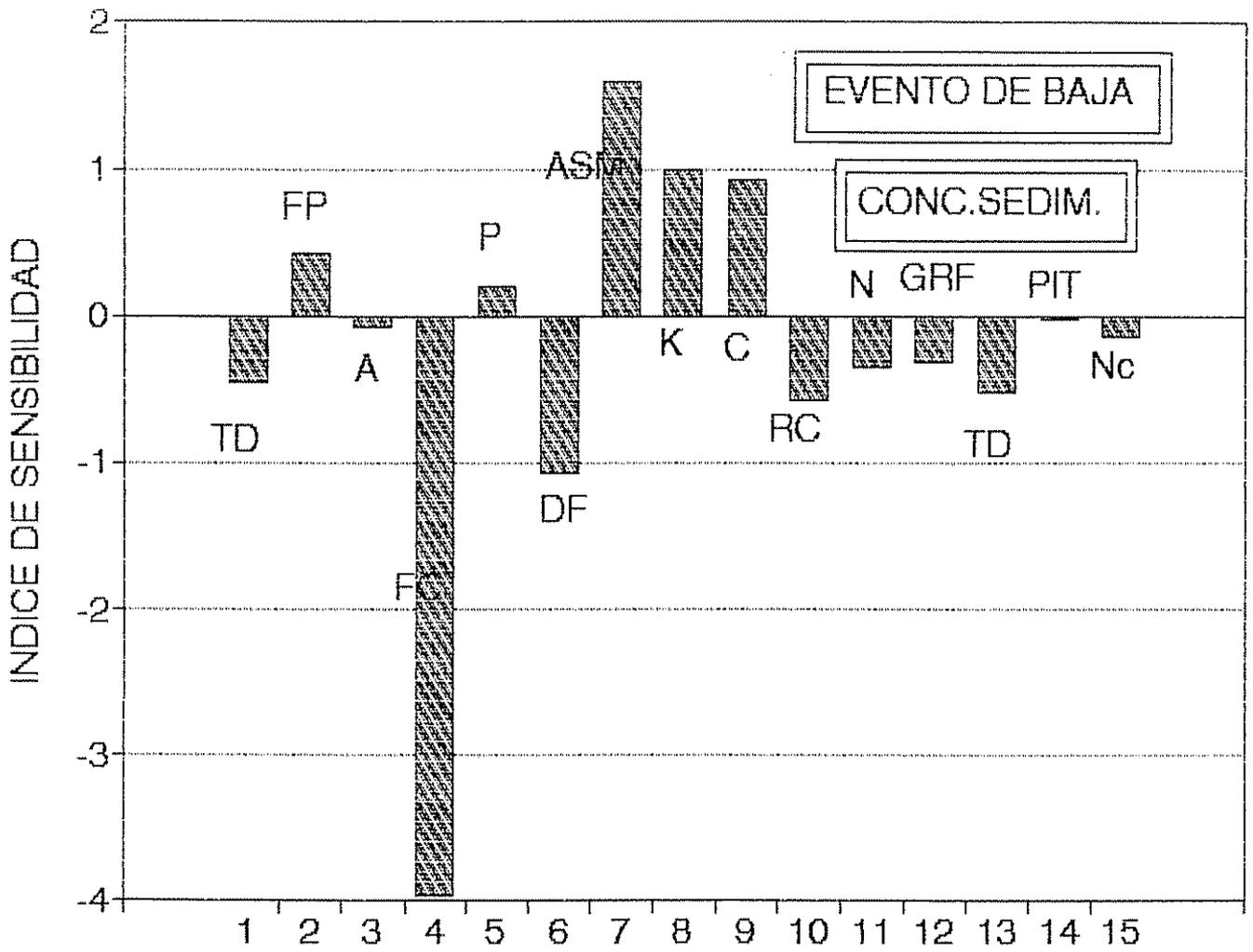


Fig. # 2. Indices de Sensibilidad para Evento de Baja. Conc.Sed.

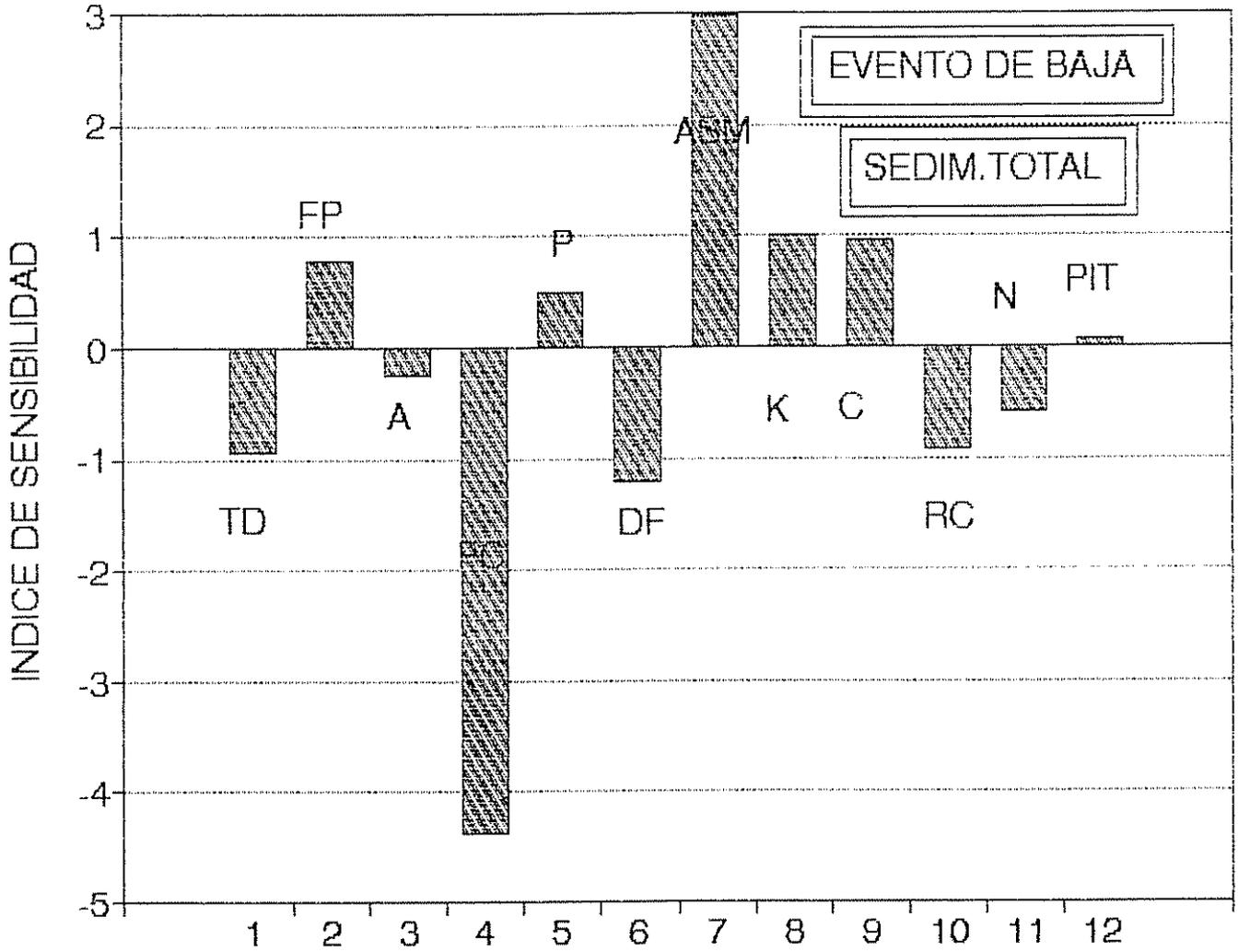


Fig.# 3. Indices de Sensibilidad. Evento de Baja. Sedim.Totales

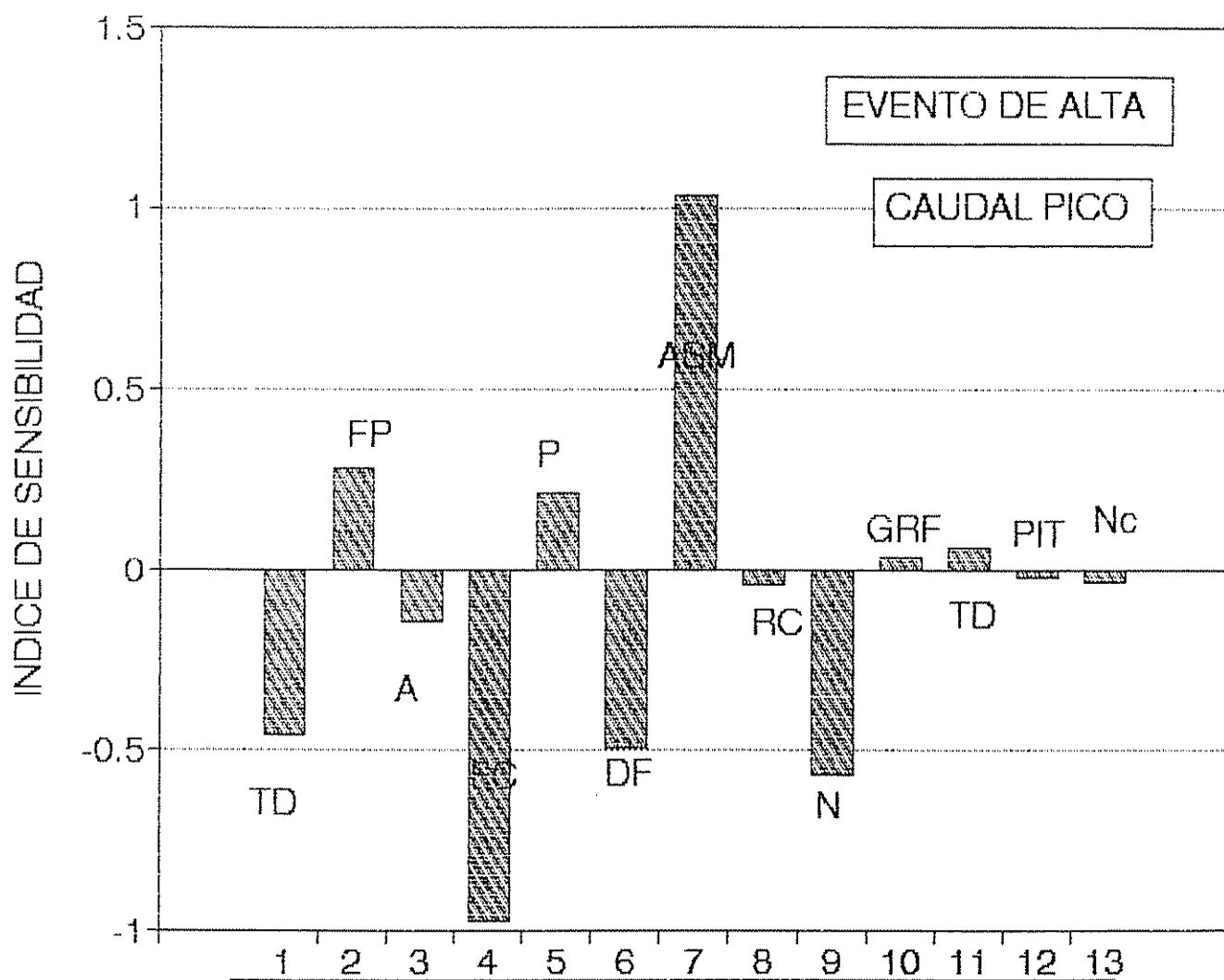


Fig.# 4. Indices Sens. Evento de Alta. Caudal Pico

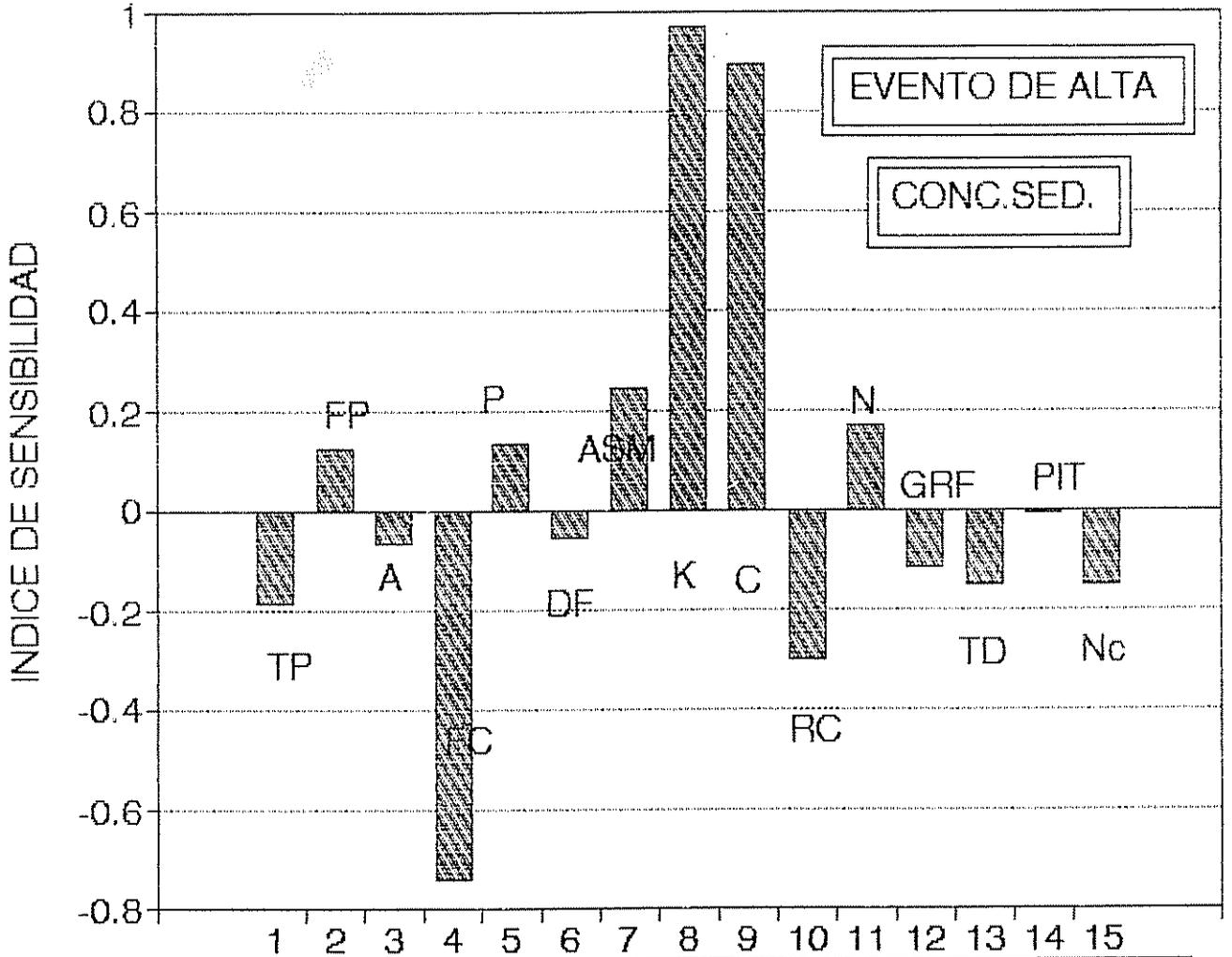


Fig # 5. Indices Sens. Evento Alta. Conc.Sedimentos

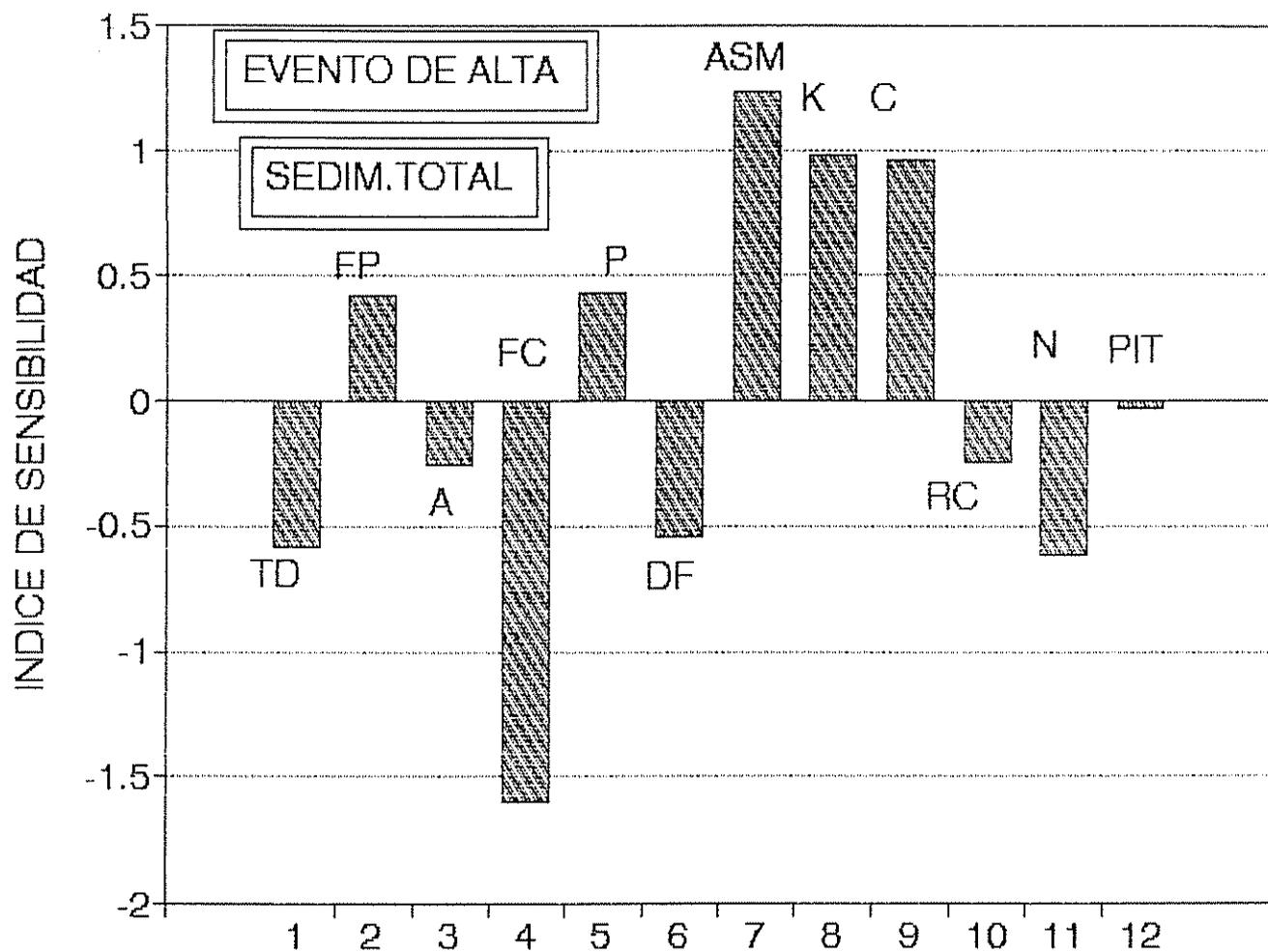


Fig # 6. Indices Sensib.Evento de Alta. Sedim.Totalles

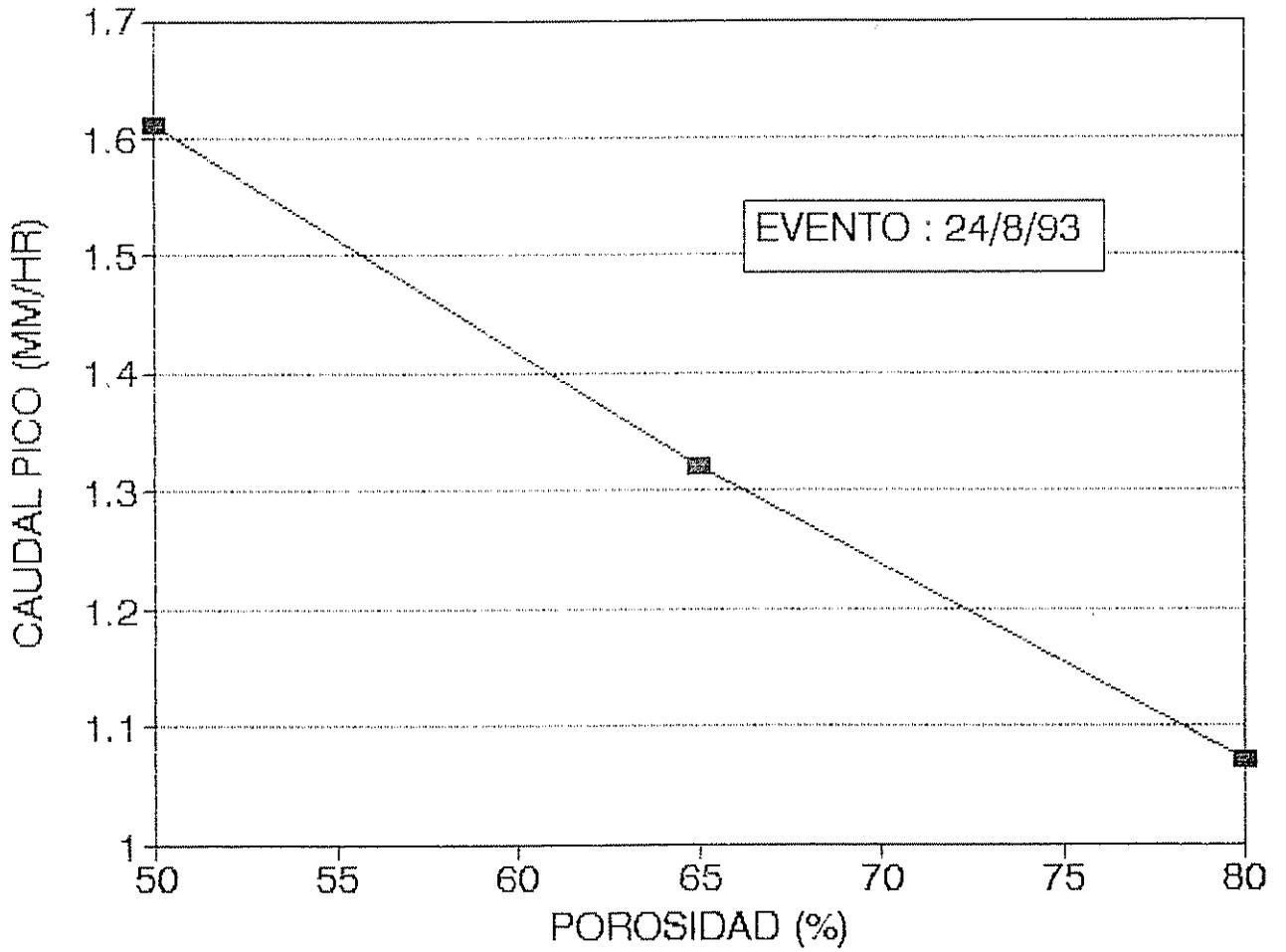


Fig # 7. Caudal Pico vs Porosidad

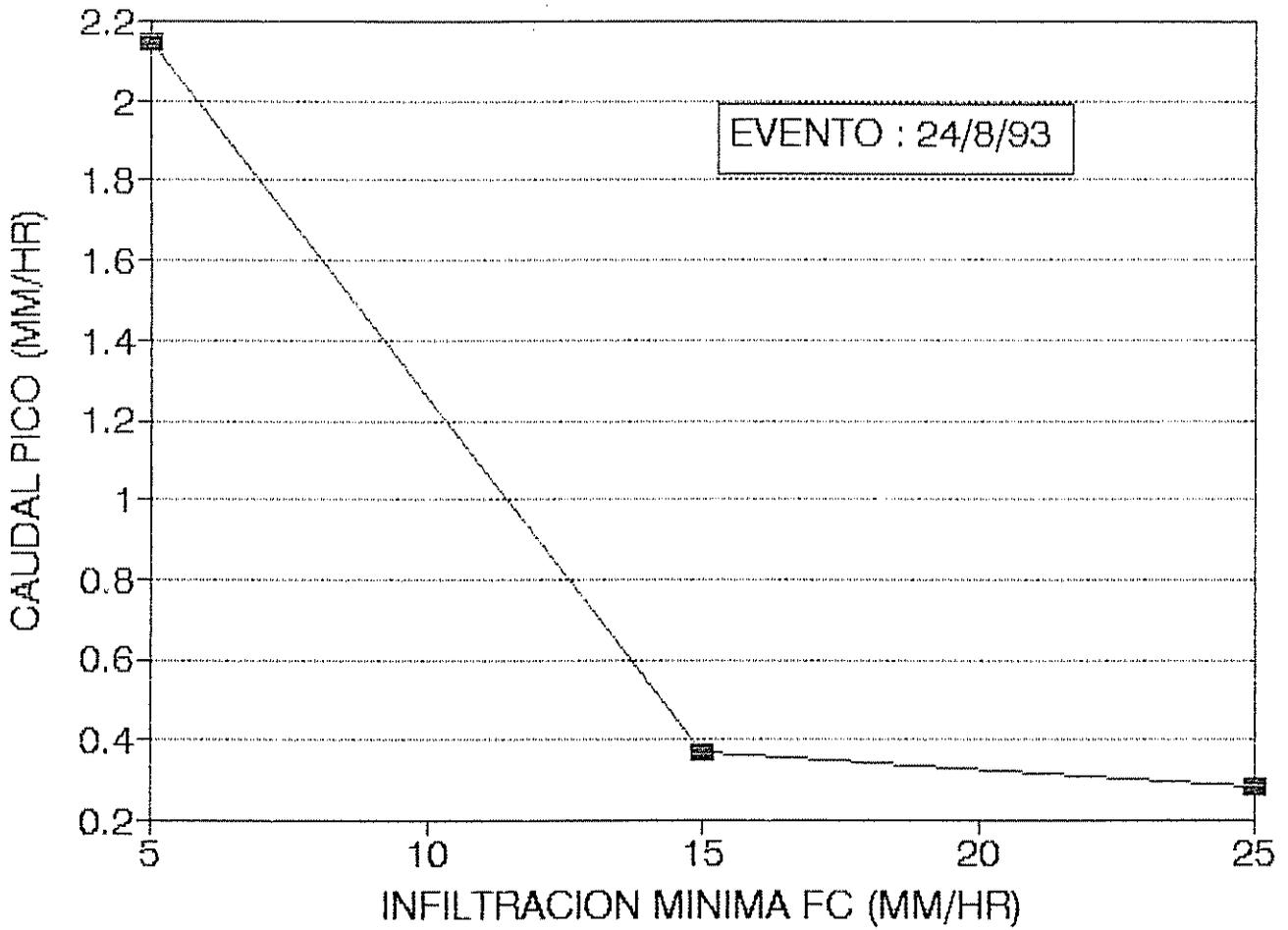


Fig # 8. Caudal Pico vs Inf.Minima FC

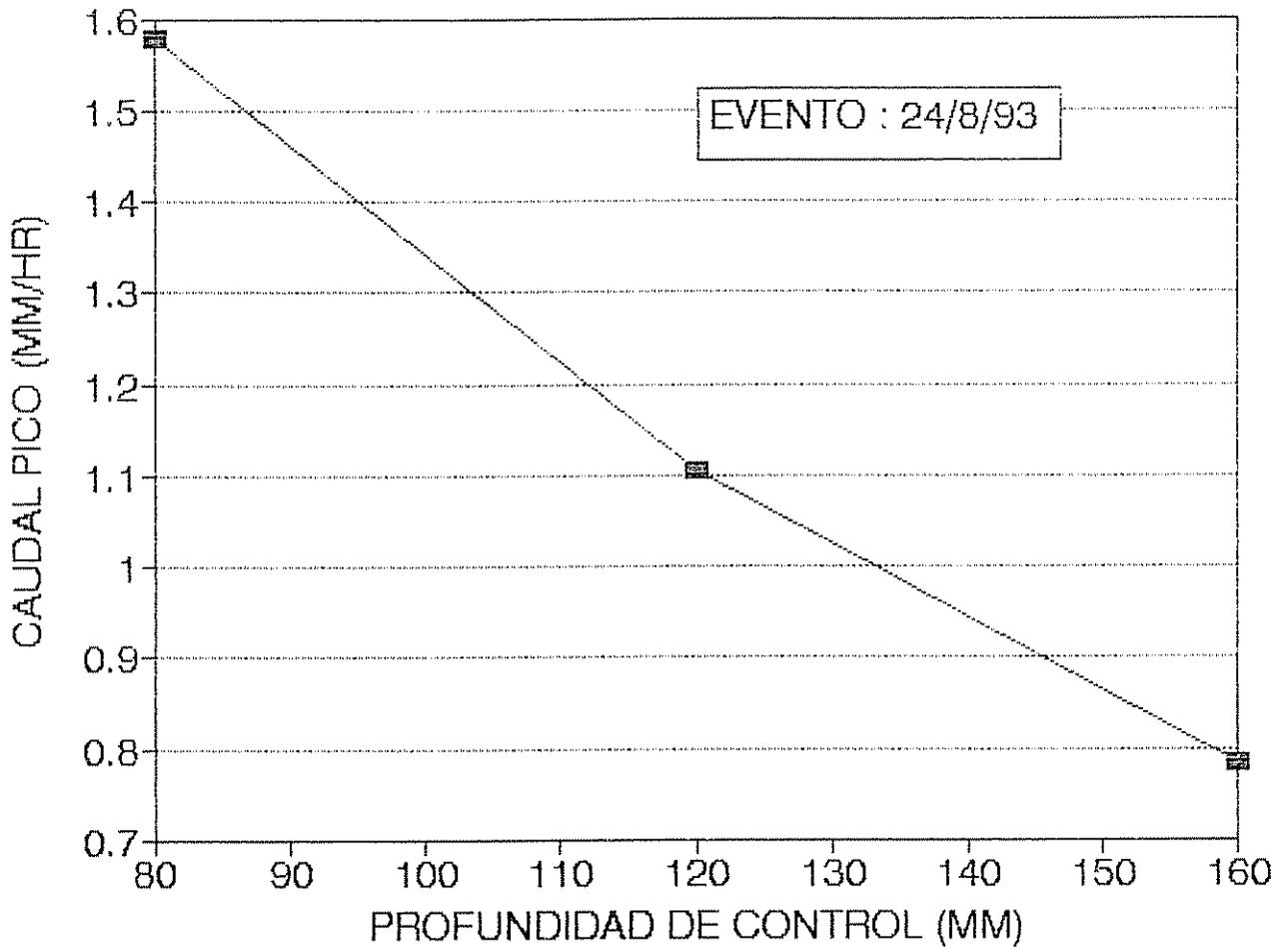


Fig # 9. Caudal Pico vs Profundidad de Control

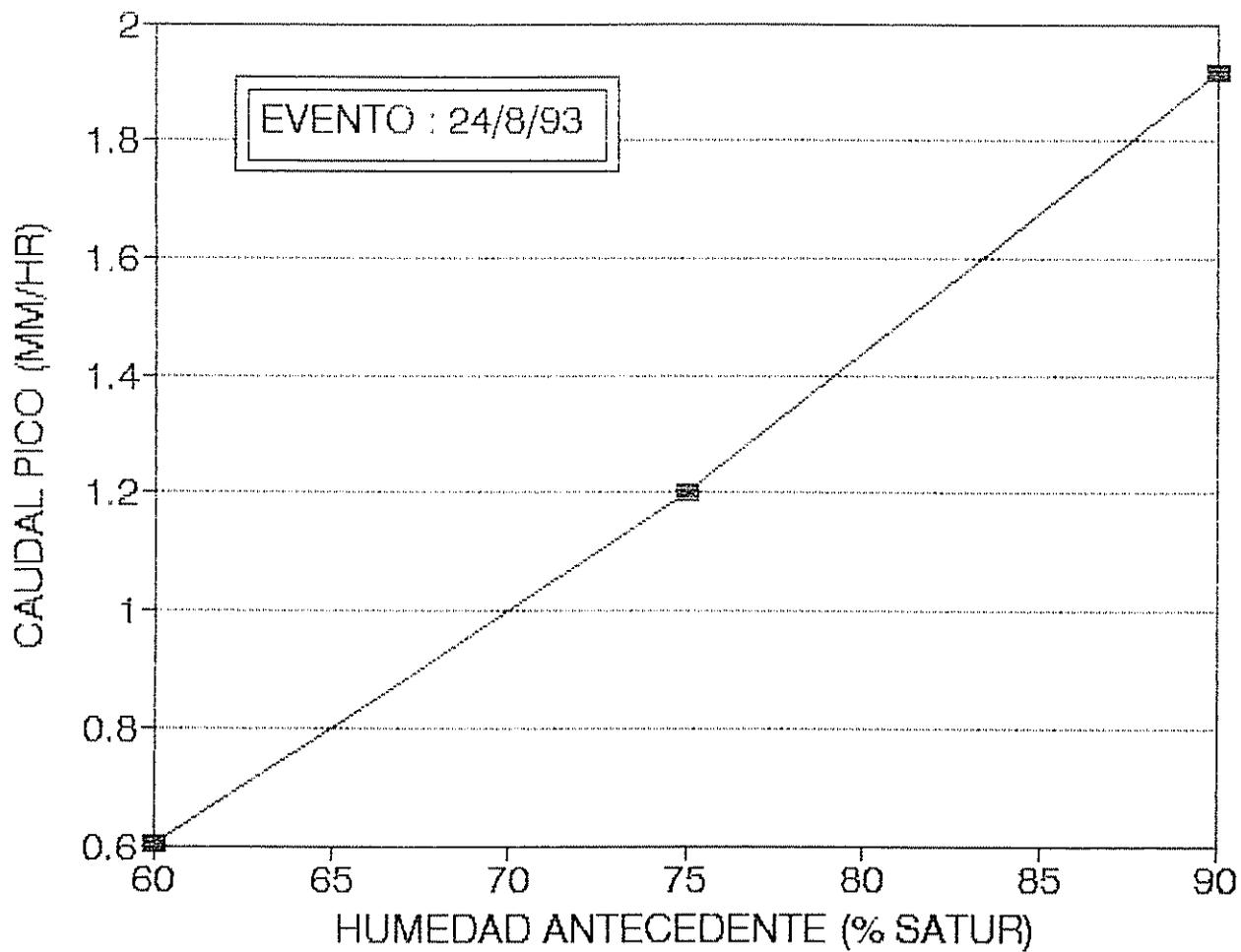


Fig # 10 . Caudal Pico vs Humedad Antecedente

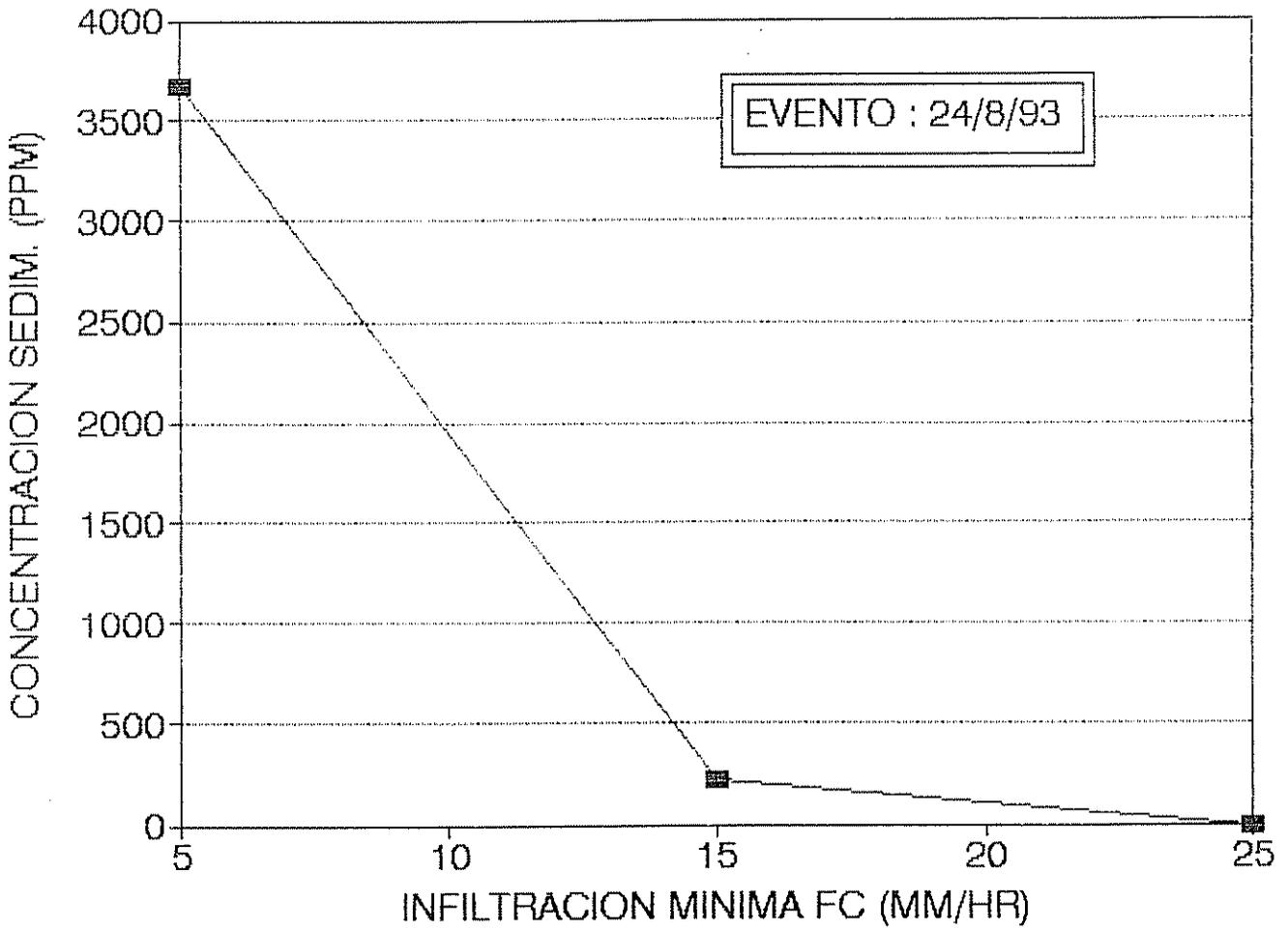


Fig. # 11. Conc.Sed. vs Inf.Minima FC

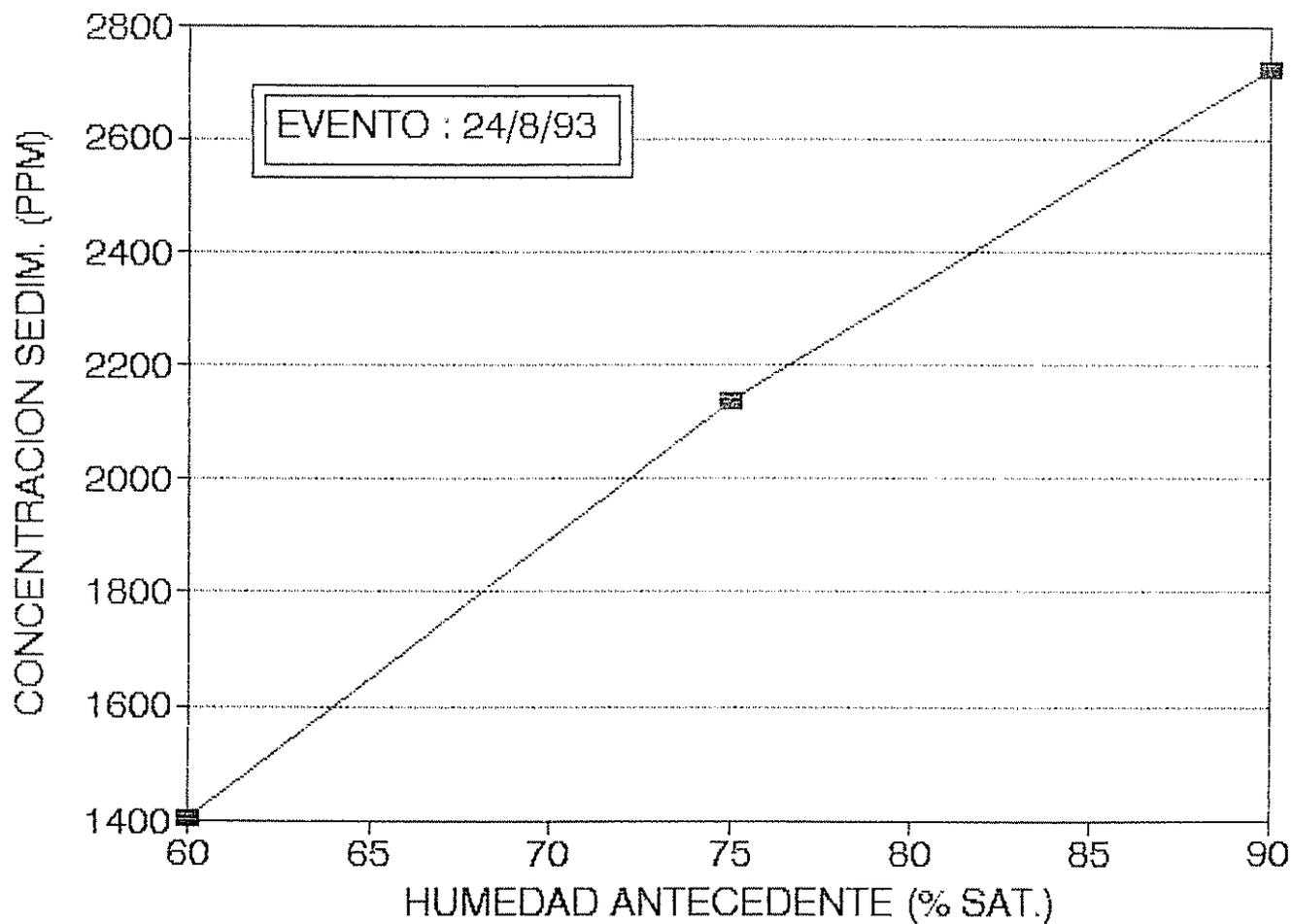


Fig. # 12. Conc.Sed vs Humedad Antecedente

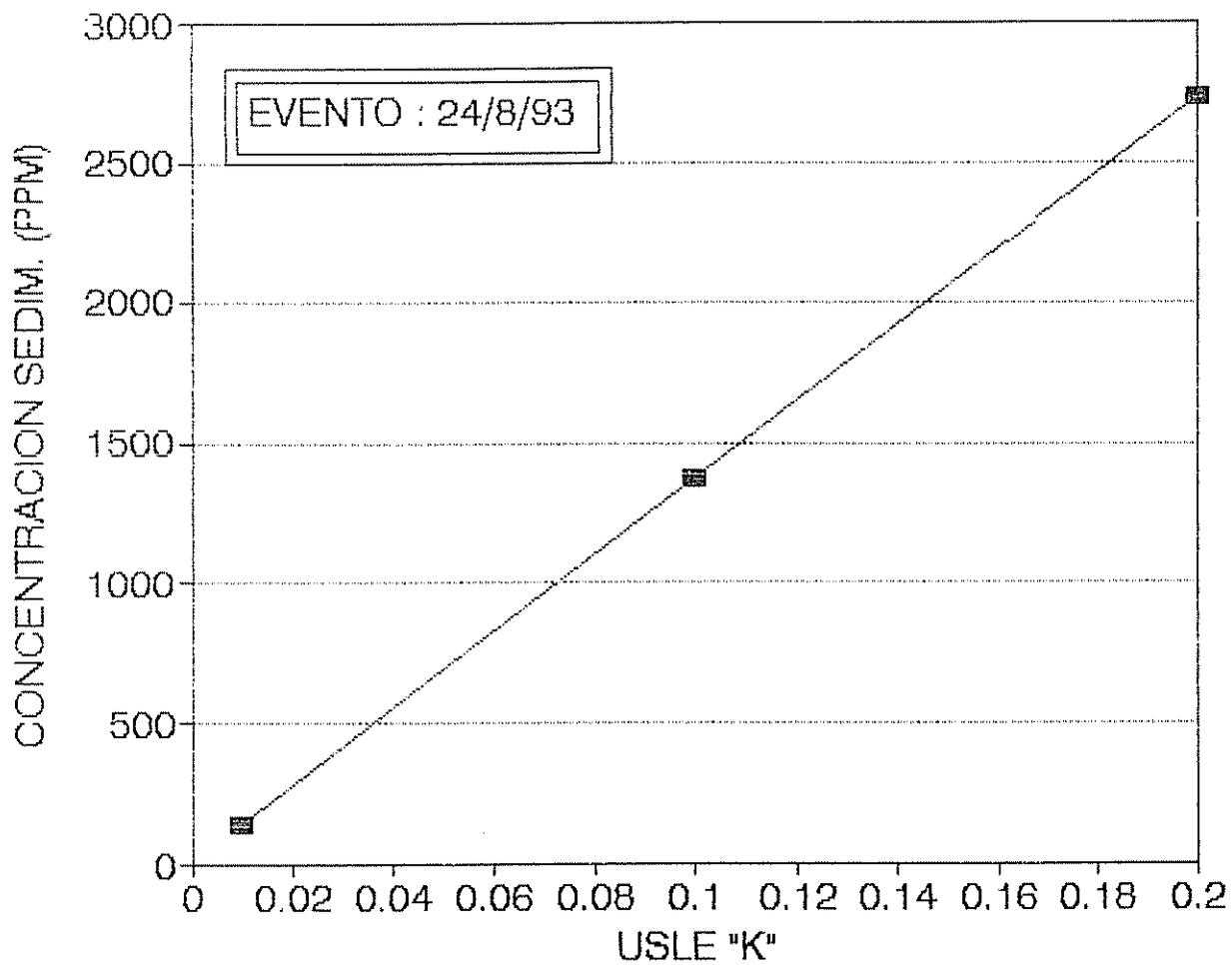


Fig # 13. Conc.Sedim. vs USLE K

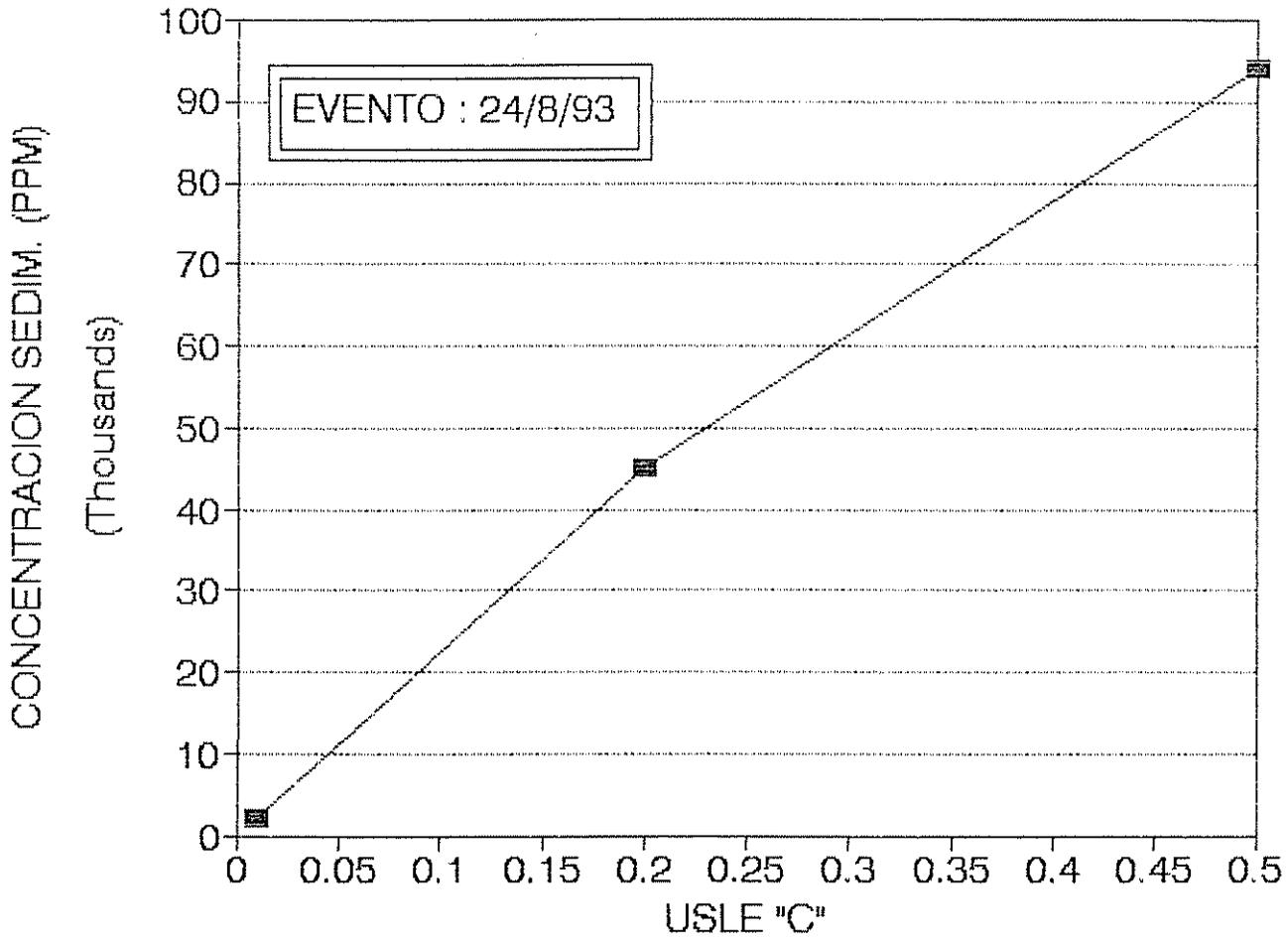


Fig # 14 Conc.Sedimentos vs USLE C

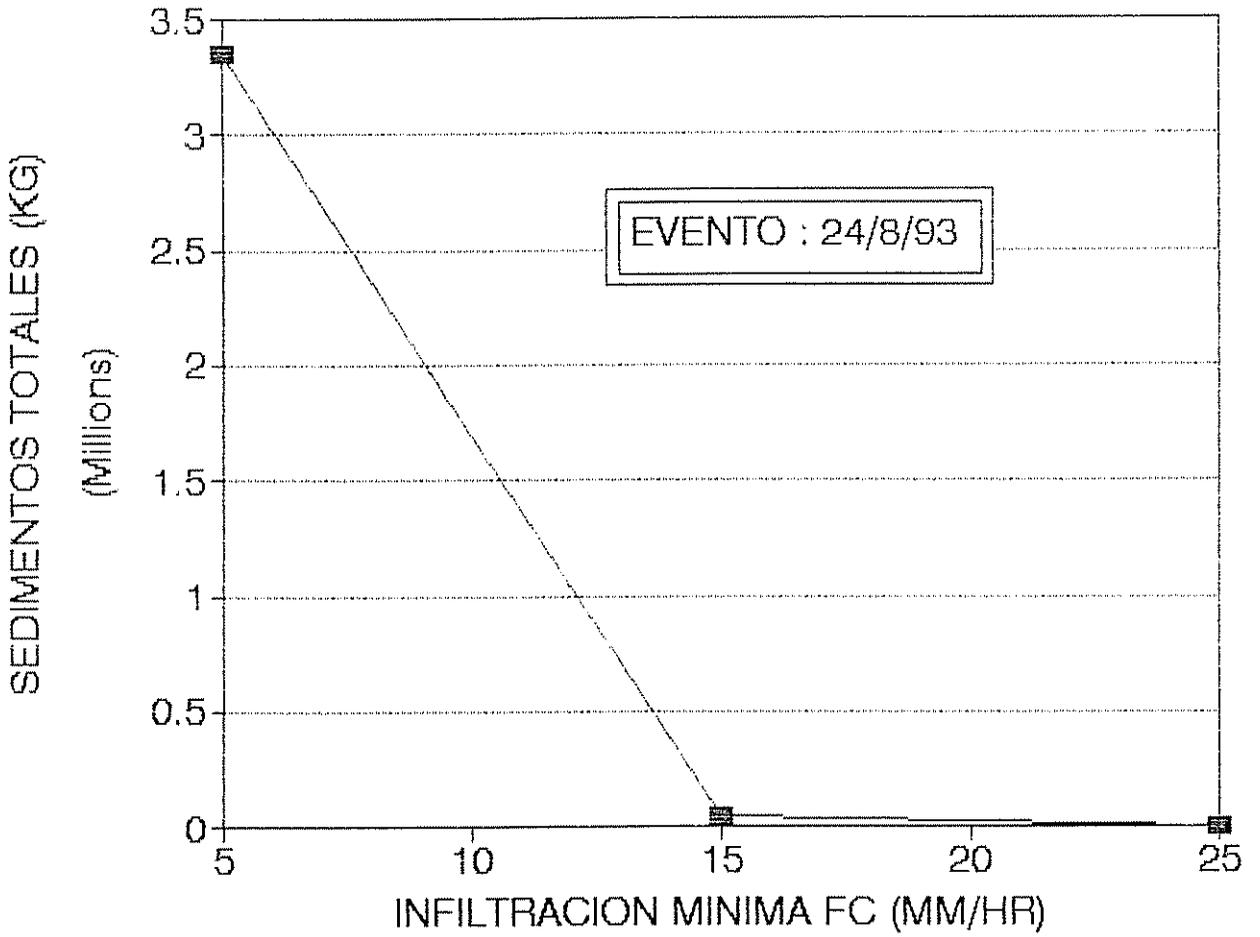


Fig. # 15. Sedimentos Totales vs Infiltracion Minima

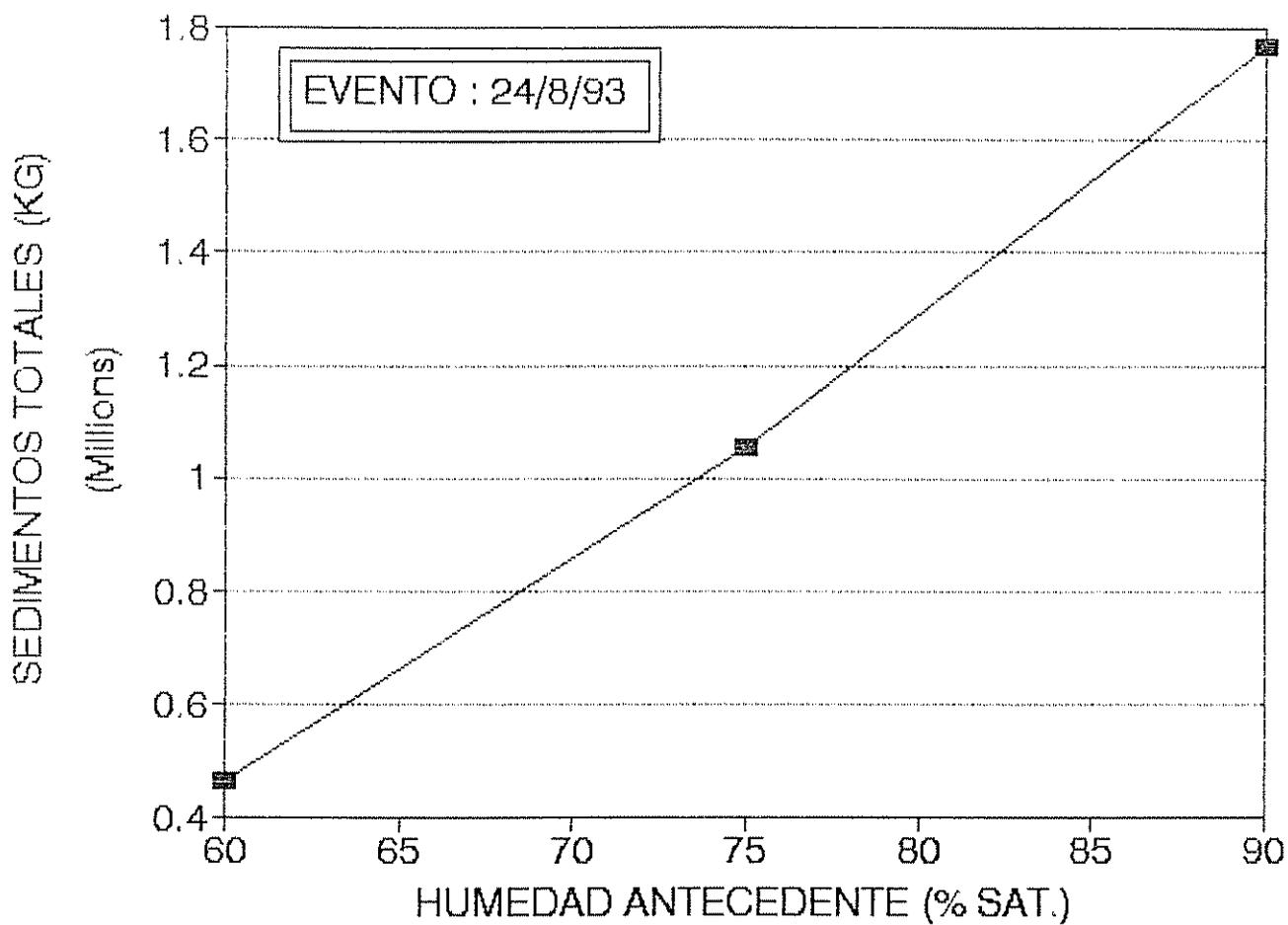


Fig. # 16. Sedimentos Totales vs Humedad Antecedente

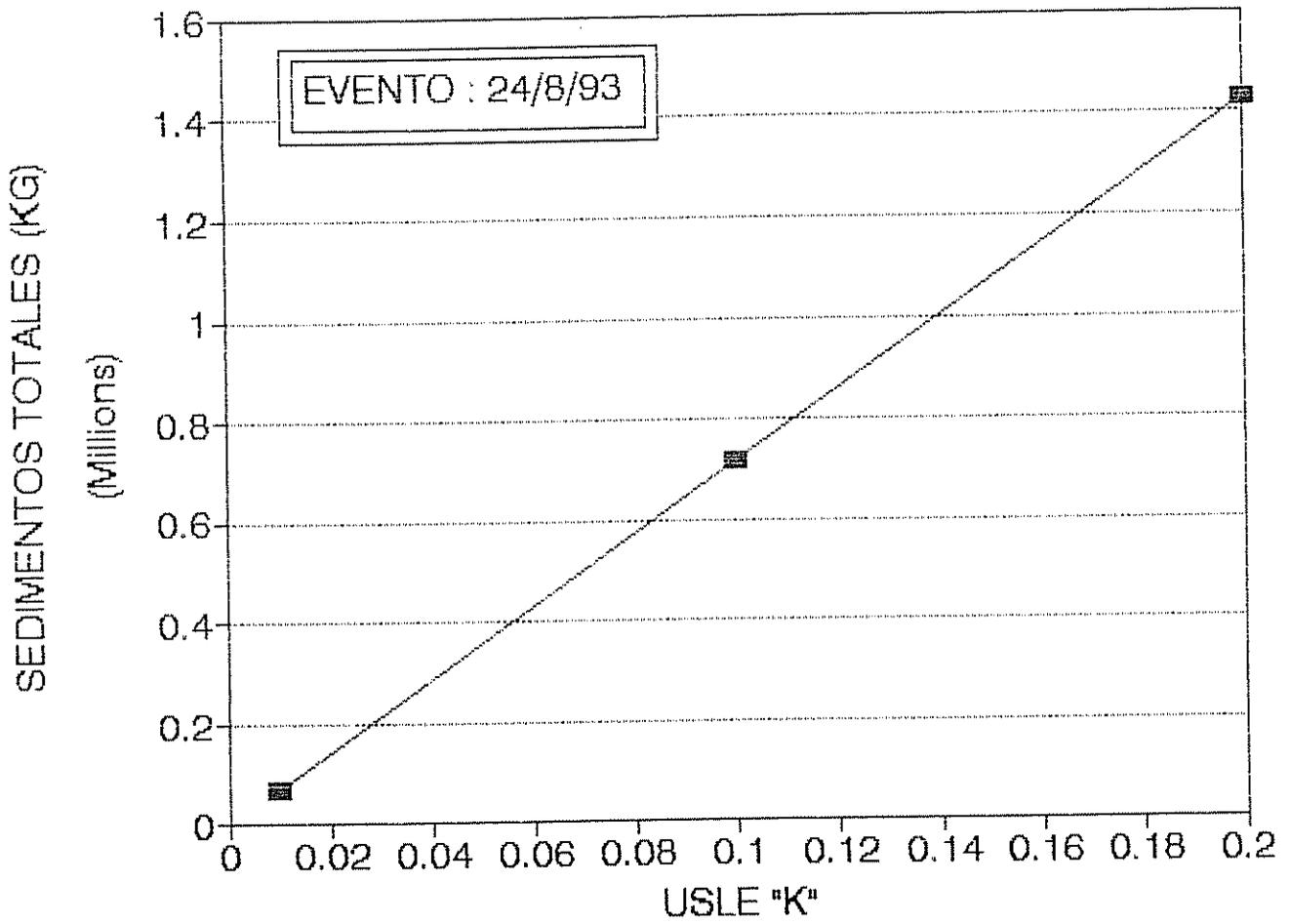


Fig # 17. Sedimentos Totales vs USLE K

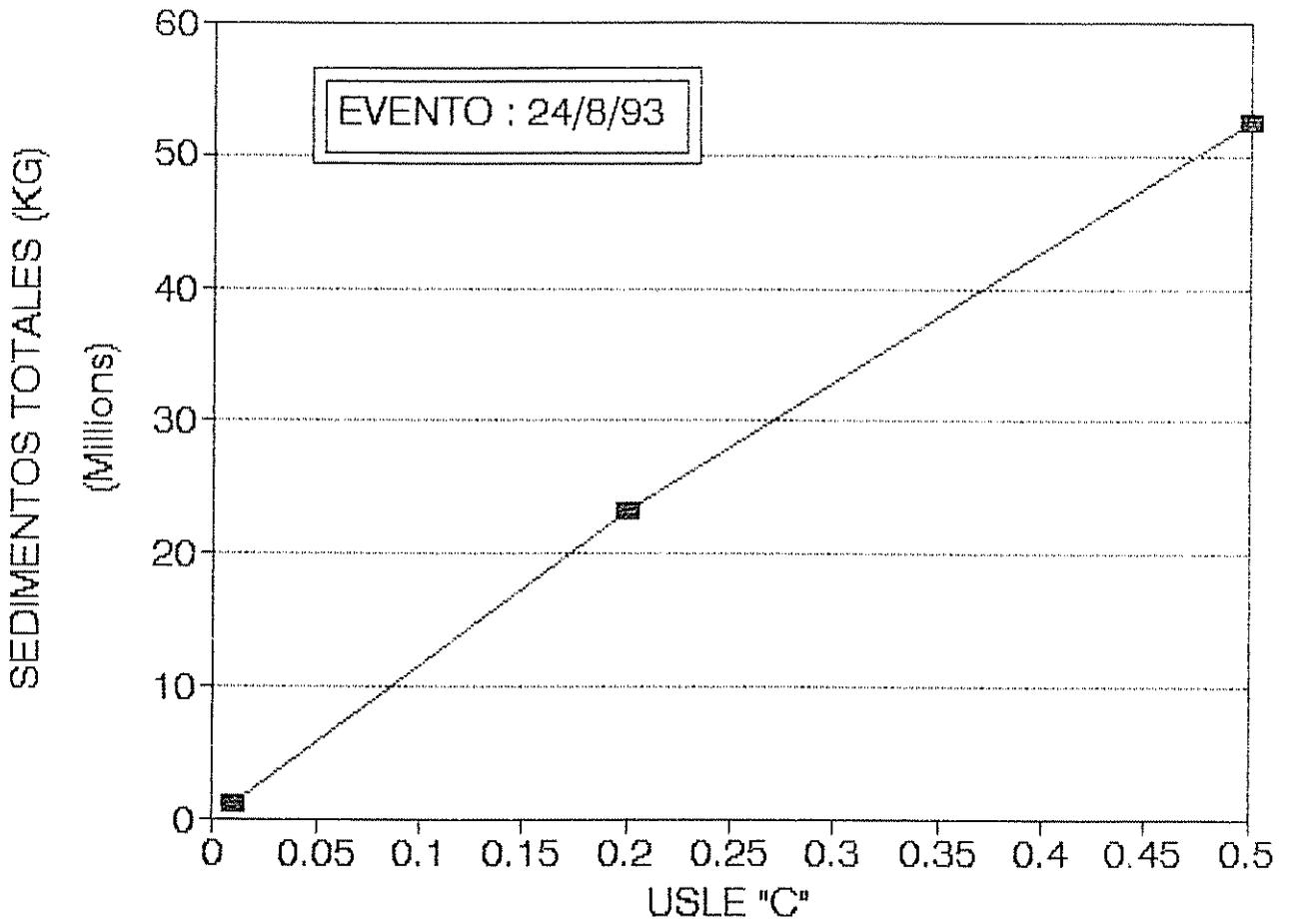


Fig # 18. Sedimentos Totales vs USLE C

**ANEXO 3**

PH DISTRIBUTED HYDROLOGIC AND WATER QUALITY SIMULATION  
 BY ANSWERS VER 4.880215  
 STANDARD PREDATA FILE FOR CUENCA RIO PEJIBAYE

RAINFALL HYETOGRAPH FOR EVENT OF 21/09/82

GAGE NUMBER R1

TIME - MIN.	RAINFALL RATE -	MM/H
.0	.00	
30.0	.00	
60.0	6.40	
90.0	8.20	
120.0	5.20	
150.0	9.20	
180.0	25.80	
210.0	35.40	
240.0	39.00	
270.0	15.40	
300.0	4.40	
330.0	.80	
360.0	.70	
390.0	.30	
420.0	.00	
1500.0	.00	

GAGE NUMBER R2

TIME - MIN.	RAINFALL RATE -	MM/H
.0	.00	
30.0	.00	
60.0	.00	
90.0	.74	
120.0	7.18	
150.0	6.78	
180.0	20.80	
210.0	41.64	
240.0	49.30	
270.0	36.64	
300.0	8.24	
330.0	3.06	
360.0	.68	
390.0	.52	
420.0	.30	
450.0	.04	
1500.0	.00	

GAGE NUMBER R3

TIME - MIN.	RAINFALL RATE -	MM/H
.0	.00	
30.0	.00	
60.0	.00	
90.0	.00	
120.0	.00	
150.0	5.60	
180.0	23.20	

210.0	6.40
240.0	6.00
270.0	17.60
300.0	9.60
330.0	8.00
360.0	11.60
420.0	2.40
480.0	.10
1500.0	.00

## GAGE NUMBER R4

TIME - MIN.	RAINFALL RATE -	MM/H
.0	.00	
30.0	2.03	
60.0	.00	
90.0	.90	
120.0	24.62	
150.0	36.80	
180.0	9.14	
210.0	2.66	
240.0	.64	
270.0	.36	
300.0	.20	
330.0	.00	
1500.0	.00	

SIMULATION TIME INCREMENT = 60. SECONDS

## SOIL PROPERTIES

SOIL	POROSITY (PERCENT VOL.)	FIELD CAP. (PERCENT SAT.)	INFILTRATION CONSTANTS			CONTROL ZONE MM
			FC MM/H	A MM/H	P	
1	59.0	82.0	11.00	40.00	.60	200.0
2	66.0	63.0	11.00	40.00	.75	138.0
3	65.0	73.0	11.00	40.00	.65	100.0
4	78.0	64.0	11.00	40.00	.55	115.0

ASM (PERCENT SAT)	EROSION CONST.
90	.40
69	.40
80	.02
70	.02

TILE DRAINAGE COEFF. = 2.00 MM/24H  
GROUNDWATER RELEASE FRACTION = .200E-03

## COVER/MANAGEMENT PRACTICES

MM	CROP	MAX. POT. INTERCEPTION MM	PERCENT COVER	ROUGH. COEFF.	ROUGH. HEIGHT MM	MANNING'S N
1	CANA	.80	75.	.65	76.0	.100
2	CAFE	.90	70.	.65	70.0	.100
3	PASTO	.40	100.	.50	38.1	.100
4	ARBOLES	1.00	90.	.50	40.0	.100
5	BOSQ.SEC	2.00	100.	.55	63.5	.120
6	BOSQ.PRI	2.50	100.	.60	76.2	.150

EROSION  
CONSTANT

0.15

0.30

0.40

0.04

0.01

0.01

## CHANNEL PROPERTIES

TYPE	WIDTH M	MANNING'S N
1	45.0	.025
2	25.0	.025
3	18.0	.030
4	12.0	.050
5	8.0	.050
6	4.0	.050
7	2.0	.050

## CUENCA RIO PEJIBAYE (ASPECTO MODIF)

## WATERSHED CHARACTERISTICS

NUMBER OF 16.00 HA OVERLAND FLOW ELEMENTS = 1432

NUMBER OF CHANNEL SEGMENTS = 177

AREA OF CATCHMENT = 22392.7 HA

CATCHMENT SLOPE: MIN = 00.00 AVE = 23.39 MAX = 60.00

PERCENT

CHANNEL SLOPE: MIN = .50 AVE = 6.75 MAX = 18.15  
 PERCENT  
 PERCENT OF AREA TILED = 100.0 WITH A D.C. OF 2.00 MM/24H  
 MEAN ANTECEDENT SOIL MOISTURE = 74., FIELD CAPACITY = 68.  
 PERCENT SATURATION  
 GROUNDWATER RELEASE FRACTION = .0002  
 OUTLET IS ELEMENT 1429 AT ROW 53 COL 28

SURFACE COVER/MANAGEMENT CONDITIONS SOIL ASSOCIATION  
 PROPERTIES

CROP	PERCENT PRESENT	PERCENT COVER	N	C	NO.	PERCENT PRESENT	FC MM/H	MM/H
CANA	2.4	75.	.100	.15	1	1.1	11.0	21.0
CAFE	3.6	70.	.100	.30	2	18.8	11.0	27.6
PASTO	1.5	100.	.100	.40	3	43.6	11.0	25.1
ARBOLES	.1	90.	.100	.04	4	36.5	11.0	31.6
BOSQ. SEC	21.5	100.	.120	.01				
BOSQ. PRI	70.8	100.	.150	.01				

CONTROL DEPTH	K
200	0.4
138	0.4
100	0.02
115	0.02

OUTLET HYDROGRAPHS--VER 4.880215

TIME MIN.	RAINFALL MM/H	RUNOFF MM/H	YIELD SEDIMENT KG	CONCENTRATIONS SEDIMENT PHOSPHORUS (N/A)
.0	.00	.0000	0.	0.
15.0	.46	.0000	0.	0.
30.0	.46	.0001	0.	0.
45.0	1.03	.0004	0.	0.
60.0	1.03	.0008	0.	0.
75.0	1.70	.0014	0.	0.
90.0	1.70	.0023	0.	0.
105.0	8.16	.0034	0.	0.
120.0	8.16	.0047	0.	0.
135.0	13.60	.0064	0.	0.
150.0	13.60	.0083	0.	0.
165.0	19.83	.0107	0.	0.

180.0	19.83	.0162	54.	215.
195.0	18.49	.0291	950.	1253.
210.0	18.49	.0864	7585.	2729.
225.0	20.26	.5157	55167.	4312.
240.0	20.26	2.5370	516290.	5982.
255.0	17.78	4.9061	2046204.	7714.
270.0	17.78	5.9885	4707110.	9039.
285.0	6.29	6.1545	8110351.	10349.
300.0	6.29	5.1625	11636980.	11595.
315.0	3.85	3.9828	14825090.	13249.
330.0	3.85	2.9916	17545000.	14494.
345.0	4.62	2.2366	19671370.	14338.
360.0	4.62	1.6751	21179290.	13226.
375.0	1.07	1.2518	22203630.	11921.
390.0	1.07	.9475	22892970.	10655.
405.0	.97	.7247	23358450.	9381.
420.0	.97	.5603	23670370.	8102.
435.0	.05	.4429	23880420.	7041.
450.0	.05	.3538	24027460.	6329.
465.0	.04	.2874	24135660.	5842.
480.0	.04	.2394	24217460.	5311.
495.0	.00	.2035	24279400.	4738.
510.0	.00	.1778	24326770.	4214.
525.0	.00	.1590	24364100.	3742.
540.0	.00	.1449	24393790.	3270.
555.0	.00	.1343	24417380.	2801.
570.0	.00	.1267	24435970.	2322.
585.0	.00	.1219	24450370.	1855.
600.0	.00	.1186	24461370.	1455.
615.0	.00	.1160	24469780.	1142.
630.0	.00	.1144	24476270.	904.
645.0	.00	.1135	24481380.	717.
660.0	.00	.1130	24485390.	560.
675.0	.00	.1129	24488460.	418.
690.0	.00	.1130	24490660.	289.
705.0	.00	.1131	24492130.	182.
720.0	.00	.1134	24493010.	106.
735.0	.00	.1136	24493490.	53.
750.0	.00	.1138	24493730.	26.
765.0	.00	.1140	24493840.	13.
780.0	.00	.1141	24493880.	4.
795.0	.00	.1143	24493900.	0.
810.0	.00	.1145	24493900.	0.
825.0	.00	.1146	24493900.	0.
840.0	.00	.1147	24493900.	0.
855.0	.00	.1149	24493900.	0.
870.0	.00	.1150	24493900.	0.
885.0	.00	.1151	24493900.	0.
900.0	.00	.1152	24493900.	0.
915.0	.00	.1153	24493900.	0.
930.0	.00	.1154	24493900.	0.
945.0	.00	.1155	24493900.	0.
960.0	.00	.1156	24493900.	0.
975.0	.00	.1157	24493900.	0.
990.0	.00	.1157	24493900.	0.
1005.0	.00	.1158	24493900.	0.

1020.0	.00	.1159	24493900.	0.
1035.0	.00	.1160	24493900.	0.
1050.0	.00	.1160	24493900.	0.
1065.0	.00	.1161	24493900.	0.
1080.0	.00	.1162	24493900.	0.
1095.0	.00	.1162	24493900.	0.
1110.0	.00	.1163	24493900.	0.
1125.0	.00	.1163	24493900.	0.
1140.0	.00	.1164	24493900.	0.
1155.0	.00	.1164	24493900.	0.
1170.0	.00	.1164	24493900.	0.
1185.0	.00	.1165	24493900.	0.
1200.0	.00	.1165	24493900.	0.
1215.0	.00	.1165	24493900.	0.
1230.0	.00	.1166	24493900.	0.
1245.0	.00	.1166	24493900.	0.
1260.0	.00	.1166	24493900.	0.
1275.0	.00	.1166	24493900.	0.
1290.0	.00	.1166	24493900.	0.
1305.0	.00	.1167	24493900.	0.
1320.0	.00	.1167	24493900.	0.
1335.0	.00	.1167	24493900.	0.
1350.0	.00	.1167	24493900.	0.
1365.0	.00	.1167	24493900.	0.
1380.0	.00	.1168	24493900.	0.
1395.0	.00	.1168	24493900.	0.
1410.0	.00	.1168	24493900.	0.
1425.0	.00	.1168	24493900.	0.
1440.0	.00	.1168	24493900.	0.
1455.0	.00	.1168	24493900.	0.
1470.0	.00	.1169	24493900.	0.
1485.0	.00	.1169	24493900.	0.
1500.0	.00	.1169	24493900.	0.

RUNOFF VOLUME PREDICTED FROM 59.11 MM OF RAINFALL =  
12.299 MM

AVERAGE SOIL LOSS = 1094. KG/HA

INDIVIDUAL ELEMENT NET SEDIMENTATION

ELEMENT SEDIMENT		ELEMENT SEDIMENT		ELEMENT SEDIMENT	
ELEMENT	SEDIMENT	ELEMENT	SEDIMENT	ELEMENT	SEDIMENT
NO.	KG/HA	NO.	KG/HA	NO.	KG/HA
1	-3.	2	-4.	3	-3.
-2.					
5	-1.	6	-1.	7	-0.
-3.					
9	-1.	10	-1.	11	-6.
-4.					
13	0.	14	-9.	15	-24.
-6.					
17	-1.	18	-1.	19	-4.
10.					
21	14.	22	6.	23	-5.
-11.					

.

.

.

.

1413	-1464.	1414	3287.	1415	-9576.	1416
1585.						
1417	-2927.	1418	-17728.	1419	-254.	1420
-322.						
1421	-17957.	1422	-27318.	1423	-705.	1424
-781.						
1425	-343.	1426	-4262.	1427	-6736.	1428
-303.						
1429	-6631.	1430	-463.	1431	-8278.	1432
-561.						

MAX EROSION RATE = 152284. KG/HA      MAX DEPOSITION RATE = 91861. KG/HA

STD. DEV. = 8649. KG/HA

NO. AMOUNT	AMOUNT	CHANNEL DEPOSITION --		NO.	AMOUNT	NO.
		NO.	AMOUNT			
28	0.	39	0.	55	0.	72
0.						
89	0.	106	0.	115	0.	122
0.						
132	0.	139	0.	148	0.	157
0.						
166	0.	176	0.	185	0.	196
0.						
206	0.	219	0.	228	0.	244
0.						
253	0.	272	0.	281	0.	304
0.						
312	0.	336	0.	337	0.	345
0.						
368	0.	369	0.	378	0.	385
0.						
405	0.	413	0.	420	0.	443
0.						
451	0.	456	0.	457	0.	480
0.						
488	0.	489	0.	490	0.	491
0.						
492	0.	504	0.	518	0.	525
0.						
542	0.	543	0.	544	0.	555
0.						
561	0.	578	0.	591	0.	598
0.						
613	0.	628	0.	633	0.	644
0.						
647	0.	648	0.	664	0.	668