

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
DEPARTAMENTO DE PROYECTOS E INGENIERÍA RURAL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

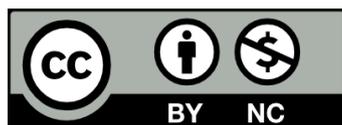
**CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE LA EROSIÓN
POR CÁRCAVAS**

Javier Casalí Sarasíbar

Directores:
Dr. José Javier López Rodríguez
Dr. Juan Vicente Giráldez Cervera

Pamplona, Septiembre 1997

Esta obra está protegida por una licencia Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)



a mis padres

AGRADECIMIENTOS

A D. José Javier López Rodríguez y a D. Juan Vicente Giráldez Cervera, directores de esta Tesis. El optimismo, sabiduría y confianza constante del Dr. Javier López han hecho posible la finalización con bien de esta aventura. Al Dr. Juan Vicente Giráldez, catedrático de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Córdoba, debo enorme gratitud. El saber que en todo momento he podido contar con su consejo y guía desde allí han sido el mejor respaldo, y visitarle siempre fue una enriquecedora experiencia.

El Dr. Carlos V. Alonso, del USDA-National Sedimentation Laboratory (Oxford, Mississippi, USA) ha aportado valiosísimos elementos. Sin su consejo, hospitalidad, y sin el material diverso que puso a mi disposición, el camino hacia la finalización de este trabajo habría sido sin duda más largo y tortuoso.

Al Dr. Camilo Robles debo en muy buena medida mi vinculación con la Universidad. Su humanidad y cercanía han supuesto muchos momentos agradables durante estos años.

El Dr. Miguel Donézar, y D. Joaquín Del Valle de Lersundi, del Servicio de Estructuras Agrarias del Gobierno de Navarra, han realizado importantes contribuciones. Su amplio saber profesional ha sido una gran ayuda, así como su profundo conocimiento del medio rural en Navarra. Las charlas, discusiones y puestas en común han resultado tremendamente enriquecedoras, y han facilitado mi acercamiento al mundo más real y cotidiano de la agricultura. Además, han aportado documentación, datos de distinta índole, así como su propia mano de obra en las labores de campo, sin la cual gran parte de las mismas no podrían haberse realizado.

Al Dr. Rafael García Santos, del Departamento de Proyectos de la Universidad Pública de Navarra, agradezco su amable asesoramiento y apoyo material en cuestiones de topografía.

El contar con Luis Martínez de Azagra y su familia en Pitillas ha sido un apoyo en la preparación de los trabajos en campo. Además, otras personas han colaborado de manera desinteresada en esas labores casi siempre ingratas, excepto para el propio doctorando. Mi hermano Íñigo, y varios amigos, como Joaquín Archanco, Antonio Ramírez, José Chérrez, Javier San Julián, y alumnos y ex-alumnos como Aintzi Laburu y Miguel Gastesi.

Quiero manifestar un sentimiento especial de agradecimiento hacia mis padres, que han posibilitado con su trabajo y su apoyo incondicional mi dedicación en exclusiva a la Universidad durante estos años. Además, el interés y cercanía de mis hermanos siempre ha supuesto una fuente de motivación.

Otros muchos amigos y amigas han contribuido, de manera indirecta, aunque muy importante, con su afecto, ánimo e interés.

Deseo también mostrar mi agradecimiento a la Universidad Pública de Navarra por facilitar mi trabajo con sus medios materiales y humanos, y en especial a los compañeros del Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural.

Finalmente, agradezco al Departamento de Educación del Gobierno de Navarra la concesión de la beca que hizo posible el comienzo de este trabajo y el contactar con equipos punteros de investigación.

ÍNDICE

1 Introducción y objetivos	1
1.1 Conceptos generales	1
1.2 Tipos de erosión hídrica	3
1.3 Principales aspectos de la erosión por cárcavas	4
1.3.1 Cárcavas permanentes	4
1.3.2 Cárcavas asociadas a taludes	6
1.3.3 Cárcavas efímeras	7
1.4 Cárcavas efímeras	7
1.4.1 Concepto de cárcava efímera	7
1.4.2 Importancia de las cárcavas efímeras. Métodos de medición	8
1.4.3 Principales características de la erosión por cárcavas efímeras. Erosión en surcos	12
1.4.3.1 Erosión en surcos	12
1.4.3.2 Origen y crecimiento de cárcavas efímeras	15
1.4.4 Control de la erosión en cárcavas efímeras	20
1.4.5 Predicción de la erosión por cárcavas efímeras	25
1.4.5.1 Modelos matemáticos	25
1.4.5.2 Modelos basados en análisis topográficos	31
1.5 Justificación y objetivos	33
2 Mediciones y observaciones en campo	35
2.1 Introducción y objetivos	35
2.2 Descripción del área de estudio	36
2.2.1 Consideraciones generales	36
2.2.2 Descripción de los suelos	38
2.2.3 Descripción del clima general de la zona	42
2.2.4 Descripción de las precipitaciones durante el periodo de estudio en campo	43
2.3 Resultados y discusión	46
2.3.1 Tipos de erosión encontrados en la zona: descripción y localización	46
2.3.2 Mediciones en cárcavas efímeras propiamente dichas	52
2.3.3 Relaciones entre índices topográficos y erosión por cárcavas efímeras propiamente dichas	59
2.3.4 Cárcavas efímeras originadas por flujos provenientes de fuera de la parcela	63
2.3.5 Cárcavas efímeras asociadas a discontinuidades	68
2.3.6 Condiciones críticas para la aparición de cárcavas efímeras. Morfología de cárcavas de reciente aparición	74
2.3.7 Discusión general	81
3 Desarrollo de un modelo para analizar la erosión por cárcavas	90
3.1 Descripción del modelo	90
3.1.1 Aspectos fundamentales del modelo	90
3.1.2 Reparto de la pérdida de suelo entre paredes y lecho	100
3.1.3 Resolución numérica de la ecuación de continuidad del sedimento	104
3.1.4 Cálculo de la variación en la forma de la sección transversal	106
3.2 Estimación de los parámetros del modelo	110
4 Análisis del modelo	120
4.1 Análisis de sensibilidad	120
4.1.1 Desarrollo del análisis	120
4.1.2 Discusión sobre los resultados del análisis	146

4.2 Otros estudios sobre la respuesta del modelo	149
4.2.1 Influencia de la longitud del tramo, L	149
4.2.2 Influencia de no considerar aporte lateral, y en este caso, de la variación del caudal aguas arriba	151
4.2.3 Influencia de incrementos de caudales considerando aporte lateral	153
4.2.4 Influencia de considerar o no un transporte de sedimentos no equilibrado	154
4.2.5 Influencia de la duración del episodio	158
4.3 Validación del modelo	160
4.3.1 Estudio con la cuenca de Cobaza	161
4.3.2 Estudio con la cuenca de La Matea II	171
4.3.3 Estudio con la cuenca de La Abejera 0	173
4.3.4 Breve discusión general	177
4.4. Aplicabilidad del modelo	177
5 Conclusiones y orientaciones para el futuro	179
Referencias	183
Anejos	I
Anejo I Mediciones de secciones transversales de cárcavas	II
Anejo II Listado del programa <i>OCE</i>	XIX
Anejo III Inputs y outputs del programa <i>OCE</i>	LIII

1. - INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

En este capítulo primeramente se relaciona la erosión en cárcavas con los otros tipos de erosión y con el fenómeno más general de la degradación de suelos. A continuación, se profundiza en el concepto de cárcava, distinguiendo con detalle las diferentes clases que pueden encontrarse, definiendo las características propias de cada una, y los efectos que pueden producir. Una vez resaltado el interés del estudio de cárcavas efímeras se expone una revisión de los trabajos más relevantes realizados sobre dicho tipo de cárcavas, tanto en lo que se refiere a medición, factores condicionantes y esfuerzos predictivos. El capítulo se concluye con la exposición justificada de los objetivos a cubrir con esta tesis.

1.1. - CONCEPTOS GENERALES

La palabra erosión proviene del latín *erosio, -onis*, “roedura”. El Diccionario de la Real Academia define así erosión: “Desgaste o destrucción producidos en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otra. Desgaste de la superficie terrestre por agentes externos como el agua o el viento.”

Una primera matización parece necesaria en relación con la “superficie desgastada”. Podemos diferenciar entre la erosión que afecta a rocas expuestas, material geológico, de la que afecta al suelo. La primera, con procesos peculiares como la meteorización, procede lentamente y difícilmente es susceptible de ser modificada, acelerada o retardada por la acción del hombre, al menos de manera importante, siempre que la acción del hombre no consista precisamente en la exposición de la roca directamente a la atmósfera. Además, es causante de la modelización del paisaje, y en cierto modo, de la generación de suelos. No se puede decir por tanto que se trate de un fenómeno negativo.

Sin embargo, la erosión que afecta al suelo puede acontecer de manera muy rápida, y el hombre puede incidir de manera decisiva. Así que debemos de distinguir entre erosión natural del suelo, esto es, la que acontece espontáneamente en la Naturaleza sin la acción del hombre, y la citada erosión influenciada por la actividad humana. Vemos por tanto cómo en el fenómeno de la erosión, globalmente, se superponen dos escalas de tiempo diferentes (Blaikie, 1985, citado en Laguna, 1989). Una lenta, que podríamos denominar geológica, y otra más rápida, edafológica.

Al igual que la erosión del material geológico, no podemos considerar a la erosión natural del suelo como un fenómeno negativo, sino como uno más de entre los que constituyen la actividad de la Naturaleza. En muchos casos, desde el punto de vista del desarrollo de la civilización, la erosión del suelo es claramente positiva y determinante. Un ejemplo es la formación de suelos sobre los sedimentos aportados por la erosión en aquellas zonas en las que el material anterior es incapaz de dar lugar a un suelo de calidad. Este hecho fue una de las bases de la Revolución del Neolítico, en las inmediaciones de los cauces sometidos a inundaciones más o menos recurrentes (Childe, 1936, citado en Laguna, 1989).

Centrándonos en la erosión del suelo, podríamos definirla de manera sencilla como la pérdida total o parcial del suelo en una determinada localización, arrastrado por el agua (erosión hídrica) o por el viento (erosión eólica). Ellison (1946) (citado en Foster y Meyer, 1972 b) define la erosión hídrica como “un fenómeno de arranque y transporte de materiales del suelo por la acción de agentes erosivos”. La erosión eólica puede ser de gran transcendencia, aunque en general, y en nuestras latitudes, es la erosión hídrica la más importante. La sedimentación, es decir, la acumulación en los fondos de partículas en la corriente, es un fenómeno asociado íntimamente con el de erosión, consecuencia de éste.

La erosión y la sedimentación hídricas incluyen los procesos de arranque, transporte y depósito de sedimentos por los agentes erosivos y de transporte, que son el impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía que fluye por la superficie del suelo (ASCE, 1975, citado en Foster, 1982b). Se conoce como arranque a la rotura de las unidades estructurales del suelo por los agentes erosivos, que da lugar a numerosas partículas sueltas de tamaño variado. El transporte es el desplazamiento de las partículas anteriores bien por la salpicadura de las gotas de lluvia, bien por el flujo de escorrentía, que se depositan a cierta distancia del lugar de origen. (Foster, 1982b).

Hay varios agentes de transporte. En un primer grupo podemos distinguir la acción de las gotas de lluvia, y la escorrentía superficial en forma de flujos poco profundos (shallow flow) de anchura “infinita”. Son denominados a veces flujo en lámina (sheet flow). En un segundo grupo podemos diferenciar el flujo en pequeños canales, conocidos como surcos (rill flow), y el flujo en cauces más persistentes, como cárcavas y ríos. A estos agentes que actúan externamente, tomando material y transportándolo sobre la superficie, deberíamos de añadir el denominado transporte por movimientos de masa, como soliflucción (soil flows), deslizamientos (slides) y arrastres (creep), en los que el agua afecta al suelo internamente, alterando su resistencia. (Morgan, 1986).

La importancia de la erosión y la sedimentación puede llegar a ser muy considerable. La erosión reduce la productividad de los terrenos de cultivo. Los sedimentos degradan la calidad del agua y pueden transportar sustancias contaminantes. La colmatación en canales, embalses, estuarios, puertos, y otras estructuras reduce la capacidad de las mismas e implica costosas operaciones de eliminación de sedimento. (Foster, 1982b)

El fenómeno de la erosión hay que enmarcarlo dentro del concepto más general de degradación del recurso suelo, pues es uno de los procesos que originan tal degradación. La degradación del suelo es tan antigua como la propia civilización. El Convenio de Lucha contra la Desertificación define degradación de suelo como la “reducción o pérdida de la productividad biológica o económica y de la complejidad de su cobertura vegetal como consecuencia de los usos del suelo o procesos debidos a actividades humanas y de ocupación.” Entre los procesos de degradación más importantes destacan la erosión hídrica y eólica, que ocasionan una pérdida material del suelo. Otros procesos de degradación son la compactación, salinización, acidificación, y acumulación de contaminantes diversos (lluvia ácida, fertilizantes, insecticidas, residuos industriales, agrícolas o urbanos diversos).

Queda claro cómo la actividad agrícola puede ser una de las causas más importantes de la degradación del suelo, aunque no la única. En el caso concreto de la erosión acelerada, degradante, es estrechísima su relación con la actividad agrícola y forestal. En este trabajo vamos a centrar nuestra atención en ciertos aspectos de la erosión hídrica en terrenos de cultivo.

Es interesante situar el concepto de desertización, cada día de mayor actualidad, en este contexto. El PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) definió en 1991 la desertificación como “la degradación de tierras en áreas áridas, semiáridas y secas-sub-húmedas como resultado fundamentalmente de acciones humanas adversas.” El proceso de desertización hay que verlo como una degradación del suelo en un grado límite. El concepto de degradación de aguas queda incluido en la definición de desertificación mediante la palabra “tierras”, en la que esta palabra, para PNUMA “incluye el suelo y los recursos hídricos locales, la superficie del terreno y la vegetación natural” (Rubio, 1995).

1.2. - TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA.

El agua puede ejercer su acción erosiva básicamente de dos maneras: como gota de lluvia que impacta en el suelo, o como flujo superficial moviéndose sobre el suelo. Al primer tipo de erosión se le denomina erosión por salpicadura. Para el segundo empleamos los términos de erosión hidráulica o erosión por escorrentía. El flujo de agua puede ser a su vez concentrado en cauces definidos, o esparcido sobre superficies de anchura infinita. Puede darse también un flujo concentrado subsuperficial que origina fenómenos concretos de erosión, como la llamada sufosión, sifonamiento (“piping”). Frecuentemente este fenómeno es el origen de importantes procesos de acarreamiento.

Las citadas acciones dan lugar a los diferentes tipos de erosión hídrica que podemos encontrar en terrenos de cultivo: erosión laminar, en surcos, y en cárcavas (Hutchinson y Pritchard, 1976, citado en Foster, 1986). La erosión por distintos tipos de canales en terrenos de cultivo, es tenida en consideración desde hace ya tiempo, pudiendo oscilar entre pequeños surcos de algunos milímetros hasta grandes cárcavas. Diversos canales con problemas de erosión construidos dentro de áreas rurales como desagües, también se engloban bajo este término. (Foster, 1982a).

Por erosión hídrica laminar (sheet erosion), entendemos la eliminación de una capa fina y relativamente uniforme de partículas de suelo (Foster, 1982b), sin que se aprecie la presencia de incisiones, como surcos.

Está originada por la acción conjunta de la erosión por escorrentía y de la erosión por salpicadura. Aunque las intensidades de erosión pueden ser altas, este tipo de erosión pasa muchas veces inadvertido.

La erosión por surcos o regueros es la causada por numerosos pequeños canales que tienen una profundidad y una anchura de varios milímetros (Foster, 1982b). Poesen (1988) los define como pequeños cursos de agua intermitente con lados escarpados de sólo algunos centímetros de profundidad y que no suponen ningún obstáculo para el laboreo. En ellos se desprecia el efecto de la salpicadura, aunque reciben el aporte de la zona entre surcos, originado en parte por salpicadura. El Diccionario de la Real Academia no hace referencia explícita a surco como la forma de erosión que hemos definido, ni a través de la propia palabra “surco” ni a través de otra palabra castellana, “reguero”, utilizada a veces como sinónimo. Surco y reguero son definidos así. Surco: “Hendedura que se hace en la tierra con el arado. Señal o hendedura prolongada que deja una cosa que pasa sobre otra. Arruga en el rostro u otra parte del cuerpo.” Reguero: “Corriente a modo de chorro o arroyo pequeño que se hace de una cosa líquida. Línea o señal continuada que queda de una cosa que se va vertiendo”. Mientras que la erosión laminar puede pasar inadvertida, los surcos son muy visibles, y son síntoma de un importante grado de erosión. A menudo siguen marcas originadas por el laboreo, pero también pueden desarrollarse de manera similar a la red de desagüe de ríos en grandes cuencas. El flujo se concentra aguas abajo en muchos pequeños canales, uniformemente distribuidos, y constituye parte del flujo superficial (overland flow) (Foster y Meyer, 1975). Toda erosión que ocurre en esas áreas se denomina “erosión en surcos” (rill erosion). Las gotas de lluvia arrancan partículas de suelo de las zonas entre surcos, y un flujo muy fino, de escaso calado, ayudado por el impacto de la gota de lluvia, desplaza el sedimento lateralmente hacia las áreas de surcos, donde tiene lugar la mayor parte del transporte. Erosión en y entre surcos son en general considerados conjuntamente. Sin embargo, hay casos en los que se diferencia erosión en surcos de erosión entre surcos, considerando a esta última como erosión laminar (sheet erosion). Como el laboreo suele eliminar los surcos cada año, la erosión en y entre surcos elimina suelo uniformemente. (Foster, 1986)

El Diccionario de la Real Academia sí contempla la palabra cárcava como fenómeno erosivo, definiéndola como una “hoya o zanja grande que suelen hacer las avenidas de agua”. Más técnicamente, el concepto de cárcava puede definirse como un canal originado por la erosión y causado por un flujo concentrado, aunque intermitente, de agua, que se da generalmente durante, e inmediatamente después, de fuertes lluvias; es lo suficientemente profundo para interferir en las operaciones normales de laboreo y para impedir su eliminación mediante dichas operaciones rutinarias (Soil Science Society of America, 1984, citado en Poesen, 1988). A menudo las cárcavas proceden del desarrollo de un surco. En consecuencia, un mejor conocimiento de las condiciones que influyen en el origen de los surcos puede ser crucial para el entendimiento de la génesis de las cárcavas (Poesen, 1988). Ciertos tipos de cárcavas pueden ser consideradas como grandes surcos (Poesen y Govers, 1990). Hay autores que distinguen entre surcos y cárcavas en base a una sección crítica. Por ejemplo, Hauge (1977) (citado en Poesen y Govers, 1990), establece esta sección crítica en 1 pie^2 (0.093 m^2). De todos modos, según Bradford y Piets (1980) no hay un acuerdo general sobre las dimensiones que distinguen una cárcava de un surco. Foster (1982a) reconoce que la definición de surcos, cárcavas efímeras y cárcavas continúa siendo un problema. Es importante resaltar que la erosión por cárcavas es un eslabón final en una cadena, de modo que las otras formas de erosión que tengan lugar aguas arriba afectan al origen y desarrollo de las cárcavas.

Las definiciones aportadas en este apartado sobre surcos y cárcavas no son suficientemente precisas como para abordar un estudio detallado que intente ahondar en la naturaleza de los procesos. Por ello, a continuación se precisarán dichos conceptos.

1.3. - PRINCIPALES ASPECTOS DE LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS.

1.3.1. -CÁRCAVAS PERMANENTES

El concepto clásico de cárcava corresponde a la definición aportada en el final del apartado anterior. Otra definición de interés es la que considera a las cárcavas permanentes como una formación de canales muy marcados originados por erosión y transporte de suelo, roca blanda o ambas cosas simultáneamente, bajo la acción de fuerzas originadas por flujos concentrados, avance de cabeceras y derrumbe de taludes (USDA-SCS, 1992). Una vez establecidas, estas cárcavas son permanentes. Las secciones transversales tienden a ser

estrechas en comparación con la profundidad, las paredes, a ser verticales y la cabecera de la cárcava, es decir, su límite aguas arriba, aparece como una estructura claramente diferenciada y prominente. Las cárcavas permanentes tienden a desarrollarse en base a un modelo dendrítico a lo largo de cursos naturales de agua. Sin embargo, el modelo de desarrollo puede ser no dendrítico en estructuras artificiales, como zanjas de carreteras, terrazas o canales de derivación o de desagüe. Las cárcavas permanentes aparecen generalmente en redes de desagüe claramente definidas. Pueden erosionar todo el perfil del suelo, alcanzar la roca e incluso adentrarse en ella. (Foster, 1986). El estudio de la erosión en cárcavas puede afrontarse como un estudio de los fenómenos que se dan corto plazo o de los que se dan a largo plazo, donde caben cuestiones como la reconocida naturaleza cíclica de los procesos de acarreamiento y sedimentación (Bradford y Piest, 1980).

Una de las características más peculiares de las cárcavas permanentes son los frecuentes derrumbamientos de sus taludes, en forma de bloques o fragmentos de diversa naturaleza, que se acumulan en el lecho de la cárcava. Estos procesos pueden tener gran trascendencia por aportar grandes cantidades de materiales capaces de llenar la capacidad de transporte, limitando la erosión aguas abajo. Ciertos materiales además pueden desgajarse de las paredes como microdesprendimientos de salientes por acción de la gravedad, ayudados por debilitamientos del material, causados a su vez por ciclos de humectación-secado o congelación-fusión. Los materiales así acumulados, con menor resistencia al esfuerzo cortante, son evacuados fácilmente de manera total o parcial por el primer flujo significativo que tenga lugar. Flujos de escasa entidad son capaces de evacuar de esta forma grandes cantidades de sedimentos.

En ocasiones este proceso de evacuación de materiales acumulados es el más importante, como encontraron Bradford y Piest (1980), quienes lo detectaron en cárcavas en Iowa occidental, de modo que muy poco suelo era directamente erosionado por la acción del flujo sobre las paredes y lecho. Los materiales acumulados en el lecho al pie de los taludes, preservan al talud de posteriores derrumbes mientras no se evacue el material previamente acumulado. Por ello muchos diques de montaña continúan ejerciendo su acción protectora incluso rellenos de sedimentos. Los mecanismos y tipos de derrumbes y desprendimientos son muy variados, y su naturaleza sigue siendo muy desconocida (Bradford y Piest, 1980).

El crecimiento de la cárcava se produce al circular agua por ella, lo cual provoca bien la eliminación de los materiales acumulados en su base, bien la erosión de lecho y paredes, bien ambas cosas simultáneamente. Tiene lugar por tanto una profundización del lecho y un ensanchamiento lateral. Todo ello facilita a su vez que en un determinado momento se alcance una altura crítica y las paredes se vuelvan inestables, originándose un derrumbamiento de las mismas. La altura crítica depende del tipo de material y de su disposición en el perfil, así como de la forma y pendiente del talud, del contenido de humedad y de otros aspectos, como la presencia de vegetación, que con sus raíces tiende a estabilizar el talud, etc. Flujos subsuperficiales pueden originar una disminución de la resistencia del material al derrumbe. El tipo de derrumbe que se produce puede ser variado, y está muy condicionado por el ángulo que el talud forma con la horizontal. Una revisión a fondo del problema puede verse en Bradford y Piest (1980) e información adicional en Bradford et al. (1978) y Lohnes y Handy (1968). Alonso y Combs (1990), Osman y Thorne (1988), Thorne y Osman (1988) han realizado propuestas de modelización de los procesos de crecimiento de cauces por erosión de lecho y paredes, y derrumbes. Estos modelos inicialmente están pensados para ríos pero, en esencia, podrían ser válidos para cárcavas, con modificaciones. El método de Culman y variantes del mismo es el utilizado en dichos modelos para cuantificar los derrumbes. La aplicación de estos modelos a ríos da resultados muy poco satisfactorios, por no incluir todos los procesos implicados, haciéndose necesaria la incorporación de componentes estocásticas en los mismos, capaces de contemplar la aleatoriedad propia de los derrumbamientos (Alonso 1996, comunicación personal). Una revisión pormenorizada de métodos de cálculo de la estabilidad de taludes puede verse en Brunnsden y Prior (1984).

El avance de la cárcava también está condicionado, en general de manera muy importante, por el de su cabecera, siendo este proceso aún poco conocido. De Ploey (1989) y Robinson y Hanson (1994) han propuesto modelos para explicar el avance de la cabecera, e información adicional puede encontrarse en Beer y Johnson (1963), US Soil Conservation Service (1966) y Thompson (1964) (los tres últimos citados en Zevenbergen, 1987). Bradford y Piest (1980) encontraron que los mayores niveles freáticos en la cabecera eran responsables en parte de la geometría del derrumbe en masa en las cercanías de la misma. Piest et al. (1975b) comprobaron cómo esas pérdidas de suelo de la pared y cabecera, acumuladas sobre el lecho, se debían a fuerzas relacionadas con el flujo de agua en el suelo, que disminuían la resistencia y cohesión del mismo. Los autores contemplaron cómo cárcavas muy similares evolucionaban con mecanismos muy diferentes, lo que ilustra más la gran complejidad del tema.

Un tipo particular de cárcavas permanentes son las cárcavas discontinuas. Es decir, aquéllas en las que no siempre se aprecia un cauce diferenciado, sino que se muestra alternativamente presente o ausente. Representan inestabilidad en el valle y presagian la posibilidad de futura destrucción por erosión de un sistema de desagüe completo. Obviamente, la continuidad de los sistemas de cárcavas con la red de desagüe influye significativamente en la evacuación de sedimentos, por lo que es importante en los planes de conservación reducir los efectos aguas abajo de la cuenca erosionada (Grissinger, 1996a). Patton y Schumm (1975) estiman el riesgo de que se produzca erosión por cárcavas discontinuas mediante valores umbrales de pendiente y caudal. Ante la imposibilidad de conocer los valores del caudal, proponen la superficie de la cuenca vertiente a una cárcava como índice de dicho caudal.

Las medidas de conservación de suelos en cuencas afectadas de manera importante por cárcavas han resultado efectivas en diversos casos. Son significativos los datos aportados por Piest et al. (1975b), y por Sharpley et al. (1996) para observaciones sobre periodos largos de tiempo (nueve y trece años respectivamente). En el primer caso, cuando uno de los procesos mutuamente dependientes en el agrandamiento de cárcavas, concretamente la eliminación por la escorrentía de los derrubios del canal, fue reducido drásticamente, el derrumbe de paredes y el avance de la cabecera se detuvieron.

Una revisión reciente de los principales aspectos sobre erosión en cárcavas puede encontrarse en Grissinger (1996b).

1.3.2. - CÁRCAVAS ASOCIADAS A TALUDES

Govers y Poesen (1990), en zonas de loess de Bélgica Central, denominan de esta manera a las cárcavas que aparecen donde una elemento de desagüe, como un surco o una cárcava efímera, atraviesan taludes. El origen de estas cárcavas se asocia a procesos de sufosión o sifonamiento (piping) en los taludes, que se aceleran por la puesta en cultivo de los bordes. Estas cárcavas son permanentes, e interfieren seriamente las labores de cultivo. Poesen (1989) mostró que la intensidad del flujo no es un factor dominante para explicar el volumen de suelo erosionado en una cárcava asociada a un talud. Su desarrollo depende de la presencia de agujeros bióticos y grietas así como de las propiedades mecánicas de los diferentes horizontes de suelo (Poesen y Govers, 1990). Casos similares son los observados en Navarra (Del Valle y Del Val, 1990; Gutiérrez et al., 1988). De acuerdo con el peculiar origen de las cárcavas asociadas a taludes, la predicción de la localización y del volumen de estas cárcavas es más difícil que en cárcavas efímeras (Poesen y Govers, 1990). Poesen (1988) destaca que no hay cárcavas en taludes situados debajo de zonas encespedadas. La prevención de cárcavas asociadas a taludes puede conseguirse con ciertas medidas: evitar que la escorrentía atraviese el talud; eliminación de determinados taludes; medidas biológicas, como encespedado permanente y revegetación con especies de profundas raíces. En muchos casos sólo la tercera medida es factible. Una vez que la cárcava se ha formado, se pueden tomar dos tipos de medidas: eliminación de la escorrentía a través de la cabecera y estabilización con medidas estructurales y revegetación. (Poesen y Govers, 1990). Los estudios realizados en Bélgica Central (Poesen et al., 1996) revelan que las pérdidas de suelo causadas por cárcavas asociadas a taludes son un orden de magnitud más pequeñas que las debidas a cárcavas efímeras. Observaciones de campo en ambientes mediterráneos muestran que en zonas aterrazadas es frecuente la aparición de cárcavas asociadas a taludes (Poesen et al., 1996).

1.3.3. - CÁRCAVAS EFÍMERAS

Poesen y Govers (1990) denominaron cárcavas efímeras a aquéllas que se forman allá donde el flujo superficial se concentra, ya sea en cauces naturales de desagüe o a lo largo de elementos lineales del paisaje (bordes de parcelas, caminos, huellas de tractor, surcos de laboreo, etc). Son canales por los que discurre agua sólo durante los acontecimientos de lluvia, son frecuentemente eliminados o enmascarados por el laboreo y que tienden a aparecer repetidamente en las mismas posiciones año tras año. Mientras que los surcos ocurren en una ladera, las cárcavas efímeras se forman entre dos laderas opuestas. Este tipo erosión, reconocido como una clase peculiar de cárcava, detectado y frecuente en todo el mundo, ha sido tenido en consideración sólo recientemente, encontrándose que puede ser responsable de pérdidas de suelo muy importantes, incluso ser causante de la mayor parte de las mismas en localizaciones concretas (Foster, 1986; Vandaele, 1993; Thorne et al., 1986). Al análisis detallado de este tipo de erosión se dedica el apartado 1.4.

1.4. - CÁRCAVAS EFÍMERAS

1.4.1. - CONCEPTO DE CÁRCAVA EFÍMERA

Estas cárcavas están asociadas a los terrenos de cultivo. No coinciden en su definición con la de cárcava clásica, fundamentalmente por el carácter transitorio de las mismas, sin impedir el laboreo. En los últimos años, y dadas sus peculiaridades y su importancia, se ha comenzado una investigación específica sobre este tipo de erosión. Ha sido una forma de erosión tradicionalmente olvidada. La denominación de cárcavas efímeras es reciente. De hecho, Foster (1982a) remarcaba ya la necesidad de considerar de manera particular este fenómeno, al que en el citado artículo denominaba aún “concentrated flow erosion” o “erosion in waterways”.

Al aparecer las cárcavas efímeras en la misma localización cada año, la red de desagüe queda cada vez más encajada en el paisaje. Este encaje rebaja el nivel de base de las laderas laterales a la cárcava, haciéndolas más cortas y con mayor pendiente, lo que puede a su vez incrementar la intensidad de la erosión por surcos y de la erosión laminar en dichas laderas (Foster, 1986). La severidad del problema se ve a menudo enmascarada por los rellenos rutinarios mediante laboreo.

La forma, tamaño y evolución de una cárcava efímera depende de las prácticas de cultivo y del equipamiento de la explotación, además, claro está, de los procesos naturales. En consecuencia, las cárcavas variarán de una explotación a otra y entre regiones. (Mildner, 1983, citado en Thorne et al., 1986).

No suelen derrumbarse las paredes en las cárcavas efímeras, ya que en general no se alcanza la altura suficiente. Según Merkel et al. (1989), la separación entre cárcavas efímeras y cárcavas permanentes viene dada por la profundidad: más allá de unos 46 cm una cárcava ya no es considerada efímera, y comienzan a ocurrir derrumbes de taludes y avances de cabeceras, procesos propios de cárcavas permanentes. Esta distinción es la que se ha utilizado en el modelo EGEM (USDA-SCS, 1992).

En general podemos diferenciar tres zonas dentro de una cárcava efímera: cabecera, canal de tránsito y desembocadura. La cabecera tiene mucha importancia, pues aporta importantes cantidades de sedimentos al flujo y su avance aguas arriba es la causa de la elongación de la cárcava. La zona de tránsito o transporte puede ser a su vez una zona en la que sólo se produce erosión, o una zona en la que se producen tanto sedimentación como erosión (refiriéndonos a un evento concreto, ya que en principio la ocurrencia de erosión y sedimentación varía de un evento a otro). La desembocadura o fin a su vez puede ser en otro cauce, o en un “cono de deyección”. Muchas veces las cárcavas efímeras son discontinuas, por lo tanto, no habría una desembocadura o fin claro. (Zevenbergen, 1987). Aunque propiamente no sería una parte de la cárcava, hay que tener en consideración la cuenca que vierte en ella, que aporta parte de los sedimentos, debido a la erosión laminar y la erosión en surcos.

Poesen y Govers (1990) subdividen las cárcavas que denominan efímeras según su relación anchura-profundidad (RAP). Atendiendo a este criterio, podemos distinguir dos tipos principales: cárcavas efímeras con un valor de RAP mucho mayor que 1, y cárcavas efímeras con un valor menor. Las primeras son producidas por lluvias de gran intensidad y poca frecuencia cayendo sobre un suelo desnudo. Un elevado porcentaje de las pérdidas totales de suelo causadas por este tipo de cárcavas corresponde a material del horizonte superficial del suelo, con un alto contenido en materia orgánica y fertilizantes. Las cárcavas con RAP menor u igual que uno suelen darse cuando las precipitaciones son de baja intensidad y alta frecuencia, siempre que no aparezca un horizonte resistente. Causan un menor daño en el cultivo que las anteriores, y el porcentaje de suelo fértil del horizonte superficial que es erosionado a través de estas cárcavas es menor. No son fácilmente eliminables, y a menudo es necesario recurrir a un equipo especial para hacerlo, por lo que alguna de estas cárcavas perdería su calificación de efímera.

Una característica destacada de las cárcavas efímeras es su gran irregularidad (Vandaele, 1993; Lentz et al., 1993), de modo que de un año a otro se producen grandes variaciones, ligadas casi siempre a la magnitud e intensidad de las precipitaciones. Lentz et al. (1993) resaltan las variaciones espaciales, que pone en entredicho el hecho tan asumido de que las cárcavas efímeras aparezcan siempre en las mismas posiciones

dentro de las cuencas. Variaciones microtopográficas en la configuración de surcos, en la curvatura del fondo de la cuenca, presencia de puntos más débiles en los pequeños surcos originados por el laboreo, o acumulaciones de agua pueden explicar estas diferencias en la localización de unos episodios a otros.

1.4.2. - IMPORTANCIA DE LAS CÁRCAVAS EFÍMERAS. MÉTODOS DE MEDICIÓN

Al igual que los otros tipos de erosión, las cárcavas efímeras causan contaminación por dispersión de sedimentos y pérdida de productividad del suelo erosionado. Además, causan dificultades para el desarrollo de la agricultura (Foster, 1986).

La erosión por cárcavas efímeras puede ser mucho mayor que la directamente implicada en el vaciado del canal observado en un momento dado. Acrecimiento y degradación ocurren simultáneamente en diferentes tramos de una red de cárcavas efímeras, que dan lugar a varios ciclos de vaciado y rellenado en el sistema. Esto significa que la verdadera pérdida de suelo puede ser varias veces la observada en medidas del volumen vaciado. Las cárcavas efímeras son capaces de transportar materiales gruesos, incluyendo agregados de suelo, más eficientemente que los surcos. Los efectos de la degradación debida a cárcavas efímeras se extienden a través de toda la cuenca afectada (Thorne et al., 1986).

Existen diversos estudios que confirman la importancia de las cárcavas efímeras como fuentes de sedimentos, tanto por la relevancia de los valores absolutos de suelo perdidos como por el porcentaje de las pérdidas de suelo debidas directamente a este tipo de erosión. Algunos de los resultados deben de tomarse con mucha precaución, ya que están parcialmente basados en métodos con alto grado de incertidumbre (Vandaele, 1993). La medición del volumen correspondiente al canal excavado durante un corto periodo de tiempo debe de ser repetida durante varios años para obtener valores representativos de erosión medida. Estas mediciones no contemplan la erosión acelerada en las zonas adyacentes a la cárcava, ni la posibilidad de ocurrencia de más de un ciclo de erosión-rellenado entre los momentos de medición. Por otro lado, la definición de la zona de vaciado no es siempre fácil. En otras ocasiones, el método utilizado consiste en estimar el volumen de suelo perdido como consecuencia de las cárcavas efímeras comparando la topografía actual de la parcela con la original. Ello requiere del conocimiento de la forma original de la cuenca y del número de años durante los que ha sido cultivada. (Foster, 1986).

Thomas y Welch (1988) indican que en Georgia la erosión por cárcavas efímeras puede suponer el 30% del total de pérdidas de suelo en cuencas cultivadas. Estos autores calcularon los volúmenes de pérdidas de suelo debidas a cárcavas efímeras mediante fotografías aéreas de gran escala, mientras que la erosión laminar y en surcos se estimó mediante USLE. Jackson et al. (1988) estudiaron la posibilidad de usar técnicas basadas en rayos láser emitidos desde aviones para la determinación de perfiles de cárcavas efímeras. Volando a altitudes de 50 y 100m y a una velocidad de 25m/s consiguieron localizar y medir adecuadamente las secciones transversales de cárcavas de 50 cm de ancho y 15 cm de profundidad, y mayores. Localizaciones de Alabama muestran una mucho mayor contribución de la erosión por cárcavas efímeras, debido principalmente a unos coeficientes de escorrentía mayores (Laflen et al., 1985b). Spomer y Hjelmfelt (1986), en suelos franco limosos sobre loess de Iowa (USA), estimaron, para un año de lluvias importantes en el periodo crítico (suelo descubierto), que las cárcavas efímeras fueron responsables del 35% de los sedimentos evacuados de una cuenca cultivada con maíz con laboreo convencional. En ese trabajo la erosión total se estimó mediante la medición de la evacuación de sedimentos, mientras que la erosión por cárcavas efímeras se contabilizó mediante mediciones en campo y fotografías aéreas. Laflen et al. (1985b) indican que, aunque los datos son muy escasos, la erosión por cárcavas efímeras es al menos el 25% de la erosión laminar y en surcos en cuencas cultivadas de Iowa.

Grissinger y Murphee (1989) contabilizaron la erosión en dos cuencas, una de 1.54 ha, mantenida cubierta de césped, y otra de 1.90 ha, sembrada con soja, ambas con suelos desarrollados sobre loess, y situadas inmediatamente próximas a la llanura de inundación del río Mississippi. La escorrentía y la evacuación de sedimentos se registraban con detalle en las dos cuencas. Además, en campo se midió el volumen de las cárcavas efímeras. El seguimiento se continuó durante dos años. En la cuenca encespedada las pérdidas de suelo fueron tan sólo de 1650 kg/ha al cabo de los dos años, y las cárcavas efímeras resultaron insignificantes como para ser medidas. Sin embargo, en la parcela cultivada con soja, las pérdidas totales sumaron 41600 kg/ha en el mismo periodo de tiempo, de los que el 89% ocurrieron en las épocas de crecimiento del cultivo. En uno de los años las cárcavas efímeras fueron responsables del 60% de la erosión total.

Para tres localizaciones de Mississippi (Forsythe et al. 1986) (citado en Vandaele, 1993), el cociente entre erosión por cárcavas efímeras y erosión laminar y en surcos varió entre 0.13 y 0.7 durante una estación de cultivo. Auzet et al. (1992) (Vandaele, 1993) encontró que las cárcavas efímeras durante el invierno pueden alcanzar o superar el 80 % de las pérdidas de suelo debidas a la erosión por surcos en cuencas cultivadas del norte de Francia.

Vandaele (1993) ha llevado a cabo recientemente estudios rigurosos sobre la importancia de la erosión por cárcavas efímeras en Bélgica central. La mayoría de las pérdidas se produjeron en muy pocos acontecimientos de lluvia intensos. La intensidad media de erosión encontrada fue de 0.85 y 1.15 m³/ha/año. La erosión en cárcavas muestra una alta variabilidad temporal y espacial. La importancia relativa de la erosión por cárcavas se contabilizó mediante la relación erosión por cárcavas efímeras/erosión por surcos, previa medición de los mismos. Tanto las cárcavas como los surcos se midieron mediante técnicas volumétricas. La distinción entre surco y cárcava se hizo en base a una sección crítica de 0.093m². Las citadas cantidades achacadas a la erosión por cárcavas representan el 70 al 75 % de la erosión media anual causada por surcos en las mismas cuencas, aunque este índice aparece fuertemente influenciado por la estación. La relación erosión por cárcavas efímeras/erosión por surcos es más alta en invierno que en verano. Por tanto, parece que la importancia relativa de la erosión por cárcavas es mayor en invierno, con lluvias suaves, que en verano, aunque a nivel absoluto, la importancia es mucho mayor en primavera-verano. Durante precipitaciones fuertes de baja frecuencia en primavera y principios de verano, la elongación de las cárcavas efímeras está controlada principalmente por la extensión del área cultivada con especies de siembra en primavera, ya que bajo estos cultivos, el suelo presenta una baja cobertura vegetal precisamente en el momento de mayor intensidad de las lluvias y además se encuentra bastante seco, lo que parece aumentar la erodibilidad de estos suelos (Govers et al., 1990; Govers, 1991). Debido a la ocurrencia de precipitaciones fuertes y de baja frecuencia y a la mayor erodibilidad del horizonte superficial en verano por hallarse seco, la escorrentía proveniente de las laderas alcanza casi la capacidad de transporte. Así, el agua concentrada en las líneas de desagüe aguas abajo tienen una erosividad pequeña comparada con la erosión que tiene lugar en las laderas.

Vandaele et al. (1996b) realizaron un estudio sobre la importancia absoluta y relativa de la erosión por cárcavas efímeras en zonas de loess de Bélgica Central y en el sur de Portugal mediante la utilización de fotografías aéreas tomadas en diferentes años. Los suelos del área de estudio en el sur de Portugal (en la región del Alentejo), desarrollados sobre esquisto rojo, son someros, y con una pedregosidad aproximada del 30% en masa. Las fotografías permitieron identificar las cárcavas más importantes y determinar su longitud. Mediciones previas en campo posibilitaron establecer valores realistas de anchura y profundidad de las cárcavas. Los volúmenes de suelo erosionado calculados mediante este método son muy similares a los medidos mediante técnicas volumétricas en campo para mismos periodos en Bélgica (Vandaele, 1993). En el caso portugués, no existen antecedentes. Las fotos corresponden a tres años diferentes en el caso de Portugal, y a cinco en el de Bélgica. Las intensidades de erosión así encontradas varían entre 0.15 y 1.32 kg/m²/año en Bélgica y 0.1 y 0.68 kg/m²/año en Portugal, aunque en Bélgica los valores más frecuentes oscilan entre 0.15 y 0.5 kg/m²/año. Según los autores, puede asumirse que estas intensidades representan valores medios anuales. La importancia relativa de la erosión por cárcavas efímeras es muy grande en el caso portugués, pues el cociente entre las pérdidas causadas por cárcavas efímeras entre las pérdidas debidas a erosión laminar y en surcos (considerando valores medios medidos en la zona) es alrededor de 4.5. En el caso belga, oscila entre 0.4 y 2.3, variando grandemente a lo largo del año y entre eventos erosivos. Cuanto mayor es la intensidad de éstos y mayor es su periodo de retorno, menor es la contribución de las cárcavas efímeras a las pérdidas totales (Poesen et al., 1996). Como valores orientativos, para el caso belga, diversos investigadores sugieren que las cárcavas efímeras son responsables del 40-60% de las pérdidas totales de suelo, en una zona en la que los valores medios anuales de pérdidas totales se sitúan en torno a los 0.5kg/m² (Poesen et al., 1996).

Las únicas medidas realizadas hasta el momento en España de las que tenemos conocimiento se refieren a una zona árida de la provincia de Almería, al pie de la Sierra de Gata (Poesen et al., 1996). Se trata de típicos piedemontes con un grueso manto de meteorización sobre roca andesítica y, en su parte basal, extensos sistemas aluviales en abanico, de edad Pleistocena. La profundidad del suelo oscila entre 0.25 y 1 m. Abundan los fragmentos de rocas angulares en las zonas superiores, que cubren entre el 20 y el 50% de la superficie. La textura es franco-arenosa, y hay presencia de un epipedión mólico (rico en materia orgánica). El 30% del área estudiada muestra pendientes superiores al 10%. Desde 1983, el terreno no se ha cultivado, y se usa regularmente como pastizal. Se ha originado desde la fecha citada una densa red de surcos y cárcavas. La precipitación media anual es de 180mm. Dentro del área descrita se escogió una zona de 10ha, en la que se realizaron mediciones detalladas. Se elaboró un mapa escala 1:500 de todas las

cárcavas y surcos presentes, y se midieron con detalle multitud de secciones transversales. En las posiciones superiores del área de estudio, la intensidad de la erosión causada por los surcos es muy similar a la causada por las cárcavas efímeras. Sin embargo, a partir de una cierta distancia desde dichas posiciones superiores, en dirección aguas abajo, la erosión en cárcavas adquiere progresivamente más protagonismo, hasta hacerse mucho más importante que la erosión en surcos. La erosión debida a cárcavas efímeras se estima en $9.7 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, y la causada juntamente por erosión laminar y en surcos, en $2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$. La erosión laminar se estima como un 10% de la erosión total, de acuerdo con datos de la literatura para condiciones comparables (Govers y Poesen, 1988). Según esto, las pérdidas por cárcavas efímeras explican el 83% de las pérdidas totales.

A partir de los citados trabajos realizados en Bélgica, Portugal y España, se concluye que la erosión media debida a cárcavas efímeras es al menos tan importante como la erosión laminar y en surcos en Bélgica central, pero más importante aún en ambientes mediterráneos, particularmente en tierras de cultivo abandonadas. En pastizales formados a partir de tierras de cultivo recientemente abandonadas, es frecuente comprobar cómo disminuye la erosión en surcos y la erosión laminar debido a la presencia de vegetación y también a la aparición de superficies resistentes a la erosión, por ejemplo rocas. En consecuencia, las concentraciones de sedimentos en los flujos generados en las zonas superiores son bajas. Sin embargo, aguas abajo, este flujo es a menudo responsable del rápido desarrollo de cárcavas, debido básicamente a la carencia de sedimentos en el agua erosionante. Ello explica el hecho frecuentemente observado en muchas tierras abandonadas en entornos mediterráneos: domina el descenso en el nivel de los valles tras el abandono de tierras. Flujos relativamente poco cargados de sedimentos acceden a las zonas más bajas, erosionándolas activamente. (Poesen et al., 1996).

En Poesen et al. (1996) puede encontrarse una actualizada revisión sobre la contribución de la erosión por cárcavas efímeras a las pérdidas totales. Los datos disponibles se refieren casi exclusivamente a Europa Occidental y Norteamérica. A pesar de que los métodos utilizados para estimar las pérdidas de suelo causadas por cárcavas efímeras tienden a infravalorar este tipo de erosión, los datos indican que la importancia de las cárcavas efímeras está lejos de ser despreciable. El porcentaje de pérdidas totales excede el 10% en todos los estudios. En ambientes concretos, como en entornos mediterráneos o pastizales, la erosión por cárcavas efímeras parece ser la principal fuente de sedimentos. La contribución relativa de las cárcavas efímeras a la producción total de sedimentos varía con la topografía, intensidad de la precipitación, tipo de suelo, condiciones de la superficie del suelo y uso del suelo. Por ejemplo, donde los suelos son fundamentalmente limosos, francos (gruesos) o arenosos, la erosión por surcos en la ladera es más importante, reduciéndose la contribución relativa de la erosión por cárcavas efímeras de los fondos de valle.

Lentz et al. (1993) encontraron para tres cuencas en el sudeste de Minnesota (USA), estudiadas durante dos años más bien secos, valores que oscilaron entre 0.08 y $0.16 \text{ kg}/\text{m}^2$, muy inferiores que los citados para cuencas similares por otros autores. Sin embargo, mediciones previas realizadas por otros investigadores en una de las cuencas citadas durante un año más húmedo de lo habitual, registraron pérdidas diez veces mayores. Se trataba de cuencas con una extensión de 1.8, 2.4 y 3.15 ha, con desniveles y pendientes de 18.5 y 8.6%, 14 y 6.1 %, 19 y 3.4 % respectivamente. Fueron cultivadas usando técnicas de laboreo mínimo, sembradas con soja y maíz, en suelos formados sobre loess, con texturas limosas, francas y franco-arcillosas en el horizonte A respectivamente. La sección transversal de los canales en cada tramo se midió utilizando un medidor de microrrelieve para el caso de los canales largos, y técnicas fotográficas en las cárcavas pequeñas. En este último método, el área de las secciones transversales se midieron a partir de fotos tomadas in situ. El volumen movilizado se calculó sumando los productos de longitud del canal y área media en los distintos tramos. Lentz et al. (1993) comprobaron cómo el aumento en el tamaño de la sección transversal se corresponde con una disminución del grosor del horizonte A en las proximidades de la cárcava. Además, el contenido en carbono orgánico en el suelo era mayor cuanto mayor fuese la distancia entre los puntos de muestreo y el cauce. También se demostró un cierto lavado de materiales finos en las zonas afectadas por cárcavas, lo que se tradujo en un incremento en dichas zonas del contenido en arena. De todos modos, las diferencias encontradas entre propiedades de suelos afectados y no afectados por cárcavas efímeras no es grande, ni generalizable. Los sucesivos procesos de llenado de cauces mediante laboreo y la formación más o menos aleatoria de los canales tienden también a minimizar estas diferencias observadas, lo que puede explicar la escasa magnitud de las mismas.

Estos datos indican que las pérdidas de suelo debidas a cárcavas efímeras pueden ser muy importantes, y a veces incluso las más importantes en cuencas cultivadas. La no consideración de estas fuentes de sedimentos

en mediciones, y ecuaciones y modelos predictivos puede dar lugar a una importante subestimación de la severidad de la erosión de suelo.

1.4.3. - PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS EFÍMERAS. EROSIÓN EN SURCOS

1.4.3.1. EROSIÓN EN SURCOS

Ya se ha señalado que a menudo una cárcava procede del desarrollo de un surco. En consecuencia, un mejor conocimiento de las condiciones que influyen en el origen de los surcos es crucial para el entendimiento de la génesis de las cárcavas (Poesen, 1988). Además, para terminar de acotar el concepto de cárcava, conviene ocuparnos ahora con mayor profundidad del concepto de surco.

Algunos autores establecen un criterio de distinción entre cárcava y surco basado en el tamaño, situando el umbral en 0.093m^2 (Hauge, 1977). A continuación se describen algunas de las principales características atribuidas a los surcos. Fácilmente eliminables por laboreo, generalmente no aparecen siempre en el mismo lugar. Pueden ser de cualquier tamaño, pero en principio son más pequeños que las cárcavas efímeras, y la secciones transversales tienden a ser estrechas en relación a la profundidad. Se desarrollan como un conjunto de múltiples canales pequeños, paralelos y desconectados, que desaguan en cárcavas pequeñas, terrazas, o simplemente en zonas de depósito. Generalmente, están distribuidos uniformemente en la ladera, y el tamaño se distribuye también uniformemente. Se dan más frecuentemente en laderas con pendientes elevadas, dispuestas por encima de otras redes de desagüe. Aunque es mediante los propios pequeños cauces como el suelo se elimina, el laboreo anual hace que el perfil del suelo en general se vuelva más delgado en toda la ladera afectada. (Foster 1986)

Trataremos a continuación de estudiar los aspectos condicionantes de mayor importancia relacionados con la erosión en surcos detectados por algunos investigadores, sin ánimo de realizar una revisión exhaustiva.

Govers (1985) (citado en Poesen, 1988) encontró que las condiciones de flujo para el comienzo de erosión en surcos sobre suelos francos y arenosos podía ser expresada mediante la velocidad de flujo cortante (u_*):

$$u_* = (g \cdot R \cdot S)^{1/2} \quad (1.4.1)$$

donde:

u_* = velocidad cortante (m/s)
 g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
 R = radio hidráulico (m)
 S = pendiente del cauce

Posteriormente observó en campo que las redes de escurrimiento no causaban una incisión en la capa superficial del suelo mientras el valor de u_* permanecía inferior a 3.0 cm/s. Una vez que u_* excedía este valor, se produjo un rápido incremento en la profundidad del surco.

El valor umbral de velocidad cortante se relacionó con la naturaleza selectiva y con la capacidad de transporte de la escorrentía. El tamaño medio de los granos así como el tamaño medio de los agregados del sedimento erosionado fue significativamente más pequeño que el tamaño medio de los granos de los suelos (que eran francos) mientras u_* fue inferior a 3.0-3.5 cm/s. Para valores mayores de u_* no se observó un transporte selectivo. De la misma manera, para valores de u_* mayores de 3.0 cm/s la capacidad de transporte de finas capas de agua en un suelo arenoso muy fino comenzó a aumentar rápidamente. Todo esto indica que el poder erosivo del flujo superficial se incrementa rápidamente una vez la velocidad cortante excede de 3.0-3.5 cm/s, y que este valor podría ser un umbral válido para el inicio de la erosión en surcos (Poesen, 1988). Se encontró una erodibilidad máxima en suelos con un tamaño medio de partículas dentro del rango 0.016-0.025 mm. Es interesante notar que este máximo no corresponde al pico de máxima susceptibilidad al arranque por impacto de gotas de lluvia o por flujo turbulento (Poesen, 1985; Hjulström, 1935; en Poesen, 1988).

Diversos estudios de laboratorio con suelos franco arenosos muy erosionables revelaron que el contenido de humedad precedente del suelo tiene un tremendo efecto sobre las pérdidas de suelo debidas a surcos (Govers et al., 1987, en Poesen, 1988): con un aumento en la humedad precedente del 7.2% al 21% y manteniendo los otros factores constantes, las pérdidas de suelo debidas a erosión en surcos decrecieron 5.5 veces (de 424 Kg a 77 Kg) durante un experimento de 90 min de duración, con una lluvia simulada de una intensidad de 100 mm/hr. Esta observación puede ser probablemente explicada por los efectos de debilitamiento y compresión del aire causando fragmentación (slaking) que influyen en la inestabilidad estructural así como en la facilidad de arranque de partículas y en la cohesión del suelo cuando la lluvia cae sobre un suelo seco. Estos fenómenos no juegan un papel importante cuando el suelo está húmedo. Este descubrimiento tiene importantes aplicaciones para el asesoramiento sobre erosionabilidad en surcos en suelos francos en diferentes condiciones climáticas (Poesen, 1988). El humedecimiento súbito de un suelo seco puede causar fragmentación, es decir, la disrupción de las cementaciones entre partículas, debida a presiones positivas en el poro causadas a su vez por aire atrapado. Además, el hinchamiento de los componentes de arcilla durante el humedecimiento puede causar una expansión diferencial y la formación de microgrietas (Grimaldi y Tessier, 1986) (citados en Govers et al., 1990). Ambos mecanismos cooperarán en el descenso de la resistencia al esfuerzo cortante. El efecto de ambos mecanismos se incrementará en intensidad cuanto menor sea el contenido en humedad inicial. La densidad aparente puede cambiar significativamente como consecuencia del humedecimiento, lo que modifica el volumen de poros disponible para la infiltración de agua. (Govers et al., 1990)

En consecuencia, medidas iniciales de la resistencia al esfuerzo cortante pueden no relacionarse con la resistencia a la erosión observada. Las variaciones en resistencia a la erosión son tan importantes que la erosión por escorrentía causada por eventos de alta intensidad y duración media pueden causar más erosión cuando el suelo está inicialmente seco, a pesar de la mayor capacidad de infiltración del material seco. Por tanto, está claro que, en contra de la creencia generalizada, la erosión causada por un evento puede decrecer al aumentar el contenido de humedad inicial. La diferencia en resistencia a la erosión causada por variaciones en el contenido inicial de humedad es persistente durante toda la duración de los experimentos. Esto puede ser una explicación adicional de la observada máxima producción de sedimentos en áreas áridas y semiáridas (Govers et al., 1990). En el mismo artículo se cita cómo otros autores llegan a conclusiones relacionadas. Grissinger (1966) (citado en Govers et al., 1990) muestra cómo la erosión por escorrentía en sistemas de arcillosos resulta tremendamente dependiente del contenido inicial de humedad. En el caso de arcillas tipo illita y montmorillonita, la resistencia a la erosión por escorrentía se incrementaba al aumentar el contenido inicial de humedad, aunque el efecto de esta humedad inicial era ambivalente si la arcilla era caolinita. Otros estudios revelan la misma tendencia en ensayos con canales, y en surcos de riego (Grissinger et al., 1982, Kemper et al., 1985, Raws y Auzet, 1989; citados en Govers et al., 1990).

A la complejidad aludida en los párrafos anteriores hay que añadir el hecho de que en campo el contenido de humedad inicial variará además en el perfil del suelo. Puede esperarse por tanto que la intensidad de erosión variará con el tiempo: conforme los surcos se hacen más profundos, el flujo erosionará capas que varían en contenido inicial de humedad y mostrarán variaciones en la resistencia a la erosión. (Govers, 1991). Por otro lado, el laboreo reduce drásticamente la resistencia del suelo a la erosión por el flujo. Intensidades de erosión en surcos medidas inmediatamente después de laboreo fueron alrededor de tres veces las medidas antes del laboreo (Foster, 1982a). Existen otros muchos numerosos ejemplos de estudios que ilustran este hecho.

El flujo en muchos surcos es turbulento y supercrítico, aunque las transiciones entre flujos subcríticos y supercríticos son frecuentes. El flujo en surcos con pendientes superiores al 3% tiende a ser supercrítico. (Foster y Meyer 1972 b).

No todos los surcos se forman por escorrentía superficial. Govers (1987) (citado en Poesen, 1988) mostró que las galerías excavadas por animales, como topos, en el horizonte de labor, pueden conducir importantes caudales de flujo subsuperficial. Ello conduce a erosión por sufosión y finalmente, cuando el techo de la galería se desploma, se forman los surcos (Poesen, 1988).

1.4.3.2.. ORIGEN Y CRECIMIENTO DE CÁRCAVAS EFÍMERAS

Una cárcava efímera se forma donde la escorrentía superficial se concentra, lo que inicia la erosión y canalización. La iniciación de la erosión hídrica es un problema extremadamente complicado no explicado todavía de manera completa. En términos generales, cuando la intensidad del flujo aumenta, aumenta la probabilidad de arranque e incorporación al flujo de partículas o agregados de partículas (Thorne et al., 1986). En cárcavas efímeras, el arranque y eliminación de sedimentos puede explicarse esencialmente como una función de la intensidad del flujo (Foster y Lane, 1983; Thorne et al., 1986; Watson et al., 1986; citados en Poesen et al., 1990). Existen diversas medidas de esta intensidad del flujo, como esfuerzo cortante, velocidad cortante y potencia del flujo (Poesen, 1993). El parámetro más usado, más general y a veces el más satisfactorio para medir la intensidad de flujo, es la potencia unitaria de la corriente (Yang, 1973), que se define:

$$\omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \quad (1.4.2)$$

donde:

ω = potencia unitaria de la corriente (w/m)

ρ = densidad del agua (kg/m³)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Q = caudal (m³/s)

S = pendiente del cauce

La potencia de la corriente depende del producto caudal por pendiente. Hay un umbral o nivel crítico de la potencia por encima de cuál se inicia una cárcava efímera en una localización concreta (Thorne et al., 1986).

No hay mucha información disponible a cerca de la resistencia de los diferentes horizontes de loess a erosión concentrada, que es crucial para predecir la RAP (Relación Anchura-Profundidad) de cárcavas efímeras y el tipo de daño ambiental relacionado que causan, así como la velocidad de avance de la cabecera de la cárcava (Poesen, 1993). Este mismo autor explica la aparición de erosión por cárcavas efímeras en los diferentes horizontes cuando se supera la velocidad cortante crítica. Ésta es determinada a partir de los trabajos de Raws y Govers (1988), que coinciden con los de Torri et al. (1987).

Poesen y Govers (1990) encontraron que la humedad (sólo en condiciones de sequedad) y la resistencia al esfuerzo cortante (en condiciones de sequedad o de saturación, no en condiciones intermedias) son los parámetros del suelo que mejor explicaban la susceptibilidad a la erosión por cárcavas en los suelos de loess con los que trabajaban, dándose (aunque no en todos los casos) correlaciones negativas entre ellos y la intensidad de erosión. Otros parámetros controlados fueron el porcentaje de arcilla, de limo y de arena, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbonato cálcico, densidad aparente, resistencia a la penetración y ángulo de fricción interna. El hecho de que la intensidad de la erosión por cárcavas muestre una correlación negativa significativa con la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en condiciones de saturación del horizonte en cuestión es la más relevante de las relaciones encontradas, ya que esta situación refleja adecuadamente las condiciones bajo las cuales tiene lugar el arranque. (Poesen y Govers, 1990).

Por otro lado, parece evidente que el aumento en contenido de humedad disminuye drásticamente la resistencia al esfuerzo cortante. Como la resistencia al esfuerzo cortante varía con la humedad, medidas directas en el campo pueden llevar a resultados erróneos. Por tanto, se recomienda realizar las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en condiciones de saturación. Dada la importancia de la humedad inicial se deduce también el interés de llevar a cabo las mediciones en campo de resistencia durante los periodos del año en los que los acontecimientos importantes de flujos concentrados tienen más probabilidad de ocurrencia (Poesen, 1993). En general, se admite que la resistencia al esfuerzo cortante disminuye al aumentar la humedad. Si se considera esta resistencia como un indicador de la susceptibilidad o resistencia a la erosión por flujos concentrados, cabría esperar que con mayor humedad, mayor erosión. Sin embargo, se comprueba en distintas experiencias de Govers y colaboradores con suelos francos en las que, cuanto menor es el contenido de humedad inicial, mayores son las pérdidas de suelo. Esta aparente contradicción se resuelve pensando en el fenómeno de fragmentación (slaking) que se da en diversos suelos cuando se humedecen súbitamente

Diversas observaciones revelan que la presencia de CaCO₃ en las fracciones de limo y arcilla de loess incrementan la susceptibilidad a erosión en cárcavas, lo que está en concordancia con observaciones realizadas por diversos investigadores (Peele et al., 1933; Barahona et al., 1990) (citados en Poesen 1993)

Moore et al. (1988) resaltan la importancia que en Australia tiene la humedad del suelo para la aparición de cárcavas efímeras. Los suelos pierden su resistencia conforme el contenido de humedad se aproxima a la saturación, y se desploman si ocurre filtración, formándose la cabecera de una cárcava. Los flujos concentrados evacúan el sedimento, comenzando la formación del canal. De todos modos, a partir de experiencias llevadas a cabo por dichos autores en pequeñas cuencas agrícolas del sur de Australia, y del análisis de los datos obtenidos en relación con diversos índices topográficos, se concluye que, tanto el contenido de agua del suelo como la potencia erosiva del flujo superficial tienen transcendencia en la determinación de la localización de cárcavas efímeras. El índice con el que obtuvieron mejor explicación del contenido de agua en el suelo es $ln(A_s)$, donde:

$$A_s = A/(bS) \quad (1.4.3)$$

siendo:

A = la superficie vertiente (m^2)

b = longitud de su frontera o contorno

S = pendiente

La mejor manera de explicar la aparición de cárcavas efímeras considerando sólo la acción de flujos concentrados se obtuvo mediante el índice A_b, S , donde:

$$A_b = A/b \quad (1.4.4)$$

Otra variable topográfica, $A_p = (A_b)^{0.4} \cdot S^{1.3}$, predijo de manera muy poco adecuada la localización de cárcavas efímeras. Moore y Burch (1986) demostraron que este índice A_p es proporcional al factor longitud-pendiente (LS) en USLE. La localización de cárcavas efímeras en la cuenca estudiada por Moore et al. (1988) fue bien predicha utilizando un índice topográfico compuesto, basado en las citadas variables $ln(A_s)$ y $A_b \cdot S$, lo que demuestra la influencia tanto de la humedad como de los flujos en la aparición de cárcavas efímeras. Además, comprobaron cómo los altos contenidos de agua parecen jugar un papel predominante en el control de la erosión por cárcavas efímeras en las posiciones alejadas de las principales vías de desagüe, mientras que dentro de éstas, la potencia erosiva del flujo parece controlar el proceso. (Moore et al., 1988).

Lentz et al. (1993) comprobaron que los procesos más intensos, tanto de acrecimiento como de degradación, ocurrían en las posiciones intermedias del canal que constituye la cárcava. Allí observaron una duplicidad de procesos, es decir, que erosión y sedimentación se producían en mismas zonas, dependiendo de la naturaleza de los eventos hidrológicos individuales. Los citados autores encontraron lugares en los que las cárcavas no se formaban en los mismos sitios de año en año, dentro de las mismas cuencas. De manera similar a Moore et al. (1988), los resultados obtenidos mediante el análisis de las relaciones entre parámetros topográficos y erosión en cárcavas, sugieren que la saturación puede jugar un papel relativamente importante en el desarrollo de cárcavas efímeras en el área estudiada. Dicha área tiene la peculiaridad de mostrar los máximos de erosión a comienzos de primavera, momento en el que una buena parte del perfil se encuentra helado. La permeabilidad de suelos helados es muy baja, por lo que el agua que se sitúa por encima de la capa helada satura el suelo e induce abundante flujo subsuperficial. Por tanto, es posible que la importancia de las zonas de saturación para explicar el origen de cárcavas efímeras se limite a áreas con suelos helados, o suelos con una capa de baja permeabilidad en las proximidades de la superficie del suelo. Lentz et al. (1988) utilizan diversos parámetros topográficos, ya considerados por Zevenbergen (1987) y Moore et al. (1988), para relacionar la magnitud de la erosión y depósito originada por cárcavas efímeras, cuyos resultados nos arrojan también alguna luz sobre aspectos importantes de la erosión en cárcavas efímeras. Dos asociaciones fueron consistentemente significativas para todas las localizaciones: el área de la sección transversal del canal, medida de la severidad de la erosión en cárcavas, se mostró correlacionada positivamente con la curvatura de los fondos de valles; en segundo lugar, la ocurrencia de depósito se encontraba correlacionada negativamente con la pendiente. Además, para dos de las tres cuencas estudiadas, la distancia al canal desde los distintos puntos de las mismas se correlacionaba negativamente con la curvatura del fondo del valle. Se emplearon distintas combinaciones de variables, en definitiva, diferentes modelos. La curvatura del fondo del valle fue común en todos ellos y abarcó una porción importante de la variación explicada en cada sitio. La inexistencia de una relación clara y consistente entre variables topográficas y erosión en cárcavas efímeras, hace pensar que los procesos hidrológicos que ocurren en diferentes cuencas son significativamente diferentes.

Habiéndonos ya referido con extensión al origen, nos ocuparemos ahora de cómo se desarrollan cárcavas ya originadas. Una vez que la erosión se ha iniciado por la escorrentía concentrada, se produce una retroalimentación positiva entre flujo y erosión que resulta en la canalización del flujo, en un principio ancho y poco profundo. Ello ocurre porque la depresión causada por la erosión inmediatamente captura más flujo, traduciéndose en una concentración de la potencia del flujo y en una mayor erosión, que vuelve a capturar más flujo, y así sucesivamente. Esta retroalimentación cesa, bien cuando el flujo disminuye al final del suceso de escorrentía o bien cuando el canal se ha agrandado hasta el punto en el que los contornos se estabilizan. Esta última condición se alcanza porque, mientras el canal se agranda, el gradiente de velocidades cerca de los bordes de la cárcava se reduce, de modo que el esfuerzo cortante en dichos bordes, que depende del gradiente de velocidad, disminuye hasta el punto de que cesa la incorporación de materiales (Thorne et al., 1986.) Por lo tanto, la cárcava requiere cada vez de eventos más excepcionales para su crecimiento.

Los principales acontecimientos que actúan en cárcavas efímeras son los de degradación (es decir, erosión) y los de sedimentación. Los procesos de degradación tienen lugar cuando la cantidad de sedimentos que sale de un determinado tramo es mayor que la cantidad que entra proveniente de aguas arriba. Los materiales provienen del lecho y de los laterales. En cárcavas efímeras, la degradación a menudo tiene lugar a través de la generación y avance de una cabecera. La degradación ensancha el canal de la cárcava mediante la erosión del lecho y de las paredes. (Thorne et al., 1986).

El desarrollo y migración de cabeceras tiene una gran importancia en la producción de sedimentos y en la evolución de cauces, y las cárcavas efímeras no han de ser una excepción. La migración de cabeceras puede ser responsable del 60% del total de la erosión en surcos en algunos suelos, según Elliot y Laflen (1993) (citado en Bennett et al., 1997). La erosión en cárcavas es frecuentemente el resultado de una migración aguas arriba de una cabecera (Piest et al., 1995), migración que a menudo desencadena la incisión de canales y acelera el derrumbamiento de taludes (Piest et al., 1977). La naturaleza del desarrollo y migración de cabeceras es todavía pobremente conocida. Por eso, trabajos como los de Bennett et al. (1997) son de gran interés. Dichos autores examinan la dinámica de cabeceras en flujos concentrados en un canal de laboratorio, diseñado para replicar surcos como los que se encuentran en tierras cultivadas. En sus experimentos, con caudal constante en cada prueba, después de un periodo inicial, se observó un estado de erosión en régimen permanente, invariable con el tiempo: la cabecera migraba a velocidad constante, y el tamaño del agujero de erosión no cambiaba apreciablemente, permaneciendo también relativamente constante la producción de sedimentos. Aumentando el caudal, el agujero se agrandó, pero la forma del mismo y la velocidad de la migración de la cabecera se conservaron.

Los procesos de sedimentación tienen lugar cuando la salida de sedimentos es menor que la entrada en un determinado tramo de una cárcava. Como consecuencia, el lecho se eleva conforme el exceso de sedimento es almacenado. A menudo ocurre después de una fase importante de degradación, comenzando en la parte inferior del sistema de cárcavas y progresando aguas arriba. Durante la sedimentación, la cárcava y sus afluentes pueden quedar rellenos con sedimentos. Bajo estas condiciones, la erosión por surcos y cárcavas y la erosión entre surcos puede quedar inhibida, pero las plantas y plántulas adyacentes a la cárcava pueden resultar cubiertas por sedimentos. Sedimentación y erosión pueden ocurrir simultáneamente en diferentes tramos de un determinado sistema de cárcavas. También se dan simultáneamente en tramos de una cárcava individual. (Thorne et al., 1986).

La pendiente de la cárcava tiene gran influencia en la ocurrencia de erosión o sedimentación y las zonas en las que éstas se darán. Si el perfil es cóncavo, lo más probable es que la sedimentación ocurra en el extremo inferior, a partir del punto en el que la carga de sedimentos supere la capacidad de transporte. Lo contrario es lo más probable en caso de pendiente convexa. Si la pendiente es uniforme puede haber o no haber depósito. (Foster, 1986). La sedimentación reduce la carga de sedimentos y elimina selectivamente partículas grandes y densas, por lo que el flujo resulta enriquecido en materiales finos. La zona de depósito puede ser una fuente de sedimentos para lluvias inmediatamente posteriores. Los sedimentos depositados se consolidan rápidamente en pocas semanas, y su resistencia a la erosión aumenta. Como los agregados a menudo constituyen la mayor parte de los sedimentos depositados, materiales finos y materia orgánica están disponibles para acelerar la consolidación. (Foster, 1982a)

Según Poesen et al. (1990), la forma de una sección de una cárcava efímera es controlada por una combinación de diferentes factores: los que determinan la anchura del flujo concentrado, como son la intensidad de la precipitación, el tamaño de la cuenca, el coeficiente de escorrentía, la rugosidad y la pendiente de la superficie y la morfología de la zona de flujo concentrado; los que determinan la intensidad

del flujo concentrado, como caudal y pendiente; los que determinan la resistencia del material del suelo al arranque y transporte, como por ejemplo la humedad, estructura y el perfil característico del suelo.

La pendiente de la ladera donde se encuentre la cárcava o, en definitiva, la propia pendiente de la cárcava, influye en la anchura, la profundidad y, por supuesto, en la relación anchura-profundidad (RAP) (Poesen, 1993). A su vez, todo esto se halla fuertemente influenciado por la resistencia a la erosión por flujos concentrados de los distintos horizontes. Por ejemplo, si no hay un horizonte resistente cerca de la superficie, la pendiente no parece afectar significativamente a la anchura, aunque sí muestra un efecto positivo sobre la profundidad y en consecuencia sobre la RAP. El citado autor, para las zonas estudiadas del centro de Bélgica, encontró que la profundidad se incrementa rápidamente por encima de una pendiente crítica de 0.03-0.04, que está en la línea de los resultados de Savat and De Ploey (1982) y Govers (1985) para surcos, aunque otros autores han encontrado resultados contradictorios (Schumm et al., 1987) (todos ellos citados en Poesen 1993). Si aparece un horizonte resistente a poca profundidad, la profundidad de la cárcava permanece pequeña, y la RAP es grande, incluso si la pendiente es también grande. En estos casos, si durante acontecimientos de lluvia moderados se da un flujo concentrado con suficiente poder erosivo sobre un suelo recientemente labrado o sobre un horizonte A no perturbado, se origina una incisión con RAP aproximadamente igual a 1. Una vez alcanza el horizonte resistente, el surco o cárcava se ensancha, aumentando grandemente la RAP. (Poesen, 1993).

La forma del canal resultante depende de la cantidad de escorrentía, de las propiedades del suelo y particularmente de la estratigrafía. Las características de la sección son consecuencia del equilibrio que se establece entre el flujo y las dimensiones del canal. Realmente, este equilibrio, si llega a alcanzarse, tiene muy corta duración. La cárcava se modifica casi constantemente por continuos periodos de escorrentía y por procesos subaéreos, como desecación y fragmentación (slaking), entre acontecimientos de escorrentía. El desarrollo inmediato de un sistema particular de cárcavas es impredecible porque depende de condiciones meteorológicas, impredecibles. (Thorne et al., 1986.)

Grissinger y Murphee (1989), para suelos poco cohesivos formados sobre loess, encontraron una relación entre pérdidas totales de suelo y escorrentía que sugiere una erosión limitada por transporte, en la que la disponibilidad de material parece ilimitada. Las cárcavas efímeras fueron responsables del 60% aproximadamente de esa erosión total. Esta afirmación se sostiene en la correlación entre pérdidas totales y escorrentía a partir de los ocho mayores eventos registrados en el periodo de observación (dos años) y durante el periodo de crecimiento del cultivo. Las pérdidas de suelo estaban significativamente relacionadas con la escorrentía, explicando alrededor del 96% de la varianza.

Probablemente, en cárcavas pequeñas como puedan ser las cárcavas efímeras, no se den derrumbes de paredes tal y como han sido estudiados en este escrito con anterioridad. Grissinger (1993) (comunicación personal) recalca la posible gran importancia de la caída de derrubios, difícilmente cuantificable, como consecuencia de periodos de humectación-secado, congelación-fusión, o ambas cosas simultáneamente, similar a la citada por los diversos estudios ya considerados de Bradford y Piest referentes a cárcavas permanentes.

Los sedimentos erosionados en canales y laderas son una mezcla de partículas elementales y de agregados, constituidos por un conglomerado de partículas elementales y materia orgánica. El tamaño de los agregados puede ser mucho mayor que sus partículas primarias, oscilando entre <0.002 mm y >0.02 mm, y sus densidades mucho menores que las de dichas partículas primarias (entre 1.6 y 2.65), lo que influye en el transporte de los agregados más que el diámetro. (Foster, 1982a). La fracción arcilla en el suelo es un importante factor en la agregación del sedimento erosionado y condiciona el tamaño del agregado. Cuanto mayor es el contenido en arcilla, mayor es la cantidad de sedimento que se encuentra en forma de agregado, y mayores son los agregados. Observaciones del proceso de erosión en suelos naturales durante tormentas simuladas indicaron que una gran parte del suelo transportado se movía por saltación y por rodamiento a lo largo del lecho de los pequeños canales. Estas observaciones indicaron que, una vez los agregados son arrancados de los suelos naturales cohesivos, su transporte es muy similar a los de los granos no cohesivos. En consecuencia, para el estudio del transporte de estos sedimentos sólo se consideran fórmulas de carga de fondo, mientras que se rechazan las de carga suspendida. (Foster y Meyer, 1972b).

De acuerdo con la teoría puesta de manifiesto por Foster y Meyer (1972a), un flujo con una gran carga de sedimentos será menos erosivo que un flujo con poco o ningún sedimento. Ello implica que un flujo importante con una gran carga de sedimentos puede tener mayor velocidad y no degradar su cauce en

comparación con un pequeño flujo con poco sedimento. Algunos autores han sugerido un aumento del arranque debido a la abrasión causada por el sedimento transportado, aunque hay pocas razones que hagan pensar que esto es de transcendencia en la erosión de suelo en zonas cultivadas. (Foster y Meyer, 1972a).

1.4.4. - CONTROL DE LA EROSIÓN EN CÁRCAVAS EFÍMERAS

En el trabajo de Laflen et al. (1985a) pueden revisarse los métodos y estructuras habitualmente considerados para el control de la erosión hídrica. Destacan los autores la necesidad de considerar, en general, el control de la erosión, no mediante una práctica aislada, sino mediante un sistema, un conjunto de medidas. Aunque en este apartado nos ocuparemos fundamentalmente de lo concerniente a erosión en cárcavas, la afirmación anterior es importante, pues los diferentes tipos de erosión están muy relacionados entre sí. Estas son las estructuras y los métodos estudiados en el citado trabajo: laboreo de conservación, rotaciones con encespedado ("sod-based rotations"), laboreo en curvas de nivel, cultivo en fajas, construcción de terrazas, revegetación de cauces (grassed waterways), conducciones de avenamiento enterradas (underground outlets) e implantación de cubiertas vegetales (vegetative cover). No todos estos métodos son igualmente útiles para la lucha contra la erosión por cárcavas efímeras. A continuación iremos ocupándonos de cada uno de ellos, aportando también datos al respecto elaborados por otros autores.

El laboreo de conservación ha sido definido como "cualquier secuencia de laboreo que reduce la pérdida de suelo o la escorrentía en relación con el laboreo tradicional" (Soil Conservation Society of America, 1982; citado en Laflen et al., 1985a). Los residuos del cultivo se abandonan sobre la superficie del suelo (Laflen et al., 1985b). Por casi nadie es discutido el gran potencial del laboreo de conservación para reducir la erosión laminar y en surcos en prácticamente todas las circunstancias. La efectividad de esta técnica depende del tipo de laboreo de conservación considerado y de la cantidad de residuos del cultivo que quedan disponibles para el control de la erosión (Laflen et al., 1985a). Giráldez et al. (1989) demuestran la gran potencialidad del laboreo mínimo para reducir la erosión en surcos y entre surcos en varios de los cultivos más importantes en entornos mediterráneos. Una excepción es la remolacha, debido a la casi nula cantidad de residuos que quedan sobre el suelo tras la cosecha. Otros resultados sobre el tema en ambientes mediterráneos pueden verse en Giráldez y González (1994), Arnal (1994) y Giráldez et al. (1997).

Foster (1986) afirma que el laboreo de conservación puede controlar satisfactoriamente el problema en los casos menos severos, aunque en otras situaciones son necesarias acciones de mayor envergadura: canales permanentes, encespedado o revegetación de los cursos de agua, o terrazas. En los casos más graves, indica, hay que acudir a estructuras permanentes adicionales tales como estructuras metálicas, de hormigón o roca, capaces de disminuir la altura de caída del agua de modo que no haya erosión y pueda así evitarse la transformación de la cárcava en cárcava clásica.

De Ploey (1988) explica cómo el no laboreo está ofreciendo unas interesantes perspectivas ante el grave problema de erosión que padecen zonas de loess del centro de Bélgica. Tras comprobar que las intervenciones más simples, como laboreo en curvas de nivel o cultivo en fajas no conseguían eliminar ni la erosión en surcos ni la causada por las cárcavas asociadas a taludes, técnicos y agricultores llegaron a la convicción de que un control eficiente de la erosión sólo podía llevarse a cabo aplicando laboreo de conservación. Experiencias piloto desarrolladas entre 1985 y 1988 indican que, aparentemente, la erosión por surcos desaparece completamente, mientras que la producción del cultivo ha sido igual o superior. El autor resalta la necesidad de completar estos estudios con datos de años posteriores, y con estudios económicos y edafológicos.

En la actualidad se están desarrollando gran número de estudios sobre la incidencia del laboreo de conservación, y de otras técnicas de mantenimiento, en las zonas agrícolas incluidas dentro del programa DEC (Demonstration Erosion Control) en el estado de Mississippi (USA), con el fin principal de reducir los preocupantes aportes de sedimentos a los ríos en esas zonas. Los suelos, sobre loess, son en general limosos y muy erosionables.

Como un ejemplo de estos estudios, con cultivo de soja en una cuenca experimental, el no laboreo redujo la evacuación de sedimentos en un 98%, y el volumen de escorrentía en alrededor del 10%, manteniéndose o incluso aumentándose las producciones (Dabney et al., 1997b). A pesar de controlar de manera muy importante la evacuación de sedimentos, el no laboreo no fue en ese caso suficiente para controlar la erosión por cárcavas efímeras. El cultivo en fajas con laboreo convencional fue menos efectivo que el no laboreo en la reducción de pérdidas de suelo, y tampoco bastó para detener el avance de cabeceras de cárcavas. La combinación de no laboreo con cauces revegetados fue la que más redujo la producción de escorrentía, y aparece como una medida de protección estable y sostenible. Por otro lado, la combinación de no laboreo con la instalación de barreras vegetativas, colocadas transversalmente a los cauces de cárcavas efímeras, permitió un cultivo sostenido, evitando la progresiva disección de la parcela por la progresión de cabeceras de surcos o cárcavas. (Dabney et al., 1997b). Otros datos de interés sobre el positivo efecto del laboreo de conservación en distintos cultivos en el norte del estado de Mississippi (USA) puede verse en Meyer et al. (1997) y Triplett et al. (1997).

Spomer y Hjelmfelt (1986) estudiaron específicamente la transcendencia del laboreo de conservación sobre la erosión causada por cárcavas efímeras. El trabajo se llevó a cabo en dos cuencas instrumentadas de 24 y 43 ha cerca de Treinor (Iowa), cultivadas continuamente con maíz durante los años previos a la experimentación. Los suelos, desarrollados sobre loess, son profundos y de textura franco-limosa. La topografía de las cuencas es ondulada, con pendientes del 4% en los fondos y zonas más altas, y hasta del 14% en las laderas. En 1984 la erosión por cárcavas efímeras se redujo ocho veces en la cuenca cultivada mediante laboreo de conservación con respecto a la cuenca cultivada con laboreo convencional, pasando de 17000 a 2000 kg/ha. Además, la producción total de sedimentos en las cuencas, a partir de datos de 13 años, se redujo siete veces al adoptar un laboreo de conservación. En base a estos 13 años de registros puede esperarse la aparición de cárcavas efímeras uno de cada dos años en la cuenca cultivada mediante laboreo tradicional, y uno de cada cuatro en la cultivada mediante laboreo de conservación.

Lafren et al. (1985b) aportan también datos de interés sobre el positivo efecto del no laboreo en el control de la erosión por cárcavas efímeras. Los autores describen un experimento desarrollado simultáneamente en un suelo franco y en otro franco-limoso en Iowa. Consistió en aplicar caudales conocidos de agua en los caballones de un cultivo de maíz, considerando tres manejos distintos: laboreo convencional (mold-board plow), labrado con chisel y no laboreo. Se controlaron las variables hidráulicas, el arranque de suelo por el flujo y la resistencia del suelo, considerada proporcional a la profundidad alcanzada al clavarse un cono metálico dejado caer sobre el suelo (fall cone index). La resistencia a la penetración medida con el citado cono fue más de cuatro veces mayor en el caso del suelo sometido a no laboreo en relación con los otros dos tratamientos, en ambos suelos. Las intensidades de arranque, también en ambos suelos, fueron siete veces menores para el caso de no laboreo en relación a los otros dos, y el esfuerzo cortante crítico fue el doble en comparación con los otros dos tratamientos.

Estos resultados confirman que el laboreo de conservación puede ser también de enorme utilidad para frenar la erosión por cárcavas efímeras. Si bien existe un consenso casi general en que el laboreo de conservación reduce grandemente la erosión, el efecto de esta técnica sobre la producción de escorrentía es más variado, habiéndose dado casos de poca o nula reducción. En consecuencia, los sistemas de conservación que incluyan laboreo de conservación, deben de incorporar componentes capaces de conducir la escorrentía a cauces sin que se produzca erosión (Lafren et al., 1985a).

Las rotaciones de cultivos que incluyen el establecimiento de praderas se denominan “rotaciones con encespedado” (sod-based rotations). Además, esta técnica no sólo reduce la erosión del suelo, sino que ayuda a mantener durante largos periodos de tiempo el nivel de materia orgánica. Hay algunos estudios que muestran que, cuando los costes del control de la erosión de suelo se incluyen como un coste de producción del cultivo, las rotaciones con encespedado pueden ser más rentables bajo ciertas condiciones que los cultivos continuos (Erwin y Washburn, 1981). (Lafren et al., 1985a). No se han encontrado referencias específicas a cerca de la transcendencia del uso de esta técnica en la erosión por cárcavas efímeras, pero es de esperar que su efecto será también positivo.

El laboreo en curvas de nivel, aunque suele ser muy útil en muchos casos, puede ser poco efectivo, o incluso contraproducente, bajo ciertas circunstancias, desde el punto de vista de la erosión. Generalmente, el criterio es que para lluvias que producen pequeños caudales de escorrentía, el cultivo en curvas de nivel es tremendamente efectivo. Cuando dichos caudales son altos, la efectividad de la técnica decrece. Además, en laderas largas, los surcos o caballones pueden llenarse completamente de agua, concentrando la escorrentía, y originándose en consecuencia considerable erosión por surcos y cárcavas efímeras, que

puede incluso incrementar la erosión con respecto a un laboreo convencional. El laboreo en curvas de nivel es una atractiva alternativa desde un punto de vista económico, pues no incrementa significativamente los costes, de acuerdo con algunos estudios llevados a cabo al respecto (Erwin y Washburn, 1981; Walker y Timmons, 1980). Es frecuente que esta técnica no sea suficiente por sí sola para controlar la erosión del suelo. (Laflen et al., 1985a).

Otra técnica a tener en consideración es el cultivo en fajas, que combina las ventajas del laboreo en curvas de nivel y las rotaciones con encespedado. Consiste en la alternancia de fajas de igual anchura pero ocupadas por diferentes cultivos, de modo que entre las distintas fajas haya al menos una encespedada o con un cultivo en desarrollo. En el cultivo en fajas puede usarse además laboreo de conservación. (Laflen et al., 1985a). Se dispone de poca literatura específica sobre la relación entre el cultivo en fajas y la erosión por cárcavas efímeras pero, aunque es esperable una importante capacidad de esta técnica para controlar dichas cárcavas, Dabney et al. (1997b) ilustra un caso en el que no fue suficiente la utilización de fajas de amortiguación (buffer strips) para paralizar el avance de cabeceras en un cultivo de soja en suelos limosos del norte del estado de Mississippi (USA).

El aterrazamiento puede ser una técnica muy útil para el control de la erosión, aunque su alto coste suele hacerla inviable en la mayoría de los casos hoy día. (Laflen et al., 1985a).

Habitualmente, el agua de escorrentía se conduce a las redes de desagüe mediante canales abiertos. Si estos canales no se hallan protegidos de alguna manera, existe el riesgo de que sean grandes aportadores de sedimentos. La erosión de esos cauces produce auténticas disecciones en las parcelas. Además, como consecuencia del aumento de pendiente debida a la degradación del canal, la erosión laminar y en surcos puede incrementarse grandemente en las parcelas adyacentes. Una solución adecuada muchas veces es confinar el flujo de escorrentía en cauces cubiertos de vegetación, no erosionables. El diseño de estos canales está bien definido (Schwab et al., 1981). Debido a la considerable erosión que tiene lugar aguas arriba de estos canales, y al depósito de sedimentos en los mismos, el establecimiento y mantenimiento de los cauces vegetados es difícil y costoso. Estos cauces ocupan una superficie considerable de suelo de cultivo, ocupación, que puede ser rentable, dándose casos en los que no es posible de otro modo la producción. (Laflen et al., 1985a). Como ya se ha citado anteriormente, para el caso estudiado por Dabney et al. (1997b), la combinación de no laboreo con cauces revegetados fue la que más redujo la producción de escorrentía, y aparece como una medida de protección estable y sostenible.

Las conducciones subterráneas de agua son una buena alternativa a los canales vegetados para conducir el agua a las zanjas principales de desagüe. Requieren un diseño, construcción y mantenimiento cuidadoso para operar con mínimo coste durante largos periodos. Se utilizan fundamentalmente para drenar agua de escorrentía acumulada (voluntariamente) en puntos de una cuenca, como terrazas, cuencos de control del agua y sedimentos, y zonas deprimidas de las parcelas. Como el agua es acumulada en áreas de encharcamiento, los caudales de escorrentía se reducen grandemente, ocurriendo además un importante depósito de sedimentos. Dado que el encharcamiento es temporal, sólo una pequeña parte del suelo útil queda improductivo. (Laflen et al., 1985a).

Otra técnica a considerar es la consistente en el establecimiento de cuencas de control de agua y sedimentos. Son estructuras colocadas en los cauces principales, en las que el exceso de escorrentía se almacena de manera temporal, generalmente sobre los propios cultivos, hasta que el agua acumulada es evacuada por las conducciones subterráneas. Estas estructuras están básicamente diseñadas para prevenir el acarcavamiento y favorecer el depósito de sedimentos erosionados, disminuyendo el daño ocasionado aguas abajo. Si el diseño no es adecuado, existe el peligro de desbordamiento por encima de las estructuras de acumulación, con el consiguiente riesgo de erosión. (Laflen et al., 1985a).

Muchas áreas dentro de las parcelas no pueden ser eficientemente cultivadas o, si lo son, resultan extremadamente susceptibles a la erosión. Esto ocurre por ejemplo en sectores de forma irregular, caminos de servicio, áreas de giro de la maquinaria en los extremos, o áreas con problemas físicos o químicos. En muchas de estas zonas la implantación de vegetación es un medio eficaz para controlar la erosión, permitiendo el acceso e incrementando la eficiencia productiva. Las áreas vegetadas son efectivos filtros de sedimentos. El establecimiento de una cubierta vegetal adecuada puede ser difícil en suelos con problemas físicos o químicos severos. (Laflen et al., 1985a).

El uso de geotextiles es una opción de interés que debería examinarse con más atención (Grissinger, 1996a). Otras medidas de control a considerar son la construcción de zanjas transversales en la ladera, y

de trampas vegetales que atrapen los sedimentos, del tipo a los sugeridos por Dabney et al. (1997a), donde pueden verse los resultados obtenidos tras la utilización de setos de hierba rígida (grass hedges) tanto en laboratorio como en campo. En general, las denominadas barreras vegetativas (vegetative barriers) son fajas estrechas de vegetación densa permanente, que se mantienen erguidas, y que se disponen a lo largo de las curvas de nivel, aunque atravesando las zonas de flujo concentrado, con la inclinación adecuada para permitir el laboreo. Los setos de hierba rígida (stiff-grass hedges) son una clase de barreras vegetales con potencial para reducir la erosión laminar, en surcos, y la causada por cárcavas efímeras. Combinada con no laboreo, tal y como se ha indicado, estas barreras han dado buenos resultados en el control de la erosión por cárcavas efímeras (Dabney et al., 1997b). Las citadas innovadoras combinaciones prácticas pueden ser implantadas con el equipamiento disponible en la mayoría de las explotaciones, y pueden recomendarse para su adopción por los agricultores (Dabney et al., 1997b).

Los setos de hierba rígida pueden ser continuos a lo largo de las curvas de nivel, o bien puede tratarse de barreras discretas localizadas sólo a lo largo de zonas con flujos concentrados. El mecanismo básico de actuación de estas estructuras es el depósito de sedimentos inmediatamente aguas arriba de la masa vegetal. Los setos no filtran en general el sedimento, pues los canalillos y orificios son relativamente grandes, sino que sólo los materiales gruesos, como residuos fibrosos de plantas, se atrapan por filtración propiamente dicha. La eficiencia en el apresamiento de sedimentos depende de la profundidad que alcance el flujo (que depende a su vez de la densidad del seto y del caudal), de la longitud del tramo de agua remansada por el seto, y del tamaño y densidad del sedimento. En parcelas de ensayo con lluvia natural, los setos capturaron hasta 2/3 del sedimento generado aguas arriba. Meyer et al. (1995), en ensayos en canales de laboratorio, mostraron cómo, con caudales entre 5 y 40 l/s y pendiente del 5%, la eficiencia en la retención de sedimentos fue superior al 90% para partículas mayores de 125µm, y alrededor del 20% en el caso de partículas menores de 32µm. En tamaños intermedios, la eficiencia disminuye al aumentar los caudales. (Dabney et al., 1997a).

En una parcela de 10ha en Panola County (Mississippi, USA), se plantaron en 1991 setos de hierba rígida con una especie perenne, adaptada a las condiciones del este de los Estados Unidos. Tras la plantación, y en 1996, se realizaron levantamientos topográficos detallados de la parcela. Aunque se trata de un periodo de tiempo relativamente corto, los cambios sufridos por la parcela son de importancia. Por debajo de los setos, se produjo erosión, y por encima, depósito de sedimentos, de manera que, en conjunto, tuvo lugar una disminución de la pendiente en el segmento cultivado entre dos setos. El depósito acelerado de sedimento en las zonas bajas de las cuencas dio lugar a una dispersión del flujo de escorrentía, reduciéndose las fuerzas que condicionan el avance de cabeceras. Los setos de hierba rígida dispuestos transversalmente a las laderas son una tecnología emergente que puede ayudar grandemente a controlar la erosión y evacuación de sedimentos. Pueden usarse como guía en el laboreo por curvas de nivel, capturan sedimentos, y disminuyen la longitud de las laderas, fragmentándolas, limitando el desarrollo de cárcavas efímeras. (Dabney et al., 1997a).

Según Govers y Poesen (1990), el control de las cárcavas efímeras puede en principio alcanzarse bien evitando la escorrentía incrementando la infiltrabilidad de los suelos, por ejemplo, o bien incrementando la resistencia de la capa más superficial. La primera solución puede alcanzarse de diversas maneras, como con la mejora de la estructura o con cubiertas de suelo. El subsolado profundo, propuesto por Fullen (1985) para romper la suela de labor en suelos franco arenosos no es recomendable en las laderas o depresiones donde el flujo superficial pueda concentrarse. Observaciones de campo en Bélgica central muestran que la destrucción de horizontes compactos conduce a un incremento en el riesgo de formación de cárcavas con $RAP \leq 1$ (Poesen, 1993). Para incrementar la resistencia pueden también emplearse diferentes técnicas, muchas similares a las explicadas anteriormente: compactación del horizonte superficial, uso de métodos de no laboreo, establecimiento de vegetación en los cauces de agua, o de caminos de acceso resistentes a la erosión en zonas de flujos concentrados. El éxito de la compactación como reductora de la erosión por cárcavas efímeras depende grandemente del contenido de humedad tanto en el momento de la compactación como en el momento de ocurrencia de la precipitación y flujo (Ouvry, 1987) (citado en Poesen y Govers, 1990). Estos autores opinan que probablemente la solución más eficiente para el problema en la zona sea la revegetación de los cauces, con el inconveniente de su alto coste.

1.4.5. PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS EFÍMERAS

Como se ha apuntado ya anteriormente, los métodos tradicionalmente usados para la estimación de la erosión hídrica, como USLE, no han tenido en consideración a las cárcavas efímeras, lo que puede en muchos casos llevar a una infravaloración de la magnitud de la erosión total en terrenos de cultivo. Se hace por tanto necesario desarrollar métodos predictivos capaces de estimar la importancia de este tipo de erosión. A continuación se describen algunos de los principales métodos disponibles, distinguiendo entre predicción matemática y basada en parámetros topográficos.

1.4.5.1. MODELOS MATEMÁTICOS

Un procedimiento empírico fue descrito por Thorne (1984) (citado en Foster, 1986). Propuso la siguiente ecuación, que puede ser ajustada a datos tomados de campo para determinar los valores de los parámetros y validar el método:

$$E = \alpha(F_f \cdot K_f(\phi - \phi_c)) \cdot C_f \quad (1.4.5)$$

donde:

E = intensidad de la erosión por cárcavas efímeras

α = coeficiente

F_f = factor de erosividad del flujo

K_f = factor de erodibilidad del suelo

ϕ = índice que define las áreas susceptibles de erosión por cárcavas efímeras

ϕ_c = valor crítico para ϕ

C_f = factor de cobertura del suelo

El planteamiento riguroso del problema implica ineludiblemente la solución de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad para el agua (ecuaciones de Saint Venant), y de la ecuación de continuidad para el sedimento. Una discusión sobre el tema se pospone al apartado siguiente, ocupándonos a continuación de la descripción de métodos que, aunque suponen una importante simplificación de las citadas ecuaciones, resultan de gran interés.

Hay dos ecuaciones fundamentales a la hora de estudiar la erosión por cárcavas efímeras desde este enfoque simplificado (Foster, 1986). La primera ecuación a considerar es la que plasma la teoría de que la intensidad de arranque depende de la fracción de la capacidad de transporte llena con carga de sedimentos y de la capacidad de arranque del flujo:

$$\frac{DR}{Dc} + \frac{G}{Tc} = 1 \quad (1.4.6)$$

$$DR = Dc \cdot \left(1 - \frac{G}{Tc}\right) \quad (1.4.7)$$

Donde:

DR = intensidad de arranque ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

Dc = capacidad de arranque ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

G = carga de sedimentos del flujo (kg/s)

Tc = capacidad de transporte de sedimentos del flujo (kg/s)

Esta ecuación indica que el flujo, en un punto en el espacio y en el tiempo, cuenta con una cierta cantidad de energía disponible para la erosión y transporte de partículas. Si la energía necesaria para el transporte se incrementa, la disponible para el arranque disminuye, con el correspondiente descenso en la intensidad

de arranque. En la ecuación 1.4.6, el cociente entre la carga de sedimentos y la capacidad de transporte, es decir, un término de energía relativa para el transporte, más el cociente entre la intensidad de arranque y la capacidad de arranque, término de la energía relativa para el arranque, son iguales a uno, la energía disponible total. En consecuencia, para un flujo concreto, la máxima erosión ocurre cuando al mismo llega poco sedimento, ya sea de las áreas adyacentes o de los tramos superiores del canal. (Foster y Meyer, 1972a).

La capacidad de arranque D_c se expresa habitualmente mediante la ecuación (Arulanandan et al., 1980; Foster y Lane, 1983):

$$D_c = K_c \cdot (\tau - \tau_c) \quad (1.4.8)$$

donde:

K_c = factor de erodibilidad del suelo del canal (s/m)

τ = esfuerzo cortante del flujo (Pa) en un punto espacio-temporal

τ_c = esfuerzo cortante crítico (Pa) ejercido por el flujo y requerido para arrancar suelo en un punto espacio-temporal

τ se calcula como un esfuerzo cortante medio con la expresión:

$$\tau = \gamma R S \quad (1.4.9)$$

siendo:

γ = peso específico del líquido (N/m³)

R = radio hidráulico (m)

La ecuación 1.4.6 se basa en diferentes observaciones que permitieron concluir que la intensidad de arranque o depósito en un flujo es una función de la diferencia entre la carga de sedimentos y la capacidad del flujo de transportarlos. Ello está en concordancia con la asunción de Einstein (Foster y Meyer, 1972a) según la cuál la intensidad de sedimentación es directamente proporcional a la diferencia entre la concentración de sedimentos en el flujo en un determinado lugar y momento y la concentración de equilibrio para esas mismas condiciones de flujo, lo que es equivalente a:

$$DR = C \cdot (Tc - G) \quad (1.4.10)$$

donde:

C = coeficiente con diferentes valores para arranque y depósito.

Reorganizando los términos de la ecuación anterior se llega fácilmente a la ecuación 1.4.6 (Foster y Meyer, 1972a).

Cuando $G > Tc$, el término G/Tc en la ecuación 1.4.6 se hace negativo, indicando sedimentación, que puede contabilizarse utilizando por ejemplo el método seguido en CREAMS (Foster et al., 1980):

$$DpRi = d_i (Tc_i - qs_i) \quad (1.4.11)$$

donde:

$DpRi$ = intensidad de sedimentación para la partícula de clase i (kg/(m².s))

Tci = capacidad de transporte para la partícula de clase i (kg/(m².s))

qs_i = carga de sedimentos para la clase de partícula i (kg/(m².s))

El coeficiente d_i viene dado por:

$$d_i = \frac{V_{si}}{q_w} \quad (1.4.12)$$

donde:

V_{si} = velocidad de caída de la partícula de clase i (m/s)
 q_w = caudal por unidad de anchura ($m^3/(s.m)$)

La segunda ecuación es la de continuidad del sedimento, que podría expresarse, para un flujo permanente y unidimensional, de la siguiente manera (Foster y Meyer, 1972a):

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_f \quad (1.4.13)$$

donde:

x = distancia a lo largo del canal (m)
 D_i = aporte de sedimentos desde las áreas planas adyacentes (kg/s.m)
 D_f = arranque o depósito de sedimentos en el canal (kg/s.m)

Esta ecuación presenta obviamente limitaciones, pero es suficiente para muchos análisis (Foster, 1986). Este autor propone una ecuación que identifica las principales variables que deberían de ser tenidas en consideración para desarrollar un método empírico capaz de estimar la erosión por cárcavas efímeras:

$$Dct = \beta \cdot Kc \cdot V \cdot As \cdot Cc \cdot \left(1 - \frac{z}{\beta \cdot A \cdot \phi \cdot s \cdot Cc} \right)^2 \quad (1.4.14)$$

donde:

f = coeficiente
 V = volumen de escorrentía expresado como una altura media sobre el área de la cuenca vertiente
 ϕ = caudal punta de escorrentía expresado como una altura media con respecto al área de la cuenca vertiente, por unidad de tiempo
 A = área de la cuenca desaguada por la cárcava efímera
 Cc = factor para las condiciones de la cubierta en el canal.

Acudiendo a métodos más basados en procesos físicos, el modelo CREAMS (Knisel., 1980) puede ser potencialmente utilizado para estimar la erosión por cárcavas efímeras, aunque requiere una gran cantidad de datos y tiempo de cálculo, por lo que no resulta práctico para su uso extensivo y en campo, como por ejemplo, en la elaboración del INR (Inventario Nacional de Recursos). Además, se necesita más investigación para determinar los valores de los parámetros en una variada gama de condiciones de campo. (Foster, 1986).

A partir de los métodos propuestos en CREAMS, Laflen y colaboradores desarrollaron un modelo más sencillo llamado EGEE (Ephemeral Gully Erosion Estimator). Las características principales del mismo pueden verse en Watson et al. (1986). Este modelo fue elegido por el SCS (Soil Conservation Service) para ser desarrollado y modificado de manera que pueda usarse generalizadamente. El programa modificado y adaptado fue llamado EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model) (USDA-SCS, 1992), y está llamado a ser la herramienta para la estimación de cárcavas efímeras mientras no esté apunto el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Flanagan y Nearing, 1995), que contempla las principales formas de erosión en terrenos agrícolas, tanto en laderas individuales como a nivel de pequeñas cuencas. Por ser el mayor esfuerzo vigente hasta el momento en cuanto a la predicción de cárcavas efímeras, se describen a continuación las principales características del modelo EGEM. La versión cuenca del modelo WEPP, que es la que contempla la erosión por cárcavas efímeras, se encuentra en fase de aplicación, aunque incipiente.

1.4.5.1.1. EL MODELO EGEM

EGEM proporciona estimaciones de erosión en cárcavas efímeras individuales consecuencia de eventos concretos de precipitación así como de pérdidas medias anuales. El modelo no considera pasos temporales, sino que trabaja con periodos definidos, sin subdividirlos, ni es distribuido, no estudia la variabilidad espacial. Consta de dos componentes fundamentales, la hidrológica y la erosiva. La cuenca de desagüe se representa por la intersección de dos planos donde la concentración de flujo y la erosión por cárcavas efímeras tiene lugar a lo largo de la línea de intersección (ver figura 1.4.1).

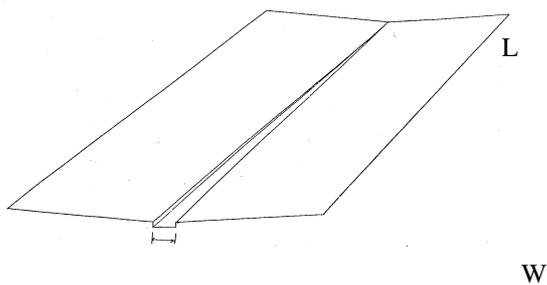


Figura 1.4.1. Representación de la cuenca de desagüe en el modelo EGEM. Se considera un estrechamiento progresivo de la sección transversal de la cárcava aguas arriba. (Modificado de Watson et al., 1986)

La primera componente calcula el caudal punta y el volumen de escorrentía, basándose en los procedimientos usados en el Engineering Field Manual del USDA-ARS (1988). Se supone que el caudal es directamente proporcional a la distancia con respecto al extremo superior del canal. Es en estos datos hidrológicos en los que se basa el modelo erosivo, en el que los procedimientos utilizados son simplificaciones de las utilizadas en CREAMS. El modelo procede a continuación calculando las llamadas “anchura de equilibrio” de la cárcava y la “anchura terminal” de la misma, ambas referidas exclusivamente al extremo aguas abajo. Estas anchuras se estiman mediante ecuaciones de regresión en base a caudal punta, coeficiente de Manning, pendiente longitudinal del cauce y esfuerzo cortante crítico del suelo del cauce. Dependiendo de la duración de la escorrentía, la cárcava, cuya anchura aguas abajo en el instante inicial es la anchura de equilibrio, podrá profundizar o no hasta la profundidad de la capa no erosionable que se supone existe en los terrenos de cultivo (suela de labor). Si dicha profundidad es alcanzada, la cárcava no se excava más, sino que se ensancha hasta alcanzar la anchura final, predefinida por las ecuaciones de regresión. La intensidad de arranque se calcula mediante la expresión 1.4.8. La figura 1.4.2. ilustra el proceso seguido.

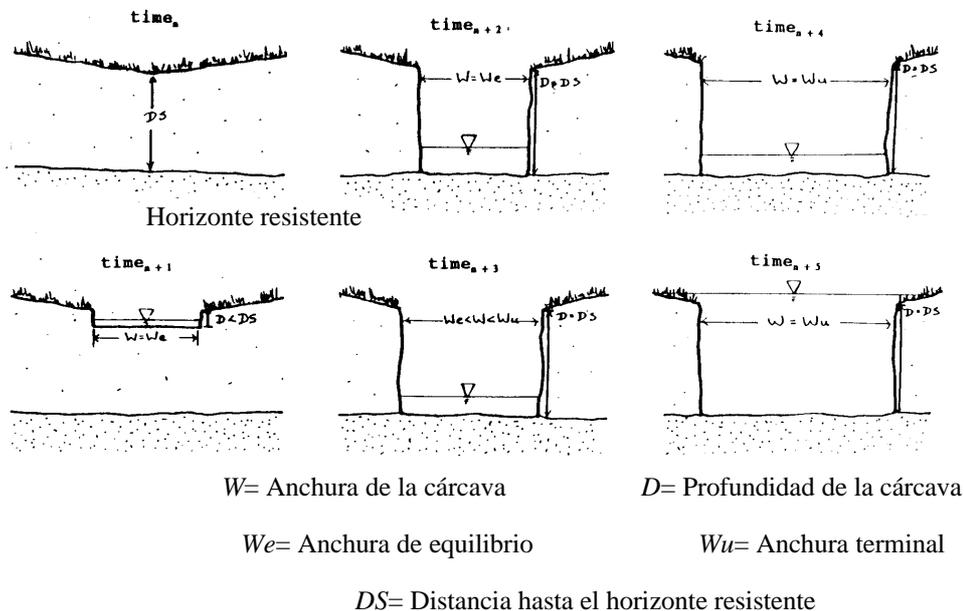


Figura 1.4.2.- Proceso de formación y desarrollo de una cárcava efímera de acuerdo con el modelo EGEM (modificado de USDA-SCS, 1992)

El modelo de erosión supone régimen permanente, pero, para estimaciones de erosión media anual, el año puede ser dividido hasta en tres periodos, representando diferentes condiciones de suelo y cultivo. Se supone que el caudal punta actúa sobre la duración del volumen de escorrentía. La erosión para cada uno

de esos tres periodos es entonces ponderada con el porcentaje del índice de erosividad anual de la lluvia para los meses asociados del año para estimar la erosión anual. El esfuerzo cortante medio se multiplica por un factor de 1.35 para representar el esfuerzo cortante máximo, que se da en el lecho del cauce.

La ecuación 1.4.6 se aplica a un instante en el tiempo, pero en EGEM se supone que es también válida para cálculos medios con respecto al espacio y al tiempo, modificándose:

$$\frac{Da}{Dca} + \frac{Ga}{Tca} = 1 \quad (1.4.15)$$

donde la letra *a* recuerda que se trata del valor medio (*average*) de las variables. *Da* es la masa de suelo arrancado (kg/m^2); *Dca* es la máxima capacidad de arranque (kg/m^2); *Ga* es la masa de sedimento transportado (kg/m^2) y *Tca* (kg/m^2) es la máxima masa de sedimento transportable. Se supone que durante el acontecimiento de escorrentía, todo el suelo arrancado en la cárcava efímera es transportado ($Da=Ga$). El modelo limita el arranque a la capacidad de transporte. Es decir:

$$Da = \frac{Dca \cdot TRCa}{Dca + TRCa} \quad (1.4.16)$$

La capacidad de transporte de sedimentos del flujo se calcula, al igual que en el modelo CREAMS, con la ecuación de Yalin. La capacidad de transporte de sedimentos se utiliza como un límite superior para la intensidad de arranque.

El modelo permite considerar la presencia de una capa de suelo no erosionable cuya profundidad debe de ser estimada a priori. La profundidad de la erosión se limita a 46 cm. Por encima de esa profundidad no son aplicables las ecuaciones para las cárcavas efímeras, pues se considera que el derrumbe de taludes y procesos de avance de cabeceras ocurren en cárcavas permanentes con profundidad mayor que esos 46 cm. No se contemplan directamente los incrementos de erosión potencial causados por procesos de congelación y fusión. El usuario puede ajustar los valores de erodibilidad, esfuerzo cortante crítico y número de curva para adecuarse mejor a dichas circunstancias. La erosión se calcula para una cárcava simple no ramificada dentro de una superficie de desagüe con flujo de agua intermitente. La erosión de los afluentes en un sistema de cárcavas ramificado se calcula por separado, individualmente. El suelo se supone uniforme y sometido a similares prácticas de cultivo en toda la longitud de la cárcava.

La cárcava se reduce conceptualmente a una sección transversal rectangular, cuya anchura se estrecha progresivamente en la dirección aguas arriba (ver figura 1.4.1). Se consideran valores únicos de *n* de Manning y de pendiente para toda la cárcava. La anchura *W* de la cárcava se calcula siempre para el extremo aguas abajo. Para las estimaciones de volumen total, se considera una sección media cuyo valor, a partir de los trabajos de Laflen, se estima en $0,664 W$, siendo *W* la anchura en el extremo aguas abajo. La profundidad de la cárcava se supone constante en toda la longitud. La pérdida total de suelo se contabiliza multiplicando el volumen vaciado por la densidad aparente del suelo. Se supone que la tormenta más copiosa de un determinado año es la causante de la cárcava, mientras que los eventos de menor relevancia previos o posteriores al citado evento principal no contribuyen al proceso de acarcavamiento.

La investigación usada para desarrollar el modelo incorpora típicas pendientes de terrenos de cultivo que provocan flujos supercríticos. Se considera que el agua que alcanza la cabecera de la cárcava es agua clara, sin carga alguna de sedimentos. Cuando la profundidad estimada del canal es 12 mm o menos, el modelo considera que la erosión es nula, ya que es probable que esté sucediendo sedimentación en el canal de sedimentos provenientes de erosión en surcos y laminar de zonas adyacentes del canal. Otros detalles sobre la estructura del modelo pueden encontrarse en Watson et al. (1986).

Entre otras limitaciones del modelo, la erosión causada por percolación, migración de la cabecera y derrumbes de taludes no son simuladas. La cuenca debe de ser hidrológicamente similar, capaz de ser representada por un número de curva. Los procesos de sedimentación no son simulados. El tiempo de concentración debe de ser mayor de 0.1 horas. La estimación de los parámetros de cultivos, suelo y clima se ve facilitada por ciertos datos disponibles a partir del trabajo de diferentes investigadores, reflejados en tablas. Esos datos, a falta de experimentaciones mucho más extensas, hay que tomarlos como simples orientaciones.

Se han llevado a cabo pocas validaciones, pero éstas indican un buen comportamiento del modelo para eventos concretos (USDA-SCS, 1992).

1.4.5.2.MÉTODOS BASADOS EN ANÁLISIS TOPOGRÁFICOS.

El empleo de métodos de análisis del terreno está siendo cada vez de mayor importancia en investigación sobre asuntos medioambientales (Grissinger, 1996b). Estos métodos permiten el examen de características y procesos espacio-dependientes y desarrollar relaciones causales o predictivas que son universalmente aplicables en diversos ambientes (Lentz et al., 1993). Parámetros como posición topográfica, orientación, pendiente, curvatura de la superficie paralela y perpendicular a la dirección de la máxima pendiente, longitud de la ladera que aporta agua, y un parámetro asociado con el área unitaria, han sido relacionados con propiedades del suelo en distintas localizaciones (Lentz et al., 1993). El tema está adquiriendo gran desarrollo, y los trabajos se suceden. Concretamente, con relación a cárcavas efímeras, Desmet y Govers (1995) realizan una comparación de los diferentes algoritmos para el escurrimiento, y de las implicaciones que tienen para la predicción de la localización de cárcavas efímeras.

Uno de los trabajos iniciales más interesantes es el de Patton y Schumm (1975), que comprobaron cómo para cárcavas discontinuas permanentes es posible establecer un umbral en base al binomio “pendiente del fondo del valle que se sitúa por encima de la cabecera de la cárcava” y “superficie vertiente por encima de dicha cabecera”.

Zevenbergen (1987) y Thorne et al. (1986) predijeron con cierto éxito la localización de cárcavas efímeras, aunque no el volumen y longitud de las mismas. La posibilidad de relacionar la erosión en cárcavas efímeras con índices topográficos sencillos permitiría realizar estimaciones relativamente rápidas sobre la importancia de este tipo de erosión en áreas extensas, bien a partir de datos medidos en campo, bien a partir de modelos convenientemente calibrados. Zevenbergen (1987) propone un índice que denomina *CTI* (Combined Topographic Index) para identificar los puntos de una cuenca en donde se dará la aparición de cárcavas. Este índice podría ser adecuado, ya que integra los principales factores que afectan a la erosión por cárcavas. *CTI* se define, para cada punto de una malla que abarque toda la superficie de estudio con densidad apropiada, como:

$$CTI=S*AREA*PLANC \quad (1.4.17)$$

donde:

AREA = superficie de la cuenca vertiente al punto en cuestión

S = pendiente del suelo en cada punto

PLANC= curvatura del fondo de la depresión en el punto estudiado

Así, considerando que el área se encuentra directamente relacionada con el caudal, el producto *AREA*S* sería una estimación de la potencia del flujo, a su vez directamente asociada a los procesos de arranque de materiales por flujos (Yang, 1977, citado en Zevenbergen, 1987). La incorporación de *PLANC* al índice garantiza el tener en consideración la curvatura, factor también implicado en la erosión en cárcavas. Para aplicar el método, en cada tipo de suelo, cultivo y clima es necesario definir un *CTI* crítico, por encima del cual comienza a producirse acarcavamiento. La indicación en un mapa de los puntos de la cuenca en los que se supera en *CTI* crítico permite localizar los tramos donde previsiblemente se situarán las cárcavas. Aplicando el método para casos concretos se localizaron adecuadamente diversas cárcavas efímeras, aunque en muchas circunstancias la longitud no era estimada con precisión (Thorne et al., 1986; Zevenbergen, 1987). Tampoco se predijo adecuadamente la magnitud de la erosión. Estas limitaciones se deben por un lado a que el *CTI* no considera los casos en los que, aunque la potencia del flujo sea importante, este flujo se encuentre cargado de sedimentos, de modo que dicha potencia no se dedica a arrancar nuevos materiales, sino, como mucho, a transportar los que ya existen en el flujo, produciéndose a veces incluso depósito. El *CTI* tampoco considera adecuadamente los fenómenos implicados en la cabecera de las cárcavas que, según diversos autores, no dependen de la pendiente general, sino de la magnitud de la caída del agua en dicha cabecera. Otra causa de error en la estimación de la erosión total

es el escaso éxito conseguido a la hora de estimar el área de las secciones transversales de la cárcava. Para ello, se intentó relacionar dicha variable con distintos índices topográficos, aunque el error cometido fue importante. Una conclusión aportada en consecuencia por los autores es la necesidad de contar con modelos basados en procesos físicos para poder contemplar más adecuadamente la complejidad presente en este tipo de erosión.

Lentz et al. (1988) utiliza diversos parámetros topográficos, ya considerados por Zevenbergen (1987) y Moore et al. (1988), para relacionar la magnitud de la erosión y depósito originada por cárcavas efímeras. Dos asociaciones fueron consistentemente significativas para todas las localizaciones. Primeramente, el área de la sección transversal del canal, que es una medida de la severidad de la erosión en cárcavas, se mostró correlacionada positivamente con la curvatura de los fondos de valle. Ello contrasta con los resultados obtenidos por Zevenbergen (1987), que obtuvo mayor significación en la correlación de la misma variable dependiente con el área vertiente. En segundo lugar, la ocurrencia de depósito se encontraba correlacionaba negativamente con la pendiente. Además, para dos de las tres cuencas estudiadas, la distancia al canal desde los distintos puntos de las mismas se correlacionaba negativamente con la curvatura del fondo del valle. Se emplearon distintas combinaciones de variables, en definitiva, diferentes modelos. La curvatura del fondo del valle fue común en todos ellos y abarcó una porción importante de la variación explicada en cada sitio. De todos modos, la inexistencia de una relación clara y consistente entre variables topográficas y erosión en cárcavas efímeras, hace pensar que los procesos hidrológicos que ocurren en diferentes cuencas son significativamente diferentes. No se intentó relacionar pérdidas globales con variables. Los resultados de estos autores sugieren que uno, dos, o incluso tres parámetros topográficos no son capaces de describir adecuadamente los procesos de erosión en cárcavas en variadas localizaciones. Igualmente, los parámetros topográficos en solitario no son capaces de predecir los efectos de la erosión en cárcavas efímeras sobre las propiedades del suelo en un determinado lugar. Estas afirmaciones concuerdan con las realizadas por Zevenbergen (1987).

Vandaele et al. (1996a) obtuvieron resultados esperanzadores utilizando los índices propuestos por Moore et al. (1988). En la región de loess del centro de Bélgica, las localizaciones en donde aparecen cárcavas efímeras pueden predecirse utilizando el producto $A_b \cdot S$ (ver ecuación 1.4.4), siendo S la pendiente longitudinal del terreno. Este índice es una medida de la erosividad del flujo concentrado. Por otro lado, para zonas cultivadas con suelos desarrollados sobre esquistos rojos en la región portuguesa del Alentejo, la erosión por cárcavas efímeras puede predecirse con una combinación del índice $A_b \cdot S$ y $\ln(A_p/S)$, índice este último que resulta ser una medida de la saturación del suelo. Estos resultados indican que la erosión por cárcavas efímeras en el caso belga estudiado es consecuencia fundamentalmente del flujo Hortoniano superficial, mientras que en Portugal, la saturación del suelo y las fuerzas de percolación relacionadas parecen ser el mecanismo dominante en la incisión. Estas conclusiones concuerdan con observaciones realizadas en campo en ambos casos.

De manera similar a como Patton y Schumm (1975) procedieron con cárcavas permanentes discontinuas, representando en papel doblemente logarítmico la pendiente longitudinal (medida inmediatamente aguas arriba de la cabecera) frente al área de la cuenca vertiente (en la cabecera) en áreas acarcavadas, (Vandaele et al, 1996a) pudieron dibujar una línea recta a través de los puntos más bajos de cada serie de datos correspondientes a distintos tipos de cárcavas y surcos. Puede asumirse que dicha línea representa una condición umbral entre lugares con y sin incisión. Esta línea puede también escribirse como una función potencial entre pendiente y área. El área de desagüe necesaria para iniciar cárcavas efímeras con una pendiente dada será lógicamente mayor para suelos bien cubiertos por vegetación. Además, la magnitud del acontecimiento de lluvia también afectará al acarcavamiento. Las relaciones área-pendiente del tipo a la expuesta pueden también aplicarse a otros tipos de erosión por flujos concentrados, como surcos, o a procesos erosivos desencadenados por pequeños deslizamientos de tierra. La posibilidad de identificar situaciones críticas de área-pendiente puede ser de mucha utilidad práctica a la hora de establecer medidas de lucha y protección contra erosión. Vandaele et al. (1996a) proponen un ejemplo en el que, en una determinada región del centro de Bélgica, se identifican las áreas en las que se sobrepasa el umbral área-pendiente. Estas áreas coinciden relativamente bien con la localización de las cárcavas realmente aparecidas.

1.5. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

A través de los anteriores apartados se han revisado los principales aspectos de la erosión por cárcavas. Ha quedado patente cómo la erosión por cárcavas efímeras puede ser de gran relevancia. Se trata de un fenómeno

poco estudiado todavía, del cuál no tenemos datos en nuestro entorno próximo. Diferentes autores, además, ponen de relieve la imperiosa necesidad de estudiar más a fondo los procesos involucrados de cara a conseguir un mayor conocimiento de los mismos, y a disponer de herramientas predictivas de utilidad. De acuerdo con esto, esta tesis se centra en el estudio de las cárcavas efímeras, con los objetivos siguientes:

1.- Mejorar el conocimiento de los procesos implicados en el fenómeno de las cárcavas efímeras, identificando los factores condicionantes clave, buscando un método de estimación adecuado. Ello se llevará a cabo mediante:

- Experimentación en campo, realizando mediciones y observaciones del origen y evolución de cárcavas efímeras.

- Desarrollo y análisis de un modelo de simulación basado en procesos físicos capaz de contemplar los principales aspectos implicados.

2.- Aportar datos capaces de ilustrar la importancia que la erosión por cárcavas efímeras tiene actualmente en un territorio concreto, como Navarra.

3.- Proponer medidas de control a partir del nuevo conocimiento adquirido.

4.- Proponer líneas de trabajo a seguir que aceleren el acercamiento al correcto conocimiento del fenómeno.

2. MEDICIONES Y OBSERVACIONES EN CAMPO.

2.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

La erosión de suelo en general y la erosión en cárcavas en particular son fenómenos muy poco estudiados en Navarra. Los mapas de erosión actual y potencial elaborados por el antiguo Instituto del Suelo y Concentración Parcelaria de Navarra, junto con el Instituto Geominero de España (Donézar et al., 1990a,b), y estudios similares de zonas no cultivadas de Navarra (Del Valle de Lersundi y Donézar, 1995b) son de gran ayuda a la hora de situar el problema. Además, recientemente se ha puesto en marcha un plan para realizar mediciones continuadas de diversas variables en cuencas agrícolas y ganaderas, entre ellas de la evacuación de sedimentos, plan que está comenzando ya a arrojar los primeros resultados (Del Valle de Lersundi y Donézar, 1995a).

Sobre margas azules, material de origen por excelencia en las Cuencas de Pamplona-Lumbier-Aoiz, hay frecuentes cárcavas allí donde el suelo ha sido previamente erosionado. Suelen presentar una sección en forma de “v”, y muchas veces su progreso origina la erosión de suelo en zonas adyacentes. Donde el sustrato es el flysch, las cárcavas excavadas sobre suelo pueden ser muy abundantes y de tamaño considerable, sobre todo si el suelo, bien por sobrepastoreo, fuego, cultivo inadecuado, o combinaciones de estos factores, ha sufrido una erosión importante. Las cárcavas en las margas y areniscas pueden ser también relevantes. Es el caso de extensas zonas del noreste de Navarra. Una proporción significativa de las Bardenas Reales muestra intensísimos procesos de acarcavamiento, con cárcavas muy grandes, convertidas en barrancos, además de una gran variedad de otras cárcavas de menor tamaño. Los suelos en esta zona son muy erosionables, con problemas de salinidad, presentando las lluvias una torrencialidad bastante acusada. Los procesos de sifonamiento son muy frecuentes. Bordeando las Bardenas se encuentran zonas de características edafológicas y climáticas similares, donde también son frecuentes las cárcavas.

A falta de estudios más pormenorizados, cabría distinguir en Navarra al menos dos zonas afectadas por erosión en cárcavas efímeras de manera importante:

1.- Parcelas cultivadas en la zona nororiental, pirenaica, de elevada pluviometría y pendiente, con cultivos como patata, que causan que el suelo quede muy expuesto durante periodos críticos de lluvias frecuentes e intensas.

2.- Extremo suroriental, con suelos sobre materiales del Terciario Continental (Unidad Ujué): sur de la Sierra de Ujué, parte de los términos de Pitillas, Santacara, Murillo el Fruto, etc., Bardenas.

En la Cuenca de Pamplona y zonas similares, la aparición de cárcavas efímeras no parece ser un fenómeno frecuente. Sin embargo, una lluvia intensa y abundante, con un periodo de recurrencia de la precipitación en 24 hr en torno a los 20 años, acontecida el 21 de enero de 1997, en condiciones de muy alta humedad en el suelo, produjo grandes y abundantes cárcavas efímeras, además de otros fenómenos erosivos. Ninguno de estos efectos ha podido ser evaluado más que de una manera cualitativa. Otra lluvia importante (entre 40 y 80 mm en unas tres horas) ocurrida a mediados de agosto de 1997 produjo efectos similares en los suelos que se encontraban desprotegidos, como los recientemente labrados. Quizás el problema sea de mayor importancia de lo que en un principio pueda parecer.

Es en la segunda de las zonas anteriormente enumeradas donde se encuentra el área de estudio en la que se realizan las observaciones y mediciones de este trabajo, concretamente, en el término municipal de Pitillas. Las condiciones que en ella se dan son similares a otras zonas del sur de Navarra, que es donde se han detectado los procesos erosivos de mayor importancia en dicha Comunidad. Lugares con características no muy diferentes al elegido como zona de estudio se presentan en otras regiones españolas, como Aragón. Se trata en general de áreas marginales desde el punto de vista agrícola. Su interés como área de estudio se justifica por diversas razones: la claridad y rapidez con que se desarrollan los fenómenos facilita su medición así como la investigación básica sobre procesos; son deseables más datos para justificar decisiones relativas a una mejor planificación de estos terrenos, ante la inminente política de abandono de tierras y ante problemáticas como la desertificación. Además se encuentra próxima a Pamplona y se dispone en ella de cierta infraestructura. Dentro del término de Pitillas, se ha elegido un área extensa incluida en la zona del Término que presenta más problemas de erosión y que

lógicamente corresponde a las localizaciones con mayor pendiente. En el siguiente apartado se incluye una descripción detallada del área de estudio. Los objetivos perseguidos en los trabajos de campo son:

- 1.- Identificar y describir los tipos de erosión presentes.
- 2.- Cuantificar la magnitud de la erosión por cárcavas efímeras.
- 3.- Describir los procesos implicados en el fenómeno de la erosión por cárcavas efímeras, tratando de identificar los factores clave condicionantes.
- 4.- Obtener datos que permitan relacionar las pérdidas debidas a cárcavas efímeras con índices topográficos de fácil adquisición, y discutir la validez y posible utilidad de dichos índices.
- 5.- Obtención de datos que permitan realizar de manera más adecuada análisis de modelos de simulación desarrollados para el estudio de cárcavas efímeras.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

2.2.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

En la figura 2.1 puede apreciarse la localización general del área de estudio. Dentro del término de Pitillas se distinguen al menos dos zonas, claramente diferenciadas: por un lado, las caídas de la Sierra de Ujué, cadena que constituye su extremo nororiental, con elevadas pendientes progresivamente decrecientes; por otro, los fondos próximos a la Laguna de Pitillas, laguna endorreica que se sitúa aproximadamente en el centro del Término Municipal. Las partes más bajas de las caídas, aún con pendientes importantes, se hallan mayoritariamente cultivadas, y en ellas aparecen problemas graves de erosión.



Figura 2.1.- Localización general del área de estudio.

La figura 2.2 ilustra, entre otros datos que se irán comentando, el área de observación elegida dentro del Término, que se inscribe dentro de la citada zona con problemas más acuciantes, incluyendo también zonas más llanas. Es un buen ejemplo, extenso, representativo de la mayor parte de los problemas que pueden darse en estos suelos. El área consta de dos subáreas (figura 2.2), correspondientes a una subcuenca completa (I) y a la parte superior de otra (II). La extensión del área I es de 79 ha, y la del área II, de 130 ha. El área II, en forma de circo, representa una transición muy brusca entre la zona alta de las “caídas”, con elevadas pendientes y semicubierta de matorral, y zonas casi llanas de cultivo. El límite sur de la subárea II es el camino (ver figura 2.2). La base sobre la que se ha realizado la figura 2.2 y otras similares es el mapa topográfico a escala 1:5000. Aunque no pueden apreciarse a simple vista algunos de los detalles que dicho mapa topográfico ilustra, se ha optado por mantenerlo como base por la adecuada visión de conjunto que proporciona.

Geológicamente, la roca madre está formada por arcillas y limos parduzcos y amarillentos, con intercalamientos de paleocanales de arenisca, materiales pertenecientes a la Unidad Artajona (Mioceno Continental Medio y Posterior). Una propiedad importante de estos materiales es su cierto contenido en sales sódicas, que se incorporan al suelo frecuentemente a través de procesos de meteorización, causando problemas estructurales en las zonas bajas debido a la dispersión de partículas de arcilla.

Geomorfológicamente podemos distinguir en toda el área de estudio tres tipos de posiciones, claramente diferenciadas. La primera, la zona superior, de elevada pendiente y suelos someros, cubierta parcialmente de matorral, donde afloran frecuentemente areniscas. Al pie de las laderas, en posición intermedia con los fondos, encontramos zonas de depósito de materiales situados superiormente en un principio. Algunas localizaciones no cultivadas de dichas zonas intermedias muestran procesos de erosión en cárcavas muy acelerados, sobre todo en sus zonas más bajas. Por último, encontramos los fondos, las zonas más deprimidas y más llanas, con suelos profundos y formados por acumulación de suelo proveniente de las posiciones más elevadas. Lógicamente, las características de los suelos varían según se sitúen en las distintas posiciones descritas, tal y como se verá en el siguiente apartado.

Tanto en I como en II, las partes más altas son de escarpadas pendientes (ver figura 2.2), se encuentran cubiertas de matorral, aunque muy poco denso, son frecuentemente visitadas por el ganado, y quemados de vez en cuando. El suelo es somero, pues se halla muy erosionado, abundando los afloramientos de areniscas. Como fenómeno erosivo destacable en estas zonas hay que citar a las cárcavas permanentes discontinuas, cuyo desarrollo está controlado por la presencia o ausencia de paleocanales de arenisca, que condiciona la excavación de lechos y paredes de cauces y el progreso aguas arriba de cabeceras.

Las zonas inferiores son generalmente cultivadas. El cultivo más frecuente es el de cereal de invierno (trigo y cebada). El laboreo es el tradicional, con diferentes modalidades, aunque últimamente se está introduciendo la siembra directa. Es frecuente dedicar parcelas al barbecho, año y vez. En época reciente, concretamente entre 1987 y 1988, se procedió a realizar en todo el término una concentración parcelaria, que incluyó modificaciones de importancia. Dos tipos de acciones son de especial relevancia en los citados trabajos de concentración: la ejecución de canales de desagüe (zanjas de avenamiento) y la modificación de tamaño y disposición de las parcelas. La excavación de canales de desagüe, que en muchos casos no han respetado la red natural de desagüe, ha desembocado en procesos de erosión activos en la cabecera de los mismos, convertidos en auténticas cárcavas permanentes grandes, y en intensos procesos de sedimentación en las zonas más llanas próximas a la laguna. La corrección de estos problemas, que amenazan la adecuada conservación de la reserva natural de la Laguna de Pitillas, situada justo en la desembocadura de las zanjales, está necesitando de cuantiosas inversiones. En la figura 2.2 puede apreciarse la disposición de los canales excavados.

2.2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS.

A continuación se describen las características fundamentales de los suelos del área. No se trata de un estudio detallado, sino un intento de aclarar las características más sobresalientes. Todos los datos provienen de la cuenca (subárea) I, pero es admisible

que las conclusiones fundamentales puedan extrapolarse sin grandes errores al área II, dada la inmediata proximidad y similitud geológica existente.

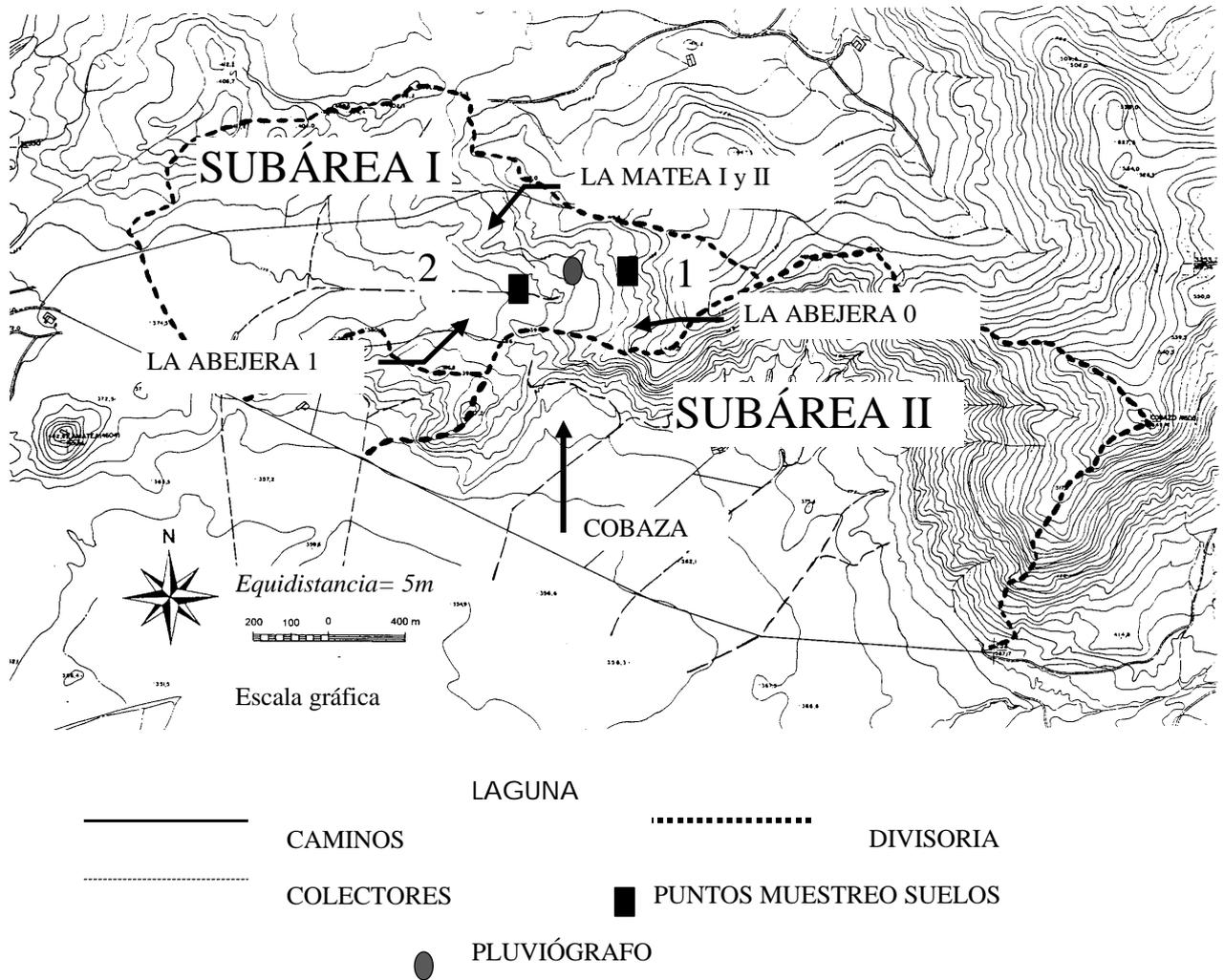


Figura 2.2.- Localización de las subáreas de estudio, del pluviógrafo y de algunos de los puntos de muestreo de suelos en el área de estudio.

En la subárea I pueden destacarse diversas pequeñas cuencas cultivadas. Se han escogido cuatro para el estudio de suelos, ya que es en ellas donde fundamentalmente se realizan las mediciones de erosión. Se trata de las cuencas que denominamos La Matea I y II, La Abejera 0 y La Abejera 1. La posición aproximada de las mismas dentro de la subárea puede verse en la figura 2.2, y su topografía detallada en las figuras 2.9, 2.11 y 2.13. En estas pequeñas cuencas se ha estudiado la textura, y en la Abejera 0 además el contenido en materia orgánica, SAR y conductividad eléctrica del extracto de saturación, todo referido al horizonte superficial del suelo. Esta limitación se debe a cuestiones presupuestarias y prácticas, y al hecho de que es éste lógicamente el horizonte de mayor interés para el estudio de la erosión. Se dispone además de datos aislados de otras localizaciones de la subárea, distintas de las citadas pequeñas cuencas, que completan la información. En las cuatro pequeñas cuencas se realizaron también mediciones de porosidad y densidad aparente del horizonte superficial. A continuación se exponen y se discuten todos estos datos. Finalmente, se discute también la

posibilidad de estimar algún parámetro hidráulico indicativo, como la conductividad hidráulica en saturación, a partir del conocimiento de la textura, proponiendo valores orientativos de los mismos.

La tabla 2.1 muestra los resultados del análisis textural (USDA simple) del horizonte superficial de los suelos de las cuatro pequeñas cuencas, distinguiendo en cada una de ellas tres localizaciones: superior, intermedia, inferior. Además se aportan valores de SAR, conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE) y contenido en materia orgánica (MO), también para el horizonte superficial, en los dos casos en los que el dato es disponible.

Localización	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla(%)	Clasificación	M.O.(%)	CE(mS/cm)	SAR
La Abejera 0 (superior)	32.1	44.97	22.92	FRANCA	1.1	9.53	9.01
La Abejera 0 (intermedio)	27.61	52.88	19.51	FRANCA	-	-	-
La Abejera 0 (inferior)	21.34	60.8	17.87	FRANCO-LIMOSA	0.98	53.9	32.5
La Abejera 1 (superior)	39.48	43.12	17.41	FRANCA	-	-	-
La Abejera 1 (intermedio)	35.63	48.81	20.55	FRANCA	-	-	-
La Abejera 1 (inferior)	30.73	55.6	13.67	FRANCO-LIMOSA	-	-	-
La Matea I-II (superior)	43.24	41.15	15.61	FRANCA	-	-	-
La Matea I-II (intermedio)	38.73	41.18	20.09	FRANCA	-	-	-
La Matea I-II (inferior)	41.6	43.94	14.47	FRANCA	-	-	-

Tabla 2.1.- Textura, contenido en materia orgánica, conductividad y SAR en las pequeñas cuencas de La Matea I-II, La Abejera 0 y La Abejera 1.

En la tabla 2.2 se pueden apreciar otros datos de textura referentes a La Abejera 1 (zona superior), que resultan ser muy similares a los expuestos en la tabla anterior.

Localización	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla(%)	Clasificación
La Abejera 1 (superior)	35.09	41.81	23.11	FRANCA
La Abejera 1 (superior)	35.99	41.95	22.07	FRANCA
La Abejera 1 (superior)	34.13	42.06	23.80	FRANCA

Tabla 2.2.- Textura en otras localizaciones de La Abejera 1 (superior).

Se dispone de otros datos que completan la información. Los datos de textura que se presentan en las dos tablas siguientes se obtuvieron con el criterio de ISSS (International Society of Soil Science), siendo posteriormente expresados de acuerdo con el criterio de USDA simple mediante interpolación, por lo que su clasificación textural es en principio de menor fiabilidad. En la tabla 2.3 podemos ver algunos datos referidos al punto de muestreo 1 (ver figura 2.2), en la zona superior de la subárea I. Puede considerarse representativo de las zonas altas no cultivadas tanto de la subárea I como de la II. La vegetación es la espontánea en la zona, siempre de escasa densidad, destacando diversas labiadas y alguna coscoja. En la tabla 2.4 se muestran resultados de propiedades de un suelo representativo de la localización intermedia entre la zona superior de matorral y la inferior más deprimida (punto 2, figura 2.2).

Horizonte	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación	M.O. (%)	CE (mS/cm)	SAR
0-30	35.2	62.6	2.2	FR. LIMOSA	4.2	3.21	1.26
30-50	19.0	50.7	20.3	FRANCO ARC. LIM.	1.3	1.78	0.609
>50	8.0	65.9	26.1	FR. LIMOSA	0.8	4.61	3.487

Tabla 2.3.- Propiedades suelos punto de muestreo 1.

Horizonte	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación	M.O. (%)	CE (mS/cm)	SAR
0-50	27.5	54.8	17.7	FR. LIMOSA	2.2	1.08	0.41
50-80	26.0	47.4	26.6	FR. ARCILLOSA	1.2	19.2	1.942
80-120	19.0	75.7	5.3	FR. LIMOSA.	1.6	28.2	26.31

Tabla 2.4.- Propiedades suelos punto de muestreo 2.

En las cuatro cuencas (La Abejera 0, La Abejera 1 y La Matea I-II) se realizaron también mediciones de densidad aparente y porosidad mediante el método del cilindro (Klute, 1986), diferenciando también (con la excepción de La Matea I-II, dadas sus reducidas dimensiones) tres posiciones: superior, intermedia, inferior. Los valores obtenidos se exponen en la tabla 2.5, en la que cada dato se refiere a la media de tres observaciones. Además, se incluye la conductividad en saturación estimada a partir de las ecuaciones propuestas por Rawls y Brakensiek (1989).

Localización	Densidad aparente (Kg/m ³)	Porosidad	K _s (mm/hr)
La Abejera 0 (superior)	1608.9	0.39	0.771
La Abejera 0 (intermedio)	1535.7	0.42	1.348
La Abejera 0 (inferior)	1611.6	0.39	0.371
La Abejera 1 (superior)	1481.8	0.44	4.953
La Abejera 1 (intermedio)	1538.7	0.42	2.187
La Abejera 1 (inferior)	1468.3	0.44	3.230
La Matea I-II (superior)	-	-	5.152
La Matea I-II (intermedio)	1526.3	0.42	2.857
La Matea I-II (inferior)	-	-	4.778
MEDIA	1538.7	0.417	-

Tabla 2.5.-Densidad aparente y porosidad medidas para los suelos de las cuatro pequeñas cuencas cultivadas y conductividad hidráulica en saturación estimada para los mismos de acuerdo con Rawls y Brakensiek (1989).

Los valores de conductividad hidráulica en saturación estimados para los suelos cuya textura se muestra en la tabla 2.2 (La Abejera 1 superior) son de 2.568, 2.943 y 2.277 mm/hr respectivamente.

A partir de los datos de las tablas 2.1 y 2.2, referidos a las tres pequeñas cuencas, podemos obtener algunas conclusiones.

En cuanto a la textura, se identifican claramente dos clases: franca y franco-limosa. La primera, en los suelos situados en las zonas superiores de las cuencas, y la segunda, en las zonas más deprimidas. Esta diferenciación sólo se aprecia en las dos cuencas mayores (La Abejera 0 y La Abejera 1), cuyos extremos aguas abajo, además, se encuentran en el fondo del valle. Por el contrario, las cuencas de La Matea I y II, más

pequeñas, se encuentran claramente por encima del nivel inferior del valle y por lo tanto, por encima de los niveles inferiores de las cuencas de La Abejera 1 y La Abejera 0. En esas dos últimas cuencas se produce un claro incremento en limo conforme nos referimos a las muestras de zonas más bajas. Todo esto está en concordancia con la disposición de los suelos descrita brevemente en el apartado anterior. El contenido en limo de estos suelos es alto, lo que, unido con la frecuente presencia de una estructura laminar, explica en parte la alta erodibilidad que evidencian estos suelos.

La citada diferencia en texturas de acuerdo con la posición tiene también transcendencia en lo que se refiere a parámetros hidráulicos, como conductividad en saturación (K_s). De acuerdo con Rawls y Brakensiek (1989), el valor de K_s esperable para suelos francos es del orden de 13.2 mm/h, mientras que para suelos franco-limosos se reduce a 6.8 mm/hr, por lo que cabe esperar que la conductividad en saturación sea menor para estos suelos. Aplicando las ecuaciones de regresión obtenidas por Rawls y Brakensiek (1989) con los datos de porosidad y textura medidos (tabla 2.5), se confirma esta misma tendencia para los suelos concretos de la zona. Según estas ecuaciones, los valores de K_s para las zonas superiores con suelos francos varían entre 2.2 a 5.1 mm/hr, y en las zonas inferiores, con suelos franco limosos, comprendidas entre 0.37 y 3.25 mm/hr. No hay que olvidar que estos datos son simples aproximaciones, y aspectos como la influencia del laboreo, presencia de costra o la existencia de estructura laminar tienen un drástico efecto sobre el comportamiento hidráulico del suelo. De hecho, algunas mediciones de conductividad en saturación realizadas en la zona superior de La Abejera 1 mediante infiltrómetro de anillos arrojan valores del orden de 20-60 mm/hr, en suelos labrados y con abundantes restos vegetales. Estas condiciones no pueden considerarse representativas de todos los suelos. Llama la atención lo elevado de las densidades aparentes, y en consecuencia, los bajos valores de porosidad medidos, algo alejados de las estimaciones que de ellos podrían hacerse de acuerdo con Rawls y Brakensiek (1989).

Ocupándonos de otros aspectos, podemos ver cómo el contenido de materia orgánica en la cuenca de La Abejera 0 es de alrededor del 1%, dato que puede ser muy similar al del resto de las cuencas, cultivadas. Los valores de conductividad del extracto de pasta saturada y SAR en La Abejera 0 ponen de manifiesto que nos encontramos ante suelos en los que la salinidad y la alcalinidad son problemas de mucha importancia. Los valores de estos parámetros aumentan de manera muy importante en la zona baja de La Abejera 0. Aquí, los cultivos presentan muchos años dificultades para desarrollarse, y se observa con frecuencia la presencia de plantas halófilas como *Salsola* y *Suaeda*. Efectivamente, junto con el elevado porcentaje de limo, la salinidad y la alcalinidad son las características más llamativas y determinantes de estos suelos. La acción del sodio produce estructuras muy débiles, frecuentemente laminares, lo que se encuentra también en relación con la facilidad con la que se forma costra superficial, de modo que la conductividad hidráulica en saturación es muchas veces un pobre indicador del comportamiento hidráulico. Todo ello explica la alta erodibilidad de estos suelos.

El suelo descrito en la tabla 2.3, correspondiente a la zona superior del área de estudio, no cultivada, presenta un contenido de materia orgánica mucho mayor en el horizonte superficial, con un color rojizo oscuro bien distinto de los de los suelos hasta ahora descritos. El tercer horizonte corresponde a la roca madre, margosa en este caso, poco alterada. Los valores de salinidad son en este suelo mucho más bajos que para los suelos de La Abejera 0, tal y como cabía esperar de acuerdo con su posición elevada. En cuanto al suelo de la tabla 2.4 (punto 2), podemos destacar que aparecen, sobre todo en profundidad, problemas importantes de salinidad. Otra propiedad de los suelos de esta

localización puede ser la cierta aleatoriedad en la distribución espacial de sus propiedades, incluido el contenido en materia orgánica, al estar originados por acumulaciones más o menos recientes. La vegetación en estas zonas es de mucha menor entidad que en la descrita anteriormente. Comparativamente con los datos del punto 1, el primer horizonte es menos arenoso y en conjunto más rico en materiales finos, lo que es lógico si consideramos que se ha formado por acumulación de los materiales situados en un principio por encima.

A modo de resumen, podemos decir que nos encontramos con suelos francos en las zonas altas, y franco-limosos en las bajas, todos ricos en limos, con graves problemas de alcalinidad y salinidad, mucho mayores éstos en las zonas deprimidas, con estructuras frecuentemente laminares, lo que ayuda a explicar que se trate de suelos extremadamente erosionables. Las densidades aparentes medidas son relativamente altas (entre 1470 y 1610 kg/m³ aproximadamente), y por lo tanto, las porosidades son bajas (0.39-0.44). Las conductividades en saturación estimadas oscilan entre 0.37 mm/hr para las zonas bajas y 5.1 mm/hr para las elevadas (valores extremos), aunque no puede pasarse por alto el importante grado de incertidumbre asociado a la estimación de este parámetro, ni la baja representatividad del mismo en zonas de costra. Aunque la zona no se corresponde estrictamente con lo que se denominan *bad lands*, de acuerdo, por ejemplo, con el Glossary of Soil Science Terms de la Soil Science Society of America (1975), podría decirse que las condiciones son próximas, tratándose de un *quasi-bad land* cultivado.

La extensión que, por ejemplo en Navarra, ocupan suelos que pueden calificarse como muy parecidos a los de la zona de estudio, puede obtenerse, a modo de dato orientativo, a partir del mapa de erosión hídrica en áreas no cultivadas de Navarra (Del Valle de Lersundi y Donézar, 1995b), que arroja una cifra aproximada de 10000ha.

2.2.3. DESCRIPCIÓN DEL CLIMA GENERAL DE LA ZONA

Las estaciones meteorológicas más próximas son las de Carcastillo-La Oliva, Olite y Beire, distantes 10.4, 11.0 y 5.6 km respectivamente, con largas series de datos. La estación de Carcastillo-La Oliva registra datos desde 1932, y la de Olite desde 1931. La estación de Beire, quizás la más representativa, estuvo en funcionamiento durante el periodo 1946-61. Por otro lado, en Carcastillo-La Oliva y en Tafalla hay estaciones completas automatizadas con registros desde enero de 1992.

En la estación de Carcastillo, la precipitación media anual es de 473.2 mm, siendo el mes de mayo el más lluvioso con una precipitación de 53.5 mm y el de julio el más seco, con 20.5 mm. En Olite, la precipitación media anual es de 524.8 mm. El mes más lluvioso es también mayo, con 60.1 mm, y el más seco igualmente junio, con 26.2 mm. Estos mismos datos para la estación de Beire son: 574.9, 84.9 (mayo), 30.3 (julio). La precipitación máxima en 24 horas (mm) para distintos periodos de retorno (Gumbel) en las estaciones de Carcastillo y Olite pueden verse en la tabla 2.6:

Estación	2	5	10	20	30	50
Carcastillo	41.4	56.2	66.0	75.3	80.7	87.5
Olite	40.9	58.0	69.2	80.1	86.3	94.1

Tabla 2.6.- Precipitación máxima (mm) en 24 hr en Carcastillo-La Oliva y Olite (Gumbel) para distintos periodos de retorno.

La temperatura media anual es de 13.1 °C para Carcastillo-La Oliva, 13.3°C para Olite, y 13.5 °C para Beire. Puede definirse el clima como mediterráneo continental. Otras características del clima en estos observatorios puede consultarse en Elías y Ruíz (1986).

2.2.4. DESCRIPCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO EN CAMPO.

El periodo de mediciones y observaciones comprende desde septiembre de 1995 hasta el momento actual, pero, dado que se procedió al seguimiento de terrenos cultivados con anterioridad a las fechas citadas, el periodo de interés en cuanto a datos meteorológicos comienza en octubre de 1994. Desde enero de 1996 se situó en la cabecera de la cuenca I un pluviógrafo (ver figura 2.2) que registra la precipitación cada minuto. Se desea este gran detalle al ser la intensidad un aspecto fundamental en el estudio detallado de la erosión. En las figuras 2.3 y 2.4 podemos observar la precipitación en las estaciones de Carcastillo-La Oliva durante los tres últimos años.

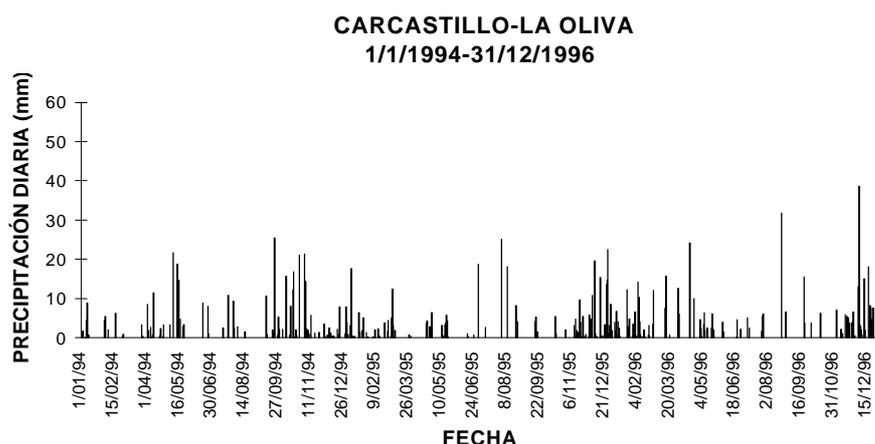


Figura 2.3.- Precipitación diaria en la estación de Carcastillo-La Oliva desde enero de 1994 hasta diciembre de 1996, ambos inclusive.

La precipitación total del año 1994 en Carcastillo fue de 397.8 mm, en 1995 de 377.5 mm, y en 1996 de 493.4mm. Por tanto, las precipitaciones de los años 1994 y 1995 son bastante inferiores a la media histórica, y la de 1996, ligeramente superior. La lluvia en 24hr registrada más importante es la del 5 de diciembre de 1996, con 38.6 mm, que no alcanza un periodo de retorno de 2 años.

En cuanto a la estación de Olite, la precipitación del año 1994 alcanzó 442.4mm, en 1995 fue de 392.5mm, y en 1996 de 483.3mm, en todos los casos, claramente por debajo de la media histórica. Destacan dos precipitaciones: la del 26 de julio de 1996, con 52mm, y la del 6 de diciembre de ese año, con 41.5mm. Estas lluvias corresponden a un periodo de retorno entre 2 y 5 años. En la figura 2.5 podemos ver las precipitaciones diarias recogidas en el pluviógrafo de Pitillas desde su instalación el 15 de enero de 1996 hasta el 31 de mayo de 1997.

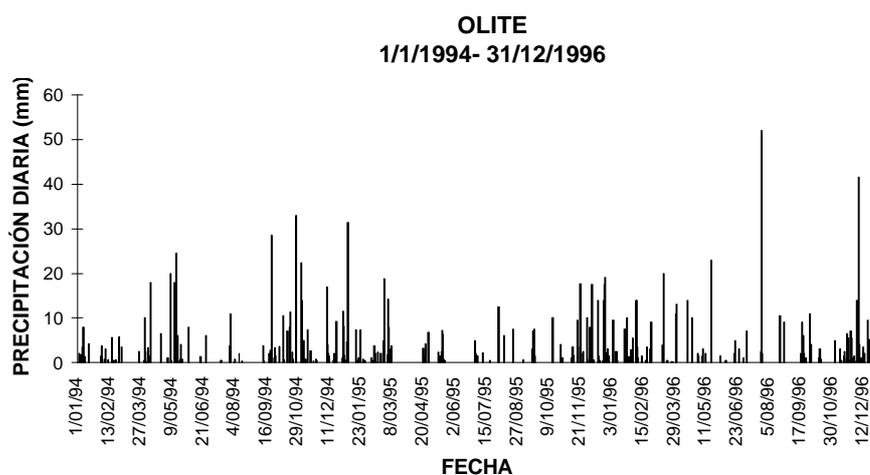


Figura 2.4.- Precipitación diaria en la estación de Olite desde enero de 1994 hasta diciembre de 1996, ambos inclusive.

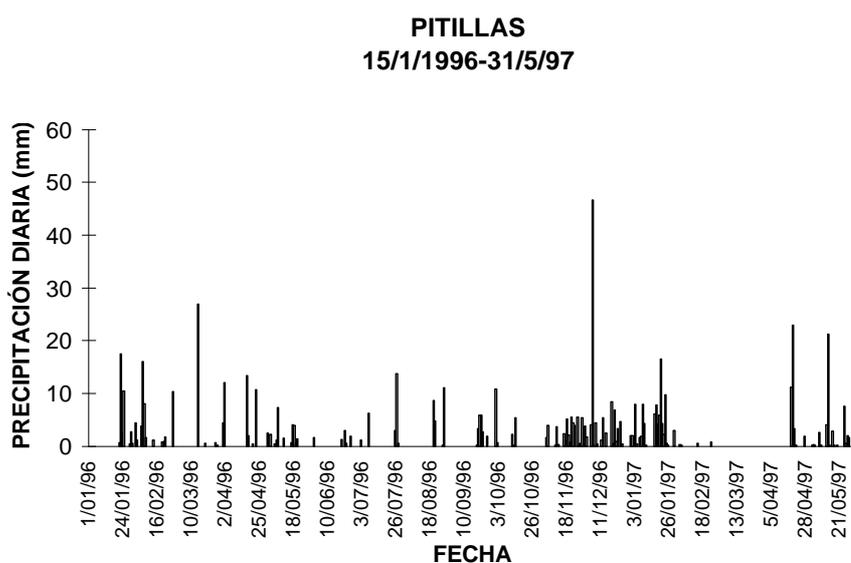
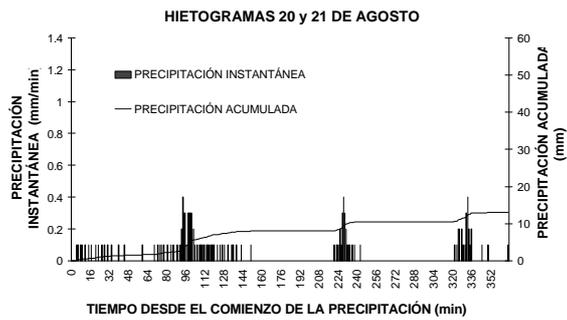
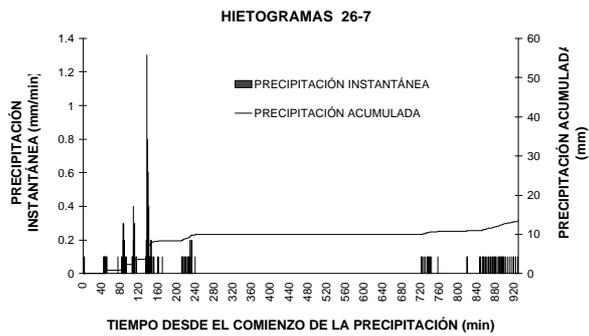
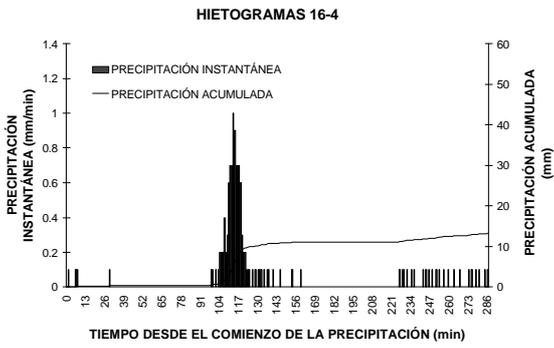
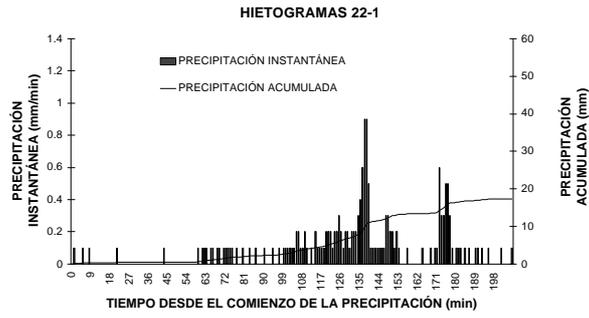


Figura 2.5.- Precipitaciones diarias (mm) registradas en el pluviógrafo de Pitillas desde el 15 enero de 1996 hasta el 31 de mayo de 1997.

La precipitación total del año 1996 (sin contar la escasa precipitación que pudo darse del 1 al 15 de enero, que no se registró), fue de 424.1mm, intermedia entre la Carcastillo-La Oliva y la de Olite, lo que resulta lógico, y que se sitúa por debajo de la media histórica tanto de Carcastillo como, por supuesto, de Olite.

Con el fin de obtener una visión de detalle de las lluvias acontecidas, en la figura 2.6 se ilustran los hietogramas de las principales precipitaciones registradas en Pitillas en el año 1996, entendiéndose por tales las superiores a 10mm/día y de intensidad apreciable.



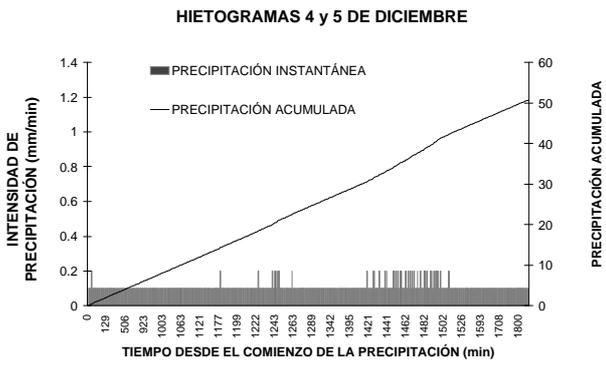
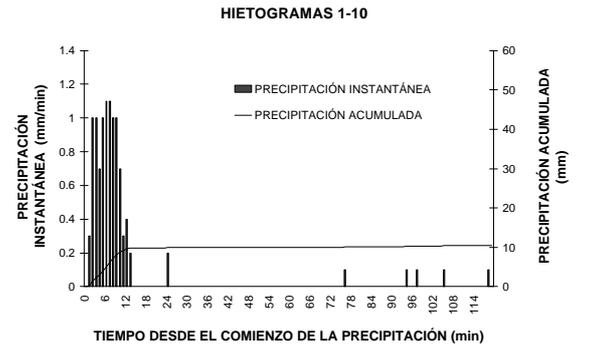
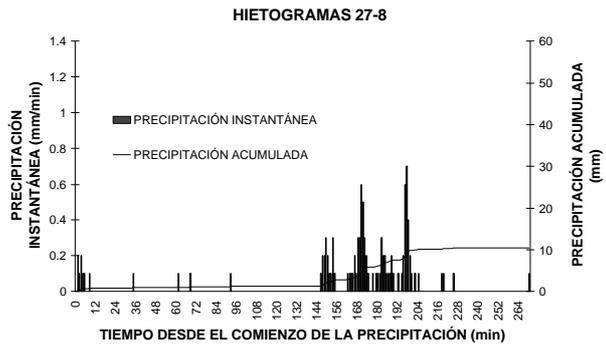


Figura 2.6.- Hietogramas de las principales precipitaciones registradas en el pluviógrafo de Pitillas durante el año 1996.

Con la excepción de la lluvia del día 5-12-96, que aportó 46.7 mm, hay que considerar poco importantes a los acontecimientos registrados en cuanto se refiere a volumen de agua recogido, aunque se han observado intensidades punta elevadas. Sólo la citada precipitación de diciembre de 1996 superó, aunque muy ligeramente, un periodo de retorno de 2 años. No se ha realizado una caracterización adecuada de las intensidades de precipitación de la zona, pues sólo hay registros continuados con pluviógrafo desde el año 1992, y con datos cada 10 minutos, de los que de momento no se dispone. De manera que, aunque contemos con datos de intensidad muy detallados en Pitillas, no pueden contrastarse.

Con estos datos, puede decirse que en la comarca de Navarra en la que se sitúa la zona de estudio, el periodo de observaciones ha sido en general poco húmedo, con muy pocas precipitaciones relevantes recogidas en 24hr, y claramente seco en el año 1995. Llama

la atención cómo las cantidades recogidas en los diferentes días de lluvia son, en muchos casos, muy distintas entre los tres observatorios. Ello pone de manifiesto una vez más lo imprescindible de contar con datos locales precisos a la hora de estudiar fenómenos detallados de erosión. En este contexto cabe decir también que el dato simple de la cantidad total recogida en 24 h, si bien puede ser de interés para estudios de erosión a escala de cuencas más o menos grandes, resulta un dato opaco para estudiar fenómenos locales.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. TIPOS DE EROSIÓN ENCONTRADOS EN LA ZONA: DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN.

En este apartado se citan, localizan y describen los tipos de erosión encontrados. En apartados posteriores se detallarán las mediciones y descripciones realizadas en diversas cárcavas efímeras, objetivo principal de este trabajo.

Las **cárcavas discontinuas** aparecen en las partes superiores, la ya descrita zona con matorrales, con suelos someros y abundante presencia de afloramientos rocosos. Son cárcavas cuyo desarrollo está condicionado por la presencia o ausencia en el cauce de paleocanales de arenisca, que controlan la migración de la cabecera (erosión remontante) a partir de un cierto nivel de base. Se les denomina discontinuas porque el cauce marcado es patente o no en función de la morfología del terreno (ensanchamiento o estrechamiento de las vaguadas), de la cubierta vegetal, de la pendiente, y de la presencia o ausencia de rocas. A través de estas cárcavas desaguan las áreas superiores, desembocando en terrenos de cultivo o, mayormente, en distintos tipos de colectores de avenamiento, principales o perimetrales. La pendiente es elevada y además, dada la abundancia de rocas, que a veces supera claramente el 50% de la superficie, y la escasa profundidad del suelo (muy degradado por siglos de pastoreo con fuego frecuente), la escorrentía puede ser importante. La abundancia de rocas y la presencia de vegetación favorece que la carga de sedimentos transportados por el agua que alcanza las zonas inferiores ser relativamente baja, hecho que incrementa el poder erosivo de estos flujos.

Las **zanjas de desagüe superficiales o colectores de avenamiento** excavadas durante los trabajos de concentración parcelaria, han sufrido unos procesos de degradación muy acelerados en sus cabeceras, mientras que en sus porciones finales, con baja pendiente, se ha dado la consecuente sedimentación, también de gran importancia. En el área de estudio hay 5 colectores principales (ver figura 2.2), que se inscriben en una red mayor, y que desembocan en la laguna de Pitillas. Sus desembocaduras quedan fuera del propio área de estudio, pero a una distancia de tan sólo algunos cientos de metros. La forma de la sección con la que los desagües fueron construidos es trapecial, con taludes de pendiente 1:1 y con una anchura de la base menor que oscila entre 0,5 y 1 m según los casos. Los colectores se encuentran absolutamente destrozados en sus cabeceras, por lo que están siendo reparados con una importante inversión, sobre todo por el peligro que para la laguna supone una fuente de sedimentos tan próxima. Estos colectores son un claro ejemplo del efecto que una errónea actuación puede tener. La modificación en terrenos tan erosionables de las condiciones de equilibrio naturales, como la red natural de desagüe, ha resultado ser muy perjudicial. Los colectores se han convertido en verdaderas cárcavas permanentes, lo que permite estudiar la evolución que seguirían

cárcavas permanentes naturales, cosa que resulta actualmente difícil en la zona, pues dichas cárcavas naturales se encuentran muy desarrolladas, en situación de casi equilibrio. En todos los colectores los procesos son similares. Sus zonas superiores reciben agua con mucha energía, dada la elevada pendiente de las cabeceras. El poder erosivo de estos flujos, como se ha comentado en el párrafo anteriores, se ve incrementado por el hecho de que el agua se incorpora relativamente poco cargada de sedimentos gracias a la presencia de vegetación y a la abundancia de rocas. Tras un primer tramo donde la erosión es aún discreta, la magnitud de los destrozos es mayor conforme nos desplazamos aguas abajo, debido a que el caudal es cada vez mayor. Alcanzado un máximo en el grado de erosión, ésta comienza a decrecer debido posiblemente a la combinación de dos factores. Por un lado, la disminución de la pendiente y por otro la saturación del flujo, con su capacidad de transporte llena. Finalmente, tiene lugar el depósito de estos materiales, que en general tiene lugar antes de alcanzar la laguna. La disposición descrita se ha establecido tras varios años con acontecimientos erosivos. Es obvio que para acontecimientos aislados importantes también se producirá una disposición similar, condicionada, claro está por la magnitud del acontecimiento. Es decir: podemos distinguir siempre con claridad una zona netamente de erosión, otra de depósito y otra de transición entre ambas.

Una consecuencia de la excavación del lecho y del ensanchamiento del mismo es la disminución de la estabilidad de los taludes de los desagües, pues aumenta su pendiente y su altura, explicándose así la abundante presencia desplazamientos de bloques. Son variados los mecanismos de movimientos de bloques detectados en los desagües, y difícilmente encajan en las descripciones aportadas por diversos autores, tratándose en muchos casos de procesos mixtos.

Más que los derrumbamientos, son más frecuentes movimientos de bloques que podríamos llamar desgajamientos. El tipo más frecuente encontrado se describe a continuación. El proceso comienza con la formación de una grieta en forma de arco a lo largo del borde del talud. La grieta puede ser muy gruesa y muy profunda, vertical, y cada vez aleja algo más al bloque así formado de la gran masa del suelo. Una vez desgajado, el bloque queda fuera de la posible influencia de los flujos subsuperficiales. A partir de aquí pueden darse diversas evoluciones: que el bloque adquiera además cierta inclinación de modo que su parte superior se haga inestable y caga al lecho; que quede el bloque más o menos intacto y vertical pero aislado. En ambas posibilidades flujos posteriores rodean al bloque completamente, que va desgastándose y desmoronándose. El resultado es la aparición de grandes muescas en forma de segmento circular, en cuyo fondo quedan restos del material que lo ocupaba, más o menos erosionado y rebajado en función de la antigüedad del desgajamiento. La circulación del agua va produciendo nuevos desgastes y derrumbes en el material desgajado. El proceso puede verse esquematizado en la siguiente figura 2.7. La distribución de estos fenómenos parece ser aleatoria en los desagües. La altura de talud necesaria para que se dé el proceso descrito es de alrededor de 1.9 m.

El derrumbe de bloques por caída súbita es raro, y más frecuente en la zona superior de los colectores. Una vez derrumbados o desplazados, los bloques no se desmoronan, o muy poco, sino que las partículas y agregados permanecen fundamentalmente cohesionados. Muchas veces los bloques obstaculizan el flujo, de modo que éste, cuando no es repentino y muy caudaloso, lo que hace es abrirse paso a modo de túnel. Si el caudal es muy grande, se produce un embalsamiento. Otras veces no son bloques enteros, fragmentos enteros de talud lo que cae, sino partes de los mismos que asoman y alcanzan mayor inestabilidad. En algunos casos aparecen socavamientos de la base del

talud que provocan unos derrumbes más complejos, pero son muy poco frecuentes. Se ha comprobado que no es en absoluto necesario el socavamiento para que se produzcan las grietas de tensión descritas. Es más: en la mayoría de los casos en los que hay socavamiento no hay grietas. Queda claro por tanto que pueden darse multitud de circunstancias diferentes.

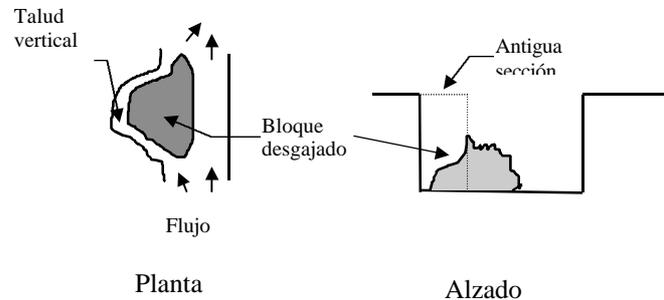


Figura 2.7.- Esquemización del proceso más frecuente de desplazamiento de bloques encontrado en los colectores de avenamiento erosionados de Pitillas.

Otra cuestión a dilucidar es el cuándo se producen los derrumbes: durante, después de las lluvias o en ambos casos. Probablemente se den todas las circunstancias, pero lo que es seguro es que hay derrumbamientos posteriores a las lluvias y a la circulación de caudales por los cauces, ya que son relativamente abundantes los bloques desplazados que permanecen intactos o casi.

Las grietas verticales aludidas son posiblemente grietas de tensión, del tipo al que, según Lohnes y Handy (1968), suelen aparecer en suelos aluviales limosos y en loess, suelos no muy diferentes a los que se dan en el área de estudio. De acuerdo con los citados autores, la causa de esta fracturación en planos verticales es en gran medida desconocida.

Otro fenómeno asociado, aunque no es un derrumbamiento, es la acumulación de materiales en la base de los taludes o en el propio lecho, materiales muy sueltos que se desprenden como consecuencia de ciclos de humectación-secado o congelación-fusión, etc. Lluvias muy ligeras después de largos periodos tiempo en los que estos materiales se acumulan, pueden evacuar gran cantidad de estos sedimentos que tienen muy poca resistencia a la erosión. Lluvias posteriores más importantes pueden arrastrar cantidades muy inferiores de sedimentos, ya que deberán de ser arrancados de la propia matriz del suelo. Bradford y Piest (1980) detectaron en Iowa este fenómeno, donde adquiría gran relevancia. En los colectores, la acumulación de este tipo de materiales resultaba evidente al final del verano.

Como puede verse, nos estamos refiriendo a un conjunto de fenómenos de extrema complejidad y muy poco conocidos todavía. Ello nos da idea de lo complicado que es el estudio detallado de la evolución de cárcavas permanentes o de bancos de ríos, bien mediante experimentaciones clásicas, bien mediante modelos de simulación. Lo que resulta evidente es la gran importancia que para la zona ha tenido la construcción del colectores de avenamiento, con la movilización en consecuencia de muchas decenas de metros cúbicos de suelo. La ejecución de este tipo de obras en zonas similares requerirá de estudios y diseños muy cuidadosos.

En la zona se aprecian diversas **cárcavas permanentes continuas** de origen natural. Son de grandes dimensiones y, como se ha indicado, se encuentran bastante estabilizadas. En otras zonas del Término existen otras muchas con mayor actividad.

Hay que destacar al sifonamiento como un proceso de gran trascendencia en el crecimiento de todas las cárcavas, dándose casos de túneles de varios metros de profundidad, en muchos casos de caída casi vertical. Gutiérrez et al. (1988, 1994) tratan en detalle sobre el fenómeno en el Valle del Ebro. Las cárcavas clásicas en el área de estudio, se limitan a las zonas de mayor pendiente con suelos de posición intermedia. Son de corta longitud, pues la cuenca que vierte en ellas es relativamente pequeña, y su pendiente disminuye súbitamente. El estado de equilibrio actual sólo se ve modificado por lluvias de alto periodo de recurrencia, capaces de crear un calado importante en el lecho actual, ancho e irregular. Derrumbes de los taludes, debidos al aumento de peso del suelo tras lluvias o al sifonamiento, cooperan también en una degradación, más lenta. Los materiales aportados al lecho por estos derrumbes serán arrastrados por posteriores lluvias. Abundan además cárcavas permanentes pequeñas, en muchos casos provenientes de la degradación de estructuras artificiales, como cunetas, bordes de caminos, y pequeños colectores perimetrales.

En los taludes de los colectores erosionados aparecen con mucha frecuencia **cárcavas asociadas a bancos** (Poesen y Govers, 1990), directamente relacionadas en su origen con fenómenos de sifonamiento. Algunas de ellas han sido eliminadas mediante movimiento de tierras. Su aparición y crecimiento están condicionadas por la disponibilidad de aportes de agua. Es conocido que resulta imprescindible un gradiente hidráulico crítico para que comiencen procesos de sifonamiento y acarreamiento lateral (Hagerty, 1991a,b). Sin embargo, ese aporte hídrico no es aparente en superficie, mientras que otras sí. Se da el caso de que varias cárcavas asociadas a bancos presentes en la zona aparecen justo en la desembocadura de cárcavas efímeras en el colector. Muestran un desarrollo muy acelerado en comparación con otras sin aporte superficial aparente. Distinguimos en definitiva en la zona dos tipos de cárcava asociada a banco: uno con evidentes pruebas de aporte superficial; otro que no evidencia dicho aporte. Si bien el origen puede estar muy condicionado por la sufosión (creación del tubo, derrumbe del mismo una vez alcanzado cierto tamaño y formación de cabecera, a veces), el crecimiento en general está condicionado por la circulación de escorrentía superficial (Poesen y Govers, 1990) lo que explica el mucho mayor desarrollo de las cárcavas asociadas a banco en las que vierte una cárcava efímera. De cualquier manera, y aunque no se han realizado mediciones, la importancia de las cárcavas asociadas a talud parece menor que la de las cárcavas efímeras, y mucho menor que la que se ha producido en los desagües por la erosión de los propios bancos y del lecho, apreciación que coincide con los resultados Poesen y Govers (1990) para Bélgica Central. La presencia de cárcavas asociadas a taludes hace más complejo todo el fenómeno de la erosión en cárcavas permanentes.

Recientemente, en cárcavas asociadas a taludes aparecidas en colectores, y con su crecimiento claramente favorecido por el aporte de cárcavas efímeras, el Gobierno de Navarra ha construido estructuras sencillas con el fin de frenar el avance de las cárcavas. En el talud erosionado del colector se han colocado mallas metálicas hechas con redondos de armadura, y el hueco correspondiente a la propia cárcava asociada al talud se ha rellenado con cantos rodados de unos 15 cm de diámetro. Aún no se han producido lluvias de importancia como para evaluar la utilidad de estas obras.

En las parcelas situadas junto a bordes de caminos o lugares en los que la pendiente cambia bruscamente, aparece un tipo de **cárcavas efímeras** que podemos denominar "*asociadas a discontinuidades*". A partir de esa discontinuidad, una vez generada la escorrentía, comienza un proceso de erosión remontante, originándose cárcavas de estructura frecuentemente ramificada, de localización puntual. Es interesante distinguir

este proceso del que se da en una cárcava formada en el seno de una parcela, donde la excavación comienza también por la acción de un flujo, pero sin discontinuidades. Es decir: llega un momento en el que, en el cauce constituido por la zona más deprimida de la propia parcela, el poder erosivo del flujo supera la resistencia del suelo. Las cárcavas asociadas a discontinuidades suelen ser relativamente pequeñas y se pueden eliminar mediante laboreo de manera sencilla, tienden a formarse en los mismos lugares cada año y, como se verá en el apartado 2.3.4, suelen alcanzar un tamaño tal, que el área de sus secciones transversales es superior al valor establecido por Hauge (1977) para distinguir entre surco y cárcava (0.093m^2). Estos datos nos hacen pensar que podemos considerar cárcavas efímeras a estas incisiones. Aunque ésa es la opción tomada en este trabajo, la discusión de si se trata de cárcavas o surcos no debe de considerarse cerrada. Dado que pueden ser de importancia, conviene llamar la atención sobre la necesidad de prevenirlas, procediendo a diseños minuciosos de los bordes de parcelas, evitando discontinuidades y saltos.

Además del propio manejo del suelo y de los movimientos de tierra que favorecen las discontinuidades, otras acciones indirectas humanas condicionan también de manera drástica la formación y crecimiento de cárcavas efímeras. Me refiero a las modificaciones de la red de desagüe, que causan aportes de agua a parcelas, y a la ubicación inadecuada de las mismas, de modo que algunas parcelas quedan colocadas en plena trayectoria de redes naturales de desagüe. En definitiva, estamos hablando de diferentes cárcavas en función de los diferentes orígenes posibles del agua. Podemos distinguir tres en la zona de estudio, que junto con las cárcavas asociadas a discontinuidades constituyen los tipos de cárcavas efímeras en los que se ha dividido el estudio. Así, nos encontramos con:

1.- *Cárcavas originadas por aportes de la propia cuenca que constituye la parcela.* Este último caso es el que generalmente constituye las cárcavas efímeras como tales, y es el que más detenidamente se estudia, también en este trabajo, de modo que se ha observado detalladamente las cárcavas de varias cuencas, tal y como se explica en el apartado 2.3.2.

2.- *Cárcavas originadas por aportes provenientes del desagüe natural de cuencas situadas aguas arriba de la parcela* (apartado 2.3.3).

3.- *Cárcavas efímeras originadas por el aporte de pequeños desagües artificiales en cabeceras de parcelas.* Aunque en el Término Municipal este tipo de cárcavas son importantes, en el área de estudio son despreciables, por lo que no se han tenido en consideración.

4.- *Cárcavas asociadas a discontinuidades.* En la zona de estudio se han identificado bastantes, y se ha procedido a su medición detallada. En el apartado 2.3.4 se estudian los resultados.

Es frecuente observar cómo los sedimentos movilizados por las cárcavas efímeras en general no abandonan siempre la parcela, sino que quedan depositados en las zonas inferiores de las mismas.

Agricultores aislados de la zona vienen aplicando por su cuenta algunas medidas correctoras para paliar el efecto de las cárcavas efímeras. En las parcelas más afectadas, algunos, alarmados, han introducido muy recientemente el laboreo de conservación. En casos en los que se da el segundo de los tipos de cárcava, hay quien ha optado por favorecer un pequeño embalsamiento del agua justo antes de la entrada en la parcela, con el fin de evitar dicho aporte. Si bien esta medida ha resultado eficaz con lluvias

poco importantes, no ha sido así con algunas más intensas o copiosas, que han provocando cárcavas al rebosar el agua por encima de la pequeña presa. En lugares donde habitualmente se forman cárcavas, ciertos agricultores construyen pequeños canales enterrados utilizando piedra arenisca plana que abunda en los alrededores, denominada en la zona “tosca”. Intentan, al parecer con bastante éxito, conducir subterráneamente hasta los colectores, de manera no erosiva, flujos que de otro modo circulan por la superficie del suelo formando cárcavas. Además, estos canales enterrados favorecen el avenamiento en estas zonas de frecuente acarcavamiento, que muchas veces coinciden con áreas en las que se producen encharcamientos, desempeñando una doble función. Muy poco se ha estudiado a cerca de la efectividad y rentabilidad de estas técnicas en la zona.

La erosión en **surcos** es también importante, aunque no se dispone de datos medidos, sino únicamente de observaciones visuales. En las parcelas sembradas de girasol en primavera tras labores que dejan el suelo muy suelto donde se aprecian casos acuciantes. También se aprecian con frecuencia en otoño, tras las primeras lluvias, cuando el suelo se encuentra en barbecho o con cereal poco desarrollado. La huella dejada por la sembradora, tanto en girasol como en cereal, es un claro factor de aceleración en la aparición de surcos en zonas con pendiente elevada. Tampoco se dispone de datos sobre la magnitud de la **erosión laminar**, pero incluso en zonas con pequeña pendiente hay evidencias de flujo laminar, con arranques y deposiciones, tanto en áreas cultivadas como no cultivadas.

Como un caso peculiar, hay que destacar en la zona, por último, la erosión, muy intensa, laminar, en surcos y en cárcavas, que ha tenido lugar en parcelas recientemente abandonadas. Se trata de zonas deprimidas, con graves problemas de salinidad, en las que la vegetación natural es halófila, con muy graves problemas de erosión incluso en pendientes suaves. La implantación de la vegetación natural es muy costosa, y los cultivos se desarrollan con mucha dificultad. Estas zonas abandonadas adquieren mayor interés considerando que extensas superficies pueden evolucionar de manera semejante en un futuro inmediato, si continua la tendencia favorable al abandono de ciertas tierras. Será necesario conocer mejor la dinámica de estos procesos y conocer las superficies afectadas con el fin de minimizar los posibles impactos.

2.3.2. 2.3.2 MEDICIONES EN CÁRCAVAS EFÍMERAS PROPIAMENTE DICHAS.

Tras identificar las cárcavas de este estilo presentes en el área de estudio, se realizaron levantamientos topográficos minuciosos de las cuencas que las originan y mediciones de la excavación producida en dichas cárcavas.

La forma de las secciones transversales de todas las cárcavas estudiadas en este trabajo se midió con precisión mediante un perfilador de 1 m de anchura (figura 2.8), siguiendo el método que Sancho et al. (1991) utilizan para la medición de surcos naturales. El perfilador consiste en 50 varillas metálicas dispuestas verticalmente en la sección cada 2 cm, de modo que dejadas caer libremente, sus extremos indican la forma de la sección transversal de manera precisa. Mediante dos niveles de burbuja se garantiza la correcta colocación del aparato. En gabinete, mediante hoja de cálculo o programa sencillo, una vez tomada una fotografía del suficiente número de secciones transversales en cada cárcava y conocida la separación entre las mismas, se procede a la estimación del área de cada sección transversal y del volumen total excavado. Este procedimiento permite la medición de la excavación principal, aunque en algunos casos no cubre toda la excavación que podríamos denominar secundaria, que puede abarcar más de 1m. El perfilador ha sido diseñado de modo que puede seguirse con detalle la evolución de la erosión en surcos y cárcavas a lo largo del tiempo, repitiendo mediciones en mismos lugares, convenientemente fijados y localizados (Benito et al., 1992).



Figura 2.8.- Perfilador para la medición de las secciones transversales de cárcavas.

Las cuencas en las que se localizan las cárcavas tienen por nombre Cobaza, La Abejera 0, La Abejera 1, La Matea I y La Matea II. En la figura 2.2 podemos ver la localización de las mismas en el área de estudio. La divisoria que delimita el área vertiente a cada cuenca queda a menudo condicionada por la presencia de colectores que rodean perimetralmente a las parcelas, lo que explica que a veces la situación de dicha divisoria no se rija por criterios estrictamente topográficos. Los detalles sobre cuencas y cárcavas se estudian a continuación.

La cuenca de **La Abejera 0** tiene una extensión de 1.74 ha, y se halla inmersa en una parcela de forma y pendiente irregular, como puede apreciarse en el mapa adjunto (ver figura 2.9). Fue labrada con vertedera y sembrada en la primera semana de octubre de 1994, y cosechada en junio de 1995. Se mantuvo en barbecho desde entonces hasta octubre de 1996, cuando fue nuevamente sembrada siguiendo las técnicas convencionales en la comarca. Previamente, en abril de 1996, fue labrada de nuevo, lo que causó la desaparición de la cárcava presente. En buena parte de la parcela las labores se realizaron en dirección de la máxima pendiente, ya que es costumbre laborear “a vueltas”, siguiendo trayectorias más o menos concéntricas. Por tanto, si el laboreo es “a vueltas”, la forma alargada de la parcela favorece el laboreo en dirección de la máxima pendiente. La cárcava que se formó en la parcela fue medida el 13 de enero de 1996, habiéndose recogido unos 550 mm de precipitación desde la última operación de labrado hasta la medición, lo que cubre un periodo de dieciséis meses aproximadamente.

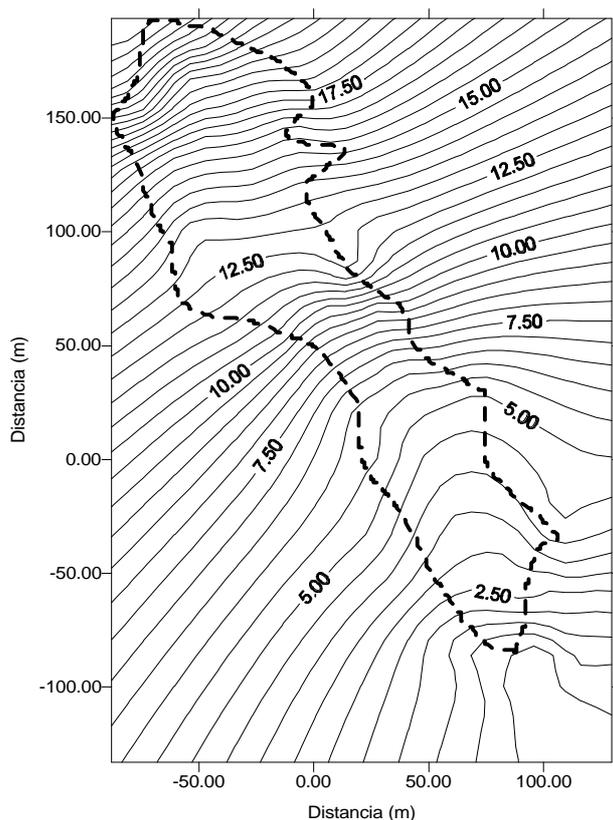


Figura 2.9.- Plano de la cuenca La Abejera 0 mostrando la divisoria aproximada.

Las pérdidas totales contabilizadas mediante el método descrito suman 5.5m^3 , lo que, considerando una densidad aparente de 1600 Kg/m^3 (tabla 2.5) suponen 8800 Kg . De acuerdo con la extensión de la cuenca, hablamos unas pérdidas de $0,5\text{ Kg/m}^2$ en el periodo de dieciséis meses considerado, o de $0,38\text{ kg/m}^2/\text{año}$. Se trata de unas pérdidas de importancia, teniendo en cuenta que el periodo ha sido seco y sin lluvias copiosas, aunque la intensidad de las mismas es desconocida. Como se comentará en apartados posteriores, las pérdidas más importantes en la zona tienen lugar a finales del otoño y comienzos del invierno, con suelos húmedos y casi desnudos. En consecuencia, es muy probable que esta cárcava se origine en diciembre de 1994 ó enero de 1995, periodo en el que se dieron lluvias apreciables (ver figuras 2.4 y 2.5). El perfil longitudinal de la cárcava puede apreciarse en la figura 2.10.

Podemos destacar en la cárcava cuatro tramos en lo que se refiere a pendiente: un primer tramo (0-S1) bastante llano (pendiente del 0.9%), donde tiene lugar una importante sedimentación, en forma de cono de deyección. Es el único lugar en el que se aprecia claramente sedimentación, aunque, tal y como afirman Thorne et al. (1986), al darse cambios de pendiente y de cubierta del suelo, cabe esperar que en la misma cárcava haya zonas de erosión y arranque, y zonas de sedimentación en un mismo episodio.

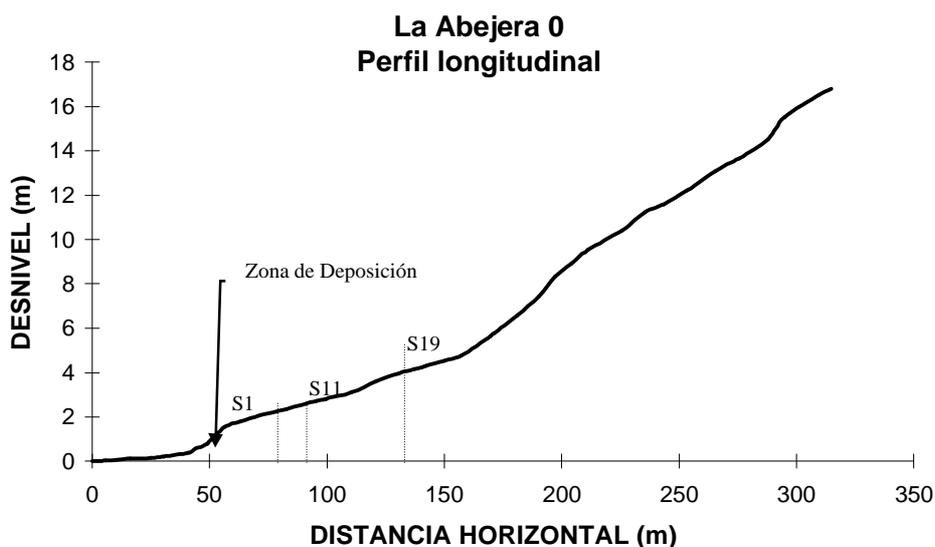


Figura 2.10. Perfil longitudinal de la cárcava de La Abejera 0, indicando la localización de las diferentes secciones transversales medidas.

A continuación, se sitúa una zona de elevada pendiente (7.7%) y de unos 16 m, en la que la cárcava muestra las mayores anchuras y profundidades de toda la parcela. El suelo aparece desnudo, y al igual que en la zona de sedimentación, la salinidad es elevada. Sigue un tramo de unos 40m de longitud (S11-S19) con pendiente media del 3.7 % y un grado de erosión menor. El último tramo, el superior, (S19 al final), cuyas secciones no fueron medidas, de nuevo con pendiente importante (7.7%) y 145 m de longitud, muestra una cárcava poco profunda, en la que la presencia de vegetación o restos de la misma es muy importante. En algunos segmentos de este último tramo es difícil apreciar el curso de la cárcava. Teniendo en cuenta que las pérdidas en esta parte superior no fueron medidas, la cifra aportada debe considerarse como un valor mínimo aproximado. En todos las localizaciones de la cárcava, la magnitud de la erosión disminuye drásticamente en las zonas en las que hay alguna presencia de cultivo o restos vegetales. En la figura I.1.1 (anejo I) pueden verse los perfiles transversales de las secciones medidas.

Las cuatro cuencas a las que me voy a referir a continuación (Cobaza, La Matea I, La Matea II y La Abejera 1) han tenido un sistema de manejo muy semejante. A excepción de la cuenca de Cobaza, que fue labrada con vertedera, todas fueron labradas con chísél y sembradas la primera quincena de octubre de 1995 con cereal de invierno, de acuerdo con las técnicas tradicionales de la zona. Dada la forma poco alargada de las parcelas, el laboreo “a vueltas” no se tradujo a penas en este caso en laboreo en dirección de la máxima pendiente. Las cárcavas que aparecieron en estas cuencas se midieron a finales de agosto de 1996, habiéndose dado hasta entonces, y desde el momento del último labrado, una precipitación en la zona de unos 400 mm. Las figuras 2.11, 2.12 y 2.13 muestran la topografía de las cuencas y la posición aproximada de las divisorias y de las cárcavas.

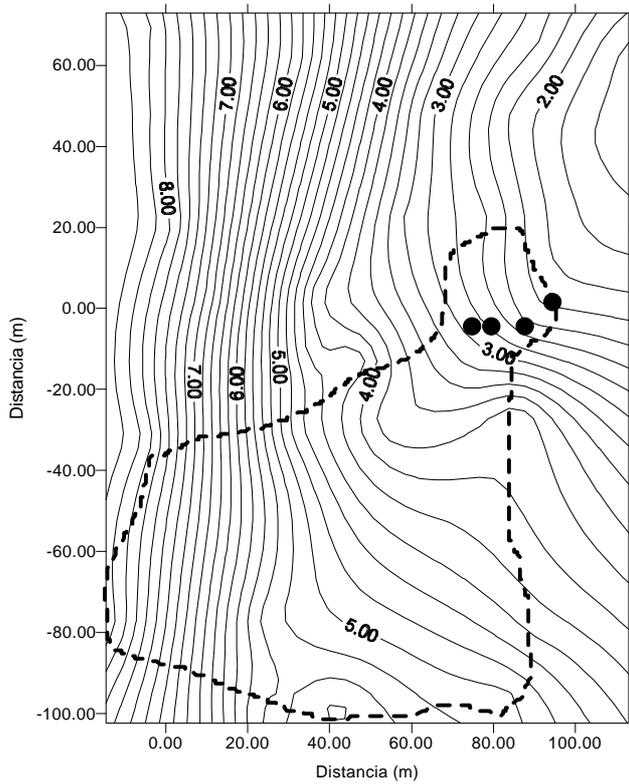


Figura 2.11.- Plano de la cuenca La Abejera 1 mostrando la posición aproximada de la divisoria y de la cárcava.

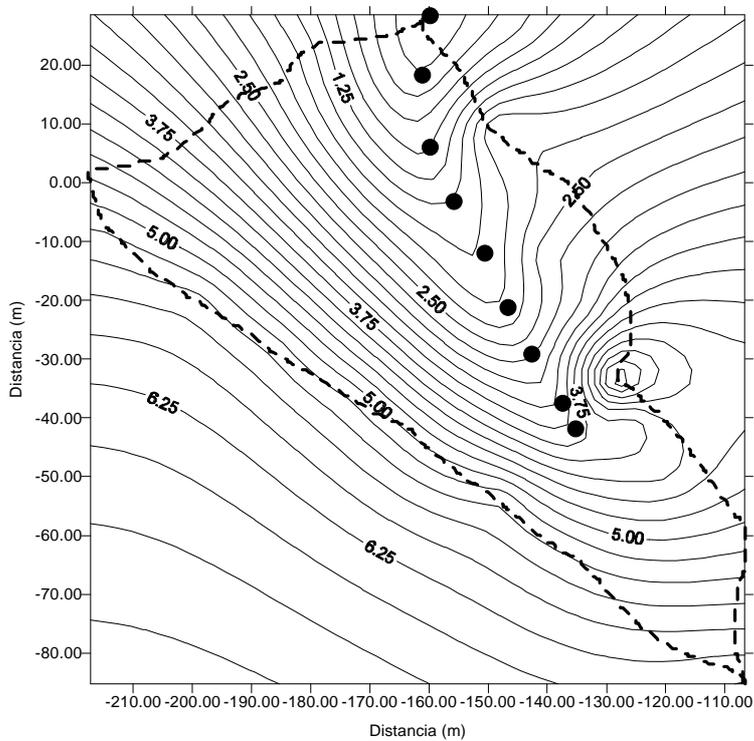


Figura 2.12.- Plano de la cuenca de Cobaza mostrando la posición aproximada de la divisoria y de la cárcava.

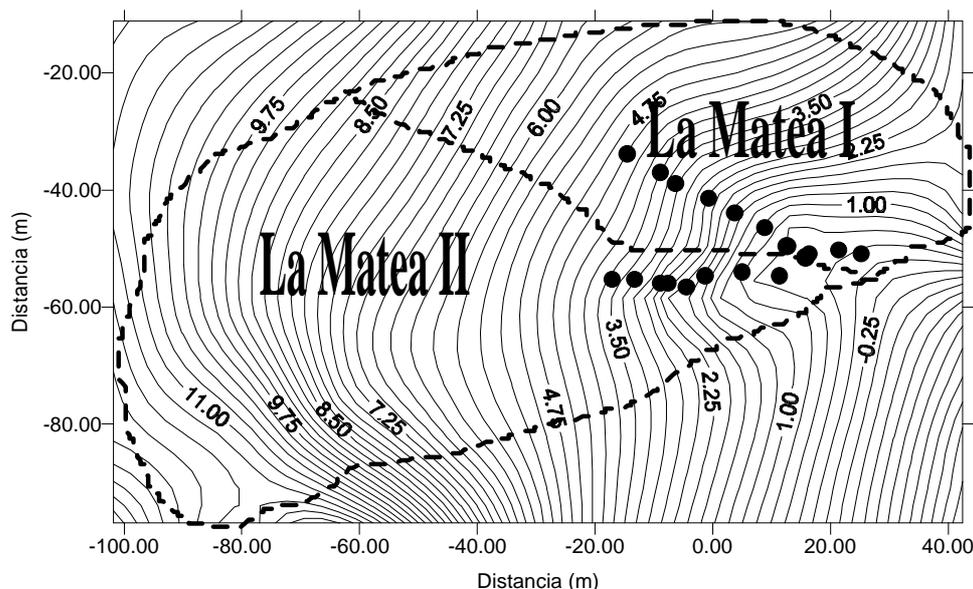


Figura 2.13.- Plano de las cuencas de La Matea I y La Matea II mostrando la posición aproximada de las divisorias y de las cárcavas.

En la tabla 2.7 se indican las características fundamentales de las cuatro cuencas y las pérdidas por cárcavas efímeras medidas en ellas.

CUENCA	ÁREA (m ²)	PENDIENTE MEDIA (%)	PÉRDIDAS TOTALES (m ³)	PÉRDIDAS (Kg/m ²)
LA ABEJERA 1	9620	4.4	0.826	0.156
COBAZA	5500	5.2	3.853	0.92
LA MATEA I	2570	9.2	3.0	1.54
LA MATEA II	4260	9.1	2.73	0.846
TOTAL	-	-	10.409	-

Tabla 2.7.- Superficie y pendiente de las cuatro cuencas, y erosión en ellas producida.

La cárcava de la cuenca de **La Abejera 1** era de unos 18 m, y su pendiente media del 0.03. La cabecera de la cárcava se mostraba nítida, de modo que aguas arriba de la misma no se apreciaba ningún cauce marcado. Las mayores secciones transversales se dan en el centro de la cárcava, para volver a ser más discretas en el extremo aguas abajo. El relativamente bajo valor del área de las secciones transversales puede hacer pensar que nos encontramos ante surcos y no ante cárcavas. Dada la posición de la cárcava, y tras observaciones realizadas recientemente no incorporadas en este informe, se piensa que tiende a formarse siempre en dicha posición, prevaleciendo este criterio sobre el del tamaño a la hora de clasificarla como cárcava. De manera similar se ha procedido en todos los casos en este trabajo. Las pérdidas, de 0.826 m³ son muy discretas, comparadas con las de las otras cuencas, lo que se explica fundamentalmente por las mucho menores pendientes, como puede apreciarse en los mapas. En la figura I.1.2 (anexo I) pueden verse las secciones transversales medidas, aproximadamente equidistantes entre sí, desde el extremo aguas abajo de la cárcava.

La cuenca de **Cobaza** se sitúa en una parcela relativamente grande que consta a su vez de diferentes subcuencas, siendo una de ellas la que ahora nos ocupa, y que cubre una extensión de 0.55 ha. En la cárcava se da también una variada distribución de forma y tamaño de las distintas secciones transversales, siendo mayores en las zonas centrales y disminuyendo hacia los extremos superior e inferior de la cárcava, cuyo perfil longitudinal puede verse en la figura 2.14. La pendiente media es del 4.6% aproximadamente. Los puntos marcados corresponden con la localización de las diferentes secciones medidas. Las pérdidas en este caso son muy importantes. Las diferentes secciones transversales pueden verse en la figura I.1.3 (anexo I).

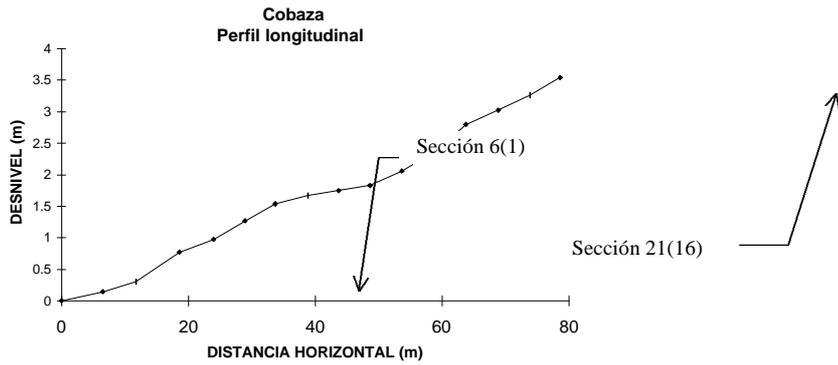


Figura 2.14. Perfil longitudinal cárcava de Cobaza, indicando la localización de las diferentes secciones transversales medidas.

Las pequeñas cuencas de **Lamatea I y II** son contiguas y se sitúan en una misma parcela. Las cárcavas desarrolladas en ellas mostraban una disposición espacial compleja, con abundantes ramificaciones, de modo que la medición resultaba dificultosa. En consecuencia, resulta también difícil determinar la cuenca vertiente a los extremos superiores. Se observa cómo a pesar del pequeño tamaño de las cuencas, las pérdidas son muy importantes, dada la elevada pendiente. En la figura 2.15 podemos apreciar los perfiles longitudinales de los ramales principales de dichas cárcavas, en la que se indica además la localización de las diferentes secciones transversales medidas. La pendiente media de ambas cárcavas es del 9.5% aproximadamente. En las figuras I.1.4 y I.1.5 pueden verse dichas secciones transversales medidas.

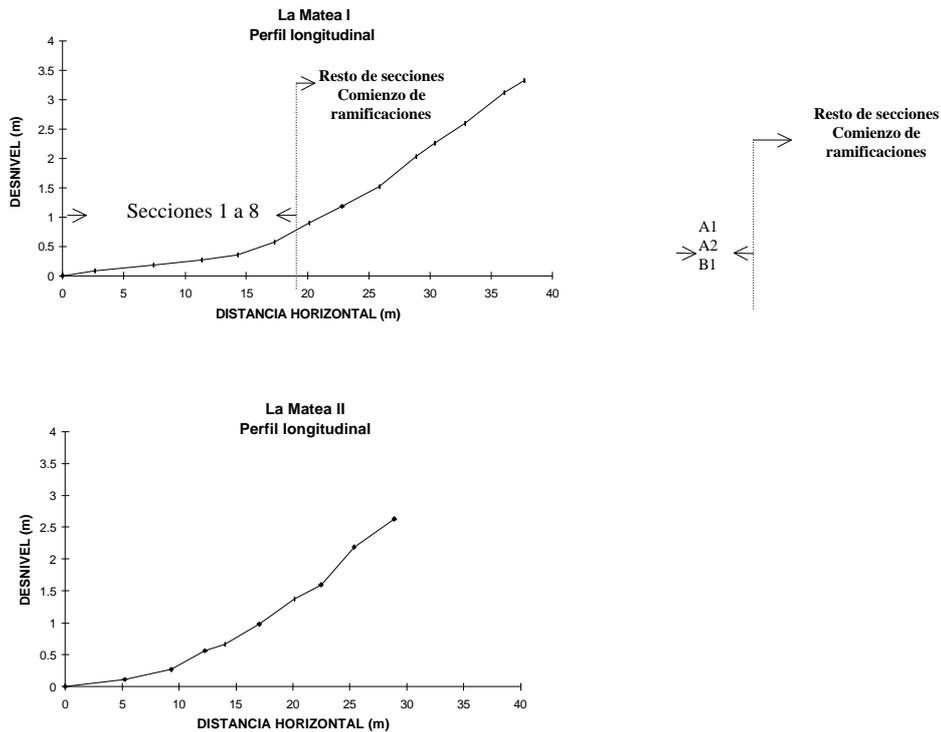


Figura 2.15.- Perfiles longitudinales de las cárcavas de La Matea I y II, indicando la localización de las diferentes secciones transversales medidas.

No se aprecian en las cárcavas efímeras derrumbes de bloques, aunque sí es importante en algunos periodos la acumulación de materiales finos desprendidos de las paredes, que son evacuados en la siguiente lluvia capaz de generar escorrentía, fenómeno similar al que encontraron Bradford y Piest (1980) en cárcavas permanentes de Iowa. En todas las cárcavas la relación anchura/profundidad más

frecuente ha sido próxima a 1, aunque en las zonas extremas altas y bajas de las cuencas abundan los casos en los que este índice es >1 . En general, podría admitirse que la mayor parte de las pérdidas se deben a segmentos de cárcavas en los que la relación anchura-profundidad es próxima a 1, con una forma de la sección transversal casi rectangular. Las secciones claramente rectangulares tienden a darse en las cárcavas más grandes (La Abejera 0, Cobaza), y en sus tramos inferiores finales. Con la excepción ya citada de Cobaza y La Abejera 0, y al igual que se encontró en los colectores de avenamiento, la magnitud de la erosión aumenta progresivamente aguas abajo, hasta alcanzar un máximo y disminuir posteriormente. Esto podría justificarse por algo similar a lo que Bell y Surtherland (1983) encontraron para el caso de transporte de sedimentos no equilibrado, en el que la capacidad de transporte real del flujo emplea cierto espacio, a partir del extremo aguas arriba, en alcanzar el valor de equilibrio. Posteriormente, tras alcanzar un máximo, la capacidad de transporte se encontrará muy llena y se producirá una disminución de la erosión, hasta cesar. En varias cárcavas, la disminución de la erosión puede atribuirse a un descenso en la pendiente. El hecho de que estas cárcavas se deben al efecto de varios acontecimientos de lluvia hace más difícil de comprender el fenómeno. En algunas cárcavas se aprecia con claridad el cauce lleno de sedimentos. Es decir: existió en un momento anterior un cauce mayor que el actualmente visible y que, con posterioridad, por procesos de sedimentación, se rellenó, en parte o totalmente. Por eso, estas pérdidas hay que considerarlas como un valor mínimo. El laboreo en la dirección de la máxima pendiente ha sido casi inexistente en las cuencas, por lo que no puede atribuirse a este hecho la aparición de las cárcavas. Sólo en La Abejera 0 es posible alguna relación entre laboreo y cárcavas.

En general podemos ver cómo se han producido en las cuencas pérdidas de importancia, aun cuando las precipitaciones en el periodo considerado han sido de escasa cuantía. Se comprobó visualmente que la intensa aunque no muy copiosa lluvia del día 22 de enero de 1996 (ver figura 2.6) tuvo un gran efecto erosivo en la zona. No hay observaciones directas de las lluvias en la zona antes del 15 de enero de 1995, pero, a partir de fotografías, puede afirmarse sin gran error, que fue ésta la lluvia causante de la mayor parte de las cárcavas medidas en las cuencas. El suelo se encontraba muy húmedo y la lluvia tuvo gran intensidad. Otras lluvias importantes posteriores no causaron apenas daños, por la menor humedad del suelo, en meses de primavera avanzada, verano y comienzos de otoño, y por la mayor cubierta vegetal debida al cultivo o sus restos en dichas épocas, en comparación con el comienzo del invierno. Estas observaciones permiten deducir que la humedad inicial del suelo ha sido un factor clave en la generación de cárcavas. Como se detallará en el apartado 2.3.6, los datos parciales del año 1997 parecen confirmar esta respuesta, corroborando la gran transcendencia de la intensidad de la precipitación. Puede sospecharse por tanto que son las lluvias de invierno las causantes de las pérdidas más frecuentes, pero que excepcionalmente, lluvias también más excepcionales de verano son capaces de provocar erosión en cárcavas, de acuerdo con comentarios de agricultores de la comarca. En verano la circunstancia más crítica se dará con suelos recién labrados, tras la cosecha, lo que ocurre sobre todo en veranos húmedos que permiten labrar pronto.

Como se pudo comprobar en el apartado 1.4.2, existen muy pocos datos para contrastar los valores de pérdida de suelo obtenidos en Pitillas. Además, los datos disponibles, tanto los resultados obtenidos por nosotros como por la mayoría de los otros autores, se refieren a periodos de tiempo de observación muy cortos y a lugares muy concretos, con una representatividad discutible. De todas maneras, teniendo siempre en cuenta estas limitaciones, es posible realizar un cierto contraste de los resultados obtenidos.

En comparación con la medición realizada en Portugal (Vandaele et al. 1996), las pérdidas registradas en Pitillas son más importantes. En efecto, en tres de las cinco cuencas se superan los $0.8\text{kg/m}^2/\text{año}$, mientras que en el caso portugués la erosión media debida a cárcavas efímeras se sitúa entre los 0.1 y los $0.7\text{kg/m}^2/\text{año}$. Del estudio llevado a cabo en Almería (Poesen et al., 1996) puede obtenerse una cifra orientativa de pérdidas medias anuales en ese caso del orden de $0.135\text{kg/m}^2/\text{año}$, muy inferior a la obtenida en este año en la mayoría de las cuencas de Pitillas. Hay que tener en cuenta no obstante que las estimaciones en el caso portugués se realizan a partir de fotografías aéreas, de manera que cárcavas pequeñas del estilo a las estudiadas en Pitillas no se aprecian bien en las fotos, y no pueden ser contabilizadas. Por tanto, si en la parcela portuguesa se dan también cárcavas pequeñas, las pérdidas citadas deben de considerarse como un límite inferior. La importancia de las pérdidas medidas en Pitillas, aun tratándose de cárcavas pequeñas, pone de manifiesto que la utilización de fotografías aéreas en la zona produciría una infraestimación inaceptable. La modesta cifra de pérdidas de Almería puede explicarse por lo escaso de las precipitaciones medias en la zona y por la irregularidad de su distribución. Aunque el estudio de Almería integra valores correspondientes de 10 años, es posible que en ese periodo de tiempo no se hayan producido lluvias realmente importantes.

Los dos estudios realizados en ambientes mediterráneos destacan la importancia de las cárcavas efímeras en la producción de sedimentos, que serían responsables de la casi totalidad de las pérdidas de suelo. En el caso de Pitillas, y aunque no se dispone de datos, la realidad, en un entorno también mediterráneo, puede ser muy similar pues, aunque hay surcos, estos no son particularmente abundantes en las cuencas estudiadas.

La tolerancia para pérdidas de suelo (soil loss tolerances) ha sido definida como la máxima intensidad de erosión anual que puede ocurrir en un suelo determinado, de modo que se mantenga una alta productividad del cultivo de manera rentable e indefinida (Wischmeier y Smith, 1978, citado en Schertz, 1983). El Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service, SCS) de los Estados Unidos propuso, entre otros criterios guía, un valor de pérdidas de 11200kg/ha/año como un valor máximo que en ningún caso debería rebasarse. Esta cifra orientativa, propuesta en 1956, sigue siendo hoy tenida en consideración. En 1973, el SCS propuso una tabla para estimar tolerancias en diferentes suelos, en base a su profundidad útil para el desarrollo de raíces y la capacidad del sustrato para generar nuevo suelo, siempre con el máximo absoluto citado. De acuerdo con esta tabla, y aun considerando los suelos de Pitillas como “fácilmente renovables”, las tolerancias para La Matea I y II serían del orden de 4500kg/ha/año, para La Abejera 0 y 1 entre 4500 y 9000 kg/ha/año (hay diferentes profundidades de suelo en las parcelas), y para Cobaza, entre 4500 y 6700 kg/ha/año (la variación se debe a la misma razón). De acuerdo con esto, en La Matea I y II y en Cobaza se rebasan muy ampliamente las tolerancias, acercándose mucho a la cifra máxima absoluta. Además, hemos de tener muy en cuenta que estas cifras se deben sólo a erosión por cárcavas efímeras. En La Abejera 0 y La Abejera 1 las cifras, más modestas, quedan alejadas de las tolerancias, al menos en lo que se refiere a cárcavas efímeras.

2.3.3. 2.3.3 RELACIONES ENTRE ÍNDICES TOPOGRÁFICOS Y EROSIÓN POR CÁRCAVAS EFÍMERAS PROPIAMENTE DICHAS.

La posibilidad de relacionar la erosión en cárcavas efímeras con índices topográficos sencillos permitiría, con la ayuda de modelos digitales del terreno y de sistemas de información geográfica, realizar estimaciones rápidas sobre la importancia de este tipo de erosión en regiones extensas. Las relaciones a utilizar en dichas estimaciones procederían bien de datos medidos en campo, bien de modelos de simulación convenientemente calibrados.

Patton y Schumm (1975) comprobaron cómo para cárcavas discontinuas permanentes es posible establecer un umbral en base al binomio “pendiente del fondo del valle que se sitúa por encima de la cabecera de la cárcava” y “área vertiente por encima de dicha cabecera”. Zevenbergen (1987) realizó un estudio similar en cárcavas efímeras. En la figura 2.16 se muestran las relaciones encontradas para tres de las cuencas de estudio en Pitillas en las que la identificación de una cabecera resultaba factible. Se observa la misma tendencia encontrada por dichos autores para cárcavas permanentes. Aun cuando estos datos sólo resultan representativos para unas circunstancias locales, parece posible proponer un método rápido para identificar las condiciones críticas de cárcavas efímeras. La disponibilidad de mayor número de datos de este estilo permitiría la obtención de gráficas y curvas como las que pueden verse en Vandaele et al. (1996) (ver apartado 1.4.5.2), y la aplicación del método propuesto por dichos autores para identificar las zonas más susceptibles al acaravamiento. En el caso de que la cárcava observada sea consecuencia de más de un evento, no puede asegurarse que la posición de la cabecera corresponda a la situación inicial (situación crítica). En este caso, pueden considerarse el área de desagüe y la pendiente, en la ladera más empinada a lo largo de la cárcava, tal y como hicieran Patton y Schumm (1975) (Vandaele et al., 1996).

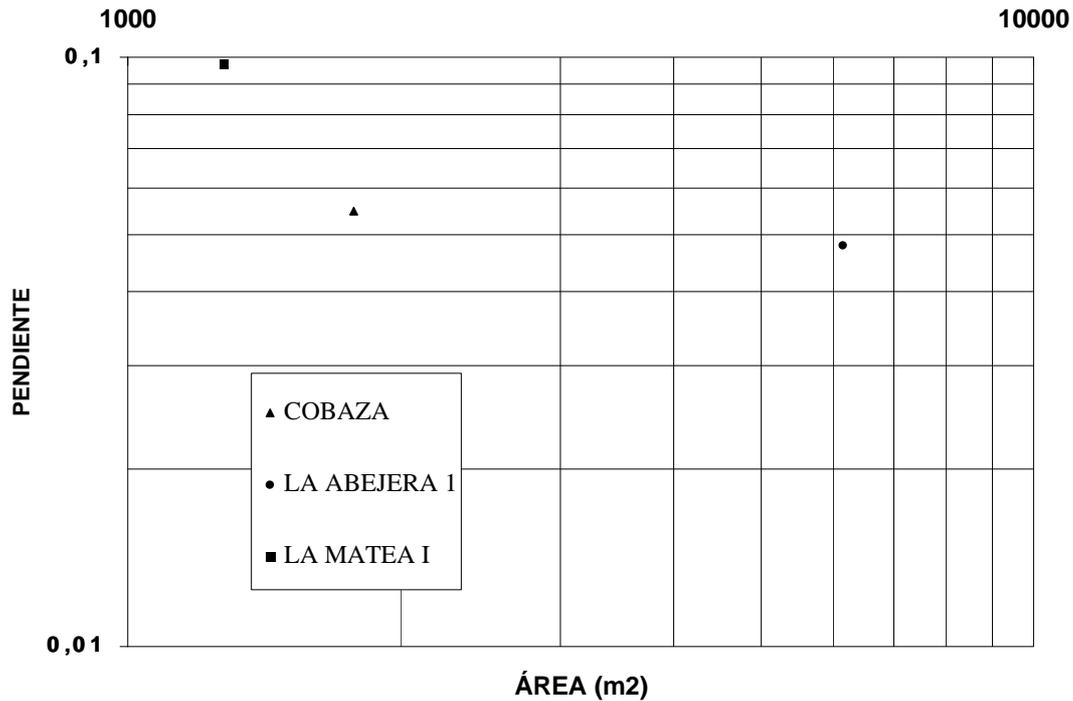


Figura 2.16.- Relaciones críticas área pendiente para tres de las cuencas estudiadas.

Sería del mayor interés relacionar las pérdidas totales con algún índice sencillo, lo que permitiría obtener estimaciones rápidas aproximadas de pérdidas en áreas extensas, obviamente, para condiciones concretas de suelo, cultivo y clima. En el apartado 1.4.5.2 se comentó el índice *CTI* (Combined Topographic Index) propuesto por Zevenbergen (1987).

En este trabajo se analizan brevemente dos índices que relacionan pérdidas totales por cárcavas efímeras en la cuenca, con características topográficas de la misma, y son: el producto área total por pendiente, ponderada (de toda la cuenca) con el área (*AP1*); y el producto área total por pendiente del fondo del valle, ponderada con la longitud de cada tramo (*AP2*). Es decir:

$$AP1 = A \cdot \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.1)$$

$$AP2 = A \cdot \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (2.2)$$

donde:

A = superficie total de la cuenca, considerando como tal la que vierte a la cárcava visible

A_i = área de las distintas zonas de la cuenca con pendiente homogénea

L_i = longitud de las distintas porciones del fondo del valle con pendiente homogénea

P_i = valor de la pendiente homogénea en cada zona o segmento

n = número de áreas o segmentos con pendiente homogénea definidas

En el primer índice, de muy fácil obtención, se consideran implícitamente la pendiente longitudinal del fondo, la curvatura del mismo y la potencia de la corriente, además de considerar explícitamente la pendiente de la cuenca. En el segundo se considera la potencia de la corriente, pero se ignora la curvatura. La potencia de la corriente es la energía por unidad de tiempo disponible en el flujo para arrancar y

transportar sedimentos (ecuación 1.4.2). Del mismo modo que Patton y Schumm (1975), el área de desagüe puede utilizarse como un sustituto del caudal. De este modo, el producto del área de desagüe por la pendiente en los índices *AP1* y *AP2* reflejarían una medida de la potencia del flujo en la cuenca. La curvatura del fondo se considera en el índice *AP1* mediante la pendiente media de la cuenca. Las figuras 2.17 y 2.18 ilustran los resultados obtenidos, utilizando las cuencas de La Abejera 1, Cobaza, Lamatea I y Lamatea II. Como se relacionan pérdidas medidas con *AP1* y *AP2*, sin considerar zonas de sedimentación, no tiene transcendencia el defecto aludido en el apartado 1.4.5.2 de los índices *CTI* y similares, en el sentido de que no son capaces de considerar deposiciones.

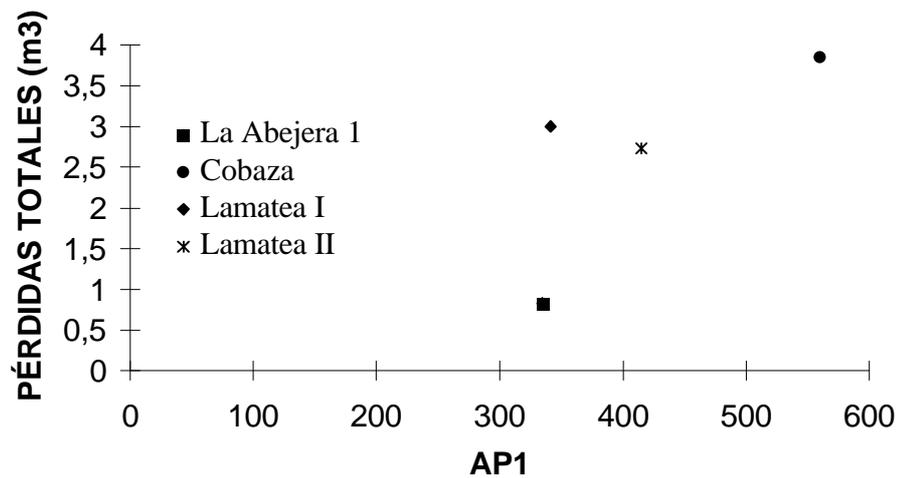


Figura 2.17.- Relación entre pérdidas totales e índice *AP1*.

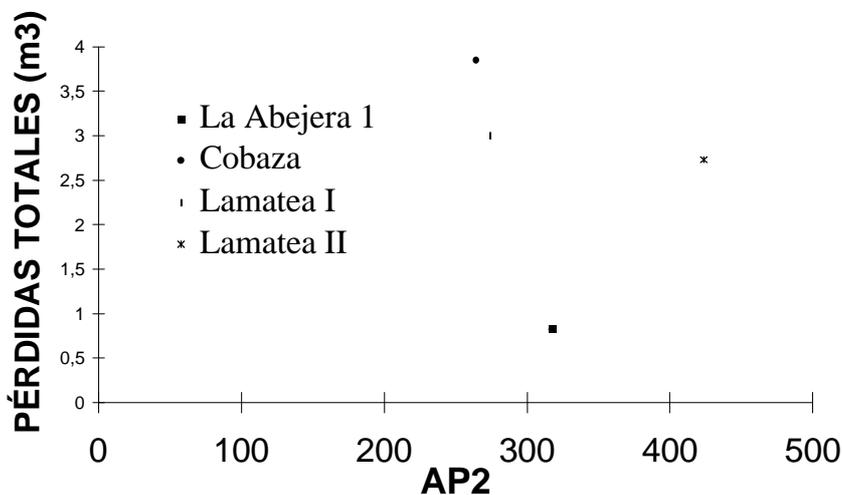


Figura 2.18.- Relación entre pérdidas totales e índice *AP2*

De las figuras anteriores se deduce cómo el índice *AP2* resulta inadecuado, pues a mayores valores del índice, menores son las pérdidas predichas, quizás por no incluir la curvatura, lo que es un contrasentido. Sin embargo, el índice *AP1* responde de manera prometedora, apreciándose una clara correlación entre las dos variables. Los dos puntos centrales, correspondientes a las cuencas de La Matea I y La Matea II quedan muy próximos, y uno de ellos, el correspondiente a La Matea I, fuera de la tendencia marcada por los otros tres, que es muy evidente. Estas dos cuencas son muy pequeñas, de modo que requieren mediciones precisas para quedar nítidamente definidas, a cuya dificultad ya se ha aludido con anterioridad. Pequeños errores en la medición tanto de las cárcavas como de la topografía de las cuencas puede explicar estas desviaciones. El índice *AP1* parece prometedor como indicador de las pérdidas

totales a partir de parámetros topográficos de fácil estimación. Para la utilización en la práctica de índices como el *API* sería necesaria una información detallada de las cuencas en diferentes condiciones meteorológicas, edafológicas y agronómicas. Conviene dejar muy claro que el número de puntos de que se dispone para la obtención de estas correlaciones es muy bajo, muy inferior al mínimo deseable, por lo que sólo podemos hablar a nivel de tendencias.

2.3.4. 2.3.4 CÁRCAVAS EFÍMERAS ORIGINADAS POR FLUJOS PROVENIENTES DE FUERA DE LA PARCELA.

Como se indicó anteriormente en la presentación general (apartado 2.3.1), se da el caso de que algunas parcelas de la zona se hallan situadas en plena trayectoria de cauces naturales que desagüan cuencas, dispuestas aguas arriba de dichas parcelas. La figura 2.19 sitúa las cárcavas de este estilo halladas en la zona de estudio al final del verano de 1996. Todo lo dicho en apartados anteriores sobre clima, suelos, manejo de cultivos, método de estimación de pérdidas por cárcavas, etc., es aplicable a estas parcelas, llamadas Cobaza II, Camino III, La Matea III y La Matea IV. No hubo prácticamente laboreo en la dirección de la máxima pendiente. Puesto que la posibilidad de referir las pérdidas en estas cárcavas a superficies de cuencas vertientes es en principio discutible, el estudio topográfico en este apartado es mucho más simple y en algunos casos no se realizó.

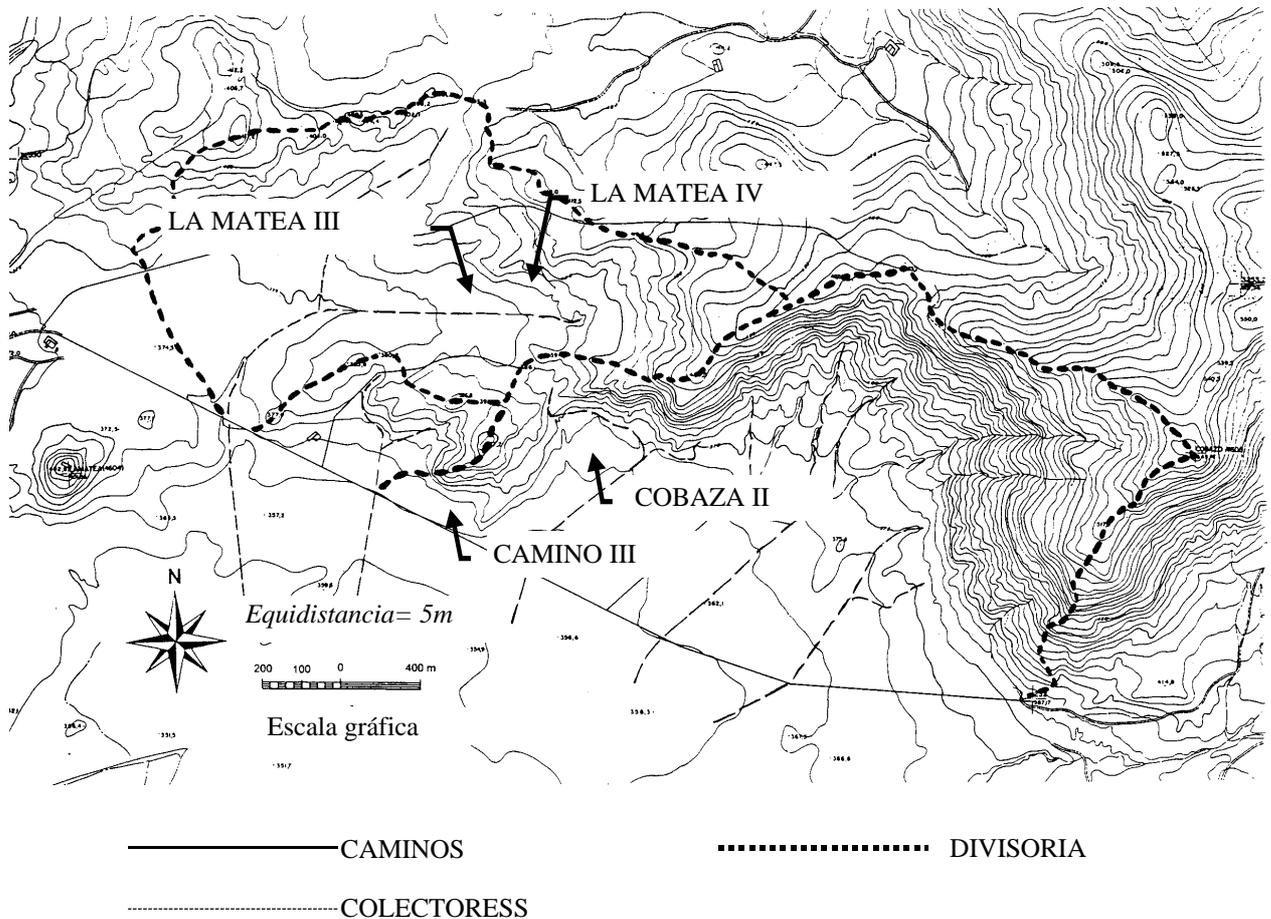


Figura 2.19.- Localización en el área de estudio de las cárcavas efímeras originadas por flujos provenientes de fuera de la parcela.

En la tabla 2.8 se exponen las pérdidas totales expresadas en volumen de suelo movilizado en todas las cárcavas estudiadas en este apartado.

CÁRCAVA	PÉRDIDAS (m ³)
LA MATEA III	6.26
LA MATEA IV	2.43
CAMINO III	6.80

COBAZA II A	3.61
COBAZA II B	11.12
TOTAL	30.22

Tabla 2.8.- Pérdidas por cárcavas efímeras originadas por la interposición de las parcelas en cuencas de drenaje naturales.

Se detallan a continuación algunos aspectos de las cárcavas estudiadas.

En la parcela de La Matea III irrumpe el flujo proveniente de una cuenca constituida tanto por parcelas cultivadas como por parcelas sin cultivar. En la figura 2.20 puede verse el perfil longitudinal de la cárcava, y en la figura I.2.1 (anexo I) las diferentes secciones transversales medidas, que se corresponden con los puntos del perfil longitudinal. La pendiente media de esta cárcava es del 2.9%.

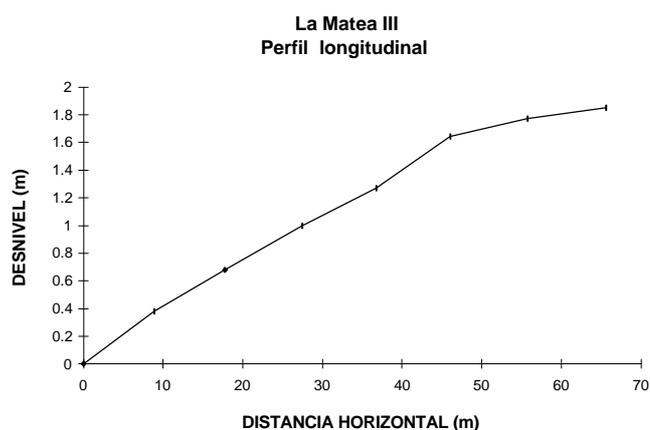


Figura 2.20.- Perfil longitudinal de la cárcava de La Matea III.

A partir del extremo aguas abajo de la cárcava se situaba una importante área de depósito. Sin embargo, en la zona inferior de la parcela, la cárcava volvía a excavarse, justo antes de verter en el colector próximo (ver figura 2.19). La medición de estas secciones completa el cálculo del volumen de suelo movilizado por la cárcava. Dichas secciones pueden observarse en la figura I.2.2. Contabilizando los dos fragmentos, se obtiene un volumen excavado total de 6.26 m³ (tabla 2.8).

La figura I.2.3 (anexo I) muestra las secciones transversales medidas en La Matea IV, aproximadamente equidistantes entre sí. La longitud de la cárcava era de 52 m, y el agua que la formó provenía de una pequeña cuenca cubierta en parte de matorral y muy pedregosa. El volumen total excavado por la cárcava se estima en 2.43 m³.

En la figura 2.21 podemos ver el perfil longitudinal de la cárcava Camino III, mientras que en la figura I.2.4 se ilustran las diferentes secciones transversales medidas, que se corresponden con los puntos del perfil longitudinal. En la sección 6 hay una nítida cabecera. La elevación de la sección 5 con respecto a la 6 se explica por el socavamiento que la caída del agua produce en dicha sección 6. Entre las secciones 8 y 10 aparece una zona de depósito. Se trata de una cárcava importante, que se excava por los aportes de una cuenca también importante, recogidos por un colector de avenamiento perimetral que rodea la parcela. La pendiente media es del 3.9%, y las pérdidas contabilizadas en este periodo ascienden a 6.8 m³.

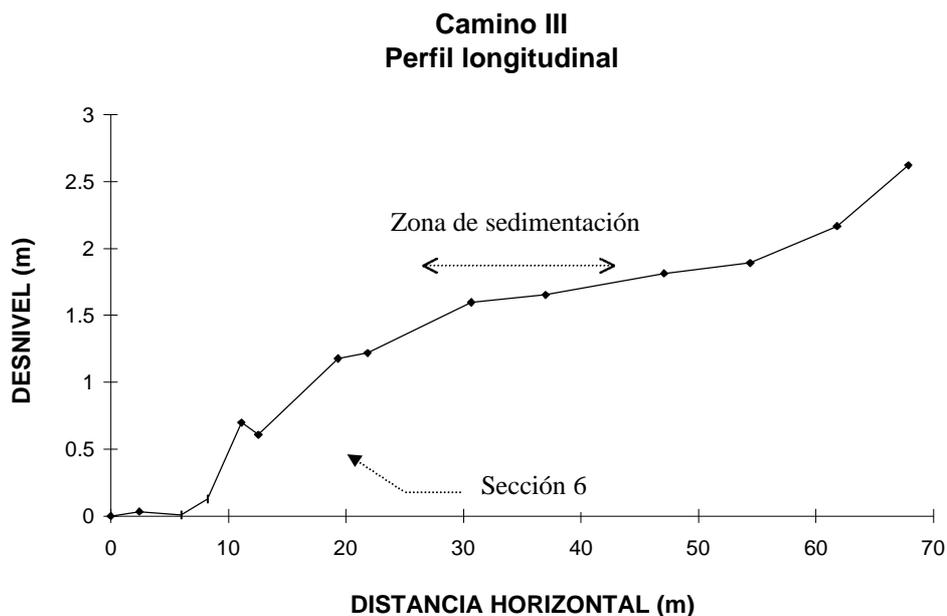


Figura 2.21- Perfil longitudinal cárcava Camino III.

La cárcava de Cobaza II consta de dos segmentos. La figura 2.22 muestra la disposición en el plano de ambas, y la figura 2.23 sus perfiles longitudinales, con los puntos en los que se realizaron mediciones de las secciones transversales. Las pendientes medias de los segmentos A y B son respectivamente del 7.4 y 4.3%. La figura I.2.5 ilustra las secciones transversales medidas en el segmento B, y la I.2.6 las del segmento A. Justo en la entrada del cauce natural a la parcela el agricultor preparó unos embalses pequeños de tierra con el fin de almacenar el agua antes de su entrada en la parcela y evitar las cárcavas. Precisamente, las cárcavas aquí medidas se han formado por el rebosamiento del agua por encima de la masa de suelo que cierra la balsa, rebosamiento que se ha producido incluso con lluvias de poca importancia.

Se ha aludido anteriormente a la dificultad de relacionar en este tipo de cárcavas las pérdidas producidas con el área a la que esta pérdida incumbe. Sin embargo, conseguir aportar algún dato orientativo al respecto sería de gran interés. Una posibilidad es el relacionar las pérdidas de suelo producidas con la extensión de parcela que se encarga de aportar suelo para rellenar la cárcava en las siguientes operaciones de labrado. Hablando de erosión laminar y en surcos, referir las pérdidas a la superficie de la que provienen resulta algo natural y lógico, pues puede suponerse que el suelo erosionado se elimina aproximadamente por igual en buena parte de la superficie afectada, superficie que puede hacerse coincidir con la cuenca hidrológica vertiente sin cometer grandes errores. El referir las pérdidas por cárcavas al área correspondiente a la cuenca vertiente, como se ha hecho en el anterior apartado, es claramente válido en el caso de cárcavas efímeras propiamente dichas. El dato sirve para ser comparado con posibles cifras de erosión laminar y en surcos, y usarlo se justifica además porque, a largo plazo, el suelo erosionado por las cárcavas efímeras propiamente dichas provendrá de toda la cuenca. Sin embargo, en el presente caso de cárcavas originadas por flujos provenientes de aguas arriba, la cuenca aguas arriba no aporta en absoluto los sedimentos que se erosionan por causa de la cárcava. Por tanto, pensamos, la manera correcta de referirlos, manteniendo el mismo criterio usado con las cárcavas efímeras como tales, es con relación a la porción de la cuenca hidrológica que se encuentra en la parcela, pues es la que realmente aportará a corto o largo plazo, los sedimentos que la cárcava evacue.

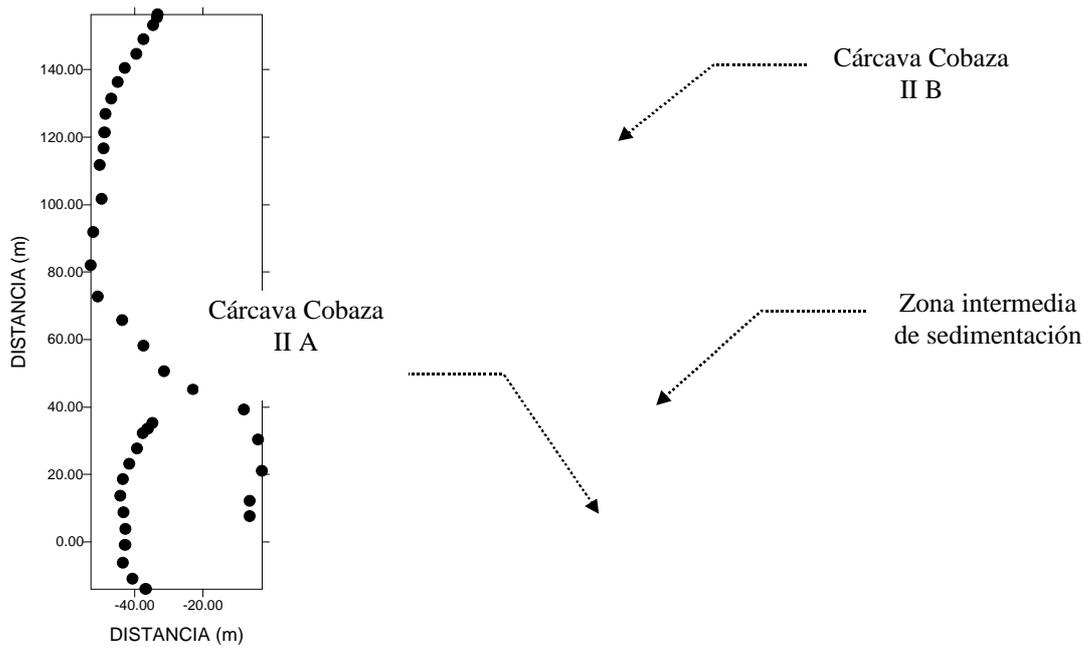


Figura 2.22.- Disposición en el plano horizontal de los dos segmentos de la cárcava en la cuenca de Cobaza II.

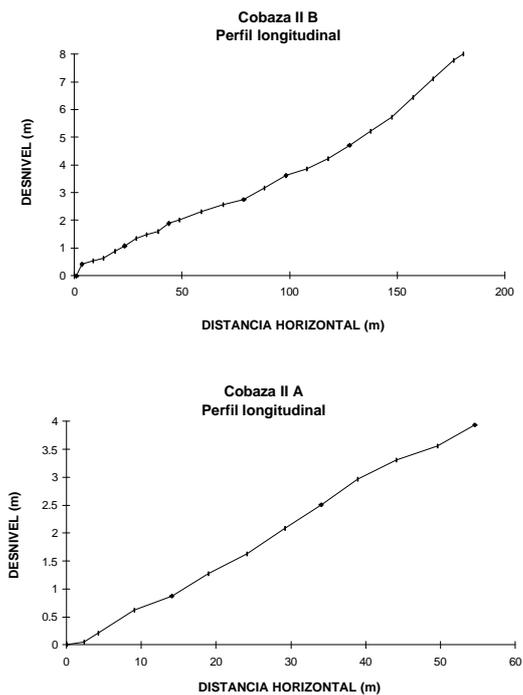


Figura 2.23.- Perfiles longitudinales de los dos segmentos de la cárcava en la cuenca de Cobaza II

Si siguiendo el criterio argumentado en el párrafo anterior, no se disponen de datos suficientes para delimitar con detalle la porción de la cuenca vertiente a estas cárcava. Sin embargo, en algunas sería sencillo obtener valores aproximados, como en el caso de Cobaza II, una cuenca estrecha y alargada. El área de la cuenca de Cobaza II situada en la parcela es de unos 8500 m². Dado que el volumen movilizado es de 14.73 m³, suponiendo una densidad aparente de 1538.7 kg/m³ (tabla 2.5), la masa de suelo movilizadora es de 2.66 kg/m². En Camino III y La Matea IV, las áreas son muy pequeñas, y los volúmenes altos o muy altos, por lo que las pérdidas unitarias deben de ser aún mayores que las de Cobaza II.

Aunque la cuenca de La Matea IV es grande, las pérdidas son elevadas, y es de esperar unas pérdidas unitarias también importantes. Las tolerancias en estas cuencas, de acuerdo con la tabla del SCS (ver apartado anterior) oscilarían entre 0.45 y 0.67 kg/m²/año para La Matea III y La Matea IV, 0.22 y 0.67 kg/m²/año para Cobaza II, y 0.22 y 0.45 kg/m²/año para Camino III. Queda claro que los valores de pérdidas son muchísimo mayores que las tolerancias, e incluso superan con creces el valor propuesto como máximo de 1.12 kg/m²/año. Además, las superficies afectadas por estas pérdidas aceleradas son muy importantes. Las intensidades de erosión son mucho mayores a las citadas por Vandaele et al. (1996) y Poesen et al. (1996) para cuencas cultivadas en el sur de Portugal y Almería, y no serían observables mediante fotografías aéreas, por lo que su estudio no sería factible mediante este método.

Al igual que las cárcavas efímeras propiamente dichas del estudiadas en el apartado anterior, el origen de las cárcavas estudiadas en éste se atribuye fundamentalmente a la lluvia del 22 de enero de 1996 (figura 2.6).

En estas cárcavas se ha producido también un decrecimiento de la erosión aguas abajo. Pero, debido probablemente a la súbita invasión de la parcela por el agua, dándose una superación inmediata de las condiciones críticas necesarias para el comienzo de la incisión, se trata más bien un decrecimiento constante, sin un aumento previo tan claro como el que ocurría en el anterior tipo de cárcavas estudiado.

Las pérdidas detectadas en el área de estudio por este tipo de cárcavas son muy importantes (tabla 2.8), mucho más que las debidas a cárcavas efímeras como tales: 30.22 m³ frente a 10.41 m³. Ha habido pérdidas de gran intensidad aunque las lluvias durante el periodo de estudio han sido escasas. Podemos en consecuencia decir que no han sido las actividades normales de cultivo las responsables de las mayores pérdidas, sino la inadecuada colocación de las parcelas junto con la inexistencia de medidas protectoras o correctoras. Conviene alertar del riesgo de cometer errores similares en zonas en las que se piensa realizar acciones parecidas a las que han conducido a la situación actual en el área de estudio. Algunos de los problemas podrían corregirse mediante la instalación de colectores enterrados, solución que parece adecuada a este tipo de cárcavas, y que constituye una práctica habitual en agricultores aislados, con buenos resultados en algunos casos. Los canales instalados por los agricultores de la comarca se construyen enterrando, a profundidad suficiente para no impedir el laboreo, piedras planas dispuestas de manera que formen un pequeño canal relleno de cantos más pequeños, y que es conducido hasta el colector más próximo fuera de la parcela. Una vez más habría que discutir la rentabilidad de tales acciones o de otras medidas protectores similares, y plantearse seriamente el cambio de uso definitivo de estas tierras tan susceptibles.

2.3.5. 2.3.5.- CÁRCAVAS EFÍMERAS ASOCIADAS A DISCONTINUIDADES.

Varias de estas cárcavas fueron detectadas en la zona de estudio, tal y como se ha indicado en el apartado 2.3.1. En la figura 2.24 se localizan, llamadas Camino I, Camino II (muy pequeña, no se midió), Camino IV, Camino V, Camino VI y Cobaza Oriental. Todo lo referente a cultivos, manejo de suelo, tipo de suelo, etc., explicado en apartados anteriores es aplicable a estos casos.

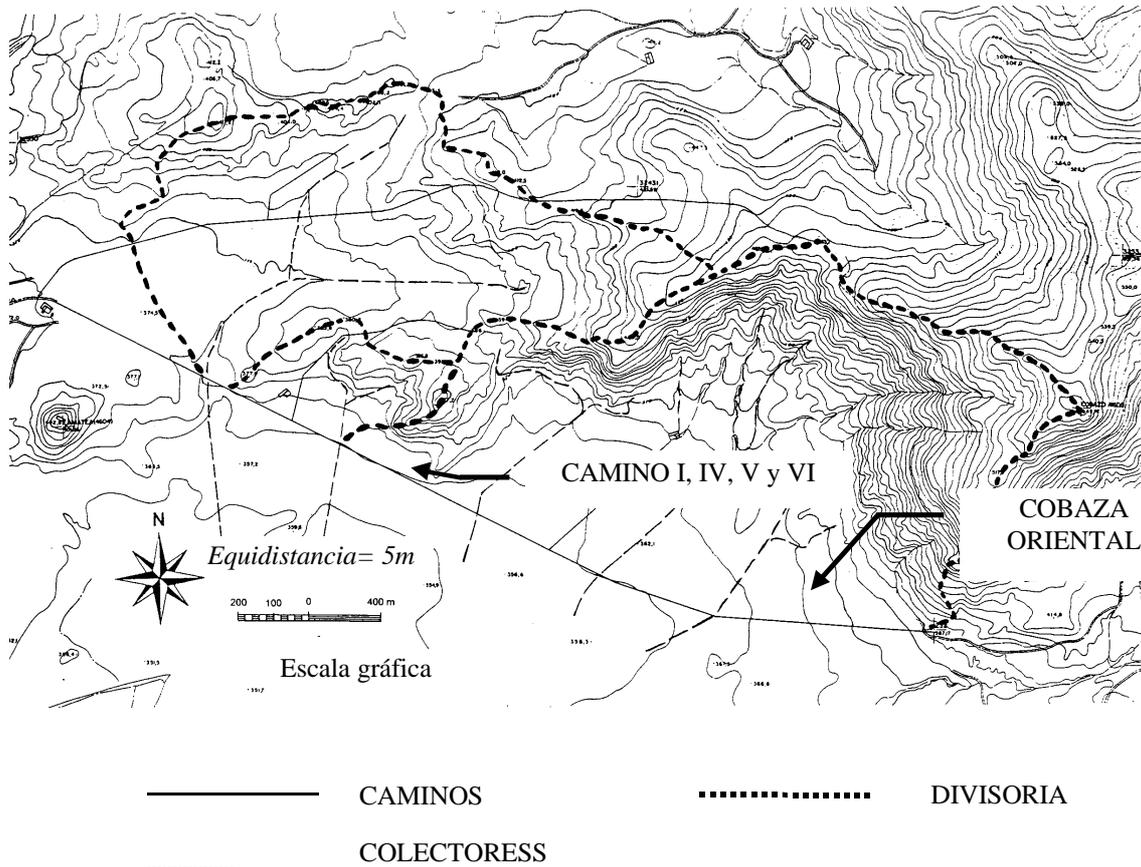


Figura 2.24.- Localización en el área de estudio de las cárcavas asociadas a discontinuidades.

En la tabla 2.9 se recogen las pérdidas causadas por estas cárcavas, que ascienden a 12.31 m³, analizándose a continuación las peculiaridades de cada una de ellas.

CÁRCAVA	PÉRDIDAS (m ³)
CAMINO I	1.06
CAMINO IV	1.58
CAMINO V	1.13
CAMINO VI	0.66
COBAZA OR.	7.89
TOTAL	12.31

Tabla 2.9.- Pérdidas medidas en las diferentes cárcavas asociadas a discontinuidades.

En la figura 2.25 podemos ver el perfil longitudinal de la cárcava Camino I, y en la I.3.1 las secciones transversales, que se corresponden con los puntos representados en el perfil. Las pérdidas estimadas en este caso son de 1,06 m³. El punto 7 corresponde a una nítida cabecera. Las derivaciones laterales

intentan ser contempladas en el propio perfil, lo que explica la forma extraña de algunas secciones transversales. La pendiente media es del 1.5%.

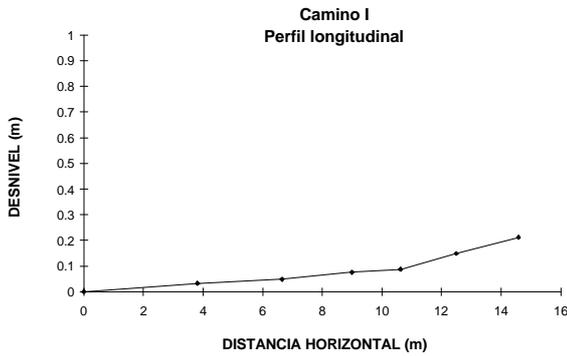


Figura 2.25.- Perfil longitudinal de la cárcava Camino I

La figura 2.26 ilustra la disposición de los diferentes segmentos que constituyen la cárcava de Camino IV. Rodeando al segmento B se disponían otros dos, el A y el C (no representados), casi idénticos en longitud y anchura al B, por lo que sólo fue medido éste. Los extremos superiores de los segmentos constituyen cabeceras claras.

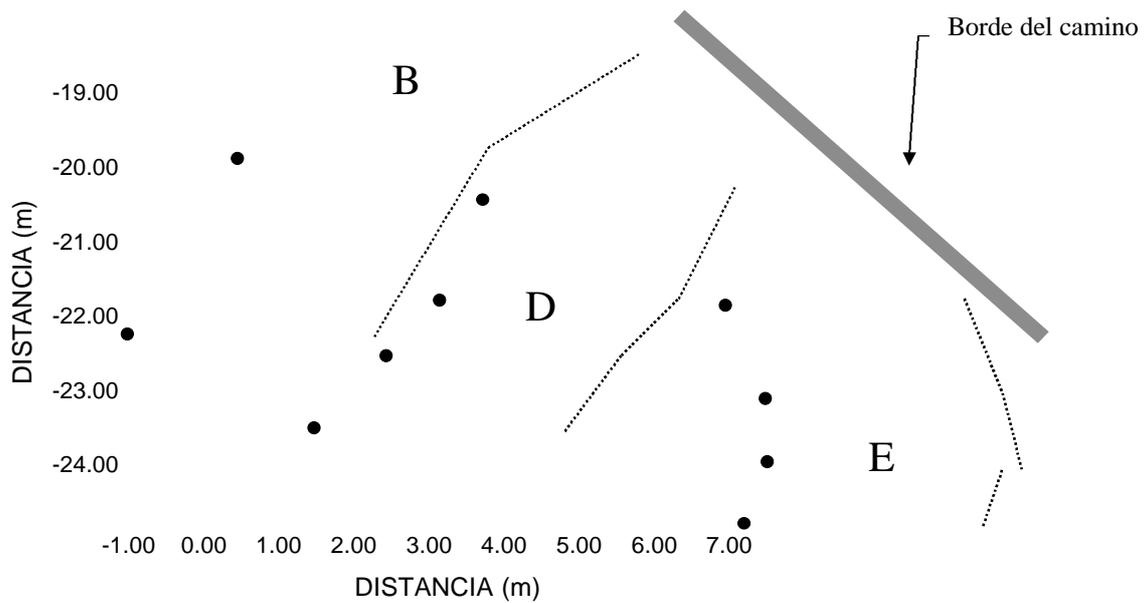


Figura 2.26.- Disposición de los segmentos que constituyen la cárcava de Camino IV.

La figura 2.27 ilustra los perfiles longitudinales de los perfiles medidos, y la I.3.2 las secciones transversales. Las pérdidas fueron de 1.58 m³. Las pendientes son del 7.7% en los segmentos B y D, mientras que el E es prácticamente horizontal.

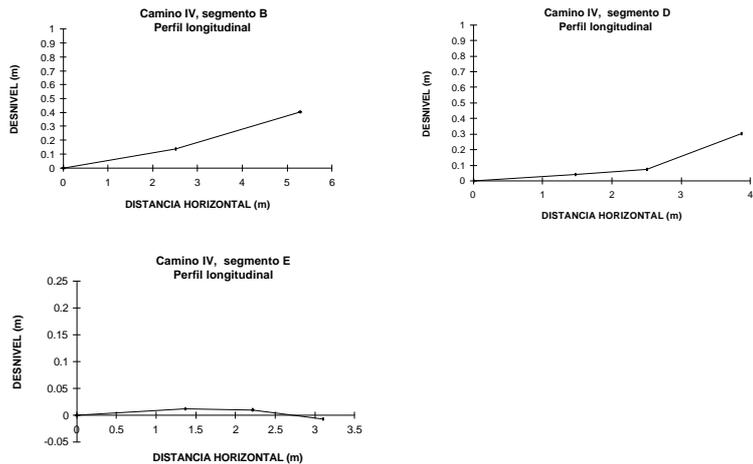


Figura 2.27.- Perfiles longitudinales de los diferentes segmentos que constituyen la cárcava de Camino IV.

La figura 2.28 muestra la disposición de los segmentos que configuran la cárcava Camino V, la figura 2.29 los perfiles longitudinales, y la I.3.3 los perfiles transversales. Las pérdidas fueron de 1.13 m^3 . La pendiente longitudinal de los segmentos A y B es del 0.5%.

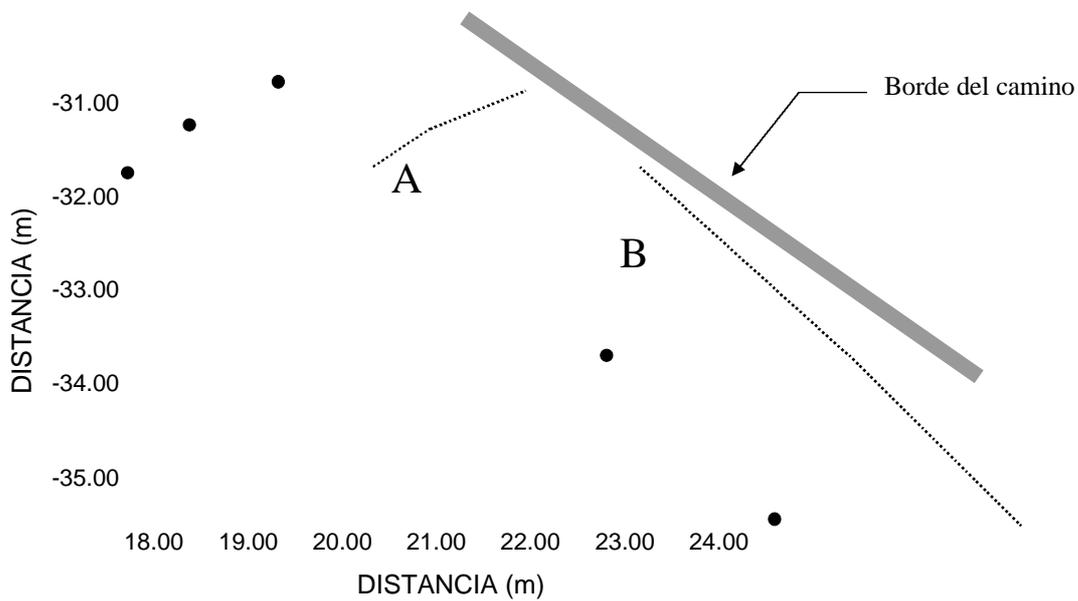


Figura 2.28 .- Disposición de los segmentos que configuran la cárcava Camino V.

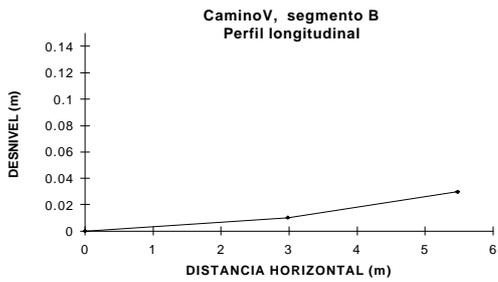
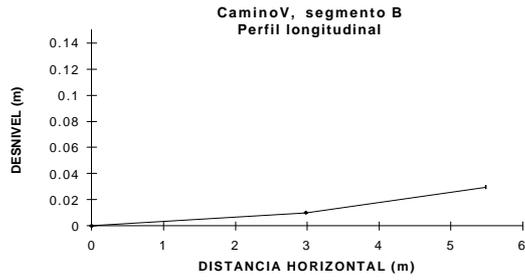


Figura 2.29 .- Perfiles longitudinales de los segmentos que configuran la cárcava Camino V.

La figura 2.30 muestra la disposición de los segmentos que constituyen la cárcava Camino VI, y la 2.31 los perfiles longitudinales de los mismos, mientras que la I.3.4 ilustra los perfiles transversales medidos. Las pérdidas fueron de $0,66 \text{ m}^3$. La pendiente media del segmento A es del 6.9%, y la del B del 12.0%.

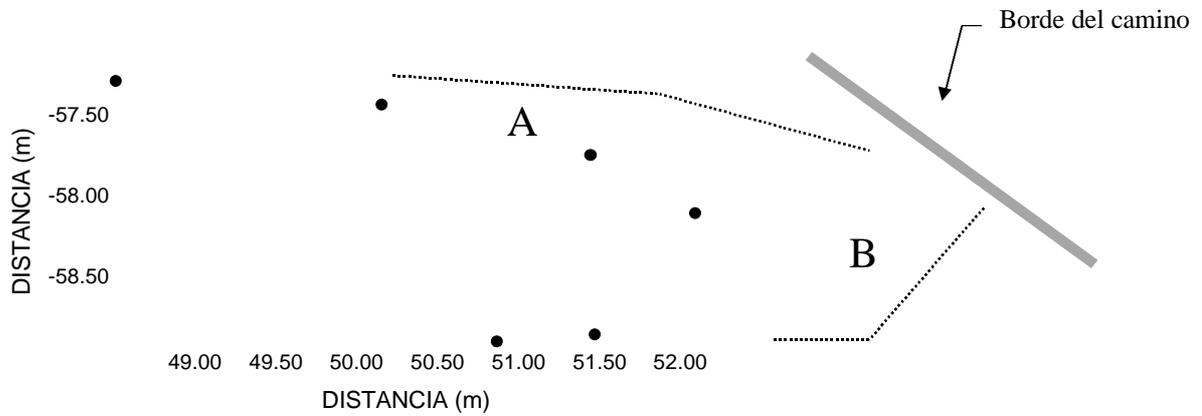


Figura 2.30.- Disposición de los segmentos que configuran la cárcava Camino VI.

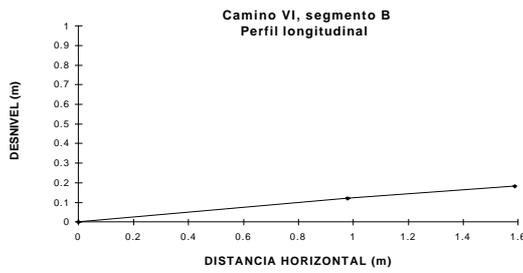
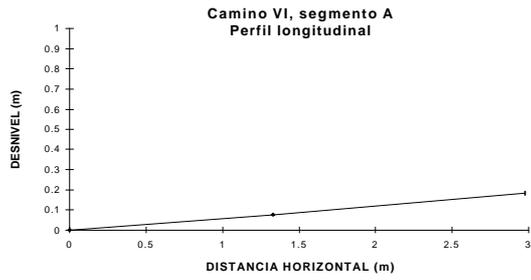


Figura 2.31 .- *Perfiles longitudinales de los segmentos que configuran la cárcava Camino VI.*

Por último, las figuras 2.32, 2.32, y I.3.5 muestran estos mismos datos de la cárcava de Cobaza Oriental, aunque el perfil longitudinal se refiere sólo al segmento A, el principal, cuya pendiente aproximada es del 2.0%.

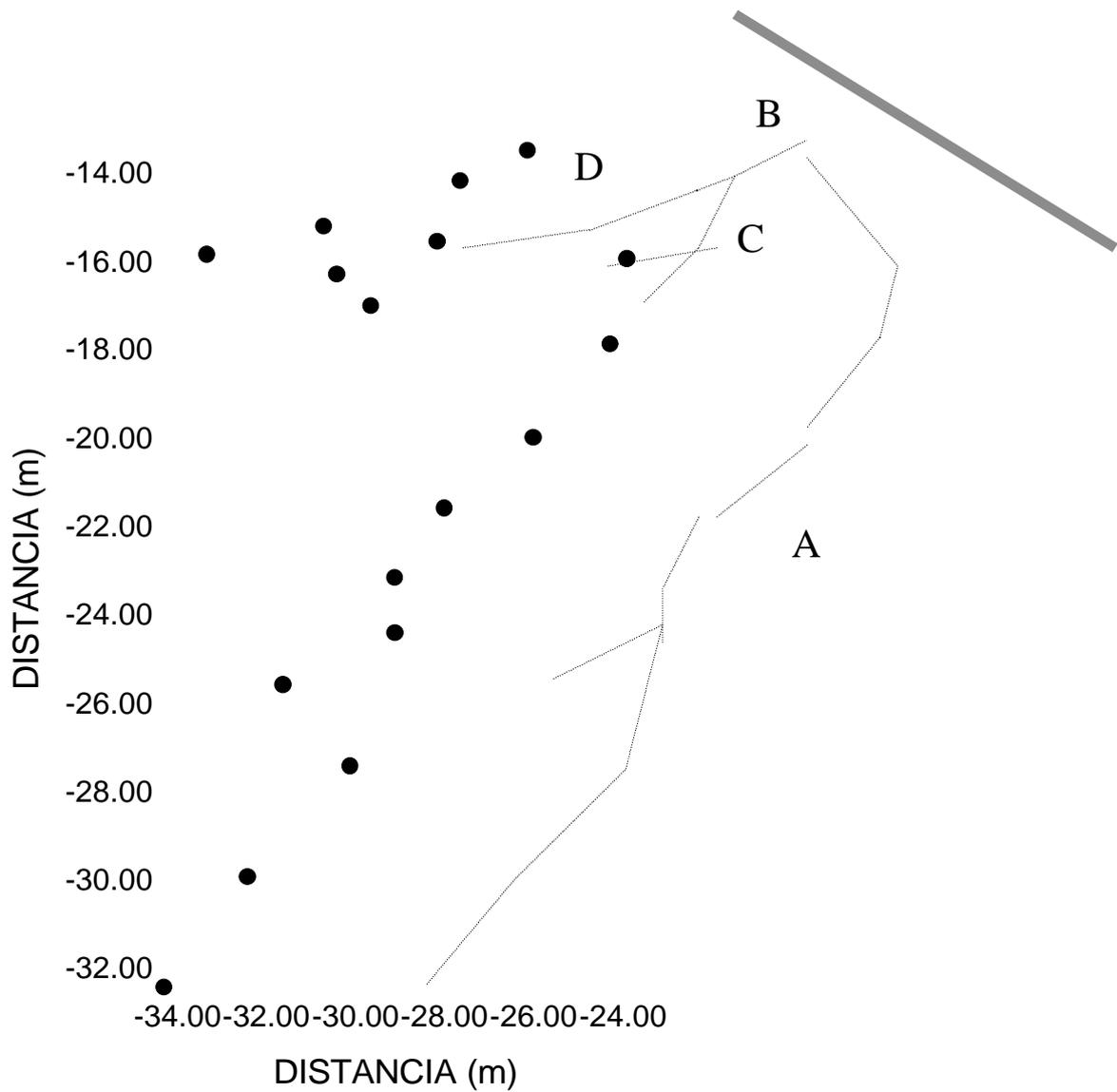


Figura 2.32. Disposición de los distintos segmentos que constituyen la cárcava de Cobaza Oriental.

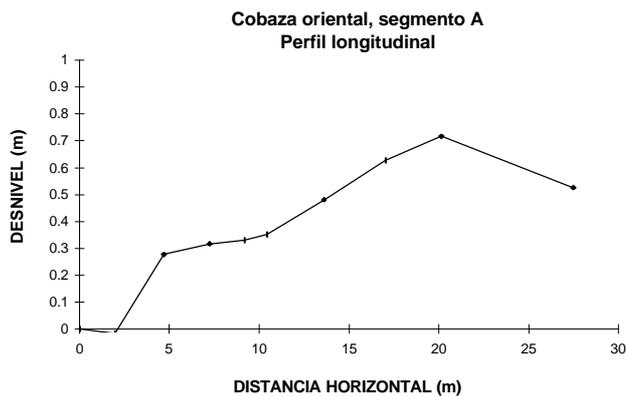


Figura 2.33. Perfil longitudinal cárcava de Cobaza Oriental, segmento A

En estas cárcavas no se da la variación gradual en el área de las secciones transversales que se observó en los dos tipos anteriores, sino que las secciones son más homogéneas, en algunos casos, muy grandes, y las cabeceras son muy nítidas. Ello puede explicarse por la dominancia de un proceso de erosión remontante, que comenzaría en puntos del suelo especialmente susceptibles, como orificios o incisiones, por ejemplo, pequeños tubos de sifonamiento. Las pendientes calculadas de las propias cárcavas son variadas, y las hay

bastante elevadas, aunque la pendiente original del terreno antes de la aparición de las cárcavas es baja. La elevada pendiente de algunas cárcavas se debe a que, frecuentemente, el lecho en la cabecera se encuentra más elevado que en el resto, en posición intermedia entre el suelo original y el lecho del resto de la cárcava, lo que tiene mucha importancia en la pendiente media calculada al tratarse de tramos cortos. Resulta muy arriesgado, con los datos disponibles, asignar un área de la parcela como cuenca aportadora de suelo para el vaciado-rellenado de las cárcavas con el fin de calcular unas pérdidas por unidad de superficie: son fenómenos puntuales con límites muy difusos, y serían necesarios estudios microtopográficos. Lo que resulta evidente con una simple observación en campo es que las cuencas que aportan agua a estas cárcavas son mucho menores que las cuencas aportadoras en los otros dos tipos de cárcavas estudiados en los dos apartados anteriores. Puede decirse por tanto que el efecto iniciador y acelerador de la discontinuidad es manifiesto: hacen falta superficies y pendientes mucho menores para provocar pérdidas iguales o mayores a las producidas por los otros dos tipos de cárcavas efímeras estudiados. Estas reflexiones permiten concluir que las cárcavas asociadas a discontinuidades son claramente diferentes, y se justifica clasificarlas a parte.

Es discutible la clasificación de estas incisiones como cárcavas y no como surcos. El tamaño alcanzado este año por algunas de las secciones supera el límite propuesto por Hauge (1977) (0.093m^2), y aceptado por diversos autores como válido, para separar cárcavas de surcos, aunque es seguro que habrá años en los que no se alcanzará dicho tamaño. Sin embargo, sí parece haber una tendencia a repetirse la aparición en los mismos lugares año tras año. Tras una primera aparición quizás aleatoria, o determinada por los citados puntos más susceptibles, en años posteriores, la hondonada producida por el labrado de la cárcava facilitaría la concentración de escorrentía en la zona y la aparición de la cárcava en la misma posición en años posteriores. Es sobre todo este criterio el que nos lleva a clasificar a este tipo de erosión como cárcava. Además, es efímera, porque se elimina periódicamente por laboreo. Los bordes de caminos, lugares en los que se ha detectado la presencia de este tipo de cárcavas, presentan taludes muy pequeños, con desniveles del orden de 0.5m. Aunque se observa la presencia de tubos de sifonamiento, que quizás tienen importancia para originar la incisión activa, los cauces y las pérdidas no se producen por el desmoronamiento de estos tubos, sino por el proceso de erosión remontante de la cabecera. Este hecho, y la posibilidad de ser fácilmente eliminadas, distinguen a estas cárcavas de las denominadas por Poesen y Govers (1990) “asociadas a taludes”.

La magnitud total de las pérdidas de suelo causadas por cárcavas asociadas a discontinuidades en el conjunto del área de estudio (12.3 m^3) es similar, aunque algo superior, a las debidas a cárcavas efímeras propiamente dichas, lo que da idea de su importancia. Las cárcavas asociadas a discontinuidades tampoco pueden ser apreciadas a partir de fotografías aéreas. Para evitar la aparición de estas cárcavas se hace necesario un diseño cuidadoso de las estructuras de los bordes de las parcelas, fundamentalmente de los caminos, protegiéndolos y suavizando los cambios bruscos de pendiente, aunque es esta una tarea difícil de llevar a la práctica.

2.3.6. 2.3.6.- CONDICIONES CRÍTICAS PARA LA APARICIÓN DE CÁRCAVAS EFÍMERAS PROPIAMENTE DICHAS. MORFOLOGÍA DE CÁRCAVAS DE RECIENTE APARICIÓN.

A partir de octubre de 1996, tras el labrado, se procedió a realizar un seguimiento de las cuencas de La Matea I y II, La Abejera 1 y La Abejera 0, representativas del área de estudio, y en las que se ha comprobado la formación habitual de cárcavas efímeras propiamente dichas. Las parcelas que ocupaban las cuencas se sembraron con cereal a principios de octubre de 1996 siguiendo las técnicas de laboreo habituales en la zona y comentadas en apartados anteriores. El fin fundamental del seguimiento fue identificar las condiciones críticas para la aparición de cárcavas efímeras propiamente dichas. Además, los datos obtenidos podrían ser útiles para una validación aproximada del modelo de simulación. Con estos fines, se continuaron los registros detallados de precipitación, y se visitó el área cada vez que se producían precipitaciones. Se controló también el contenido de humedad de la capa más superficial del suelo (unos 5 cm) antes y después de los periodos de precipitación, utilizando el método gravimétrico tradicional. En cada una de las cuencas, siempre que el encharcamiento del terreno no impidiese el acceso, el muestreo se realizó en tres localizaciones: zona superior, inferior y central. Las cárcavas aparecidas tras las lluvias se midieron con el perfilador ya descrito. Se procede primeramente a describir los datos y resultados obtenidos, discutiéndose brevemente a continuación.

La figura 2.34 muestra la evolución de los contenidos de humedad, expresados como saturación relativa, encontrados para las tres cuencas estudiadas, en relación con la precipitación diaria acontecida a partir de septiembre de 1996.

Sólo la lluvia caída durante los días 4 y 5 de diciembre de 1996 fue capaz de generar cárcavas efímeras propiamente dichas en la zona, concretamente en La Matea I y en La Abejera 0, mientras que no aparecieron en La Abejera 1 ni en La Matea II. La humedad del suelo era muy alta. Además, se generaron cárcavas asociadas a discontinuidades, algunas de importancia, en los mismos lugares ya descritos en el apartado 2.3.4, así como cárcavas relacionadas con el vertido de colectores de avenamiento de parcelas perimetrales, u otro tipo de colectores. Estos últimos tipos de cárcavas no fueron controlados. En la figura 2.6 pueden verse las distintas intensidades y la precipitación acumulada de la citada precipitación de diciembre. Fue una lluvia prolongada, con intensidades bajas y constantes, y sin apenas interrupciones. El periodo de retorno de la precipitación acumulada en 24 hr es de alrededor de 3 años (tabla 2.6). El desarrollo del cultivo era muy escaso en el momento de ocurrencia de la lluvia, con plántulas entre 5-10 cm que cubrían muy ligeramente la superficie del suelo. Las precipitaciones acontecidas antes y después de los días 4 y 5 son de escasa cuantía e intensidad, dándose sólo en contadas ocasiones periodos de 1 minuto en los que se alcanzan intensidades de 0.2 mm/min. Por lo tanto, las cárcavas efímeras propiamente dichas detectadas en las cuencas, medidas el día 10 de diciembre de 1996 son atribuibles a la importante precipitación de los días 4 y 5.

En la figura 2.35 podemos ver los perfiles transversales de la cárcava de La Abejera 0 medidos el día 10 de diciembre, mientras que la figura 2.36 nos ilustra las secciones correspondientes a la cárcava de la Matea II medidas ese mismo día. Sólo los puntos más profundos de las secciones en las figuras 2.35 y 2.36 corresponden al cauce de las cárcavas, que son muy pequeñas, tanto por su longitud como por el área de las secciones transversales. Se clasifican sin duda como cárcavas efímeras y no como surcos ya que su posición coincide exactamente con las cárcavas, mucho mayores encontradas en estas cuencas al final del verano de 1996.

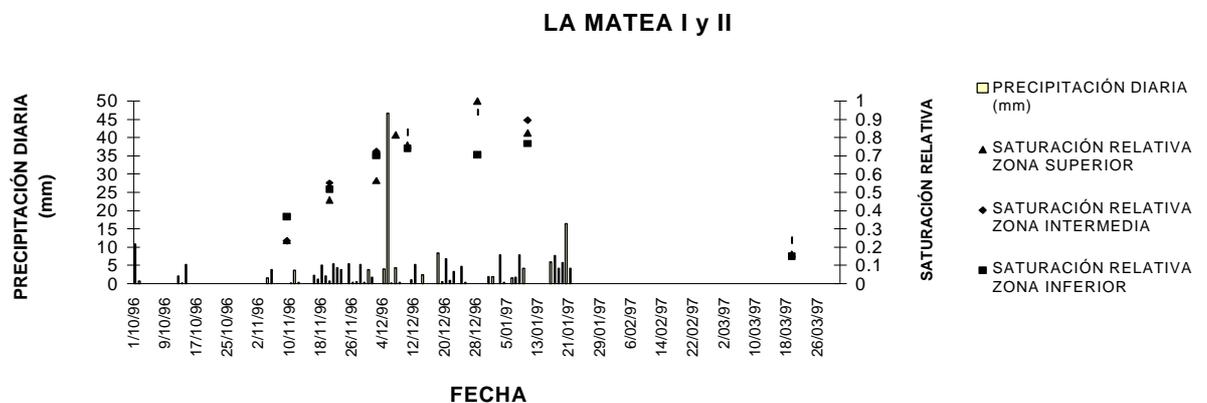
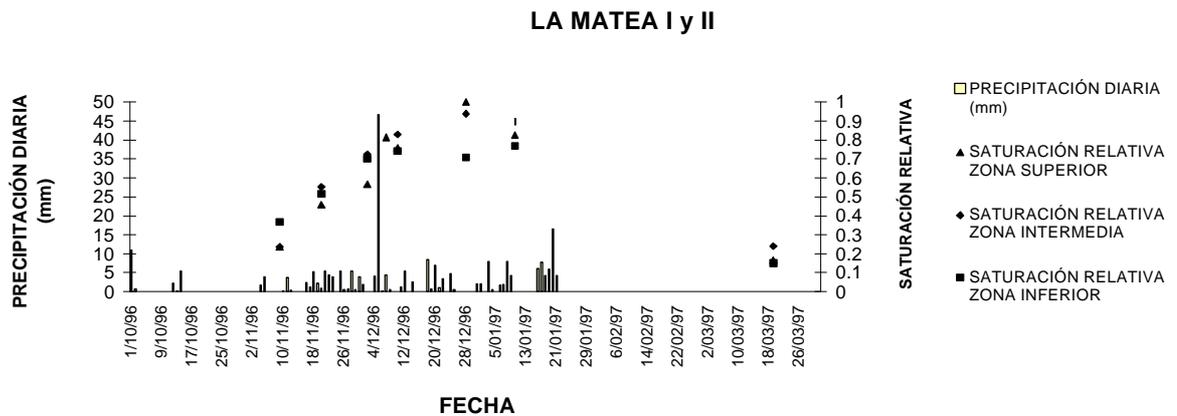
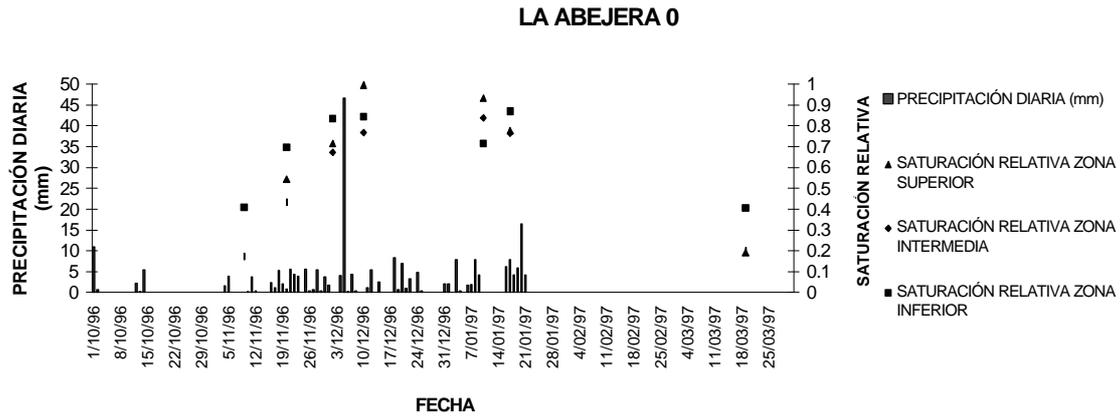


Figura 2.34.- Evolución del contenido de humedad (saturación relativa) en la superficie de los suelos en las cuencas de La Matea I y II, La Abejera 0 y La Abejera 1, desde octubre de 1996 hasta marzo de 1997, en relación con la precipitación diaria en el mismo periodo.

No fue posible realizar un levantamiento topográfico detallado de las cárcavas recién aparecidas, de modo que la separación entre las secciones medidas se midió con una cinta métrica. De todos modos, la topografía de las cuencas es conocida con detalle (ver figuras 2.9, 2.11 y 2.13). En la tabla 2.10 se indica la separación entre las secciones y el área de cada sección transversal atribuible propiamente al cauce de las cárcavas (definido a partir de los datos del perfil completo ilustrado en las figuras 2.35 y 2.36). La sección 1 corresponde al extremo aguas abajo en ambos casos. El volumen excavado se estima, con estos

datos, en 0.272 m³ para la cárcava de La Abejera 0, y en 0.228 m³ para la cárcava de La Matea II. La longitud de la cárcava de La Abejera 0 es de 16.6 m, mientras que la de La Matea II es de 7.2 m. Ambas cárcavas se hallan situadas en el extremo inferior de las cuencas respectivas.

Secciones	La Abejera 0		La Matea II	
	Área (m ²)	Separación (m)	Área (m ²)	Separación (m)
1	0.0132	2.35	0.0219	0.970
2	0.023	1.66	0.163	1.15
3	0.0209	2.37	0.0173	1.17
4	0.0251	1.54	0.0459	1.17
5	0.0141	1.68	0.0419	1.17
6	0.0134	2.22	0.343	1.53
7	0.0139	2.1	0.0095	-
8	0.008	2.7	-	-
9	0.014	-	-	-

Tabla 2.10.- Áreas de las secciones transversales medidas en las cárcavas de La Abejera 0 y La Matea II y separación entre las mismas.

La longitud de la cárcava de La Abejera 0 coincide justamente con la longitud del tramo de máxima pendiente (alrededor del 7%) de la cárcava aparecida en esta misma posición y medida en febrero de 1996, así que la cabecera se situaría justamente en la posición del cambio de pendiente.

Los perfiles transversales completos de las secciones, obtenidos mediante el perfilador, podrían servir para conocer la pendiente de las laderas que conforman la cárcava. Sin embargo, dado lo bajo de la pendiente, es generalmente insuficiente dicha medición, por lo que datos como los que se ilustran en la figura 2.37, en la que la longitud de la sección transversal estudiada es mucho mayor, resultan útiles. En la citada figura se aportan algunas secciones transversales medidas tras el labrado del campo, en octubre de 1996, en las zonas que la cárcava ocupó en su anterior aparición. Estas secciones serían dos ejemplos de las correspondientes al cauce en el que se ha formado la cárcava. Se dispone sólo de datos no sistemáticos y únicamente de La Abejera 0 y La Abejera 1. Con ellos como orientación, y con el complemento de los datos del perfilador, pueden obtenerse valores adecuados de las pendientes de laderas. Otra posibilidad para estimar estas pendientes es la utilización de mapas topográficos detallados como los que disponemos para estas cuencas, metodología similar a la que sugiere Zevenbergen (1987).

En la figura 2.38 se muestra este mismo tipo de mediciones de secciones transversales para la cuenca de La Abejera 1. Corresponden a dos posiciones intermedias de la zona inferior de la cuenca. Dado que la cárcava que aquí se origina suele ser bastante corta, estas mediciones pueden representar bastante bien las condiciones generales de la cárcava.

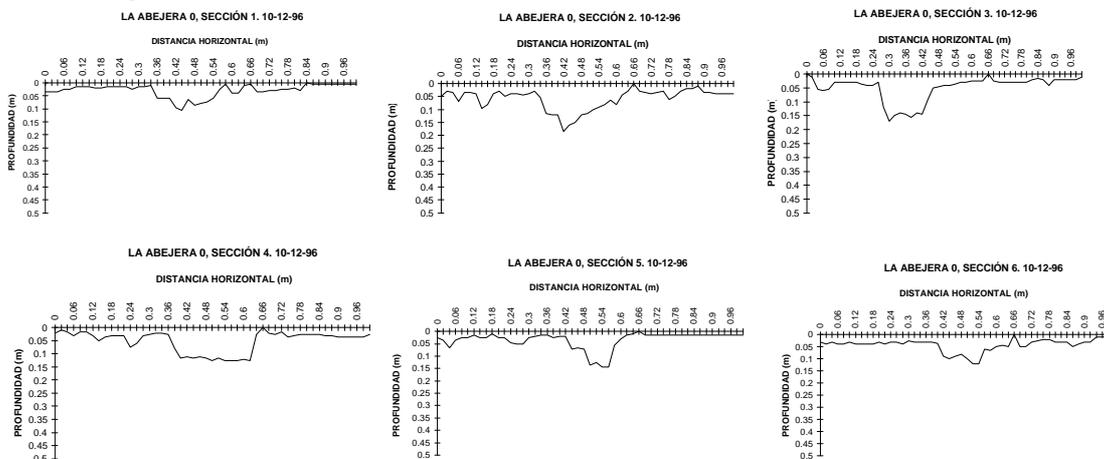




Figura 2.35.- Perfiles transversales de la cárcava de La Abejera 0, aparecida tras la lluvia de los días 4 y 5 de diciembre de 1996.

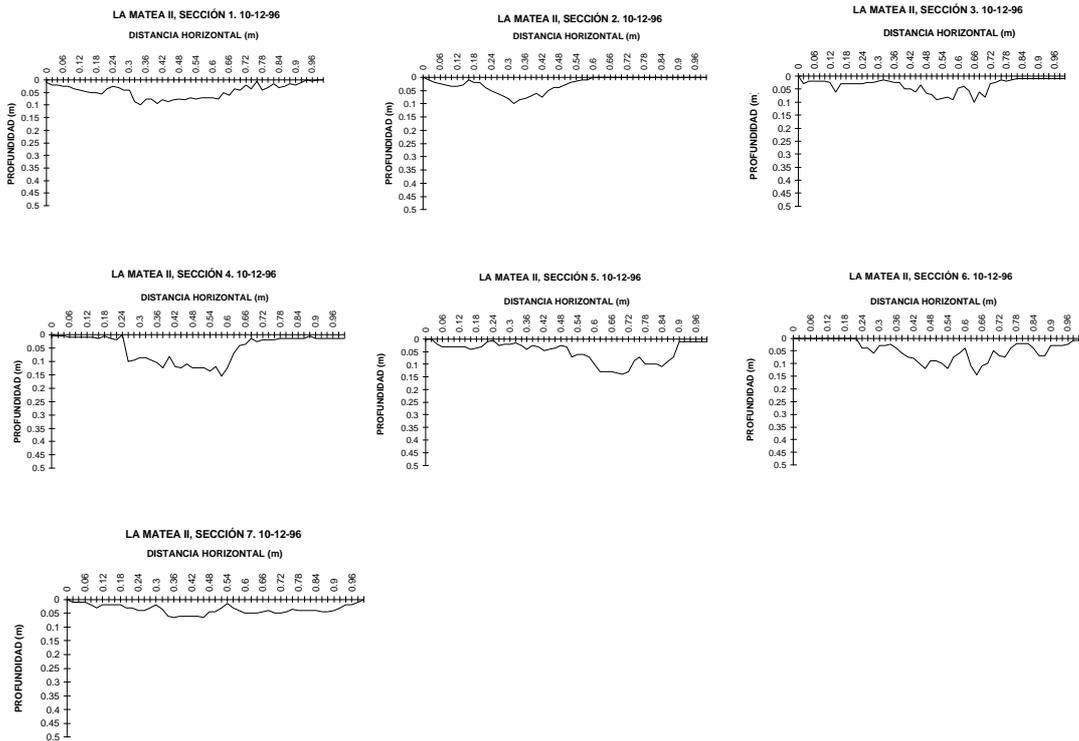


Figura 2.36.- Perfiles transversales de la cárcava de La Matea II aparecida tras la lluvia de los días 4 y 5 de diciembre de 1996.

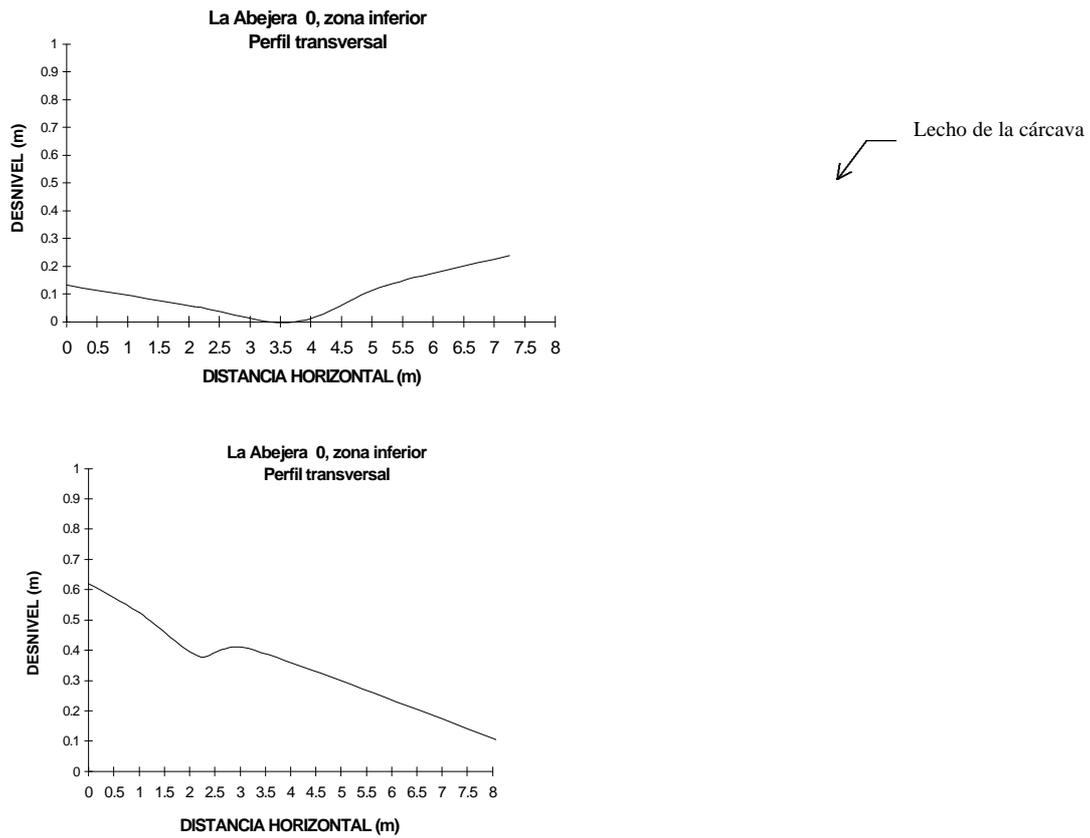


Figura 2.37.- Dos secciones transversales del fondo de valle en La Abejera 0, cauces potenciales de cárcavas efímeras.

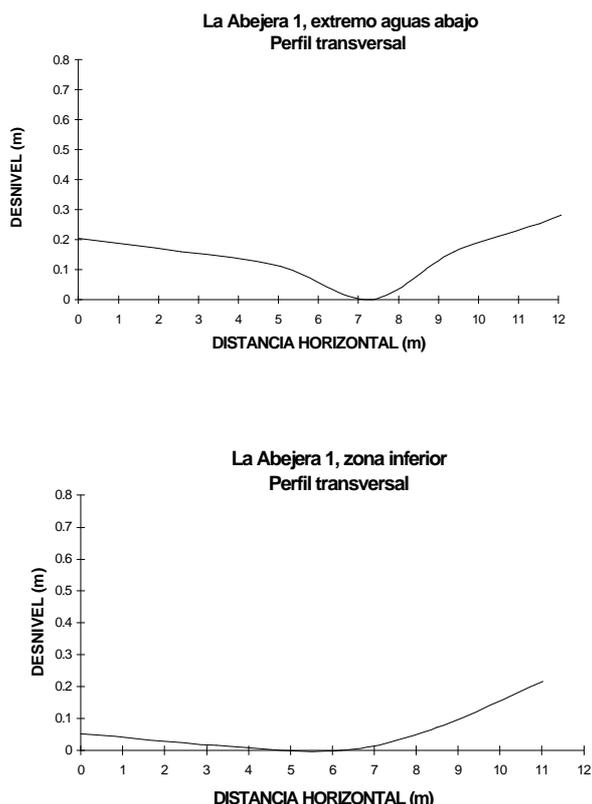


Figura 2.38.- Dos secciones transversales del fondo de valle en La Abejera 1, cauces potenciales de cárcavas efímeras.

En la tabla 2.11 pueden verse las pendientes aproximadas en las cercanías del lecho para los lados izquierdo y derecho, calculadas a partir de las secciones transversales comentadas.

CUENCA	Izquierda	Derecha
LA ABEJERA 0, sección I	0.0433	0.0733
LA ABEJERA 0, sección II	0.1111	0.0662
LA ABEJERA 1, sección I	0.0513	0.0732
LA ABEJERA 1, sección II	0.0091	0.0409

Tabla 2.11.- Pendientes de las laderas a ambos del lecho en algunas secciones de las cuencas de La Abejera 0 y La Abejera 1.

Como puede verse en la figura 2.34, lluvias continuadas, poco copiosas y poco intensas, a partir de noviembre, tuvieron como consecuencia un incremento muy importante del contenido de humedad, aunque no dieron lugar a cárcavas. La lluvia de los días 4 y 5 fue abundante, pero poco intensa, y propició la aparición de pequeñas cárcavas, aunque no en todas las cuencas en las que aparecieron durante el invierno pasado. En ese caso, una lluvia mucho menos abundante pero mucho más intensa (ver figura 2.6), caída en similares fechas (22 de enero) y con condiciones de humedad del suelo probablemente muy parecidas, ocasionó cárcavas de importancia. Las pérdidas ocasionadas por estas dos cárcavas aparecidas en La Abejera 0 y La Matea II son muy limitadas. La explicación hay que buscarla en la baja intensidad de la precipitación, dado que la lluvia total recogida es importante, y el suelo se encontraba casi saturado y prácticamente desprovisto de vegetación. Dado que las condiciones del suelo, casi saturado y desprotegido, eran muy favorables en diciembre de 1996 para la aparición de cárcavas, puede decirse que

la intensidad máxima registrada el día 5 de ese mes, que fue de 12mm/hr, debe de ser muy próxima a la mínima indispensable para la formación de cárcavas en la zona.

La humedad del suelo en el momento de comenzar la precipitación parece ser también un factor muy importante. Estos datos confirman lo ya dicho al analizar los resultados del apartado 2.3.2. Puede decirse por tanto que en la zona, la aparición de cárcavas efímeras como tales requiere tanto lluvias de cierta intensidad y en condiciones de alta humedad del suelo, sin cubierta vegetal, por lo que la aparición de cárcavas no es absolutamente fácil. La época más crítica, de acuerdo con estas condiciones, será el fin del otoño y principios del invierno. En verano, los suelos labrados también son altamente susceptibles. Si el verano es húmedo, el labrado se adelanta, dejando los suelos más susceptibles y durante más tiempo. Sin embargo, las cárcavas asociadas a discontinuidades y las debidas a la interposición en redes de desagüe requieren para su aparición condiciones menos exigentes, ya que se ha detectado su presencia bastante generalizada, lo que está en consonancia con el hecho discutido en los apartados 2.3.4 y .2.3.5 de que estos dos tipos de cárcavas sean los que más pérdidas producen en la zona.

Detallaremos ahora en la información disponible sobre la evolución del contenido de humedad en las cuencas. En La Abejera 1, cuenca relativamente pequeña y con escaso desnivel, es en general difícil apreciar diferencias de importancia en el contenido de humedad del suelo en relación con la posición: la saturación relativa es muy similar, en cada día de medición, en la zona superior, intermedia e inferior. En La Matea I y II, cuencas también pequeñas pero con mucho mayor desnivel que en La Abejera 1, las diferencias son mayores pero no parecen obedecer a un patrón claro, pues en muchos casos no es la zona inferior la que muestra mayores contenidos de humedad. Las diferencias encontradas en La Abejera 0 sí son de importancia, y responden además a un comportamiento coherente. Se trata de una cuenca mucho mayor que las dos anteriores, y con un importante desnivel. El contenido de humedad es en ella claramente mayor en la posición inferior, frecuentemente. Este hecho es mucho más evidente en los momentos en los que el suelo se encuentra más seco. Es decir: el suelo se conserva más húmedo allí durante más tiempo. Parece razonable por tanto pensar que es sólo en cuencas grandes donde el efecto de acumulación de humedad puede tener importancia a la hora de facilitar la aparición de cárcavas, hipótesis avalada por ciertos autores (Moore et al., 1988).

El índice *API* muestra también un comportamiento prometedor aplicado a las pérdidas detectadas tras la lluvia del día 5 de diciembre. En la tabla 2.12 pueden verse las pérdidas producidas ese día en las cuatro cuencas y los valores de *API*. Son los dos mayores valores los que registran pérdidas, registrándose más en el caso de La Abejera 0, con el máximo valor. En los dos casos con menores valores, no se han registrado cárcavas.

CUENCA	API	VOLUMEN EROSIONADO (m³)
LA ABEJERA 0	1278.6	0.272
LA ABEJERA 1	334.7	0
LA MATEA I	341.1	0
LA MATEA II	415.1	0.228

Tabla 2.12.- Valor del índice *API* en relación con las pérdidas tras la lluvia del 5-12-96.

Refiriéndonos ahora a la forma de las secciones (figuras 2.35 y 2.36), cabe destacar en primer lugar su gran irregularidad. En el caso de La Abejera 0 puede intuirse una forma trapezoidal muy próxima a la rectangular. No parece en ese caso haber predominado la erosión de los laterales, sino más bien la erosión en el lecho. En las secciones centrales de La Abejera 0 (secciones 3, 4, 5 y 6), la forma casi rectangular es clara. La anchura en el lecho en estas secciones oscila entre los 12 y los 24 cm, y en el extremo superior entre 16 y 30 cm. Estas anchuras parecen coincidir con la de la zona más deprimida de las secciones transversales medidas antes de la aparición de las cárcavas. Así por ejemplo, para La Abejera 0 (ver figura 2.37), oscilaría alrededor de los 10-30 cm, coincidentes con las anchuras de cárcava reales medidas. De todos modos, se hace necesario establecer unos límites mínimos de curvatura para poder definir con cierta objetividad la anchura del lecho del cauce potencial. La cárcava parece que se ha excavado fundamentalmente degradando el lecho, aunque esto no es algo generalizable, sino que cabe pensar que está grandemente condicionado por el tipo de lluvia: un caudal importante daría lugar a secciones más anchas, mientras que un caudal bajo y constante, del tipo al que parece haberse dado tras la

lluvia de los días 4 y 5, de acuerdo con el hietograma, daría lugar a una sección más estrecha y profunda, entre otras razones, porque el agua escasa se concentrará en la zona ya excavada, erosionando fundamentalmente el lecho.

La forma que la cárcava adquiera durante la primera lluvia debe influir sobre el crecimiento de la cárcava en lluvias posteriores: una cárcava muy ancha favorecerá que lluvias posteriores sólo produzcan erosión en el lecho, si se llegasen a superar las condiciones críticas de flujo, mientras que si es estrecha, es más probable que pueda darse erosión lateral de importancia. La anchura de la cárcava no va a depender únicamente de la anchura del cauce potencial, sino que además, va a depender de los caudales. De hecho, se comprueba que esto es así: en el anejo I.1 pueden verse secciones de La Abejera 0 y La Matea II muchísimo más anchas que las de la figura 2.37.

La forma trapezoidal y no claramente rectangular de las secciones puede en parte explicarse porque el esfuerzo cortante no es homogéneo en todo el lecho, sino máximo en las zonas centrales más profundas, lo que limitaría la erosión en los extremos del lecho. Sin embargo, en las figuras del anejo I se muestran perfiles de cárcavas excavadas en estas mismas cuencas pero en momentos anteriores, donde se aprecian secciones netamente rectangulares. Ello a su vez podría explicarse considerando que lluvias posteriores a las de formación dan lugar a caudales conducidos únicamente por el lecho, en el cauce ya formado, circunstancia en la que la variación del esfuerzo cortante en el lecho debe de ser algo menor.

Al igual que lo detectado para cárcavas causadas por un número elevado de acontecimientos, parece haber cierta tendencia también en este caso a que las secciones sean menores (atendiendo al área) en el extremo aguas arriba, crezcan hacia las posiciones intermedias, y vuelvan a decrecer. Las causas podrían ser las mismas que las apuntadas en apartados anteriores. Quizás parte de la disminución en el extremo aguas abajo se deba a que en realidad se mida en zonas donde se ha producido algo de sedimentación.

En cualquier caso, el pequeño tamaño de las cárcavas formadas tras esta lluvia limita la validez e interés de estas reflexiones y a su posible utilización con modelos.

2.3.7.

2.3.7.- DISCUSIÓN GENERAL

Los datos disponibles, con relación a la Península Ibérica, y a la erosión en cárcavas efímeras, incluidos los que se aportan en esta tesis, se refieren en general a periodos de tiempo muy cortos, y a localizaciones extremadamente puntuales, y sirven sólo para comenzar a situar el problema y para marcar las pautas a seguir en el futuro. Además, la corta duración de los periodos de observación tiene mucha mayor importancia en climas mediterráneos, pues la gran variabilidad entre unos años y otros es una característica intrínseca de este clima. Para otras regiones europeas y norteamericanas, los datos son más abundantes, pero en general adolecen de los mismos defectos.

En la zona de estudio se han identificado tres tipos fundamentales de cárcavas efímeras al final del verano de 1996: cárcavas efímeras originadas por flujos provenientes del exterior de la parcela; cárcavas efímeras asociadas a discontinuidades; cárcavas efímeras propiamente dichas, es decir, las formadas por flujos provenientes de las propias parcelas. En un periodo relativamente seco y exento de lluvias copiosas, se han detectado pérdidas de suelo importantes, y puntualmente muy importantes, de hasta $1.5 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ en cárcavas efímeras propiamente dichas y superiores a $2.7 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ en cárcavas del primer tipo citado. En la mayoría de los casos, las pérdidas unitarias no sólo superan las tolerancias habitualmente establecidas para la profundidad del suelo de que se trate, sino que incluso superan la intensidad de $1.2 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ propuesto como límite superior infranqueable para garantizar un mantenimiento indefinido y rentable de las producciones. Ante la inexistencia de datos de tolerancias a pérdidas de suelo para casos similares al de estudio, es necesario acudir a los proporcionados por el Soil Conservation Service (USA) (Schertz, 1983). En zonas con agricultura en declive y altas intensidades de erosión, como la que nos ocupa, podría discutirse el planteamiento de otro tipo de tolerancia, por así llamarla, "ambiental", de manera que las pérdidas fuesen tales que se pudiese, por ejemplo, garantizar siempre el establecimiento de una vegetación natural óptima en breve plazo. No hay que olvidar que las pérdidas citadas se deben tan sólo a erosión por cárcavas efímeras, y que es evidente que en la zona, la erosión laminar y la erosión por surcos es también relevante en terrenos cultivados.

El volumen total de suelo movilizado en el periodo octubre de 1995 a agosto de 1996 por las cárcavas efímeras en la zona estudiada en Pitillas se estima en 53.0 m³ sin contar las pérdidas en La Abejera 0, que no se incluyen, pues se produjeron en un periodo de tiempo diferente al resto. El 57.1% de estas pérdidas son causadas por el primer tipo de cárcava; las cárcavas asociadas a discontinuidades suponen el 23.3%, mientras que las cárcavas que corresponden al concepto más tradicional de cárcava efímera son responsables del 19.6% de las pérdidas. Las pérdidas unitarias encontradas superan a las contabilizadas en otras dos áreas mediterráneas de la Península Ibérica (ver apartado 1.4.2), en las que las cárcavas efímeras explican la mayoría de la erosión total. Por el momento, no se dispone de información suficiente para nuestro caso sobre la importancia relativa de las cárcavas efímeras. Poesen et al. (1996) indican, citando además a otros autores, cómo el abandono de parcelas en zonas mediterráneas parece incrementar la importancia relativa de la erosión por cárcavas efímeras (apartado 1.4.2). Hay que aclarar que en este caso, el término “efímeras” hace referencia a cárcavas formadas por concentración de escorrentía, en oposición a cárcavas asociadas a taludes, de acuerdo con la terminología habitual en estos autores (ver Poesen y Govers, 1990). Sin embargo, según el criterio más general, estas cárcavas de terrenos abandonados no serían efímeras, sino permanentes, pues ya no se realizaría el laboreo que las eliminase. El posible incremento de la erosión en cárcavas aludido por Poesen et al., es un hecho a tener en consideración, sobre todo si la política de abandono de tierras adquiere auge en el futuro: en zonas mediterráneas, donde la intensidad de la erosión puede ser muy alta, y ésta es debida fundamentalmente a las cárcavas efímeras, un aumento precisamente de la erosión por tales cárcavas puede tener consecuencias muy negativas. Sería interesante contrastar la información de Poesen et al. (1996) con la aportada por Ruiz-Flaño (1993) refiriéndose a la evolución de parcelas abandonadas en valles pirenaicos.

El pequeño tamaño de las cárcavas medidas en Pitillas, sólo detectables con observación sobre el terreno *in situ*, no está reñido con la importancia de las pérdidas detectadas. La utilización de fotografías aéreas, que únicamente permite identificar cárcavas grandes, infraestimaría grandemente la magnitud del problema.

En las cárcavas asociadas a discontinuidades, el papel relevante de la discontinuidad queda de manifiesto ya que menores pendientes y áreas en relación con los otros dos tipos de cárcavas efímeras bastan para producir pérdidas iguales o mayores. Así, la mayor parte de las pérdidas por cárcavas efímeras son debidas, no al propio manejo del suelo ligado estrictamente al cultivo, sino a una inadecuada estructuración y disposición de las parcelas de acuerdo con la red de desagüe, y a la ausencia de infraestructuras tales como colectores que evacúen las aportaciones de cuencas naturales sin dañar el suelo de las parcelas. Como más adelante se comentará, queda por discutir si este tipo de actuaciones, u otras modificaciones posibles, resultan rentables desde el punto de vista económico o ambiental, pudiéndose plantear otras alternativas, como el abandono acompañado de revegetación. De acuerdo con las observaciones y datos aportados, en zonas con gran pendiente, y zonas con problemas de salinidad en pendiente, el cultivo debe de ser abandonado si se desea mantener el suelo a medio plazo. Lo alarmante de las pérdidas por cárcavas del primer tipo hace imprescindible tomar medidas drásticas si se desea seguir contando con la presencia de suelo en dichos casos. Se ha comprobado en diferentes circunstancias el papel clave que la ausencia o presencia de vegetación o restos de vegetación, tiene en el desarrollo y crecimiento de cárcavas efímeras.

Ha quedado patente cómo hay pérdidas unitarias muy importantes en las parcelas cultivadas de la zona debidas exclusivamente a cárcavas efímeras. Un asunto no tratado, pero de la mayor importancia, sería ver, en una superficie más extensa, cuántas cuencas existen con capacidad para generar pérdidas tan importantes. Es decir, se trataría de comprobar si estas pérdidas son algo muy puntual, o si por el contrario, las zonas con alto grado de erosión por cárcavas son muy abundantes. Este trabajo está por hacer, y proporcionaría una información mucho más realista. No sólo se aplicaría, obviamente, a cárcavas efímeras propiamente dichas, sino que debería de realizarse con los otros tipos de cárcavas efímeras y con los otros tipos de erosión. Para el caso de cárcavas efímeras, podría utilizarse información del estilo a la de la figura 2.17 (índice *API*), una vez se dispusiera de colecciones de datos mucho más amplias que las actuales. Esta información sería fácilmente tratable con modelos digitales del terreno y sistemas de información geográfica. La información final serían superficies de suelo y manejo homogéneo, asociadas con pérdidas de suelo anuales y con periodos de retorno. La disponibilidad de modelos de simulación convenientemente calibrados posibilitaría generar información muy rápida y fiable sobre pérdidas, limitando el número de costosas y largas experimentaciones y mediciones a realizar. La dificultad de relacionar la magnitud de la erosión por cárcavas efímeras con índices topográficos, señalada por diferentes autores, pone de manifiesto el interés de contar con modelos de simulación basados en

procesos físicos, y capaces de contemplar una buena parte de la complejidad que encierra este tipo de erosión.

Para la aparición de cárcavas efímeras de importancia en el periodo de estudio han sido necesarias tres condiciones: lluvias de una cierta magnitud mínima; suelo desnudo o casi, muy alta humedad en el suelo. Trataremos en los párrafos siguientes de analizar la importancia de cada uno de estos factores. Para ello, con los datos disponibles, estudiaremos la variación de la erosión como consecuencia de la variación del factor en cuestión, fijando los otros dos. La información disponible más abundante se refiere a las cárcavas efímeras propiamente dichas, como se vio en los apartados 2.3.3 y 2.3.6.

Comenzaremos por la precipitación. El manejo del suelo en las cuencas fue el mismo en el invierno de 1995-96 y 1996-97, y el clima fue similar, de modo que en ambos casos el suelo se encontraba casi saturado en el momento de las lluvias importantes del 22-1-96 y del 5-12-96. La lluvia del 22 de enero (ver figura 2.6) fue relativamente poco abundante (unos 18mm), pero con altas intensidades durante algunos minutos (hasta 60mm/hr), y causó cárcavas efímeras abundantes y grandes. Con la lluvia del 5 de diciembre ocurrió lo contrario: fue abundante (algo más de 50mm), pero la intensidad nunca fue superior a los 12mm/h. Causó erosión por cárcavas propiamente dichas, pero de muy pequeño tamaño, y cárcavas efímeras de los otros tipos, también pequeñas. La cantidad de lluvia recogida en 24hr para esa última lluvia, corresponde a un periodo de retorno de alrededor de 3 años, algo no despreciable. Dado que las condiciones de humedad del suelo, casi saturado, y la ausencia de cubierta vegetal efectiva hacían idóneas las condiciones para la aparición de cárcavas, podríamos decir que la intensidad máxima registrada el día 5 debe de ser muy parecida a la mínima imprescindible para la aparición de cárcavas efímeras propiamente dichas en la zona. En la figura 2.6 se ve cómo los momentos de gran intensidad en la lluvia del 22 de enero son muy breves, pero han tenido una importancia inmensa. Quizás la existencia de dos picos de intensidad, algo separados en el tiempo, incrementó la importancia de esta lluvia. Se deduce de aquí una extrema sensibilidad a la intensidad de la precipitación, de modo que las pérdidas de todo un año pueden estar condicionadas a la aparición de altas intensidades, aunque sólo sea durante breves minutos, en periodos críticos con alta humedad y escasa cobertura. También se deduce de aquí la necesidad de conocer con gran detalle la intensidad de las precipitaciones para acometer el estudio preciso de la erosión.

Es de sobra conocido que una cubierta vegetal tupida previene casi totalmente de la erosión. Lluvias intensas, alguna tanto como la del 17 de enero de 1996, caídas en abril, julio o agosto de 1996 (ver figura 2.6), sobre parcelas cubiertas por el cultivo o restos del mismo, con suelo, si no seco, muy alejado de la saturación, no produjeron en absoluto cárcavas efímeras.

Se dispone de pocos datos para analizar la influencia de la humedad del suelo aisladamente, fijados los otros dos factores. Sí se ha comprobado que lluvias intensas, como la del 1 de octubre de 1996, con intensidades superiores a los 60 mm/hr (figura 2.6), caídas sobre parcelas casi descubiertas, y con suelo muy alejado de la saturación (figura 2.34), no han producido cárcavas efímeras. La lluvia del 16 de abril de 1996 (figura 2.6), con intensidades punta superiores a los 60 mm/h, no produjo efecto apreciable sobre parcelas recién sembradas con girasol. Es posible que, como sugiere Govers (1991), la erodibilidad de estos suelos sea mayor cuanto más secos se encuentran en el momento que comienza la precipitación. Pero nuestras observaciones indican que, si ese hecho se da, su efecto queda superado por el aumento de la infiltración con la consiguiente disminución de la escorrentía, pues con suelo seco no ha habido erosión. En las zonas más deprimidas de la parcela controlada de mayor tamaño, el contenido de humedad es casi siempre mayor que en las zonas más elevadas, observándose que en dichas depresiones es más frecuente la aparición de cárcavas, que avanzan a partir de esa posición hacia arriba con mayor facilidad, aunque no contamos con información suficiente como para cuantificar la influencia de la acumulación de humedad. Las zonas más deprimidas suelen ser además las más salinas y sódicas, desprovistas de vegetación.

Vemos que, cómo es lógico, la cubierta vegetal condiciona todo el proceso. Si la cubierta es completa o casi, no se producen pérdidas por cárcavas sea cual sea la intensidad de la precipitación o el contenido de agua del suelo. Si la cubierta es parcial o nula y el suelo está próximo a la saturación, las pérdidas se producen y con una sensibilidad extrema a la intensidad de la precipitación, importando muy poco o nada la duración y cuantía de la misma si no se supera un cierto umbral de intensidad. El papel de la humedad es también muy importante, pues precipitaciones similares a las que han producido grandes pérdidas con suelo saturado desnudo, no producen pérdida alguna con suelo seco en las mismas condiciones.

El periodo más crítico para la aparición de cárcavas efímeras en cultivos de cereal o barbechos no vegetados en la zona, parece ser el final del otoño y principios del invierno, cuando el suelo generalmente se encuentra más húmedo y más desprotegido, época en la que son esperables precipitaciones intensas o abundantes, o ambas cosas simultáneamente. Las observaciones de estos dos últimos años avalan este comportamiento. El estudio de la probabilidad de ocurrencia de lluvias de cierta intensidad (por ejemplo, superior a 12mm/hr) en esta época, proporcionaría una muy buena información sobre el riesgo de erosión grave. Otra circunstancia crítica, aunque secundaria de acuerdo con nuestras observaciones, es el verano, después de la cosecha del cereal. Secundaria porque la humedad del suelo es menor, la probabilidad de lluvias es también menor, aunque puedan ser intensas, y porque los restos del cultivo protegen en parte al suelo, al menos hasta que son quemados o enterrados. Cuanto antes se realicen estas labores, más crítica será la circunstancia. Veranos húmedos tempranamente favorecen que el labrado se realice pronto.

Del análisis expuesto se deducen algunas reflexiones y propuestas de control de la erosión en cárcavas efímeras en la zona, que pueden servir de orientación para otras similares, y que se tratarán en los párrafos siguientes. Quizás hay una reflexión previa a hacer es precisamente que es necesario realizar una profunda reflexión sobre el tema, estableciendo los objetivos a cubrir claramente, y abordando después los estudios y experimentaciones necesarios. Hoy son inexistentes en nuestro entorno estudios sobre las acciones más adecuadas a realizar y su justificación económica o de otra índole. Para todo ello, el paso previo necesario es conocer la verdadera magnitud del problema. Quizás en muchos casos no sea necesario hacer nada. Los primeros datos apuntan a que el problema es grave en algunos puntos, en los que se superan con creces las tolerancias tradicionalmente consideradas. ¿Las posibles medidas de control deberían de anteponerse a otros criterios, como el económico? Si la puesta en práctica de las medidas de control adecuadas no resultan rentables, ¿debería de optarse por otro tipo de uso de ese suelo, y no por utilizar otros manejos más baratos pero hirientes? Obviamente, para responder a estas y otras muchas preguntas que podrían formularse, sería necesario llevar a cabo estudios económicos y experimentaciones. Además, el resultado de los posibles estudios económicos depende grandemente de los criterios previos que se consideren. Si los costes del control de la erosión del suelo se incluyen como un coste de producción del cultivo, las medidas de conservación pueden resultar rentables (Laflen et al. 1985), aunque es muy difícil que esto ocurra en la zona de estudio, dado el bajo valor añadido de los cultivos comúnmente implantados.

La primera medida que viene a la cabeza es, lógicamente, evitar en todo lo posible que el suelo esté desnudo. El no laboreo aparece como una técnica muy prometedora y viable (Giráldez y González, 1994; Giráldez et al., 1997). Estas cubiertas permanentes harían además de trampas de sedimentos para los flujos provenientes de las partes superiores de las cuencas, y probablemente disminuirían los caudales punta que se alcanzan aguas abajo. En Arnal (1994) puede verse un resumen de las experiencias sobre este método realizadas en Navarra, aunque no se centran específicamente en sus efectos sobre la erosión. En la zona de estudio, las cuencas de Cobaza, Cobaza II y La Matea IV se sembraron este año mediante siembra directa. Las cárcavas, presentes desde el año anterior, obviamente no han desaparecido, pero, aunque no se han medido, se comprueba a simple vista que no ha crecido en absoluto. Es cierto que la erosión por cárcavas efímeras ha sido poco importante en toda la zona este año, por lo que la comprobación de la posible eficacia de la siembra directa no se ha realizado en condiciones óptimas, pero cárcavas como la de Cobaza II, clasificada como “causada por aportes de flujo provenientes de fuera de la parcela”, han tenido importancia en parcelas próximas mantenidas en barbecho o cultivadas con cereal de invierno. Las zonas más sensibles, como son los fondos salinos, que actúan como áreas dinamizadoras de la erosión, deberían de mantenerse cubiertas lo más posible de vegetación, y no ser nunca alteradas ni puestas en cultivo.

En el caso de que sigan realizándose labrados, pueden plantearse diversas medidas. El laboreo en curvas de nivel quizás no protegiese en caso de lluvias extremas (Laflen et al., 1985), pero sí de los efectos de lluvias más normales, que también originan cárcavas. Es una medida sencilla y con poco coste, si es que tiene alguno, aunque puede resultar incómoda para el agricultor. Desde el punto de vista estrictamente de la erosión, el labrado con vertedera paralelamente a las curvas de nivel puede ser positivo al incrementar grandemente la aspereza del terreno. El no quemar el rastrojo, enterrándolo además lo más tarde posible, disminuiría el riesgo en el verano, aunque esto puede obligar a labrar en peores condiciones.

En cárcavas causadas por flujos provenientes de fuera de la parcela, la construcción de drenajes enterrados podría solucionar parte de los problemas, aunque es fácil que su coste resulte demasiado elevado, de modo que, más que como una pauta general, puede sugerirse como una medida puntual. Las barreras vegetales (Dabney et al., 1997a) son una alternativa a tener muy en consideración, que podría ser

útil en principio para disminuir los efectos de todo tipo de cárcavas. Como ocurre con el resto de las medidas, sería necesario experimentar para la aplicación específica de la técnica en la zona, comenzando por la elección de las especies a utilizar. En cuencas cultivadas de cierta extensión, puede ser de interés la instalación de cuencos de sedimentación y regulación de la escorrentía, como los citados por Laflen et al. (1985).

Durante el año 1997 se han seguido realizando en la zona de estudio mediciones y observaciones. Aunque los nuevos datos no han sido procesados ni elaborados todavía, pueden obtenerse de ellos claras conclusiones a nivel cualitativo, por lo que merecen su inclusión en esta discusión general. Estos datos confirman en gran medida lo expuesto con anterioridad.

Hasta el día 20 de agosto, en el que tuvo lugar una intensa tormenta, las cárcavas efímeras tenían mucha menor importancia en la zona que en las mismas fechas del año anterior. Como ya se ha comentado (apartado 2.3.6), la explicación hay que buscarla en la ausencia de lluvias verdaderamente intensas en los periodos en los que el suelo estuvo muy húmedo y desprovisto de vegetación. Con posteriores lluvias, algunas intensas, no se produjeron cárcavas al estar el suelo mucho más seco y cubierto por el cultivo desarrollado. En los terrenos en los que se realizó siembra directa, no aparecieron nuevas cárcavas, ni las preexistentes se agrandaron, aunque no hay que olvidar la escasa intensidad de las lluvias, lo que limita mucho la validez general de la comparación.

Como se ha dicho, el día 20 de agosto sucedió una tormenta muy importante, de la que ahora mismo se desconocen los detalles (precipitación total, intensidades, duración). En ese día, una parte importante de las parcelas del área de estudio se encontraban ya labradas, incluso algunas de las que se habían sembrado con siembra directa el año anterior. En prácticamente todas las parcelas labradas aparecieron cárcavas de todos los tipos descritos, y algunas de mucha importancia, con destrozos realmente grandes. En varias de esas parcelas, las cárcavas eran bastante mayores que las medidas en agosto de 1996, según podía apreciarse a simple vista. Además, aparecieron cárcavas en otras muchas localizaciones nuevas, con menores o mucho menores cuencas vertientes y pendientes. Así por ejemplo, las cárcavas de Cobaza y Cobaza II (apartados 2.3.3 y 2.3.4), eran muy grandes, y en la misma parcela aunque en distintas subcuencas, aparecieron más cárcavas, no identificadas el pasado año, por lo que los valores de pérdidas medidos en agosto de 1996 serían un valor mínimo en comparación con las causadas únicamente por esta lluvia. En La Abejera 1 (apartado 2.3.3) ocurre algo similar. Sin embargo, las parcelas mantenidas con vegetación o restos de cultivo sufrieron daños mucho menores, en algunos casos incluso inapreciables, aun en cuencas de muy elevada pendiente, como La Matea II. Una excepción es la cuenca de La Abejera 0, donde aparecieron dos grandes cárcavas, aunque algo menores que las medidas en enero de 1996. La parcela en general estaba cubierta de rastrojos, pero la zona en la que aparecieron y se desarrollaron las cárcavas, la misma que en anteriores ocasiones, corresponde a una zona deprimida, salinizada, y desprovista de vegetación, lo que confirma la importancia de estas localizaciones para la generación de cárcavas.

Sin rechazar la conclusión de que el otoño-invierno parece ser la época en la que se pueden formar cárcavas grandes con mayor facilidad, se confirma cómo también lluvias importantes de verano son capaces de hacerlo en zonas desprovistas de vegetación, por otro lado bastante abundantes este año, al haber sido un verano bastante húmedo, que permitió labrar tempranamente. Por tanto, la condición de que el suelo esté próximo a saturación no es imprescindible para la aparición de cárcavas. No cabe la menor duda de que solamente el efecto de esta lluvia ha sido suficiente para que en muchos puntos de la zona de estudio se haya superado con creces la erosión tolerable, sin contar la acción de la erosión laminar o en surcos. Probablemente el total de pérdidas en la zona debidas a cárcavas efímeras en el periodo octubre 1996-octubre 1997 sea muy parecido al medido para el periodo octubre 1995-octubre 1996, por lo que, en dos años consecutivos las pérdidas han sido muy importantes. Estas observaciones ponen de relieve la importancia de los acontecimientos aislados, lo que puede justificar, como hacen algunos modelos, la utilización únicamente de la lluvia más importante del año para la estimación de pérdidas por cárcavas efímeras. Así, si en el periodo octubre 1995-octubre 1996 las pérdidas se deben básicamente a la lluvia del 22 de enero, las del periodo octubre 1996-octubre 1997 se deben casi exclusivamente a la del 20 de agosto.

En cuanto al método utilizado para la medición de cárcavas, puede decirse que ha resultado útil y preciso. Sin embargo, de cara a mediciones frecuentes de gran cantidad de secciones resulta muy conveniente disponer de algún sistema automatizado que evite la lectura desde fotografías de los perfiles, tarea costosa y monótona. Otra, posibilidad para facilitar el trabajo es limitarse a planimetrar las imágenes de las

secciones transversales medidas, una vez calculada la escala correspondiente. El método propuesto por Lawler et al. (1997) puede ser de interés para mediciones de cárcavas activas en plazos largos. Consiste en enterrar sensores sensibles a la luz, de modo que conforme la erosión avanza, el sensor queda expuesto al sol, registrándose el momento en el que comienza la exposición.

La erosión producida en grandes zanjas de desagüe en la zona ha sido enorme, y ha conducido a la destrucción de sus tramos superiores y al depósito de grandes volúmenes de sedimentos aguas abajo. Queda así de manifiesto la necesidad de más adecuados criterios a la hora de estructurar y diseñar el desagüe de zonas tan sensibles, donde pequeñas modificaciones de las condiciones naturales pueden tener graves consecuencias. La magnitud de la erosión producida en estas zanjas es ahora mismo desconocida, pero probablemente será mucho mayor que la causada por cárcavas efímeras. Además las zanjas son origen de numerosas cárcavas asociadas a bancos que incrementan la gravedad y complejidad del problema. Las recientes obras de concentración parcelaria, que han conducido a la defectuosa ordenación de las parcelas y a la construcción de los colectores hoy tan erosionados, han sido causantes de un importante deterioro en las condiciones del área desde el punto de vista de la erosión de suelo. Los diseños poco cuidadosos con la red de desagüe quizás presenten pocas consecuencias negativas en áreas poco erosionables, pero es muy importante en terrenos como éstos, lo que no debe de olvidarse para futuras actuaciones en lugares similares. Además de la elección correcta de las zonas de establecimiento de los colectores dentro de la red de desagüe de las cuencas y de la elección de pendientes y tamaño de la sección, debe de plantearse la vegetación inmediata de la estructura, aunque el asunto, en zonas semiáridas y salinas, no es de fácil solución.

Hay que destacar que en la zona de estudio sólo se ha medido con detalle la erosión en cárcavas efímeras, y hay evidencia de no despreciables intensidades de erosión por surcos, por erosión laminar en las parcelas, y de intensísima erosión de los colectores de avenamiento. Además, hay otras formas de erosión actuando que son de la mayor importancia en la aportación de sedimentos a nivel de cuenca. Se trata de las cárcavas asociadas a los taludes de los colectores, de cárcavas permanentes discontinuas, cárcavas permanentes originadas por la erosión de cunetas, bordes de caminos, lindes de parcelas y colectores diversos, y la erosión de todo tipo que proviene de parcelas abandonadas. Se están ya realizando mediciones de las pérdidas debidas a gran parte de los tipos de erosión citados, y todo parece indicar que las pérdidas, referidas a la cuenca completa, son de gran importancia, lo que indica la necesidad de conocer también con detalle la erosión fuera de los propios terrenos de cultivo. Al hablar de erosión a nivel de cuencas o subcuencas hay que plantear la misma reflexión que en párrafos anteriores con respecto a la erosión en cárcavas efímeras: aunque sin duda es interesante conocer lo que ocurre en una cuenca aislada, elegida casi al azar, hay que ir más allá, e intentar averiguar la que ocurre en áreas más amplias para conseguir una visión realista. A este nivel se hace imprescindible la realización de mediciones a la salida de la cuenca y en su interior, como las que aludía al principio del apartado. Una posibilidad de enorme potencialidad, y la única viable a gran escala, es la utilización de modelos de simulación convenientemente calibrados a partir de los datos de campo. Este tipo de trabajos que incluyen costosas mediciones y análisis con modelos, deben de realizarse prioritariamente en zonas en las que mediciones y observaciones previas las han destacado como de mayor susceptibilidad e interés.

A raíz de estas discusiones, que muestran la gran erodibilidad de los suelos de la zona, conviene llamar la atención sobre el deterioro que podría ocasionar en los mismos acciones como su puesta en riego, al margen de otras consideraciones que podrían hacerse, de índole económico, o en relación con la salinidad y alcalinidad de los suelos. Ha quedado comprobado cómo intensidades bajas de precipitación (apartado 2.3.6) son capaces de desencadenar procesos erosivos, por lo que el diseño de los riegos por aspersión debería de ser muy cuidadoso. Además, es muy probable que el riego de estas tierras incrementase espectacularmente la erosión por sifonamiento, como ha ocurrido en regadíos de suelos muy similares en Las Bardenas.

Ante la gran susceptibilidad de estos suelos se hace necesario, en primer lugar, una adecuada caracterización de los mismos, y a continuación, proceder a su localización y a cuantificar la extensión que ocupan, con el fin de poder orientar su uso adecuadamente. La interacción que se da entre todos los tipos de erosión, actuando simultáneamente, hace pensar que las medidas de planificación y de control han de realizarse globalmente, refiriéndose a extensas áreas y a cuencas hidrológicas, y no tratando únicamente de corregir los problemas de manera puntual.

Quizás la principal idea a destacar sea la casi total ausencia de datos adecuados para conocer la magnitud real del problema de la erosión de suelo, tanto en Navarra como en España en general, y tanto sobre

erosión en cárcavas efímeras como sobre erosión total en terrenos de cultivo. La circunstancia es muy similar en lo que se refiere a erosión en otro tipo de entornos diferentes del agrícola. Un trabajo que ayuda a situar el problema a nivel de Navarra puede verse en Del Valle y Donézar (1995b). El conocimiento en cierta profundidad de las principales características del problema, como distribución espacial y temporal, factores controladores, intensidad, etc., es un punto de partida indispensable para cualquier paso posterior, como la propuesta de medidas de control rentables y realistas, planificación y ordenación del territorio, establecimiento de técnicas de manejo de cultivos óptimas, análisis, desarrollo, evaluación y utilización de modelos de simulación, etc.

Ciñéndonos al ámbito agrícola, es posible que el problema sea mucho más importante de lo que parece, o que ocurra lo contrario, pero hoy por hoy no se dispone de datos como para inclinarse por una posibilidad u otra, al menos en bastantes zonas. Tradicionalmente, comarcas como la Cuenca de Pamplona o La Valdorba, o alrededores de Estella, todas ellas en Navarra, no se cuentan como gravemente afectadas por problemas de erosión. Sin embargo, fuertes aguaceros caídos este año, algunos en épocas críticas, han producido pérdidas de suelo evidentemente importantes, incluyendo grandes cárcavas efímeras. No se está por el momento en condiciones de analizar la magnitud de estas pérdidas, ni de compararlas con otras o con una tolerancias, ya que no se han medido ni ahora ni nunca, ni se tiene un conocimiento suficiente de las intensidades de las lluvias, ni de su distribución temporal, ni se conocen adecuadamente las tolerancias a pérdidas de suelo propias de nuestras condiciones. Pero, por otro lado, se tiene la evidencia de que en los últimos decenios, en estas comarcas, las producciones de los cultivos por unidad de superficie no sólo no han disminuido, sino que han aumentado. Ello puede deberse a que las pérdidas de suelo han estado por debajo de las tolerancias, o que, habiendo estado por encima, los avances tecnológicos (abonados, fitosanitarios, pesticidas, maquinaria) han enmascarado los posibles efectos de la pérdida de suelo. Desde luego que en muchas zonas elevadas de parcelas de la Cuenca de Pamplona, por ejemplo, se aprecian las propias margas al aire, debido a la erosión hídrica y la erosión por el laboreo, margas que convenientemente tratadas, son capaces incluso de producir cosecha. En Pitillas ha podido ocurrir un enmascaramiento semejante. Por lo tanto, y como punto de partida para el futuro, es imprescindible realizar mediciones generalizadas y duraderas sobre la magnitud de la erosión. Al menos parte de esta toma de datos hay que referirla a nivel de cuenca, contabilizando la evacuación de sedimentos a la salida de la misma, y midiendo en su interior los efectos de los distintos tipos de erosión, pudiendo obtenerse de este modo un conocimiento más adecuado y detallado de la dinámica de los procesos.

En Navarra se han comenzado ya algunos trabajos del máximo interés en esta línea, con la instrumentación de cuencas cultivadas para controlar erosión, contaminación por agroquímicos, y caudales (Del Valle de Lersundi y Donézar, 1995a). En la coyuntura actual, y en terrenos altamente degradados, el criterio económico parece algo secundario en estudios como éste, al menos aparentemente. Sería el criterio conservacionista y de óptima utilización de los recursos los que justifican estos estudios: aportes de sedimentos, con sus contaminantes, riesgo de desertificación, alteraciones microclimáticas, alteraciones de fauna y flora, etc. Estos trabajos deberían de realizarse en primer lugar en las zonas que estudios y observaciones previas han mostrado su alto riesgo de erosión acelerada. A este respecto, los trabajos de Donézar et al. (1990 a,b), aunque no se basan en mediciones, son un adecuado punto de partida, y sirven para ponernos en situación ante el problema en base a criterios objetivos.

A modo de ejemplo, un amplio territorio de especial interés en Navarra, es el de las Bardenas Reales. Los problemas señalados en Pitillas, y con intensidades probablemente mayores, parecen darse en este territorio vecino, de características geológicas y de uso del suelos similares. Mucho se ha hablado sobre la importancia de la erosión que allí se da, y muchos y buenos trabajos se han elaborado a cerca de casi todo los aspectos de la zona. Además, la controversia sobre la óptima utilización de este territorio siempre está presente. Aunque se han formulando ya opiniones, algunas muy justificadas, sobre el manejo de las distintas áreas de Bardenas, un conocimiento real sobre la hidrología de la zona, hoy inexistente, permitiría planificar mucho más adecuadamente acciones futuras. La gravedad de los fenómenos de erosión encontrados en una zona muy similar como es Pitillas y nuestra ignorancia sobre la importancia, magnitud y dinámica de real de los fenómenos hidrológicos en estas zonas justifica sobradamente estos estudios, por razones económicas y sobre todo medioambientales. Las Bardenas es un territorio muy humanizado desde antiguo, pero en las últimas décadas, probablemente, de manera más intensa por la agricultura. Quizás los resultados sean sorprendentes. Quizás estemos a tiempo de corregir fenómenos cuya magnitud no sospechamos, quizás haya poco que corregir, quizás con exceso de pesimismo damos por imposible la solución de problemas que destrazan en decenios un territorio de miles de años de antigüedad, destinado a perdurar otros tantos, y que aporta miles de toneladas de sedimentos al Ebro...

3. - DESARROLLO DE UN MODELO PARA ANALIZAR LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.

En el capítulo 1 se han expuesto las principales ecuaciones que, de acuerdo con Foster (1986) deben de considerarse para estudiar adecuadamente las cárcavas efímeras. El modelo EGEM, descrito también en el capítulo 1, supone una importante simplificación de las mismas, así como del fenómeno general de la erosión por cárcavas efímeras. Con el fin de mejorar el conocimiento de los procesos implicados y de disponer de una herramienta de predicción, sería conveniente contar con un modelo más basado en procesos físicos (Zevenbergen, 1987; Thorne et al., 1986; Thomas y Welch, 1988). A la hora de acometer este empeño parece de la mayor importancia incluir términos que contemplen la naturaleza transitoria del fenómeno (Bennet, 1974), y considerar la variación del cauce erosionable. Se propone un modelo que se adaptará a las peculiaridades de las cárcavas, basado en el modelo de Alonso y Combs (1990). Sus características fundamentales se describen en el apartado 3.1.1, mientras que en los apartados 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4, se detallan algunas características del mismo.

3.1.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL MODELO.

El método propuesto ha de explicar la aparición y crecimiento de una cárcava efímera provocada por una lluvia que causa sólo erosión, prescindiendo de los procesos de sedimentación al final de la cárcava. En el modelo EGEM (USDA-SCS, 1992) se adopta también esta simplificación. Aunque puede haber cárcavas con variadas pendientes en las que zonas de sedimentación neta alternan con zonas de erosión neta (Thorne et al., 1986), éstas pueden separarse bien, lo que permite estudiar los procesos aisladamente.

Partimos de un canal prismático cuyas características geométricas son conocidas, y constituido por la zona más deprimida de una parcela (ver figura 3.1), en la que potencialmente puede darse la aparición de una cárcava. La pendiente de los taludes del canal viene dada por la pendiente natural del terreno. La forma de la sección transversal se considera trapecial, y la determinación de la anchura del lecho se realizará también en base a la disposición natural del terreno. El suelo se considera uniforme. La hipótesis fundamental es que la aparición de una cabecera y el desarrollo de una cárcava se debe a la superación del esfuerzo cortante crítico. El tramo a estudiar, de longitud L , se divide en subtramos de longitud Δx , y el periodo total de tiempo a considerar se divide en pasos de tiempo de duración Δt . El caudal, la capacidad de transporte y el esfuerzo cortante son mayores en las cercanías del extremo aguas abajo de la parcela por los aportes laterales de agua. Cabe esperar por tanto que los esfuerzos cortantes críticos se alcancen frecuentemente en lugares intermedios de la cuenca.

La hipótesis de erosión limitada por transporte ha sido tenida en consideración por diversos autores a la hora de cuantificar el fenómeno de la erosión hídrica (USDA-SCS, 1992). Bennett (1974) la plantea como un enfoque alternativo a la ecuación de Foster y Meyer (1972a) (ver ecuación 1.4.6). La hipótesis de limitación por transporte indica que siempre va a haber material disponible para ser arrancado y transportado, incorporado a la corriente, por su abundancia y alta predisposición a ser movilizado. Según este enfoque:

$$DR_j^n = (G_j^n - Tc_j^n) \quad (3.1)$$

donde:

DR_j^n = arranque en un subtramo j en el instante n (Kg/s)

G_j^n = carga de sedimentos que alcanza el subtramo i en el instante n (Kg/s)

Tc_j^n = capacidad de transporte en el subtramo i en el instante n (Kg/s)

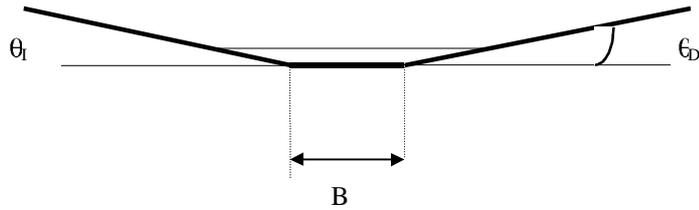


Figura 3.1.- Definición del canal prismático inicial (sección transversal).

En toda sección en la que se supere el esfuerzo cortante crítico, arranque y erosión proceden hasta llenar la capacidad de transporte en el subtramo. A la diferencia entre la capacidad de transporte del flujo en un determinado tramo y la carga de sedimento que entra en el mismo, en un determinado instante, le daremos el nombre de capacidad de transporte disponible en el flujo en ese instante y posición. En la ecuación anterior, $G > T_c$ indica condiciones de sedimentación. Aunque, en general, no se sabe si la erosión es limitada por transporte o por arranque, esta hipótesis resulta más fácilmente aceptable para casos de suelos altamente erosionables. Estudios llevados a cabo en zonas de loess en Mississippi (USA), ponen de relieve una tendencia a la limitación por transporte en el proceso erosivo (Grissinger et al., 1989). Del trabajo de Spomer y Hjelmfelt (1986) pueden extraerse conclusiones similares, al detectarse una fuerte correlación entre volumen de escorrentía y pérdidas de suelo totales por cárcavas efímeras. De esta manera la naturaleza cohesiva del lecho en este modelo queda representada mayormente por el esfuerzo cortante crítico, ya que todo flujo con un esfuerzo cortante menor que el crítico no producirá erosión alguna; por el contrario, cuando este esfuerzo cortante se vea superado, la erosión procederá hasta completar toda la capacidad de transporte. No hay aporte de sedimentos de las laderas adyacentes al cauce. Tampoco se considera la posibilidad de derrumbamientos, poco importantes en cárcavas efímeras, como se ha comprobado en nuestras propias observaciones de campo. En el modelo EGEM (USDA-SCS, 1992) se considera que el derrumbe de taludes ocurre en cárcavas permanentes con profundidad mayor que a 46 cm, límite superior considerado por los citados autores para las cárcavas efímeras.

En el planteamiento del modelo es necesario contar con una formulación adecuada de la ecuación de continuidad para el sedimento pues, como se detallará más adelante, aplicándola entre las dos secciones transversales que limitan a cada subtramo, podremos calcular la magnitud de la degradación en cada subtramo. Además, son necesarias las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad para el agua que describen el flujo. Todas estas ecuaciones se detallan a continuación, y para su formulación, se admite como válida la hipótesis de que es suficiente considerar tan sólo una coordenada espacial (flujo unidimensional).

En cuanto a las ecuaciones del flujo del agua, asumiendo que el canal es suficientemente recto y uniforme, el flujo puede caracterizarse adecuadamente mediante un modelo unidimensional, tratándose de un flujo gradualmente variado. Las ecuaciones que gobiernan un flujo gradualmente variado no permanente en un canal erosionable son (Chen, 1973):

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta}{A} Q^2 \right) + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} + S_f = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + B \frac{\partial z}{\partial t} = q_L \quad (3.3)$$

donde:

A = área mojada

Q = caudal

β = factor de corrección

h = calado

z = elevación del lecho del canal

S_f = Pendiente de la línea de energía

g = aceleración de la gravedad

B = anchura del lecho activo

q_L = caudal lateral de agua por unidad de longitud del canal

x = distancia a lo largo del canal
 t = tiempo

El hidrograma de entrada en el canal, como propusiera Thomas (1972), tanto lateral como por cabecera, es discretizado, tratándose como si fuese una sucesión de episodios en régimen permanente con diferentes magnitudes y duraciones, y con cambios instantáneos de un nivel a otro; es decir, se utiliza un análisis hidráulico en periodo extendido. Se supone que los cambios en el lecho dentro de cada periodo Δt son despreciables en comparación con los cambios en el área mojada. Con estas suposiciones, y considerando que $f=1$, las ecuaciones anteriores pueden aproximarse de la siguiente manera (Alonso y Combs, 1990):

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{V^2}{2g} + h + z \right) + S_f = 0 \quad (3.4)$$

$$Q(x + \Delta x) = Q(x) + q_L \Delta x \quad (3.5)$$

donde:

V = velocidad media del flujo

Para resolver estas ecuaciones se usa un método tipo al de “standard step” (Chow, 1958, sección 10-6), que resulta muy adecuado para el estudio del flujo en cauces naturales, porque permite estimar las variables del flujo SECCIÓN 1 es especificadas. La figura 3.2 ilustra el SECCIÓN 2

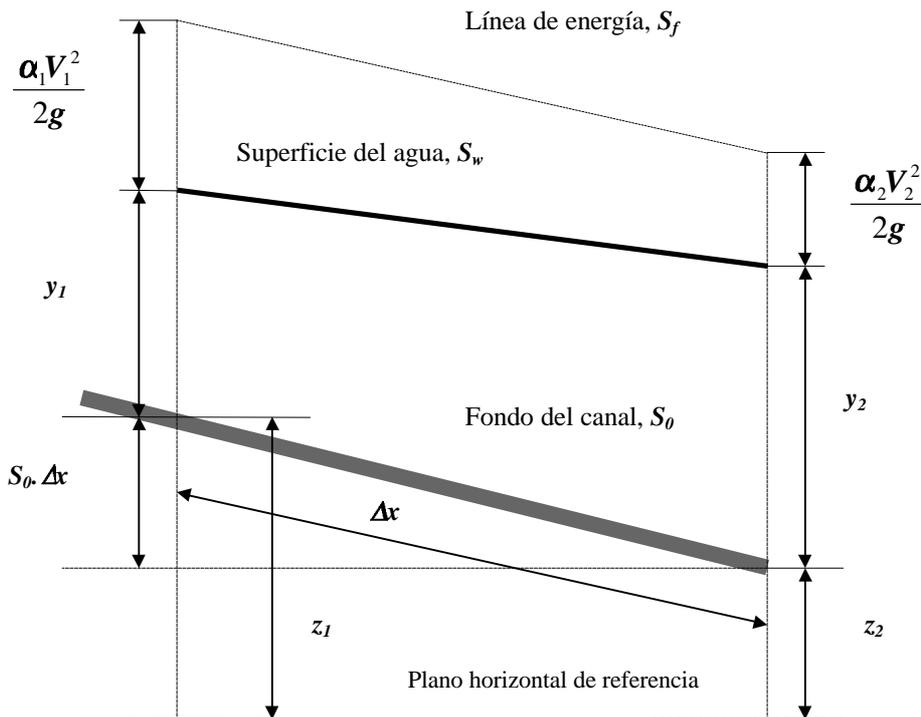


Figura 3.2- Tramo de cauce para la deducción del método del paso estándar, donde y_1 e y_2 son los calados, S_w es la pendiente de la superficie libre del agua, y S_0 es la pendiente longitudinal del lecho del canal.

Sean Z_1 y Z_2 las elevaciones de la superficie del agua por encima del nivel de referencia en las secciones 1 y 2 respectivamente (figura 3.2):

$$Z_1 = S_0 \cdot \Delta x + y_1 + z_2$$

$$Z_2 = y_2 + z_2$$

donde:

y_1 e y_2 = calados

S_o = pendiente longitudinal del lecho del canal

La pérdida por fricción se considera :

$$h_f = S_f \cdot \Delta x = \frac{1}{2} (S_{f_1} + S_{f_2}) \cdot \Delta x \quad (3.6)$$

donde S_{f_1} y S_{f_2} son las pendientes de la línea de energía en las dos secciones extremas. Para estimarlas se utiliza la ecuación de Manning, suponiendo un coeficiente de aspereza constante:

$$S_f = n^2 \cdot Q^2 \cdot R^{-\frac{4}{3}} \cdot A^{-2} \quad (3.7)$$

donde

n : coeficiente de aspereza de Manning

R_h : radio hidráulico (m)

El balance de energía entre dos secciones quedará:

$$Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_e \quad (3.8)$$

donde:

α = coeficiente de ajuste de la altura cinética media

h_e se añade para tener en consideración las pérdidas por remolinos, que pueden llegar a ser muy importantes en canales no prismáticos. Éstas dependen sobre todo del cambio en altura de velocidad. En este caso, se aplica:

$$h_e = \left| \alpha_2 \frac{V_2^1}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^1}{2g} \right| \cdot k \quad (3.9)$$

donde $k=0.1$ para tramos con modificaciones graduales, y $k=0.5$ para tramos con modificaciones abruptas (Chow, 1958, sección 10-4). Los coeficientes α_1 y α_2 se considera igual a 1 en todos los casos. En este modelo, se consideran abruptas las expansiones y graduales las contracciones.

Utilizando las alturas totales, la ecuación (3.8) queda:

$$H_1 = H_2 + h_f + h_e \quad (3.10)$$

Es ésta la ecuación básica que define el procedimiento del paso tipo estándar. En el modelo, se aplica dos a dos entre todas las secciones consecutivas definidas, comenzando por el extremo aguas abajo del canal. Conocido en dicho extremo el nivel del agua con respecto al nivel de referencia (lo que permite conocer H_1), el algoritmo procede mediante un método de prueba y error a estimar el nivel del agua en la sección aguas arriba siguiente, de modo que se cumpla la ecuación (3.10) con la precisión deseada (Alonso y Combs, 1990). Si en un número determinado de iteraciones no se consigue una solución óptima, se supone que, en la sección en cuestión, el calado es el normal, a cuyo cálculo se procede.

El modelo permite introducir un valor concreto del nivel en el extremo aguas abajo. Sin embargo, en una cárcava natural ese valor es siempre desconocido. Lo que se hace es suponer que el calado, en el extremo

de comienzo de los cálculos, es el calado normal. Chow (1958, sección 10-6) admite que los errores, tanto por considerar un valor incorrecto del nivel en la sección de comienzo, como por proceder con los cálculos en el sentido equivocado, hacia aguas arriba siendo el flujo supercrítico, o hacia aguas abajo siendo subcrítico, pueden ser de poca o nula importancia. Cuando la altura de velocidad es pequeña, el método del paso tipo estándar puede llevarse a cabo aun en la dirección equivocada sin arrojar errores serios, a pesar de que siempre es recomendable llevar los cálculos hacia aguas arriba si el flujo es subcrítico y hacia aguas abajo si es supercrítico. Si el paso de cálculo empieza con una elevación supuesta que es incorrecta, el perfil del flujo resultante se hará cada vez más correcto con cada paso de cálculo, siempre y cuando éstos se lleven en la dirección correcta. Por consiguiente, si no se conoce una elevación en el tramo bajo consideración o cerca de él, puede suponerse una elevación arbitraria para una sección distante suficientemente lejos, ya sea arriba o abajo de la sección inicial.

El suponer que en el extremo aguas abajo de las cárcavas el calado es el normal causa muy poco error, sobre todo si el flujo es subcrítico, ya que el cálculo en el programa comienza en el extremo aguas abajo, y si el número de secciones consideradas es elevado. Esto último garantiza una rápida aproximación a valores correctos de nivel.

En su forma más general, la ecuación de continuidad del sedimento expresada para un cauce viene dada por la siguiente expresión (Chen, 1973):

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} (AC_s) + (1 - \lambda) \frac{\partial}{\partial t} (Bz) = 0 \quad (3.11)$$

donde

Q_s = carga total de sedimentos del flujo o caudal de sedimentos (m^3/s)

C_s = concentración volumétrica de sedimento suspendido en el agua por unidad de longitud del canal

λ = porosidad efectiva del sedimento almacenado en el lecho activo

En muchos casos de interés práctico, el segundo término de esta ecuación es despreciable en relación con los otros. Definiendo además:

$$q_s = \frac{Q_s}{B(1 - \lambda)} \quad (3.12)$$

expandiendo la ecuación diferencial y ordenando, tenemos:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{z \partial B}{B \partial t} + \frac{q_s}{B(1 - \lambda)} \frac{\partial B}{\partial x} = 0 \quad (3.13)$$

Si aceptamos que el proceso de ensanchamiento del canal se produce lentamente en espacio y tiempo, la ecuación anterior se reduce a la forma unidimensional comúnmente usada (Alonso y Combs, 1990):

$$\frac{\delta z}{\delta t} + \frac{\delta q_s}{\delta x} = 0 \quad (3.14)$$

Esta ecuación es aplicable a un canal de forma cualquiera en el que se supone que la variación en la carga de sedimentos influye únicamente en la elevación del lecho. Como indica Bennett (1974), Simons et al. (1965) y Kennedy (1963) la utilizaron para predecir transporte de sedimentos en forma de carga de fondo y para estudios de la mecánica teórica de las formas del lecho.

En los suelos cultivados que padecen erosión, gran parte del sedimento es transportado como carga de fondo por los flujos poco profundos, y parece ocurrir lo mismo en los flujos concentrados (Foster 1982a). Observaciones del proceso de erosión en suelos naturales durante tormentas simuladas indican que una gran parte del suelo transportado se movía por saltación y por rodamiento a lo largo del lecho de los pequeños canales. Ello justifica el rechazo de las fórmulas de carga suspendida (Foster y Meyer, 1972b) para la estimación de la capacidad de transporte en este tipo de flujos. Estas observaciones indicaron que,

una vez los agregados son arrancados de los suelos naturales cohesivos, su transporte es muy similar al de partículas de materiales no cohesivos.

Existen disponibles un elevado número de fórmulas para predecir la capacidad de transporte de flujos, cada una aplicable a intervalos limitados de tipos de sedimentos y flujos. A menudo los resultados aportados por unas y otras son muy diferentes, y seleccionar una fórmula adecuada es una tarea complicada (Alonso et al., 1981). Además hay que contar con la incertidumbre añadida acerca del verdadero tamaño y peso específico de las partículas erosionadas en suelos agrícolas (Foster, 1982a). En este trabajo se opta por la fórmula de Yang (1973), aunque fórmulas como las de Yalin y Laursen podrían haber sido también consideradas (Alonso et al., 1981). Según dichos autores, la fórmula de Yang es una de las que mejor estiman la capacidad de transporte en corrientes en el rango de arenas finas a arenas gruesas. Yang basa su fórmula en la premisa de que la carga total está dominada por la intensidad de gasto de energía potencial por unidad de peso de agua. La ecuación de Yang se expresa:

$$C = 10^\lambda \quad (3.15)$$

donde

$$\lambda = 5.435 - 0.286 \log\left(\frac{wd}{\nu}\right) - 0.457 \log\left(\frac{u_*'}{w}\right) + \left[1.799 - 0.409 \log\left(\frac{wd}{\nu}\right) - 0.314 \log\left(\frac{u_*'}{w}\right)\right] \log\left(\frac{VS_o}{w} - \frac{V_c S_o}{w}\right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_c}{w} = \frac{2.5}{\left[\log\left(u_*' \frac{d}{\nu}\right) - 0.06\right]} + 0.66 < \left(u_*', \frac{d}{\nu}\right) < 70 \\ \frac{V_c}{w} = 2.05, \left(u_*', \frac{d}{\nu}\right) \geq 70 \end{array} \right. \quad (3.16)$$

donde

C = concentración de sedimento, peso seco, en partes por millón
 w = velocidad de caída de las partículas de sedimento (settling velocity)
 d = tamaño de las partículas
 ν = viscosidad cinemática del fluido
 u_*' = velocidad cortante en el lecho
 V = velocidad media del flujo
 S_o = pendiente

Puede comprobarse (Alonso et al., 1981) cómo la relación entre concentración de sedimentos C y la carga sólida es:

$$g_s = 10^{-6} C \cdot \gamma \cdot V \cdot h \quad (3.17)$$

donde

g_s = carga sólida de sedimentos expresada como peso seco de sedimentos por unidad de anchura y de tiempo.

Conocidos C o g_s , la obtención de Q_s es inmediata. En el programa informático de esta tesis (anexo II), el cálculo de la capacidad de transporte se realiza en la función YANG, donde se expresa como concentración volumétrica (partes por parte). En la subrutina BELVDA, donde se resuelve la ecuación de continuidad, se multiplica por el caudal líquido, obteniéndose la carga total de sedimentos Q_s (m^3/s). En la subrutina PRIX se ordena imprimir la capacidad de transporte, expresada como concentración volumétrica en partes por millón.

La velocidad de caída de las partículas se calcula mediante la ecuación de Dietrich (1982). Pretende ser un método rápido y razonablemente preciso para calcular la velocidad de caída de partículas de forma natural. Incorpora para ello los efectos que ejercen sobre la velocidad de caída de los sedimentos naturales la forma irregular de las partículas, generalmente alejada de la esfericidad, y el grado de redondez de las mismas, definida dicha redondez como la variación de curvatura a larga escala longitudinal,

diferenciándola de las distorsiones a pequeña escala longitudinal. Es una ecuación empírica obtenida a partir de diversos estudios experimentales previos y que tiene en consideración además los efectos del tamaño y densidad de las partículas. El análisis está hecho en base a cuatro parámetros adimensionales: diámetro nominal adimensional D_* , la velocidad de caída adimensional W_* , el factor de forma de Corey CFS y el índice P de redondez de Powers. La expresión es como sigue:

$$W_* = R_3 \cdot 10^{R_1 + R_2} \quad (3.18)$$

Siendo:

$$W_* = \frac{\rho w^3}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \nu}$$

$$R_3 = \left[0.65 - \left(\frac{CFS}{2.83} \tanh(\log D_* - 4.6) \right) \right]^{-\left(1 + \frac{3.5 - P}{2.5}\right)}$$

$$D_* = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D_n^3}{\rho \cdot \nu^2}$$

$$R_2 = \left[\log \left(1 - \frac{1 - CFS}{0.85} \right) \right] - (1 - CFS)^{2.3} \cdot \tanh(\log D_* - 4.6) + 0.3(0.5 - CFS) \cdot (1 - CFS)^2 \cdot (\log D_* - 4.6)$$

$$R_1 = -3.76715 + 1.92944(\log D_*) - 0.09815(\log D_*)^2 - 0.00575(\log D_*)^3 + 0.00056(\log D_*)^4$$

Donde:

W_* = velocidad de caída adimensional
 ρ = densidad del líquido
 ρ_s = densidad de la partícula
 w = velocidad de caída
 g = aceleración de la gravedad
 ν = viscosidad cinemática del líquido
 CFS = Factor de forma de Corey. Se define:

$$CFS = \frac{c}{(ab)^{\frac{1}{2}}}$$

donde:

a, b, c = respectivamente, ejes mayor, menor e intermedio, mutuamente perpendiculares, de la partícula.

D_* = Tamaño de partícula adimensional

P = Valor de redondez de Powers

D_n = Diámetro nominal, definido como el diámetro de una esfera con el mismo diámetro que la partícula en cuestión

El modelo permite calcular la capacidad de transporte procediendo separadamente para cada una de las varias fracciones en las que puede dividirse el sedimento (máximo de 10). La capacidad de transporte total es la suma de las capacidades de transporte del flujo para cada una de las fracciones.

El programa incluye la posibilidad de considerar un modelo de transporte de sedimentos no equilibrado. El estado de equilibrio, refiriéndonos al transporte de sedimentos en un cierto cauce, se da en un flujo en el que el input de sedimento sobre un tramo definido, durante un periodo de tiempo suficientemente largo (aunque finito), es igual al output. Para ello, el flujo debe de ser uniforme. Un estado de no equilibrio, en condiciones de flujo uniforme, se da cuando el caudal de sedimentos cambia con el tiempo y la posición, de modo que input y output tienen valores diferentes. Estas situaciones transitorias pueden ser causadas

por: un flujo no permanente y aporte constante de sedimento aguas arriba; flujo permanente y variación en el aporte de sedimento por el extremo aguas arriba; flujo y aporte no permanente. En estas situaciones puede darse tanto depósito como degradación. El transporte de sedimentos en una cárcava es fundamentalmente un transporte no equilibrado. Algunas de las situaciones más claras de desequilibrio pueden ser: la irrupción de un flujo poco cargado de sedimentos en una parcela; cambios de pendiente; fases ascendentes y descendentes del hidrograma.

Bell y Sutherland (1983) encontraron cómo la capacidad de transporte no alcanza el valor teórico correspondiente a cierto flujo de manera inmediata cuando una corriente limpia con caudal de agua constante y con bajo o nulo caudal de sedimentos irrumpe en una zona con lecho erosionable. Proponen una relación entre capacidad de transporte actual, en condiciones de no equilibrio, y capacidad de transporte en condiciones de equilibrio, para un caudal constante, que puede expresarse:

$$\ln \left[1 - \frac{q_{sn}(x,t)}{q_s(x,t)} \right] = -C(t)(x - x_0) \quad (3.19)$$

donde:

$q_{sn}(x,t)$ = carga sólida de sedimentos en condiciones transitorias (Kg/s)

$q_s(x,t)$ = carga de sedimentos en condiciones de equilibrio (Kg/s)

x = distancia en la dirección aguas abajo (m)

x_0 = punto de referencia

$C(t)$ = coeficiente dependiente del tiempo (s^{-1})

Considerando que x_0 es el punto donde el canal comienza, podemos expresar la ecuación anterior:

$$\frac{q_{sn}(x,t)}{q_s(x,t)} = 1 - e^{-C(t)x} \quad (3.20)$$

El trabajo de Bell y Sutherland (1983) se limita a estudiar el transporte como carga de fondo. De todos modos, cabe esperar que el transporte en una cárcava sea fundamentalmente en forma de carga de fondo (Foster, 1982a; Foster y Meyer, 1972b).

La ecuación 3.20 es la utilizada en el modelo desarrollado en esta tesis, y permite calcular la capacidad de transporte una vez se ha determinado el valor del coeficiente $C(t)$, corrigiendo la ecuación de Yang. Choudhury (1995) la empleó para el estudio de procesos de degradación en ríos. El valor de $C(t)$, afirma este autor, a pesar de diversas investigaciones llevadas a cabo, permanece aún poco definido, considerando que podría expresarse como:

$$C = \frac{1}{1 + \alpha' t} \quad (3.21)$$

donde α' es un parámetro que debe de ser definido para cada caso. Esta es la aproximación usada también en este trabajo. La consideración o no de un transporte no equilibrado es opcional en el modelo, de modo que puede contarse o no con ello según se crea conveniente (ver input INE en el anejo III).

Según lo expresado por las dos ecuaciones anteriores, cuanto mayor es el valor de α' , fijados ciertos valores de t y x , menor es la capacidad de transporte de la corriente. De manera similar, fijados α' y x , al ir transcurriendo el tiempo, la capacidad de transporte tiende a reducirse, mientras que fijados α' y t , al aumentar x , es decir, al ir avanzando aguas abajo, aumenta la capacidad de transporte. Un valor de $\alpha'=0$ significaría una independencia del fenómeno con respecto al tiempo.

El modelo procede a calcular las variables hidráulicas y la capacidad de transporte en todas las secciones transversales definidas, comenzando desde el extremo aguas abajo, para cada paso de tiempo Δt . Aplicando la ecuación de continuidad del sedimento entre las dos secciones transversales que delimitan cada subtramo, podemos calcular la magnitud de la erosión que va a tener lugar en dichos subtramos. La ecuación de continuidad del sedimento se resuelve numéricamente mediante un método de diferencias finitas, siguiendo el esquema de Lax, aunque modificado por De Vries (1971). La ecuación de continuidad del sedimento se integra marchando aguas abajo, ya que se trata de una ecuación en derivadas parciales de tipo hiperbólico. Los detalles pueden verse en el apartado 3.1.3.

Una vez conocida la magnitud total de la erosión en cada subtramo, y en cada paso de tiempo, hay que determinar qué proporción de esa erosión total es erosión en lecho y cuál es erosión en las paredes. Calculada la erosión del lecho del modo que más adelante se detallará, se completa la erosión estimada para ese subtramo con materiales provenientes de los taludes. La siguiente figura esquematiza la posible situación en un determinado momento de una sección transversal cualquiera con respecto a la situación de comienzo.

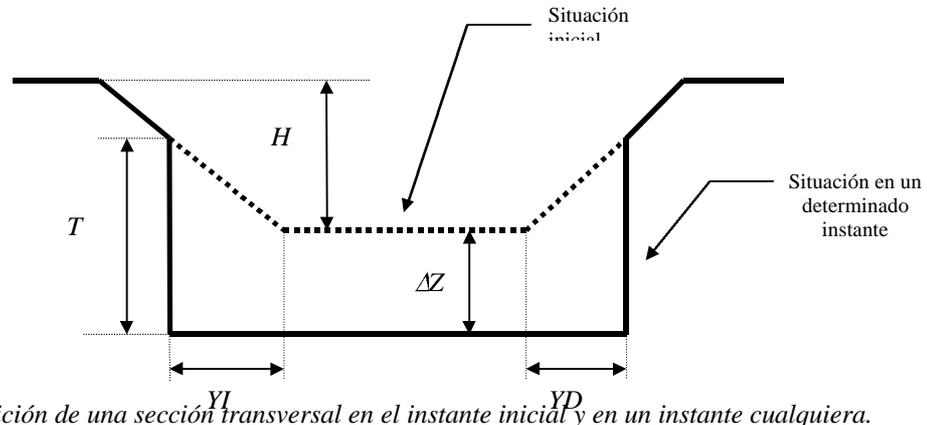


Figura 3.3.- Disposición de una sección transversal en el instante inicial y en un instante cualquiera.

Calculada la magnitud de la erosión en el lecho y en los taludes, se redefine la forma de cada sección en cada paso de tiempo (sección 3.1.4). Se determina la nueva elevación del lecho y la nueva anchura del mismo. En el siguiente paso de tiempo se consideran las nuevas formas de las secciones. Estas operaciones se realizarán tantas veces como pasos de tiempo se hayan establecido. De acuerdo con este proceder, puede calificarse al modelo como “quasi-bidimensional” (ASCE, 1990), ya que permite considerar cambios laterales en las secciones transversales.

La figura (3.4) es un diagrama de flujo esquematizado a cerca del funcionamiento general del modelo.

3.1.2. - REPARTO DE LA PÉRDIDA DE SUELO ENTRE PAREDES Y LECHO.

Uno de los planteamientos básicos es que la capacidad de transporte disponible en el subtramo se destina prioritariamente a transportar los materiales provenientes del lecho. La capacidad de transporte se completa con materiales de las paredes. Si el esfuerzo cortante calculado sobre el lecho no supera el esfuerzo cortante crítico del suelo, no habrá erosión de ningún tipo en el subtramo. Obviamente, tampoco se contabilizará erosión si la carga de sedimentos que alcanza el subtramo es mayor o igual que la capacidad de transporte calculada para el mismo. La prioridad de

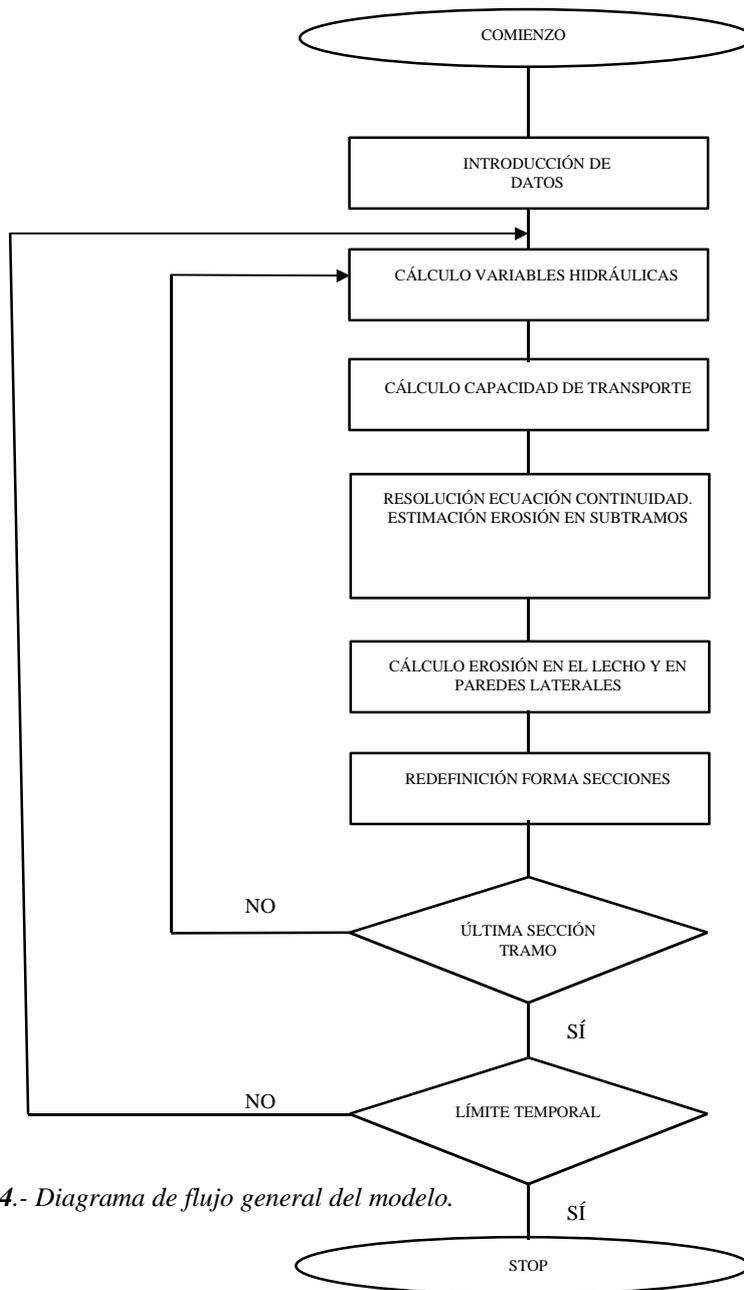


Figura 3.4.- Diagrama de flujo general del modelo.

la erosión del lecho se justifica en que, como es sabido, el esfuerzo cortante del flujo es mayor en él que en las paredes (Chow, 1958). En este caso, se desea considerar el esfuerzo cortante más representativo del lecho que, se supone que es el máximo, y que puede calcularse mediante la corrección del esfuerzo cortante medio con un coeficiente C_τ de acuerdo con Olsen y Florey (1952), por ejemplo.

El esfuerzo cortante medio en una sección es:

$$\bar{\tau} = \gamma \cdot R_h \cdot S_f \quad (3.22)$$

donde:

$\bar{\tau}$ = esfuerzo cortante medio (Pa)
 R_h = radio hidráulico (m)

Así, el esfuerzo cortante considerado como el actuante en el lecho será:

$$\tau = C_\tau \cdot \gamma \cdot R_h \cdot S_f \quad (3.23)$$

donde:

C_τ = coeficiente para obtener el esfuerzo cortante más representativo del lecho a partir del esfuerzo cortante medio en la sección

La erosión del lecho en un determinado subtramo al final de un paso de tiempo de duración Δt se estima mediante la expresión :

$$E_{l_{j,n}} = \frac{k \cdot (\tau_{j,n} - \tau_c) \cdot B_{j,n} \cdot \Delta t}{\gamma_s} \quad (3.24)$$

donde:

$E_{l_{j,n}}$ = erosión en el lecho del subtramo j en el instante n , expresada como volumen por unidad de longitud (m^3/m)

k = coeficiente de erodibilidad (N/(N.min))

$\tau_{j,n}$ = esfuerzo cortante ejercido por el flujo (Pa) en el lecho del tramo j y en el instante n . Se calcula mediante la expresión (3.23):

τ_c = esfuerzo cortante crítico (Pa). Es el valor a partir del cual se considera que comienzan a moverse las partículas del suelo

$B_{j,n}$ = anchura del lecho en el subtramo j e instante n (m)

γ_s = peso específico aparente del suelo (N/m^3)

El numerador de la expresión anterior permite calcular el peso por unidad de longitud que se está erosionando en cada paso de tiempo. El cociente entre γ permite conocer el volumen erosionado por unidad de longitud.

La expresión

$$R = K \cdot (\tau - \tau_c) \quad (3.25)$$

donde :

R = intensidad de erosión ($Kg/(m^2 \cdot min)$)

ha sido ampliamente utilizada para estimar arranques de suelos cohesivos (Nearing et al., 1994; Lal y Elliot, 1994). Conviene aclarar que los parámetros K y τ_c son parámetros de ajuste (Nearing et al., 1994; Arulanandan et al., 1980). Arulanandan et al.(1980) proponen un método prometedor para la difícil

tarea de estimar dichos parámetros, que se estudiará con detalle en el apartado 3.2. La base de datos elaborada por dichos autores puede ser útil para estimar valores orientativos.

Si el valor estimado para E_l en un determinado instante y subtramo es mayor que la capacidad de transporte disponible, se supone que sólo ocurre erosión en el lecho. En suelos normales, si este caso ocurre, será en circunstancias en las que la capacidad de transporte disponible sea pequeña, y que también lo será la erosión. De acuerdo con los esgrimidos argumentos de distribución del esfuerzo cortante en la sección transversal, parece razonable proceder como se ha indicado. Esta aproximación dará lugar además a que corrientes poco energéticas, con baja capacidad de transporte o baja capacidad de transporte disponible, se dediquen fundamentalmente a erosionar el lecho, dando lugar a cauces relativamente estrechos y profundos. Este comportamiento es coherente con las observaciones de Poesen y Govers (1990), quienes distinguen entre cárcavas profundas y estrechas observadas tras lluvias suaves y continuas, y cárcavas anchas y poco profundas, originadas por lluvias intensas.

Una vez contabilizada de esta manera la magnitud de la erosión de lecho y paredes en cada subtramo, se procede a redefinición de la forma de la sección, calculando la nueva elevación del lecho y la nueva separación. El descenso en el nivel del lecho en un determinado subtramo correspondiente a una degradación de magnitud E_l (m^3/m) acaecida durante un periodo de tiempo de magnitud Δt será:

$$\Delta z = \frac{E_l}{B} \quad (3.26)$$

donde B es la anchura del lecho al comienzo del periodo Δt . El procedimiento usado para calcular la variación de la anchura del lecho y la erosión lateral se explica en el apartado 3.1.4.

Si el calado en un determinado instante y tramo no supera la altura T (caída vertical en los taludes) (ver figura 3.3), se desprecia el posible efecto de la erosión lateral, considerándose sólo erosión en el lecho. Por tanto, flujos cuyo calado es incapaz de superar la altura de los taludes excavan al cauce únicamente en profundidad; flujos cuyo calado supera esta altura también la erosionan lateralmente. Estrictamente, los flujos de poco calado también erosionan lateralmente. Sin embargo, no es exagerado suponer que esta erosión será de escasa entidad, considerando que el esfuerzo cortante del flujo es claramente mayor en el centro del lecho de un cauce de sección rectangular (Olsen y Florey, 1952; Wang et al, 1992). Este razonamiento también justifica por el hecho constatado de que al principio del evento erosivo, los avances laterales pueden ser importantes, pero, después de alcanzada cierta anchura, si hay erosión, ésta tiene lugar fundamentalmente en el lecho, lo que a su vez explica la forma claramente rectangular encontrada en muchas secciones (ver anejo I). Posteriores ensanchamientos podrán explicarse por caudales excepcionales con los que se alcancen calados $h > T$, por la aparición de derrumbes una vez alcanzada una cierta altura crítica de los taludes, o por que la erosión en profundidad alcance capas de suelo no erosionable. En cárcavas efímeras difícilmente llegan a ocurrir derrumbes (USDA-SCS, 1992), ya que, de acuerdo con su definición, estas cárcavas se eliminan frecuentemente, lo que impide que puedan alcanzarse alturas de taludes críticas. Que el lecho alcance una capa de suelo no erosionable implica que la capacidad de transporte queda satisfecha únicamente con materiales de las paredes, lo que conllevaría un rápido ensanchamiento, con socavamientos y derrumbes en voladizo. Esta posibilidad no está por el momento contemplada en el modelo.

El método que se propone en el presente trabajo para definir las aportaciones de sedimento del lecho y de las paredes es simple, pero puede resultar de utilidad en muchas circunstancias.

El diagrama de flujo que se expone en la figura 3.5 detalla los cálculos relativos a la erosión que se han explicado. El proceso descrito en el diagrama se repite para cada sección considerada en un mismo paso de tiempo, volviendo a comenzar el proceso para cada paso de tiempo definido, tal y como puede apreciarse en el diagrama de flujo general del programa, figura 3.4. Aunque no se indica en el diagrama de la figura 3.5, el programa incluye la posibilidad de estudiar exclusivamente procesos de degradación del lecho sin erosión lateral, lo que puede ser de interés en diversas circunstancias. Para más detalles, ver el anejo III, donde se explican los datos de entrada en el programa.

Como conclusión, podemos decir que, si bien en este modelo no están incluidas la totalidad de las variables implicadas en el complejo fenómeno de la erosión por cárcavas efímeras, las explicación físico-matemática de los procesos es suficiente como para posibilitar un paso adelante en el estudio de dicho fenómeno.

3.1.3. -RESOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DEL SEDIMENTO.

La integración de la ecuación de continuidad del sedimento (ecuación 3.14) requiere pasos de tiempo pequeños. Siguiendo a Alonso y Combs (1990), se propone la siguiente solución a partir del esquema de Lax, modificado por De Vries (1971), que corresponde a un esquema en diferencias finitas centrales:

$$z_j^{n+1} = \frac{\alpha}{2} (z_{j-1}^n + z_{j+1}^n) + (1 - \alpha) z_j^n + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (q_{s,j-1}^n - q_{s,j+1}^n) \quad (3.27)$$

donde:

α = coeficiente dependiente del tiempo, constante para cada x

En la ecuación anterior se ha introducido la notación $x_j = j\Delta x$, $t^n = n\Delta t$. Al ser un esquema en diferencias centrales, es necesario estimar los valores en los extremos inicial y final, lo que se realiza mediante extrapolación lineal. En la ecuación 3.27, la aproximación para la expresión

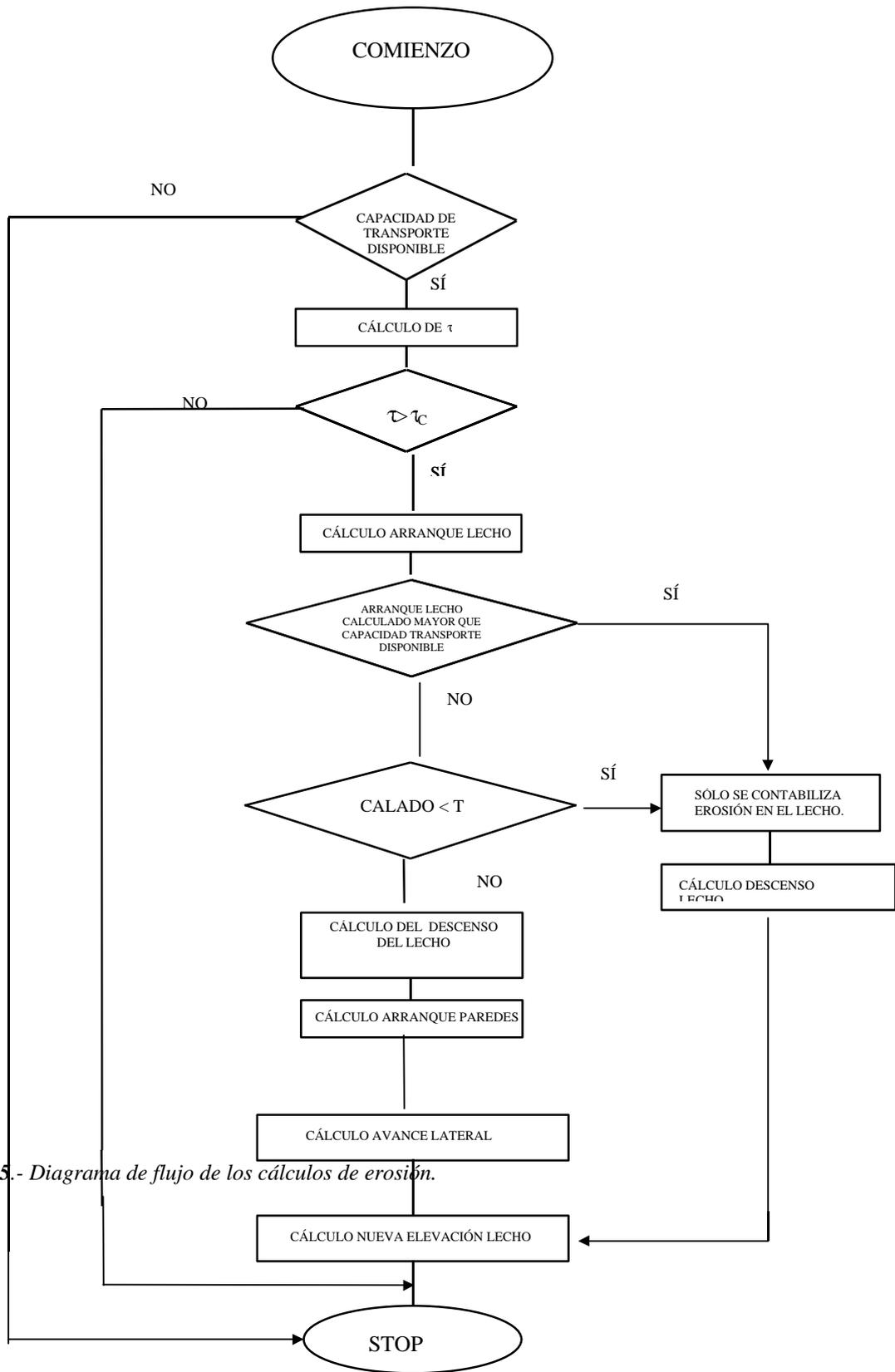


Figura 3.5.- Diagrama de flujo de los cálculos de erosión.

$\delta q_s / \delta x$ de la ecuación 3.14 es inmediata. Si embargo, no lo es para la expresión $\delta z_s / \delta t$ de la misma ecuación, a no ser que en la ecuación 3.27 se tome $\alpha=0$. Este caso, de todos modos, no conduce, según De Vries (1971) a un esquema estable. De Vries demuestra que la condición de estabilidad numérica para el esquema de la ecuación 3.26 requiere que se cumpla:

$$C_R^2 < \alpha \leq 1 \quad (3.28)$$

donde:

C_R^2 = número local de red de Courant, siendo:

$$C_R^2 = c_b \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

donde:

c_b = celeridad de las perturbaciones del lecho (m/s)

La condición expresada en 3.28 debe de cumplirse para el máximo valor de la celeridad. Además, es necesario que la diferencia $v = \alpha \cdot C_R^2$ sea pequeña (del orden de 10^{-2} ó 10^{-3}). En la práctica, se procede seleccionando Δx y fijando v . A continuación, se elige Δt de modo que se cumpla el criterio de convergencia, obteniendo finalmente α . La celeridad de las perturbaciones del lecho (la velocidad con la que se propagan dichas perturbaciones) es mucho más baja que la de las pequeñas perturbaciones que se propagan al nivel del agua. Mientras que estas últimas son de un orden de magnitud de 1 a 10 m/s, para las primeras deberíamos de hablar de valores del orden de 0.1 a 1 m/hr. (De Vries, 1971).

La ecuación 3.27 se resuelve con el fin de obtener una estimación de la magnitud total de la erosión en cada subtramo. Se procede calculando el descenso que tendría lugar en el lecho de un canal constituido por materiales no cohesivos. La diferencia $z_j^{n+1} - z_j^n$ nos proporciona el descenso que se ha produciría en el lecho de tal canal en la sección j . El producto $(z_j^{n+1} - z_j^n) B$, siendo B la anchura del lecho, es por tanto el incremento de área en la sección j como consecuencia del proceso de degradación, y puede considerarse como la erosión que tendría lugar en el tramo expresada en volumen por unidad de longitud. Esta erosión total será distribuida entre erosión del lecho y erosión lateral del modo que se ha explicado en el apartado anterior. El procedimiento aquí descrito puede verse expresado en un código FORTRAN en la subrutina BELVDA (apéndice II).

3.1.4. CÁLCULO DE LA VARIACIÓN EN LA FORMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Al final de cada paso de tiempo es necesario redefinir la forma de cada sección transversal que, en general, habrá sufrido modificaciones tras el proceso de degradación al que probablemente ha estado sometida. Esta nueva forma será la considerada para los cálculos hidráulicos en el siguiente paso de tiempo.

Con este fin se estudian las coordenadas de los diferentes puntos significativos en una determinada sección. En la figura 3.6 se indican dichos puntos, así como el origen de los ejes Z e Y , en una sección genérica. El origen de la coordenada X es el extremo aguas arriba del tramo considerado.

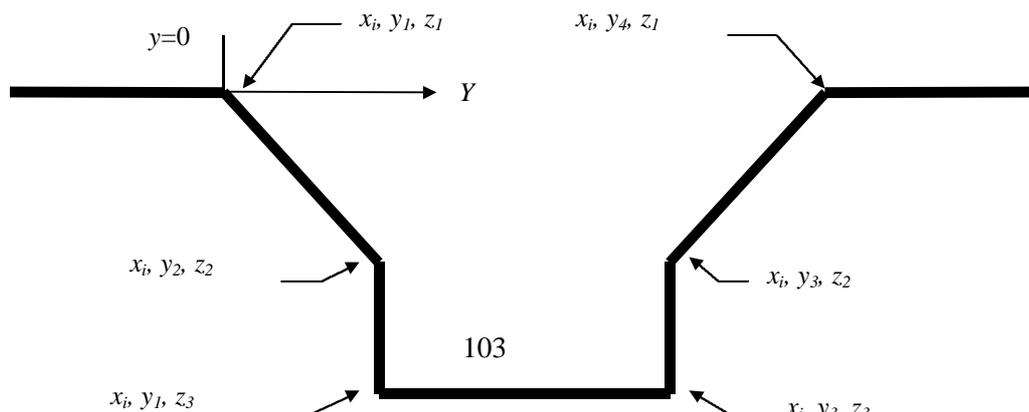


Figura 3.6.- Definición de las coordenadas de los puntos singulares de las secciones transversales.

En el apartado anterior se explicó la manera de calcular el descenso en el nivel del lecho. A continuación se detalla el procedimiento seguido para estimar el avance lateral acontecido de un paso de tiempo a otro. En la figura (3.7) podemos apreciar el estado de una sección transversal en un instante inicial t_0 y en un instante posterior consecutivo $t_0 + \Delta t$. Las áreas correspondientes a los trapecios a y b corresponden a la erosión lateral que va a tener lugar.

Calculada la erosión que acontecerá en el lecho, se fija la nueva elevación del mismo. Conocida también la magnitud de la erosión lateral en cada sección, expresada, como sabemos, en volumen por unidad de longitud, la cuestión a responder es cuál es el incremento de anchura a añadir a la anchura del cauce al final del paso de tiempo anterior. En el esquema de la figura 3.7, las incógnitas son las distancias ΔB_I y ΔB_D , alturas de los trapecios de áreas a y b . Obviamente, la profundidad que alcanza la erosión lateral se limita a la profundidad calculada para el lecho previamente (Δz). Conocidos además los ángulos de los taludes (β_I y β_D), se calcula en cada sección y en cada paso de tiempo los incrementos de anchura ΔB_I y ΔB_D , correspondientes, y se añaden a la anchura calculada para el paso de tiempo anterior. Estrictamente, sólo los triángulos de catetos ΔB_I y M_I por un lado, y ΔB_D y M_D por otro, serían propiamente erosión lateral, de acuerdo con la figura 3.7. Sin embargo, al proceder en el cálculo en primer lugar con la erosión del lecho, consideramos las áreas a y b , como erosión lateral.

Planteamos a continuación la solución para el caso de la subárea a , siendo análogo el procedimiento en el otro extremo, con el ángulo del talud correspondiente. Los cálculos se realizan en la subrutina BELV (apéndice II), en cuyos comentarios puede encontrarse información adicional. El método es también válido para los casos en los que la erosión lateral sea 0 y sólo haya degradación en el lecho. De acuerdo con la figura:

$$a = \frac{M_I + \Delta z + \Delta z}{2} \cdot \Delta B_I = \frac{\frac{\Delta B_I}{\text{tg } \beta_I} + 2 \cdot \Delta z}{2} \cdot \Delta B_I$$

Multiplicando por $2 \text{tg } \beta_I$ y ordenando:

$$\Delta B_I^2 + \Delta B_I \cdot 2 \cdot \text{tg } \beta_I \cdot \Delta z - 2 \cdot \text{tg } \beta_I \cdot a = 0 \quad (3.29)$$

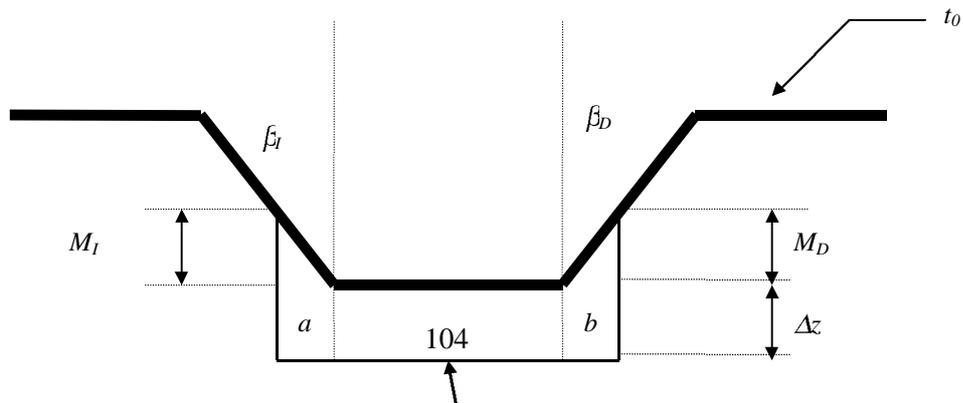


Figura 3.7.-Geometría de la sección transversal. Variables implicadas en el cálculo del ensanchamiento lateral.

Se trata de una ecuación de segundo grado que se resuelve de manera inmediata. Se comprueba fácilmente que para cualquier otro instante diferente del inicial (figura 3.8) el coeficiente para la variable ΔB_1 vale:

$$BB = 2 \cdot \Delta Z \cdot \text{tg } \beta_1 + YI$$

donde:

ΔZ = descenso acumulado que se ha ido produciendo en el lecho

YI = incremento de la anchura (acumulado) con respecto a la anchura inicial, en el talud izquierdo

El conocimiento de estas variables y del descenso del lecho permite calcular fácilmente las nuevas coordenadas de los puntos singulares expresados en la figura (3.6). Estas nuevas coordenadas se determinan en las subrutinas BELV, en lo que se refiere a z , y XSDS, en lo que hace referencia a x e y . El cálculo de la caída vertical T , ver por ejemplo la figura 3.3, es casi inmediato por trigonometría sencilla.

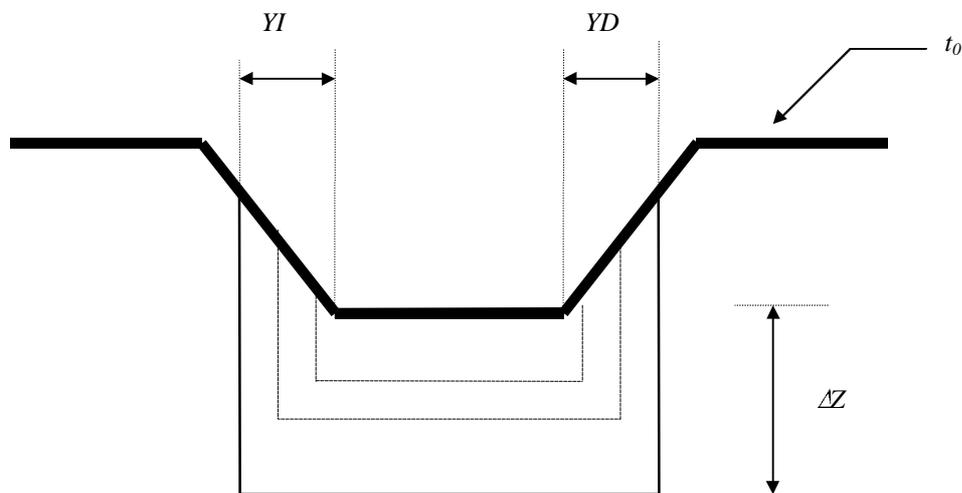


Figura 3.8.- Geometría de la sección transversal para un instante cualquiera.

3.2. - ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Entenderemos como parámetros aquellos datos de entrada que corresponden a características físicas del medio en estudio. Son aquéllos con los que se procedería a una calibración de acuerdo por ejemplo con la definición de Bennett (1974): “la calibración consiste en determinar, a partir de los inputs y los outputs observados, los mejores valores para ciertos parámetros del modelo en una cuenca determinada”. Se entiende que “los mejores valores” serían los que consiguen que la semejanza entre realidad y outputs del modelo sea máxima.

Nearing et al. (1994) incluyen la estimación de parámetros como un aspecto de la fase de desarrollo del modelo. De acuerdo con estos autores, la estimación de parámetros implica dos pasos diferenciados: identificación de parámetros y desarrollo de ecuaciones de predicción de los mismos. La identificación consiste en determinar los parámetros a partir de series de datos obtenidas experimentalmente. Esta identificación, por tanto, implica el uso del propio modelo informático y de técnicas de optimización con el fin de analizar los datos experimentales, obteniéndose valores de los parámetros del modelo a partir de los datos medidos. El segundo paso consiste en desarrollar métodos para predecir los parámetros del modelo para suelos o condiciones ambientales no representados en la base de datos medidos.

En este trabajo no ha sido posible proceder con el primero de los pasos, de modo que los parámetros relacionados con el suelo se estiman de acuerdo con trabajos previos desarrollados por diferentes investigadores.

Los parámetros en este caso son: longitud del tramo de estudio, pendiente longitudinal, esfuerzo cortante crítico τ_c , coeficiente de erodibilidad K , coeficiente para obtener el esfuerzo cortante más representativo del lecho a partir del esfuerzo cortante medio C_s , anchura inicial del lecho, pendiente de los taludes, coeficiente de aspereza de Manning, peso específico aparente del suelo, coeficientes de pérdidas por remolino, porosidad del suelo, celeridad de las perturbaciones del lecho, temperatura, tamaño de las partículas transportadas, peso específico de las partículas transportadas, coeficiente para el transporte no equilibrado, y los parámetros de la ecuación Dietrich para estimar la velocidad de caída de las partículas.

Ocupémonos individualmente de cada uno de ellos, siguiendo el orden en que se encuentran en el archivo de entrada de datos TEST.INP.

LONGITUD DEL TRAMO DE ESTUDIO

Se obtiene a partir de datos topográficos, considerando siempre que la pendiente del tramo debe de ser razonablemente uniforme.

PENDIENTE LONGITUDINAL

Obtenible a partir de mapas detallados o mediciones ex profeso.

ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO τ_c Y COEFICIENTE DE ERODIBILIDAD K PARA EL LECHO

Arulanandan et al. (1980), proponen un método prometedor para estimar estos parámetros, ya que tiene en consideración tanto las propiedades del suelo erosionado y del líquido de los poros, como las del fluido erosionante (Osman y Thorne, 1988). Los aspectos fundamentales del método se explican a continuación.

Una elevada cantidad de muestras inalteradas y llevadas a saturación, procedentes de variados lugares de los Estados Unidos, fueron colocadas en un pequeño canal y sometidas a la acción erosionante del agua, utilizando agua destilada. Aplicando diversos caudales, y por lo tanto diversos esfuerzos cortantes, se obtuvieron para cada suelo nubes de puntos que relacionan el esfuerzo cortante τ con la intensidad de erosión R (ver ecuación 3.25) medida en el suelo colocado en el canal. Estos datos se ajustan a la ecuación 3.25, obteniéndose para cada suelo valores de K y τ_c . Tras realizar el estudio con una importante

cantidad de suelos, proponen un gráfico que relaciona K con τ_c , de modo que, conocido un parámetro, pueda estimarse aproximadamente el otro. Osman y Thorne (1988) expresan matemáticamente la citada curva, de modo que:

$$K = 223 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-0.13 \cdot \tau_c} \quad (3.30)$$

donde K queda en gr/(dina.cm) y τ_c debe de introducirse en dina/cm². La expresión 3.30 es válida cuando $\tau_c > 6$ dina/cm². Si es menor, se considera que el suelo no es cohesivo. A pesar de que Arulanandan et al. estudiaron los valores de τ_c y K para muchos suelos, el problema no quedó resuelto. Un paso adelante sería poder estimar τ_c con un método adecuado y posteriormente, mediante la ecuación 3.30 obtener K .

Así, Arulanandan et al., con el fin de obtener valores fiables de τ_c , estudian la aplicabilidad del método propuesto por Alizadeh (1974) y Heinzen (1976), quienes desarrollaron un metodología para calcular τ_c en la que tenían en consideración el SAR, la dispersión dieléctrica del suelo $\Delta\epsilon_0$ y la concentración total de sales en el líquido de los poros. Utilizaron también agua destilada como fluido erosionante, y trabajaron con muestras alteradas. Arulanandan et al. compararon los valores por ellos medidos y los estimados mediante el gráfico propuesto por Alizadeh y Heinzen, comprobando que se obtienen valores razonablemente similares, aunque los valores obtenidos del gráfico tendían a subestimar el valor de τ_c . Estudiaron también el efecto del contenido de sales en el líquido erosionante sobre el valor de τ_c , completando así el trabajo de Alizadeh y Heinzen. Vieron cómo a medida que la concentración de sales del líquido erosionante aumenta, aumenta τ_c y disminuye K ; es decir: aumenta la resistencia del suelo a la erosión. También demostraron cómo los suelos alterados muestran una menor resistencia a la erosión. De estos trabajos citados se ha tenido sobre todo en consideración lo referente a muestras inalteradas, pues deben de ser las más representativas de las condiciones que pueden interesar en el estudio de cárcavas.

A la hora de utilizar el gráfico de Alizaden y Heinzen para calcular τ_c , surgen varias dificultades. Determinar el valor de $\Delta\epsilon_0$ resulta complejo y costoso aunque, de acuerdo con el gráfico, es poca la importancia de este parámetro. Para calcular la concentración de sales en el líquido de los poros, una aproximación razonable es partir del extracto de suelo en saturación. Conocida la conductividad eléctrica de dicho extracto, puede estimarse la concentración en sales totales. Algunas de las expresiones válidas serían (Bresler et al. 1982):

$$\log C = 0.955 + 1.039 \cdot \log CE \quad (3.31)$$

$$C = 10 \cdot CE \quad (3.32)$$

donde:

C = concentración de sales en meq/l

CE = conductividad eléctrica expresada en mmhos/cm

La primera expresión está obtenida para suelos ligera o moderadamente salinos. Un límite máximo de aplicación se situaría en torno a los 15-20 mmhos/cm, aunque quizás pueda utilizarse con valores mayores sin excesivo error. La otra expresión proporciona sólo valores aproximados. Su utilización en casos de alta salinidad infravaloraría dicha salinidad en un 20% aproximadamente. Con estos datos se podría ya acudir al gráfico de Alizadeh y Heinzen. Un inconveniente grave del mismo es que sólo se proporcionan valores discretos bastante dispares de concentración (expresada como normalidad), de manera que es necesario casi siempre proceder a interpolaciones muy aproximadas para una lectura en el gráfico.

Arulanandan et al. (1980) concluyen afirmando que mediante la utilización de la gráfica de Alizadeh y Heinzen puede estimarse τ_c de manera razonable para suelos inalterados. Ya que en principio se subestiman, considerando que el líquido erosionante normal tiene en general una concentración de sales apreciable, teniendo en cuenta además que el aumento de la concentración de sales en el agua erosionante hace aumentar τ_c , la estimación mediante la gráfica de Alizadeh y Heinzen puede ser muy razonable para suelos naturales inalterados sujetos a erosión hídrica. A partir de aquí, el gráfico que relaciona τ_c y K , o la ecuación 3.30, puede usarse para determinar este último valor. El valor estimado de K representa un límite superior, al ser hallado mediante la utilización de agua destilada, ya que conforme aumenta la concentración de sales aumenta el esfuerzo cortante crítico τ_c .

Además del método al que hemos hecho referencia, existen otras posibilidades para estimar τ_c y K basadas en propiedades del suelo, desarrolladas en principio para el estudio de la erosión en surcos, pero que pueden también ser útiles para nuestros fines, a modo de aproximación. Lal y Elliot (1994) citan un trabajo de Elliot et al. (1989) en el que, tras realizar experimentos de campo con 36 suelos, encontraron que K y τ_c pueden predecirse mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{K}{10^{-3}} = 196 + 0.015 M^{0.2} (M^{0.8} - 3500) - \frac{32.7}{CEC^{0.4}} + \frac{0.16}{SAR^{0.75}} \left(\frac{1}{Al} - 50 \cdot SAR^{1.75} \right) + 7.98 \frac{OM^{1.5} + 3.5}{OM^{0.5}} \quad (3.33)$$

donde:

K = coeficiente de erodibilidad (s/m)

M viene definida a su vez por la expresión:

$$M = (\%Limo + \%VFS) \cdot (100 - \%arcilla)$$

donde:

VFS = arena muy fina

CEC = capacidad de intercambio catiónico hallado mediante titración con NH_4 expresada en meq/100g

SAR = relación de absorción de sodio

OM = porcentaje de carbono orgánico

Además, si el contenido en arcilla es $>30\%$:

$$\tau_c = -0.5 - 284MC \cdot (MC - 0.3) \quad (3.34)$$

y si el contenido en arcilla es $<30\%$:

$$\tau_c = -2.85 - \frac{8.87}{(VFS + 0.1)^{0.2}} - 0.16 \cdot CaCO_3 + 3.65 SAR + 3.79 SS^{0.2} + 28.1 \left(\frac{WDarcilla}{\%arcilla} \right)^{0.8} \frac{1}{\%arena^{0.3}} \quad (3.35)$$

donde:

τ_c = esfuerzo cortante crítico en Pa

MC = contenido de agua en el suelo en el momento de comienzo del evento erosivo (g/g)

$CaCO_3$ = contenido en carbonato cálcico, en porcentaje

SS = superficie específica de suelo, medida mediante g EGME (suelo retenido/g de suelo)

$WDC\ arcilla$ = porcentaje de arcilla dispersable en agua

Como puede apreciarse, son muchos los parámetros necesarios para obtener estas estimaciones, lo que hace en principio poco atractivos estos métodos.

En el manual de WEPP (Flanagan y Livingston, 1995), se ofrecen otras posibilidades para estimar valores orientativos. Conviene aclarar que se trata de métodos propuestos para calcular lo que los autores del citado modelo denominan "erodibilidad de base" (baseline soil erodibility). Así, para suelos cultivados, sin residuos y labrados recientemente:

$$\tau_c = 2.67 + 0.065 \cdot \%arcilla - 0.058 \cdot VFS \quad \text{si el porcentaje de arena } >30\% \quad (3.36)$$

$$\tau_c = 3.5 \quad \text{si el porcentaje de arena es } <30\% \quad (3.37)$$

Para el caso de suelos forestales consolidados y sin residuos, la misma fuente propone:

$$\tau_c = 3.23 - 0.056 \cdot \%arena - 0.244 \cdot OM + 0.9 \cdot BD \quad (3.38)$$

donde:

OM= porcentaje de carbono orgánico
BD= densidad relativa aparente

COEFICIENTE PARA OBTENER EL ESFUERZO CORTANTE MÁS REPRESENTATIVO DEL LECHO A PARTIR DEL ESFUERZO CORTANTE MEDIO

De acuerdo con las formas frecuentes en cárcavas, una suposición adecuada puede ser el considerar que el esfuerzo cortante más representativo del lecho es el esfuerzo cortante máximo. Según Olsen y Florey (1952), el esfuerzo cortante máximo vendrá dado por el esfuerzo medio multiplicado por un coeficiente dependiente de la anchura del lecho, del calado y de la pendiente de los taludes. Por ejemplo, encontraron que para una sección trapecial en la que la anchura del lecho es cuatro veces el valor del calado, y con una pendiente de los taludes de 1:2, el coeficiente vale 1.37. Kartha y Leutheusser (1970) (citado en Wang et al., 1992), para un canal rectangular con relación anchura-profundidad igual a 2.5, encontraron que el coeficiente vale 1.41.

ANCHURA INICIAL DEL LECHO.

No está definida la mejor manera de obtener este parámetro. Un criterio razonable es estimarlo de acuerdo con mediciones de secciones transversales del cauce en el que potencialmente se desarrollará la cárcava, del estilo a las de las figuras 2.37 y 2.38. Una vez obtenidos los perfiles con detalle, se deberá de decidir el nivel de curvatura a partir del cual se podría distinguir entre lo que es lecho considerado horizontal, y los taludes del cauce.

PENDIENTE DE LOS TALUDES

El criterio se basaría en las mismas mediciones indicadas para la determinación de la anchura del lecho.

COEFICIENTE DE ASPEREZA DE MANNING

Valores orientativos pueden determinarse de acuerdo con Whoolhiser (1975) y Engman (1986). Un estudio más detallado puede realizarse con Arcement y Schneider (1989).

PESO ESPECÍFICO APARENTE DEL SUELO.

Si no es viable disponer de valores medidos, una aproximación puede obtenerse a partir del conocimiento de la textura, de acuerdo con Rawls y Brakensiek (1989).

COEFICIENTES DE PÉRDIDAS POR REMOLINO.

La estimación detallada de estos parámetros sería compleja. Es de suponer que la transcendencia de la variación de los mismos sea pequeña. Chow (1958, sección 10-4) propone los valores ya citados de 0.1 para tramos con modificaciones graduales, y 0.5 para tramos con modificaciones abruptas, que son los valores considerados en todos los casos (ecuación 3.9).

POROSIDAD DEL SUELO

El conocimiento de la textura nos puede proporcionar valores aproximados (Rawls y Brakensiek, 1989) si no es posible la medición en campo.

CELERIDAD DE LAS PERTURBACIONES DEL LECHO

El valor de este parámetro es en principio desconocido, y no se dispone de estudios específicos sobre el tema referentes a cárcavas efímeras. Sólo parece factible obtener datos capaces de situar los valores en un orden de magnitud más o menos adecuado a partir experiencias realizadas en canales de laboratorio con dimensiones relativamente similares a cárcavas. Un caso utilizable puede ser el citado por Alonso y Combs (1990), quienes se refieren a una experiencia llevada a cabo por Suryanarayana en 1969. Este autor trabajó con un canal de 0.61 m de ancho y 18 m de longitud, con un caudal de 11.6 l/s. El material del lecho era arena con $D_{50} = 0.45\text{mm}$. El valor aproximado de la celeridad de las perturbaciones del lecho en este caso era se estima en 0.0054 m/s. Otro dato de interés puede ser el aportado por De Vries (1971), quien a modo de ejemplo sitúa la celeridad de las perturbaciones del lecho entre 1-10m/h. Como se discutirá mas adelante, este parámetro debe de ser directamente considerado como un parámetro de calibración, dado que en el caso de cárcavas efímeras es muy dudoso el poder hablar de perturbaciones del lecho como tales.

TEMPERATURA DEL AGUA

Su conocimiento no supone especial dificultad.

TAMAÑO Y PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTÍCULAS TRANSPORTADAS

En general, los modelos de erosión son muy sensibles a los mismos, por lo que estos parámetros son de gran importancia. Sin embargo, un conocimiento adecuado de los tamaños y densidades aparentes de las partículas realmente transportadas por un flujo erosionante es muy complejo. Evidentemente, el tamaño de las partículas transportadas no es uniforme, sino que abarca en cada caso un rango más o menos amplio. En general, el sedimento proveniente de suelos cohesivos está constituido tanto por partículas primarias individuales como por agregados, mientras que el sedimento proveniente de suelos no cohesivos está fundamentalmente constituido por partículas primarias (Young, 1980). Sin embargo, en muchos casos, para simplificar el problema, se considera un único tamaño, que se supone representativo del comportamiento de todo el material transportado. A pesar de las limitaciones que este enfoque presenta, es el adoptado en este trabajo, aunque el modelo es capaz de considerar una división del sedimento en fracciones de acuerdo con su tamaño. Se adopta este enfoque dada la gran dificultad en conocer la distribución del tamaño y densidad de las partículas en casos concretos, lo que evita incomodidad en una fase previa de estudio del modelo como ésta, y que previsiblemente aportaría pocos beneficios.

Es esperable que en la erosión en surcos el tamaño de los agregados sea mayor que en la erosión entre surcos. Probablemente, la acción de las gotas de lluvia vuelve a romper los agregados entre los surcos una vez arrancados, mientras se desplazan hacia los surcos, haciéndolos más pequeños. Además, la energía de los finos flujos que se dan entre los surcos no es suficiente para transportar los agregados grandes que eventualmente hayan podido ser arrancados, lo que, por otro lado, puede explicar el enriquecimiento del suelo en materiales gruesos. Otra razón, por último, es el hecho que la naturaleza del flujo en los surcos pueda generar mayores fuerzas de arranque. La salpicadura directa de suelo arrancado a los surcos por efecto de las gotas de lluvia, o ladera abajo, es un modo de transporte tenido como muy poco importante. Si la erosión por surcos es intensa, no cabe esperar selectividad en cuanto al tamaño de partículas, pues la movilización podría considerarse como generalizada. En esos casos, la selectividad puede producirse en las áreas entre surcos o durante la fase de intensidad. (Alberts et al., 1980). Cabe también esperar que en la erosión en cárcavas el tamaño de los agregados sea a su vez mayor que en la erosión en surcos, como señalan Thorne et al. (1986).

Se exponen a continuación los aspectos más relevantes de algunos estudios con el fin de disponer de orientaciones a la hora de fijar un valor para el tamaño y peso específico en casos concretos. Estos estudios son de cierta antigüedad, y proporcionan unos datos relativamente escasos, pero que a modo de orientación pueden ser suficientes. La información específica sobre cárcavas es casi nula.

Young (1980) hace una revisión de los escasos estudios realizados con anterioridad, referidos fundamentalmente a erosión entre surcos (interill erosion). Se aprecia un proceso de selección para las partículas de tamaño limo, que son las más fácilmente erosionadas: es frecuentemente citado que en partículas menores de 20 μm las fuerzas cohesivas entre partículas impiden el arranque, mientras que las mayores de 200 μm son también difícilmente arrancables y transportables debido a la propia masa de la

partícula. En ninguno de los casos revisados se daban grandes cantidades de sedimento $<2\mu\text{m}$. La distribución del tamaño de los agregados en la matriz del suelo, dato del que raramente se dispone, es, como cabe esperar, un mejor indicador del tamaño de las partículas del sedimento que la distribución del tamaño de las partículas primarias.

Se comprueba que para suelos muy arenosos (50% de las partículas $>50\mu\text{m}$), la mayoría del sedimento consiste en partículas $>50\mu\text{m}$. Se admite en general que los suelos muy arenosos no muestran un alto grado de agregación; por tanto, tienden a erosionarse fundamentalmente como partículas primarias, con distribuciones del tamaño del sedimento similares a las de la matriz del suelo, lo que puede explicar el comportamiento encontrado. Young (1980), a partir de los trabajos que analiza en su artículo, aporta las siguientes expresiones como útiles para obtener una primera aproximación sobre el tamaño de los agregados erosionados en este tipo de suelos como consecuencia de la erosión entre surcos:

$$Ac_a = 0.5.Ac_s \quad (3.39)$$

$$Ar_a = Ar_s \quad (3.40)$$

$$L_a = 100 - Ac_a - Ar_a \quad (3.41)$$

donde:

Ac_a = Porcentaje de los agregados que tienen tamaño arcilla

Ac_s = Porcentaje de arcilla en la matriz del suelo

Ar_a = Porcentaje de los agregados que tienen tamaño arena

Ar_s = Porcentaje de arena en la matriz del suelo

L_a = Porcentaje de los agregados que tienen tamaño limo

Los suelos arcillosos en general, contrariamente a los arenosos, muestran un alto grado de agregación, y tienden a erosionarse fundamentalmente como agregados de tamaño arena ($>50\mu\text{m}$). Los tamaños más frecuentes son los comprendidos entre 50 y 100 μm y los mayores de 1000 μm . Para estimar aproximadamente el tamaño de los agregados en suelos con contenidos de arcilla $>50\%$ como consecuencia de erosión entre surcos, Young recomienda las expresiones:

$$Ac_a = 0.22.Ac_s \quad (3.42)$$

$$Ar_a = 1.53.(L_s - Ar_s) - 14.91 \quad (3.43)$$

$$L_a = 100 - Ac_a - Ar_a \quad (3.44)$$

donde:

L_s = Porcentaje de limo en la matriz del suelo

Para el caso de suelos con un porcentaje de limo en su matriz $>33\%$, el citado autor recomienda:

$$Ac_a = 1.2 + 0.22.Ac_s, \text{ ecuación de regresión obtenida con } n=15 \text{ y } r^2=0.49 \quad (3.45)$$

$$L_a = 0.14 + 0.67.L_s \quad (3.46)$$

$$Ar_a = 100 - Ac_a - L_a, n=14, r^2=0.55 \quad (3.47)$$

Según Young, los datos proporcionados por los anteriores bloques de ecuaciones serían valores muy groseros pero razonables, y pueden ser usados en ecuaciones de arranque y transporte para obtener algunas cifras orientativas en la estimación de pérdidas. Una posibilidad más adecuada para un caso como el nuestro, en el que nos interesa un único valor representativo, consistiría en obtener a partir de las cifras proporcionadas por estas ecuaciones el valor de D_{50} correspondiente a cada suelo. Estos valores habría que considerarlos como un umbral mínimo hablando de erosión en cárcavas, sabiendo que están obtenidos de ecuaciones para erosión laminar, circunstancia en la que, tal y como ya se ha indicado, el tamaño esperable de los agregados es menor que en erosión por surcos y en cárcavas. Tampoco puede olvidarse el hecho de que las expresiones citadas no indican el porcentaje de sedimento que está constituido por partículas primarias y cuál por agregados, lo que tiene transcendencia sobre todo en la densidad de las partículas transportadas. Más información sobre el tema puede encontrarse en Harmon et al. (1989) y Rothon et al. (1982).

Si el tamaño es importante, la densidad de las partículas primarias y de los agregados también juega un papel muy destacado en la erosión. Es conocido que la densidad de las partículas primarias es bastante

uniforme, y oscila entre 2.5 y 2.65 kg/m³. Por el contrario, la de los agregados es mucho más variada. Young establece los siguientes valores medios orientativos: para partículas >500 μm, 1.63 kg/m³, registrándose una variación pequeña respecto a este valor en agregados más grandes; si las partículas están comprendidas entre 50 y 500 μm, la densidad esperable es del orden de 1.81 kg/m³; si el tamaño oscila entre 20 y 50 μm, la densidad media sería de 2.15 kg/m³; por último, si se trata de agregados de tamaño arcilla, la densidad sería muy próxima a 2.65 kg/m³. El contenido en limo parece ejercer una importante influencia sobre la densidad, de modo que a mayor contenido en limo la densidad de los agregados es menor. Young (1980) propone la siguiente expresión para calcular la densidad de los agregados en función del porcentaje de limo en la matriz del suelo:

$$D_a = 2.051 - 0.012 \cdot L_s \quad (3.48)$$

donde:

D_a = densidad de los agregados (g/cm³)

L_s = Porcentaje de limo en la matriz del suelo

El efecto del grado de cobertura y de la pendiente en el tamaño de los agregados está aún muy poco estudiado, pero parece ser que cuanto mayor es el grado de cobertura, se reduce el porcentaje de material grueso, aumentando el de finos. En cuanto a la pendiente, el porcentaje de material grueso parece aumentar con la pendiente hasta un límite que algunos sitúan en torno al 10%. A partir de ese valor, el porcentaje de materiales gruesos no sigue incrementándose. Las grandes pendientes (hay estudios que consideran hasta un 32%) no parecen tener mayor efecto en el tamaño de los agregados. En pendientes muy bajas, el enriquecimiento en finos que se observa en el flujo se explica mayormente por la depósitos de los materiales gruesos aguas arriba, como consecuencia de las bajas velocidades y capacidades de transporte. (Young, 1980).

A modo de conclusión, es de destacar que el proceso de erosión se muestra selectivo: las partículas de tamaño limo, agregados o no, se erosionan más fácilmente. El material erosionado puede dividirse en dos grandes categorías de acuerdo con la clasificación textural de la matriz del suelo: suelos con más de 50% de arena o arcilla; suelos con más del 33% de limo. En cuanto a los primeros, los arenosos tienden a producir agregados > 50 μm, y en los arcillosos destaca la presencia bastante frecuente de agregados >1000 μm; en cuanto a los limosos, generalmente producen sedimentos entre 2 y 50 μm (tamaño limo), con la mayoría de las partículas comprendidas entre 20 y 50 μm. De media, la densidad de los agregados es de 2/3 o menos de la de las partículas primarias, y varía inversamente con la cantidad de limo.

Alberts et al. (1980) ponen de relieve la escasa información disponible sobre los agregados transportados en la erosión en surcos. Citan un estudio de Meyer et al. (1975) en el que, en un suelo labrado, con un 6% de pendiente, el 15% de los agregados eran >1mm, y el 3% >5 mm, lo que pone de manifiesto que la erosión en surcos puede transportar partículas muy grandes. Esta afirmación puede ser tanto o más aplicable a la erosión por cárcavas efímeras, de acuerdo con las características que el flujo suele mostrar en las mismas. Alberts et al. (1980) experimentaron con un suelo franco-limoso, en el que analizaron la erosión en surcos y entre surcos acontecida bajo diferentes caudales y precipitaciones artificiales. Encontraron que la magnitud total de la erosión en surcos fue independiente del caudal, lo que, según los autores, puede explicarse por el hecho de trabajar sobre suelos inalterados. El caudal tampoco afectó significativamente al tamaño de los agregados en la erosión por surcos. Alrededor del 33% de los agregados fue >0.05mm, y aproximadamente el 50% estaba comprendido entre 0.21 y 2 mm. Poco sedimento era >2 mm, y poco también estaba comprendido entre 0.05 y 0.21. En cuanto a la erosión entre surcos, las partículas resultaron ser marcadamente menores, de modo que sólo el 10% fue > 1mm, y el 60% resultó ser <0.05mm. Estos resultados confirman que las estimaciones de tamaños de agregados realizadas a partir de datos de erosión entre surcos deben de ser consideradas como un mínimo para los casos de erosión en cárcavas y en surcos. Alberts et al. encontraron que sólo el 5% del sedimento era transportado como arcilla primaria, y que el 80% de la arcilla se transportó formando parte de agregados.

Los datos y reflexiones de párrafos anteriores son los que se aportan con el fin de guiar en la elección razonada y realista de los tamaños de partículas transportadas, y de sus densidades, y ponen en evidencia que sólo es posible una aproximación grosera.

COEFICIENTE PARA EL TRANSPORTE NO EQUILBRADO

No existen datos como para poder proponer valores orientativos. Es claro que el transporte de sedimentos en una cárcava es generalmente un transporte no equilibrado, pero es incluso difícil establecer la causa de la falta de equilibrio, siendo en general múltiple: caudal líquido variable, aporte de sedimentos por el extremo aguas arriba variable, cambio de pendiente, etc. El trabajo de Bell y Sutheland (1983) puede servir de orientación mínimamente, ya que se realizó con un único tamaño de partícula. Choudhury (1995) utilizó un valor de $\alpha'=0.5$ (ecuación 3.21) para simular un experimento llevado a cabo por Newton (1955), con caudal constante, en el que se utilizó un canal de 9.4 m de largo, 0.3048 m de ancho y 0.6096 m de profundidad, en cuyo lecho se colocó una capa uniforme de arena de $D_{50}=0.69$ mm

PARÁMETROS DE FORMA DE LA ECUACIÓN DE DIETRICH

Los parámetros son el valor de redondez P de Powers y el factor de forma de Corey, CFS .

De acuerdo con su definición (ecuación 3.18), el parámetro de forma de Corey varía entre 0 y 1, aunque siempre es mayor que 0, y expresa la relación entre el área de la sección transversal de una esfera y el área máxima de la sección transversal de un elipsoide. Este factor de forma es el más simple y el más comúnmente utilizado. Cuanto menor es el valor de CFS , más aplanada es la forma de la partícula. Valores experimentales han demostrado cómo las velocidades de caída son significativamente más bajas cuanto menores son los valores de CFS . El valor medio de CFS para la mayoría de los sedimentos naturales varía entre 0.5 y 0.8. De acuerdo con la estructura de la ecuación de Dietrich (ver R_2 en la ecuación 3.18), CFS debe de ser mayor de 0.15, lo que no supone una limitación de importancia, dado que muy pocas partículas naturales poseen esa forma. (Dietrich, 1982).

En casos prácticos, la redondez generalmente puede ser sólo estimada, y el método estándar consiste en asignar valores de redondez basados en una comparación con imágenes propuesto por Powers (1953) y en el uso de la escala numérica correspondiente de Folk (1955). Fotografías aportadas por Schultz et al. (1954) y descripciones verbales hechas por Griggs et al. (1962) indicaron que un valor de 3.5 era un valor adecuado de la redondez de Powers para partículas con forma natural. La escala de variación varía entre 0 (redondez perfecta) y 6 (perfectamente angular). La estimación del valor de redondez P es muy subjetiva, y dos observadores examinando el mismo grano pueden aportar valores que difieren hasta en una unidad. En la mayoría de los granos naturales, las variaciones en redondez son pequeñas, y la forma será la que controlará la velocidad de caída. Para el uso general de la ecuación con sedimentos ricos en cuarzo y feldespato, la mejor estimación de la velocidad de caída se obtiene haciendo $CFS=0.7$ y $P= 3.5$. (Dietrich, 1982).

Como ha quedado apuntado previamente, las propiedades detalladas de los sedimentos provenientes de cárcavas efímeras son mera conjetura. Por tanto, parece adecuado atender la recomendación de Dietrich para establecer los valores de P y CFS que se mencionan en el párrafo anterior, es decir, 3.5 y 0.7 respectivamente.

4. - ANÁLISIS DEL MODELO

De acuerdo con Nearing et al. (1994), este análisis debe de consistir en tres partes: análisis de sensibilidad, comparaciones entre las predicciones del modelo y datos existentes de mediciones en campo, y análisis de los límites de confianza. En el presente trabajo vamos a seguir un esquema similar al citado, aunque con ciertas modificaciones, debidas fundamentalmente a la escasez de datos de campo disponibles.

En primer lugar, se procederá a un análisis de sensibilidad en sentido estricto, considerando todos los parámetros del modelo, de acuerdo con la definición planteada en la introducción del apartado 3.2. A continuación, se realizarán otros estudios tendentes a completar nuestro conocimiento sobre la respuesta del modelo, como por ejemplo, estudio de la influencia de la duración del episodio, de la longitud del tramo o de la importancia de la magnitud del aporte lateral de agua. Después se compararán los resultados del modelo con algunos datos medidos en campo. Este contraste, dada la imposibilidad de estimar adecuadamente muchos de los parámetros y variables de entrada, debe de plantearse como un estudio más bien cualitativo o de tendencias. Finalmente, se discutirán los límites de aplicación del modelo.

4.1. - ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.1.1. DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Consiste en la evaluación de los cambios relativos en la respuesta del modelo en función de cambios relativos en los valores de los parámetros de entrada. Una evaluación detallada de este estilo puede proporcionar un alto grado de conocimiento del comportamiento del modelo y, en la medida en que el modelo representa al sistema físico que simula, el análisis de sensibilidad puede proporcionar una importante orientación sobre los factores que influyen en la respuesta del propio sistema (Nearing et al., 1994). Además, nos indica cuáles son los parámetros en cuya estimación hemos de prestar mayor atención por ser los más influyentes.

Una forma muy común de expresar los resultados de un análisis de sensibilidad es la utilización del denominado coeficiente de sensibilidad, que puede definirse como (Nearing et al., 1989):

$$S = \frac{\left[\frac{O_2 - O_1}{O_{\bar{12}}} \right]}{\left[\frac{I_2 - I_1}{I_{\bar{12}}} \right]} \quad (4.1.1)$$

donde:

I_1, I_2 = valor menor y mayor del parámetro de entrada usado, respectivamente

$I_{\bar{12}}$ = media de I_1 e I_2 .

O_1, O_2 = valores de las salidas asociadas a I_1 e I_2

$O_{\bar{12}}$ = media de O_1 y O_2

S , por tanto, representa un cambio relativo normalizado en la respuesta del modelo en relación a un cambio normalizado en el valor de un parámetro de entrada, lo que permite comparar de manera razonable sensibilidades para diferentes parámetros, aunque estos parámetros tomen valores muy distintos.

McCuen y Sneider (1983) (citado en Nearing et al., 1994) explican algunas de las limitaciones de los métodos habituales del análisis de sensibilidad, como es el uso del coeficiente de sensibilidad recién definido. Destacan que la forma lineal del coeficiente no refleja la sensibilidad de la variable en todo el rango de valores del parámetro de que se trate, ya que la respuesta del modelo suele ser no lineal. El hecho de que el coeficiente de sensibilidad sea un parámetro univariante, lo que implica que no se consideran interacciones entre variables, puede resultar también un problema importante, pues puede que conduzca a interpretaciones erróneas de la naturaleza del modelo. Es decir, una variable que se muestra insensible a una determinada serie de valores de un parámetro, podría manifestarse sensible a otras series de valores. Por último, el hecho de que el coeficiente de sensibilidad sea un simple número es en muchos casos una pobre descripción de la sensibilidad. Una distribución de la respuesta en función de la distribución del input podría ser más adecuada.

A continuación se detalla el procedimiento seguido. En primer lugar, se realiza un análisis de sensibilidad estricto a cada uno de los parámetros. La variable dependiente principal cuya sensibilidad se analiza es el volumen total de suelo erosionado. Para cada parámetro se obtendrá un gráfico que relacione valores del parámetro y valores de la citada variable dependiente. Por otro lado, se especificará el valor del coeficiente lineal de sensibilidad expresado en la ecuación 4.1.1. Además del volumen total de suelo evacuado, hay otras variables dependientes cuya sensibilidad a la variación de los parámetros es del máximo interés analizar, como son las variables relacionadas con la forma del cauce y la posición del punto en el que comienza la erosión del cauce (cabecera). Por ello, se incluyen en general gráficos de las secciones transversales en tres posiciones del cauce: extremo aguas arriba, aguas abajo y sección intermedia. Estos tres gráficos se expresan para tres o cuatro valores del parámetro a analizar, generalmente máximo, mínimo e intermedio. En muchos casos se considera también conveniente aportar otros gráficos o datos, como la evolución del nivel del lecho, de la anchura del mismo, y de la caída vertical (variable T en la figura 3.3). Para algunos parámetros en los que se observe una baja sensibilidad, este procedimiento se sustituirá por otro más sencillo, indicando únicamente valores de S o algún comentario ilustrativo.

Primeramente se plantea y justifica la situación de referencia, en base a la que se realiza el análisis de sensibilidad. Trata de aproximarse a una circunstancia que puede considerarse habitual en la zona de estudio descrita en el capítulo 2. Es un caso sencillo que permite interpretar con claridad los resultados obtenidos. Dada la limitación apuntada por McCuen y Sneider, anteriormente citada, sobre los análisis de sensibilidad como el que aquí se realiza, conviene partir de una situación de referencia que resulte similar a casos reales de interés.

Se estudia el origen y primer desarrollo de cárcavas en una cuenca sencilla imaginaria, de una extensión total de 0.355 ha, muy parecida a las que pueden encontrarse en la zona de estudio. Su estructura se esquematiza en tres planos y un canal de fondo con las características que se muestran en la figura 4.1.1.

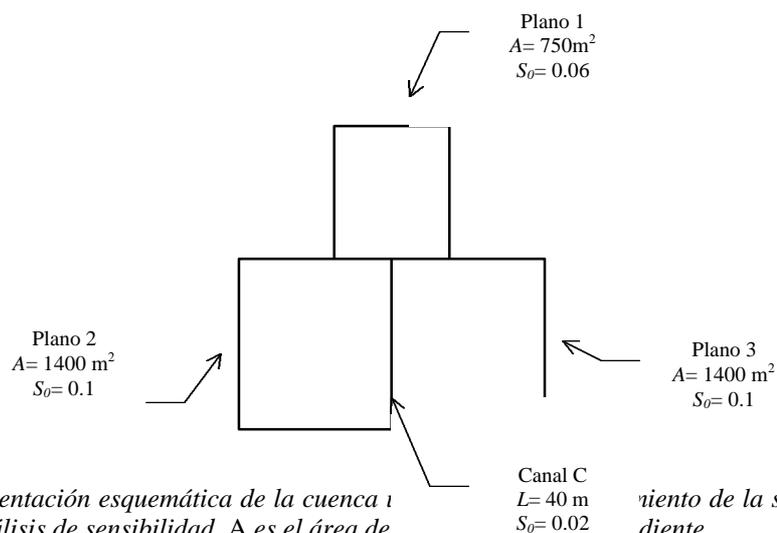


Figura 4.1.1.- Representación esquemática de la cuenca i referencia para el análisis de sensibilidad. A es el área de i nte de la situación de diente.

El aporte de agua al cauce constituido por el fondo del valle en el que se formará la cárcava, se realiza de dos maneras. Primeramente, un aporte por el extremo aguas arriba del cauce proveniente del plano 1, y otro lateral, proveniente de los planos 2 y 3. Dichos aportes van a considerarse constantes, lo que facilita una interpretación clara de los resultados obtenidos. Además, algunas de nuestras observaciones ponen de manifiesto que esta aproximación es razonable. Por ejemplo, la respuesta erosiva a las lluvias de los días 22 de enero y 5 de diciembre de 1996 en Pitillas muestran la enorme transcendencia del caudal punta y su duración, como se explicó en el capítulo 2. Por tanto, parece que los posibles efectos erosivos de lluvias suaves con algunos picos de intensidad elevada aunque de corta duración, en suelos próximos a saturación, son atribuibles casi exclusivamente a los picos de intensidad. No es descabellado pensar que este comportamiento se dé en otros muchos casos. Evidentemente, esto no será cierto si la lluvia en conjunto es de elevada intensidad. En ese caso, toda ella, y no sólo los picos de intensidad, contribuirán a la erosión. Además, la naturaleza del modelo, que considera una sucesión de regímenes permanentes y no un régimen específicamente variable, y la naturaleza del fenómeno, de rápidos cambios, hacen que quizás sea recomendable proceder solamente con el caudal punta.

Para estimar el hidrograma se utiliza una lluvia real registrada, acontecida el 22-1-96, cuyo hietograma detallado puede apreciarse en la figura 2.6. Se trata de una lluvia que produjo una erosión apreciable en la zona. Para estimar con este enfoque los caudales de trabajo, deben de obtenerse los hidrogramas de escorrentía a la salida del plano 1, y en el extremo aguas abajo de la cuenca, en la salida del canal C (figura 4.1.1), como consecuencia de la lluvia citada. La transformación lluvia-escorrentía se realiza mediante el modelo KINEROS (Woolhiser et al., 1990), y se aplica a la topografía correspondiente a la cuenca de la figura 4.1.1. La utilización de este modelo se considera conveniente porque, al ser distribuido, nos aporta estimaciones de las variables de interés en los puntos deseados.

El hietograma de la figura 2.6 se introdujo en el modelo KINEROS con datos cada minuto, tal y como fueron registrados. Para la estimación de los distintos parámetros requeridos por el modelo KINEROS se supone que la cuenca se encuentra como corresponde al momento de ocurrencia de la lluvia considerada: suelo próximo a saturación y cultivo en estado de pequeña plántula. En la tabla 4.1.1 se indican los valores adoptados para los principales parámetros requeridos por el modelo KINEROS, así como la fuente de información utilizada para su obtención.

<i>n</i> de Manning Woolhiser, 1975; Engman, 1986	0.05
Conductividad en saturación K_{sat} (mm/h) Rawls y Brakensiek, 1989	3.15
Effective net capillary drive G (mm) Rawls et al., 1982, citado en Woolhiser et al., 1990	375
Porosidad Medida en campo	0.42
Saturación relativa inicial S_i Supuesta cercana a saturación, de acuerdo con las observaciones en campo	0.8
Saturación relativa máxima $S_{máx}$ Rawls et al., 1982, citado en Woolhiser et al., 1990	0.94
Coefficiente de erodibilidad erosión hidráulica CG (s^{-1}) Woolhiser et al., 1990; Lázaro, 1996	0.02
Coefficiente de erodibilidad erosión por salpicadura CF Woolhiser et al., 1990; Lázaro, 1996	180
D_{50} (mm) Young, 1980	0.08
Peso específico relativo de las partículas transportadas Young, 1980	1.5

Tabla 4.1.1.- Principales parámetros considerados para la utilización del modelo KINEROS, y fuente usada para su estimación.

En la figura 4.1.2 pueden observarse los hidrogramas obtenidos para la salida del plano 1 y la salida de toda la cuenca. Se aprecia la cortísima duración de los caudales punta, que alcanzan valores de 7 y 30 l/s aunque durante un minuto tan sólo. Más que considerar los caudales punta, tan elevados y de tan corta duración, parece más conveniente optar por unos caudales medios representativos de las respectivos puntas de los hidrogramas, que se calculan de la manera que a continuación se explica.

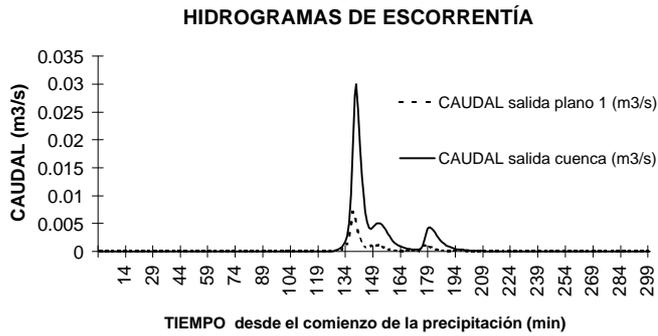


Figura 4.1.2.- Hidrogramas de escorrentía a la salida de la cuenca (canal 4) y a la salida del plano 1.

El caudal medio entre los minutos 128 y 148 desde el comienzo de la precipitación, instantes de comienzo y final del pico de los hidrogramas, es de 2l/s a la salida del plano 1, y de 9l/s a la salida de toda la cuenca. Por tanto, la aportación por el extremo aguas arriba del canal es de 2 l/s. Para calcular el aporte lateral de agua a introducir en el modelo (m³/m/s) se procede suponiendo un crecimiento lineal del caudal conforme se avanza aguas abajo de la cuenca, de manera similar al modelo EGEM (USDA-SCS, 1992). Así:

$$Q_{LAT} = \frac{Q_s - Q_e}{L} \quad (4.1.2)$$

donde:

- Q_{LAT} = Caudal lateral a considerar en el tramo (m³/m/s)
- Q_s = Caudal en el extremo aguas abajo del cauce (salida de la cuenca) (m³/s)
- Q_e = Caudal en el extremo aguas arriba del cauce (m³/s)
- L = Longitud del tramo de cauce (m)

En este caso, por tanto, el caudal lateral será de 0.000175 m³/m/s. La concentración de sedimentos en el aporte por el extremo aguas arriba se considera nula, suposición también adoptada en EGEM (USDA-SCS, 1992). Lógicamente, la longitud del tramo a simular es de 20min.

A continuación se exponen los valores para el resto de los parámetros y condiciones de entrada necesarios en la definición de la situación de referencia. Para los símbolos no citados en el capítulo 3, se utilizan los correspondientes al archivo de entrada de datos del programa, TEST.INP.

DURACIÓN DEL EPISODIO= 20 min

LONGITUD DEL TRAMO L = 40 m

NÚMERO DE SUBTRAMOS JR = 30. Este número puede verse sujeto a variación por razones de estabilidad numérica al estudiar algunos parámetros.

LONGITUD DE CADA SUBTRAMO Δx = 1.3334 m. Este número puede verse sujeto a variación por razones de estabilidad numérica al estudiar algunos parámetros.

NÚMERO DE SECCIONES TRANSVERSALES JP = 31.

NÚMERO DE PASOS DE TIEMPO NT = 80. Este número puede verse sujeto a variación por razones de estabilidad numérica al estudiar algunos parámetros.

DURACIÓN DEL PASO DE TIEMPO $DT= 0.25\text{min}$. Este número puede verse sujeto a variación por razones de estabilidad numérica al estudiar algunos parámetros.

ELEVACIÓN DEL LECHO EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO $ZREF = 0\text{m}$. La elevación del lecho en el extremo aguas abajo en el instante inicial es además el nivel de referencia.

PENDIENTE LONGITUDINAL DEL LECHO $S_0 = 2\%$.

ELEVACIÓN DEL EXTREMO SUPERIOR DE LOS BANCOS CON RESPECTO AL LECHO $DREF= 0.1\text{ m}$.

ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO $\tau_c= 1.5\text{ Pa}$. La utilización del método de Alizadeh y Heinzen (ver apartado 3.2) resulta muy poco adecuada en este caso. El suelo en concreto aquí estudiado presenta unas características de salinidad y sodicidad que hacen que quede fuera de los límites de aplicación del método. Los otros métodos propuestos en el citado apartado también presentan numerosas dificultades de cara a su utilización práctica, y predicen unos valores de τ_c en torno a 3 Pa, que parecen excesivos, dada la conocida alta erodibilidad de los suelos. En el subapartado en que se aborda la validación del modelo se detallará más a este respecto.

COEFICIENTE DE ERODIBILIDAD $K= 3.11\text{N}/(\text{N}\cdot\text{min})$. Este valor procede de aplicar la ecuación 3.30 con un valor de $\tau_c= 1.5\text{ Pa}$, realizando las conversiones de unidades oportunas.

COEFICIENTE PARA CALCULAR EL ESFUERZO CORTANTE EN EL LECHO $C_\tau= 1.4$, de acuerdo con Olsen y Florey (1952).

ANCHURA INICIAL DEL LECHO $BWDREF= 0.25\text{m}$. Este valor se propone a partir de los datos comentados en el apartado 2.3.6 y de las secciones transversales del anejo I.

PENDIENTE INVERSA DE LOS BANCOS $BSLP= 14.3$ Valor propuesto a partir de los datos comentados en el apartado 2.3.6. Corresponde a una pendiente unitaria de 0.07, con un ángulo de 4° con respecto a la horizontal.

COEFICIENTE DE MANNING $n =0.05$. De acuerdo con las mismas fuentes y criterios citados en la elección de este coeficiente para su utilización en el modelo KINEROS (tabla 4.1.1).

COEFICIENTES DE PÉRDIDAS POR REMOLINOS. $CC=0.1$; $CE=0.5$, tal y como propone Chow (1958, sección 10-4) (ver apartado 3.1.1).

PESO ESPECÍFICO APARENTE DEL SUELO $\gamma = 15000\text{N}/\text{m}^3$ de acuerdo con la tabla 2.5.

POROSIDAD $POR= 0.42$, de acuerdo con la tabla 2.5.

CELERIDAD DE LAS PERTURBACIONES DEL LECHO $c_b= 0.05\text{m}/\text{s}$ (ver apartado 3.2).

TEMPERATURA $TEMP= 15^\circ\text{C}$

PARÁMETRO DE REDONDEZ DE POWERS EN LA ECUACIÓN DE CAÍDA DE DIETRICH $P= 3.5$ (Ver apartado 3.2)

PARÁMETRO DE FORMA DE COREY EN LA ECUACIÓN DE CAÍDA DE DIETRICH $CFS= 0.7$ (Ver apartado 3.2)

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS TRANSPORTADAS $d= 0.2\text{ mm}$. Aplicando las expresiones propuestas por Young (1980) para un suelo con un contenido rico en limo (ecuaciones 3.45, 3.46 y 3.47), se obtendría un valor de D_{50} aproximadamente igual a 0.1mm. Sin embargo, Alberts et al. (1980), para un suelo de textura similar al que nos ocupa en este estudio, encontraron que alrededor del 33% de los agregados erosionados por erosión en surcos eran mayores que 0.05mm, y aproximadamente el 50% estaba comprendido entre 0,21 y 2 mm (ver apartado 3.2). En cárcavas cabría esperar incluso mayores tamaños de partículas (Foster, 1986). Conviene aclarar que, aunque el modelo permite considerar una

mezcla de sedimentos con fracciones de diferentes tamaños y densidades, es tanta la incertidumbre que se cree más conveniente optar por el estudio del modelo considerando un único tamaño representativo.

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LAS PARTÍCULAS TRANSPORTADAS $SPGR= 1.8$, valor razonable de acuerdo con Young (1980) para el tamaño y tipo de partícula esperable.

En este análisis se considerará un transporte de sedimentos equilibrado, es decir, no incluyendo la ecuación de Bell y Sutherland (1983) (ecuación 3.19) para modificar la ecuación de capacidad de transporte. En apartados posteriores se realizará un análisis secundario incluyendo la hipótesis de transporte no equilibrado. Considerar la ecuación de Bell y Sutherland supone prácticamente el incluir un parámetro de calibración más. Parece más razonable en un primer momento explorar la opción más simple.

Se procede a continuación a analizar la sensibilidad a cada uno de los parámetros citados. Obviamente, en cada caso se analiza la respuesta del modelo frente a la variación del parámetro en cuestión, manteniendo fijos los valores del resto de los parámetros y variables, de acuerdo con la situación de referencia descrita. Se ha procurado que el rango de variación de los parámetros, aspecto de importancia al calcular el coeficiente de sensibilidad S , cubra valores coherentes con los que cabe esperar en el ámbito de estudio de la erosión por cárcavas. No se va a realizar de momento un análisis crítico de la adaptabilidad del modelo para el estudio de la erosión en cárcavas, que se hará con posterioridad, sino simplemente, una descripción de los resultados obtenidos. Las explicaciones más detalladas sobre gráficos y comportamiento del modelo se realizan al estudiar los primeros parámetros, y son mucho más breves posteriormente, para evitar repeticiones.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE LA PENDIENTE LONGITUDINAL S_0

En la siguiente figura (fig. 4.1.3) puede apreciarse en diagrama de columnas la variación del volumen erosionado en relación a la variación de la pendiente longitudinal del lecho, así como el valor del coeficiente de sensibilidad obtenido. Se observa la no linealidad en la respuesta, y la importancia que reviste este parámetro, aumentando grandemente la erosión al aumentar la pendiente. En la figura 4.1.4 se puede ver la evolución con la pendiente de otras tres importantes variables dependientes, con respecto a la posición en el cauce y con respecto al tiempo. Estas variables dependientes son:

- anchura del lecho.
- elevación del lecho con respecto al nivel de referencia, que es el extremo aguas abajo del cauce en el instante inicial.
- caída vertical, es decir, la distancia vertical desde el lecho hasta el extremo superior del talud tal y como se define en la figura 3.3.

Cada una de estas variables se representa en el instante inicial 0 y en los instantes 20, 60 y 80 desde el comienzo de la ejecución. Cada línea representa el valor de cada una de las variables en las distintas posiciones, en el instante de que se trate. El valor de la anchura del lecho y de la caída vertical, o bien se mantiene estable entre un instante y otro, o bien es creciente, por lo que valores creciente de la variable se refieren siempre a instantes posteriores. Con la elevación del lecho ocurre justamente lo contrario. Cuando las variables sufren pocas modificaciones con respecto al tiempo, no pueden distinguirse todos los trazos, y sólo se aprecia una línea más o menos gruesa, como ocurre en esta ocasión la figura 1.4.4 con la elevación del lecho (a penas se erosiona) y con la caída vertical. Con estas explicaciones, creemos que los gráficos ilustran adecuadamente la respuesta del modelo, haciéndose innecesario indicar el significado de todos y cada uno de los trazos. Este mismo tipo de figura se obtendrá para la mayor parte de los parámetros, y en los estudios complementarios posteriores.

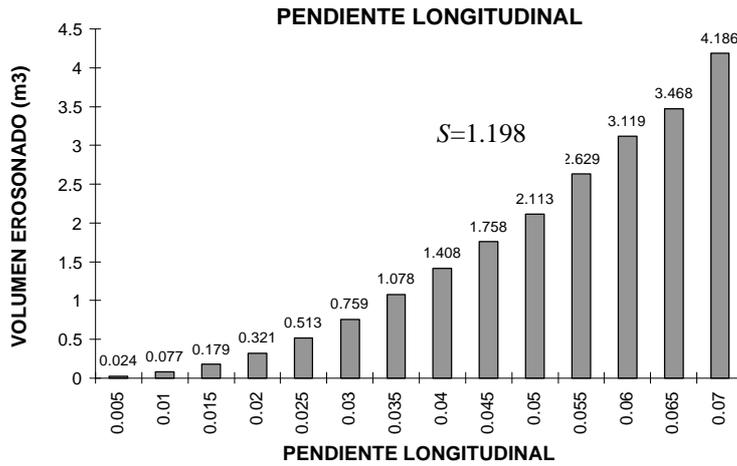


Figura 4.1.3.- Sensibilidad a la variación de la pendiente longitudinal del lecho.

Centrándonos en la figura 4.1.4 (pendiente $S_0=0.005$), se comprueba cómo la erosión es de muy poca importancia. Hasta la posición $x \approx 13$ m en el instante 20 min, y $x \approx 12$ m en instantes posteriores, no se alcanza en el lecho, gracias al aporte lateral, el esfuerzo cortante crítico capaz de iniciar el proceso erosivo. Esta iniciación constituye algo similar a una cabecera que se desplaza ligeramente hacia arriba. Al analizar posteriormente la sensibilidad a la variación del esfuerzo cortante crítico τ_c y del coeficiente K se detallará en este aspecto. La erosión se produce básicamente en los laterales, ensanchándose el lecho, sobre todo aguas arriba. El importante ensanchamiento se produce porque el bajo esfuerzo cortante calculado en el lecho, debido a la poca pendiente, hace que la mayor parte de la capacidad de transporte disponible se complete con materiales procedentes de los laterales. Sin embargo, la anchura alcanzada no es suficientemente grande como para que llegue a ocurrir que el calado sea menor que T (ver figura 3.3), lo que se traduciría, de acuerdo con la estructura del modelo en una mayor erosión del lecho (ver diagrama de flujo, figura 3.5). Conforme avanzamos aguas abajo aumenta el esfuerzo cortante en el lecho al aumentar el caudal (aportes laterales). Por tanto, aumenta también la erosión en el lecho, disminuyendo en proporción la de los laterales.

Con mayores pendientes, la anchura adquiere de manera casi súbita un valor elevado, bastante más que con la pendiente de 0.005, y prácticamente definitivo (figura 4.14). Además, en todas las posiciones el esfuerzo cortante en el lecho es claramente mayor que el crítico, y la erosión comienza en el propio extremo aguas arriba. El ensanchamiento es súbito e importante ya que la erosión calculada para el lecho es bastante menor que la capacidad de transporte, elevada, de modo que ésta se completa en los primeros instantes con materiales procedentes de los laterales. Después sigue produciéndose aumento de erosión sólo por degradación del lecho, lo que se explica porque, al haber tenido lugar el citado ensanchamiento, se alcanza fácilmente la condición de que el calado sea menor o igual que T , lo que hace que el modelo sólo contabilice erosión en el lecho. Los altos valores que en general alcanzan los ensanchamientos pueden también explicarse por una sobrevaloración de la capacidad de transporte aguas arriba, al no considerarse un transporte no equilibrado.

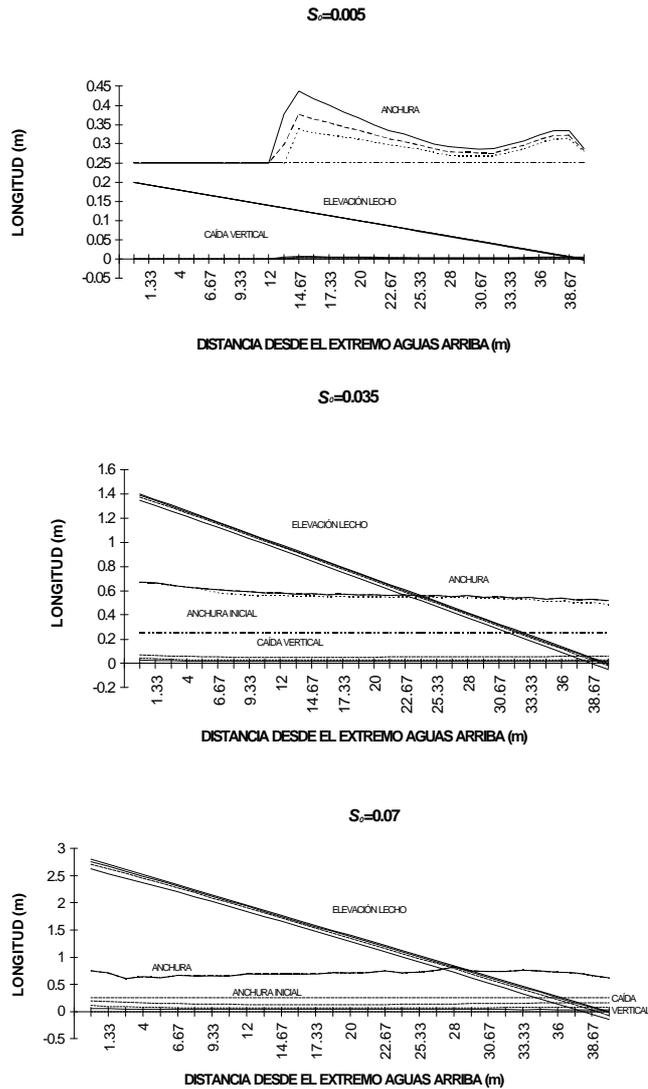


Figura 4.1.4.- Sensibilidad a la variación de la pendiente longitudinal del lecho. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho para pendientes unitarias de 0.005, 0.035 y 0.07.

La figura 4.1.5 completa la información anterior. Muestra la forma de tres secciones transversales del cauce (extremo aguas arriba, sección intermedia y extremo aguas abajo) en el instante inicial y en los instantes 10, 20, 30, 40, 60 y 80, para las pendientes unitarias de 0.005, 0.035 y 0.07, las mismas consideradas en la anterior figura. Con la pendiente de 0.005, la erosión es insignificante en comparación con los casos de mayor pendiente. En efecto, con una pendiente de 0.035, la erosión es mucho mayor. En ese caso, la anchura disminuye ligeramente aguas abajo pero permanece casi invariable con el tiempo tras incrementarse casi de manera instantánea, de modo que, transcurrido cierto tiempo, el cauce sólo se erosiona mediante erosión en el lecho. El grado de erosión es similar en la cabecera y en otras posiciones, aunque tiende a disminuir algo en la sección intermedia. Ello debe de estar causado por una disminución en la capacidad de transporte disponible, al alcanzar un flujo bastante cargado de sedimentos zonas con un caudal moderado. Aguas abajo, el aumento de caudal vuelve a traducirse en un aumento de la capacidad de transporte disponible y de la erosión. Con una pendiente unitaria de 0.07, una vez producido el ensanchamiento, casi instantáneo, la erosión se da únicamente en el lecho. Las anchuras y profundidades son bastante mayores que con una pendiente de 0.035.

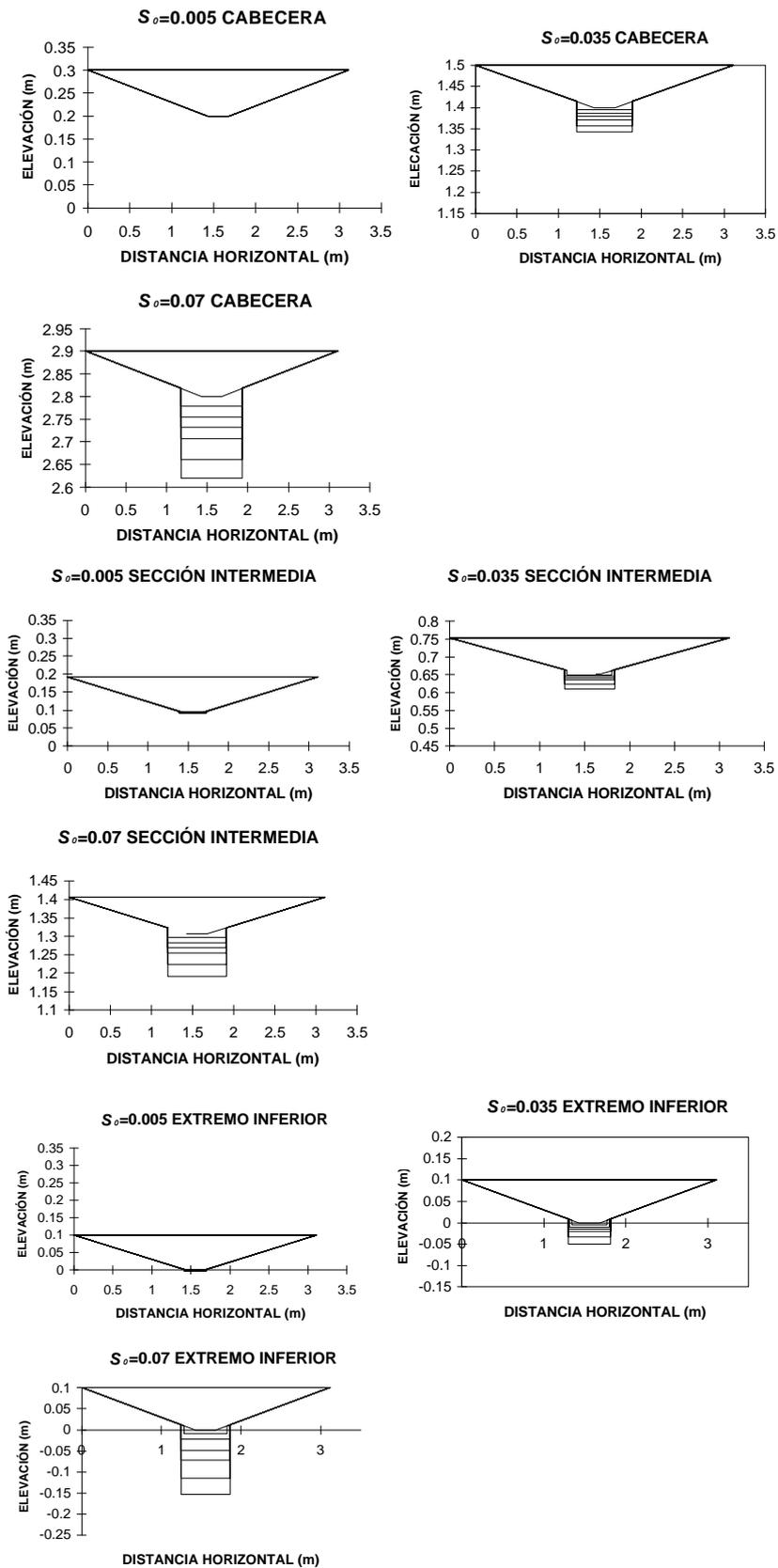


Figura 4.1.5.- Sensibilidad a la variación de la pendiente longitudinal del lecho. Secciones transversales en extremo superior, posición intermedia y extremo inferior para pendientes unitarias de 0.005, 0.035 y 0.07.

RESPUESTA ANTE LA VARIACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO τ_c Y COEFICIENTE K , PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN DEL LECHO

Se trata de los parámetros de la ecuación 3.25. Influyen sólo en la erosión del lecho, e influyen poco en la erosión total, controlada por la capacidad de transporte. En efecto, en la figura 4.1.6 se aprecia cómo la variación de la erosión total es mínima, hasta que, de manera súbita, se hace la erosión nula debido a que el flujo no supera el esfuerzo cortante crítico (caso 14). En la tabla 4.1.2 se aportan los valores de los dos parámetros utilizados en cada caso. Ambos parámetros se encuentran ligados, y en esta ocasión sólo se han estudiado de manera conjunta, por lo que no se ha obtenido el coeficiente de sensibilidad. La relación entre uno y otro viene dada por la ecuación 3.30.

Si bien la influencia de estos parámetros es casi nula en cuanto a la erosión total, es importante en cuanto a la definición de la forma del cauce: conforme aumenta τ_c y disminuye K , aumenta considerablemente la anchura del cauce, como puede apreciarse en las figuras 4.1.7 y 4.1.8. Estas figuras son análogas a las descritas para el estudio de la influencia de la pendiente longitudinal. Incluso con cambios relativamente pequeños (paso de 0.5 a 1.5 Pa), la variación es muy importante en la anchura. Con $\tau_c=0.5$ Pa sólo hay erosión en el lecho: se cumple que toda la capacidad de transporte disponible queda ya satisfecha sólo con materiales del lecho. En casos como este, el modelo considera únicamente erosión en el lecho (ver figura 3.5). Al aumentar τ_c a 2Pa, se produce una muy importante erosión lateral. Este comportamiento se exagera con $\tau_c=4$ Pa y $\tau_c=6$ Pa. En este último caso, en los primeros metros el caudal no es suficiente como para vencer el esfuerzo cortante crítico, sino que hay que esperar hasta posiciones inferiores, próximas a los 23 m primeramente, y entre 17 y 20 m posteriormente, para poder superar dicho valor (figuras 4.1.7 y 4.1.8). Es como si se tratase de una cabecera que migra aguas arriba. La migración se explica porque, al producirse erosión, aumenta ligeramente la pendiente en el tramo, lo que a su vez aumenta la velocidad y la capacidad de transporte.

	τ_c (Pa)	K (min^{-1})
CASO 1	0.5	11.420
CASO 2	1	5.962
CASO 3	1.5	3.112
CASO 4	2	1.629
CASO 5	2.5	0.848
CASO 6	3	0.4428
CASO 7	3.5	0.231
CASO 8	4	0.120
CASO 9	4.5	0.063
CASO 10	5	0.0328
CASO 11	5.5	0.0172
CASO 12	6	0.0089
CASO 13	6.5	0.0046
CASO 14	7	0.0024

Tabla 4.1.2.- Valores de τ_c y coeficiente K en cada uno de los casos.

PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN PARA ESTIMAR LA EROSIÓN DEL LECHO

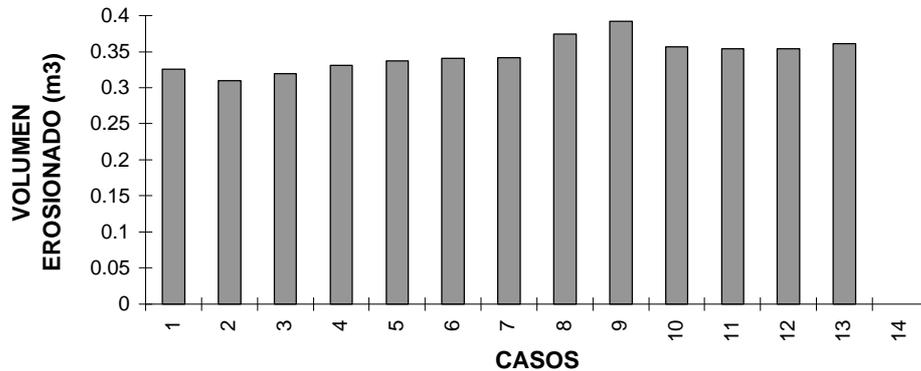
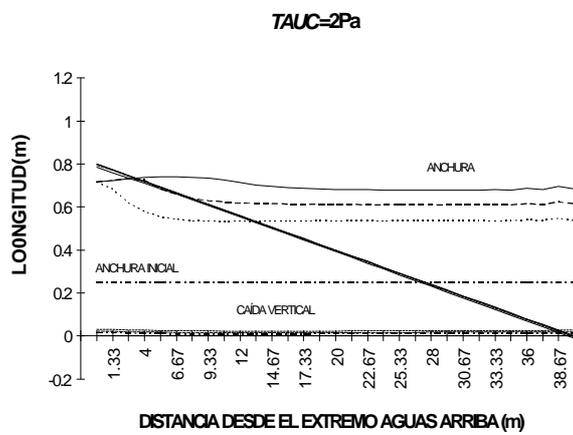
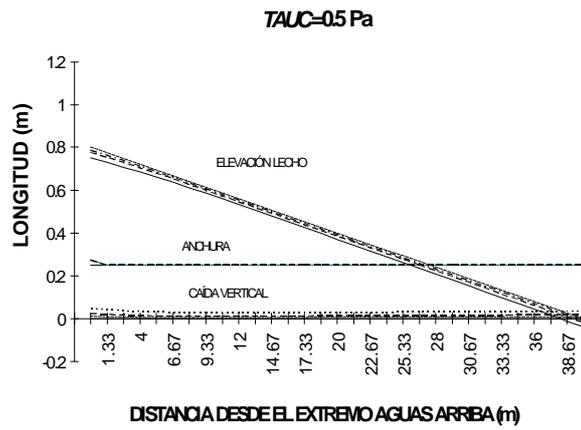


Figura 4.1.6.- Respuesta a la variación de los parámetros para el cálculo de la erosión del lecho.

De acuerdo con el comportamiento del modelo ilustrado en la figura 4.1.6, no puede pensarse que estos parámetros sean los parámetros de erodibilidad del modelo: no aumenta la erosión al aumentar el valor de K y disminuir el de τ_c . Efectivamente, deberemos de considerar como parámetros de erodibilidad de este modelo aquéllos que nos relacionen propiedades del suelo con la magnitud de la erosión. En este caso, veremos que se trata básicamente del tamaño de las partículas de suelo erosionadas por el flujo de una cárcava, que puede considerarse como una característica intrínseca del suelo ante este fenómeno, y la densidad de las mismas. Efectivamente, estos parámetros condicionan enormemente la capacidad de transporte, que controla totalmente la respuesta del modelo, al estar la erosión en los cálculos limitada por el transporte. El esfuerzo cortante crítico también es un parámetro de erodibilidad en este modelo, pues delimita la ocurrencia o no de erosión.

Las pequeñas variaciones en volumen erosionado de la figura 4.1.6 se explican por ligeras variaciones de la capacidad de transporte, causadas a su vez por modificaciones en la repartición de la erosión entre el lecho y las paredes. Aunque las variaciones en la forma son grandes, la respuesta en pérdidas de suelo es muy pequeña. Como se verá, esto concuerda con la baja sensibilidad de las pérdidas totales encontrada para los cambios de forma en el cauce, como anchura del lecho o pendiente de los bancos.



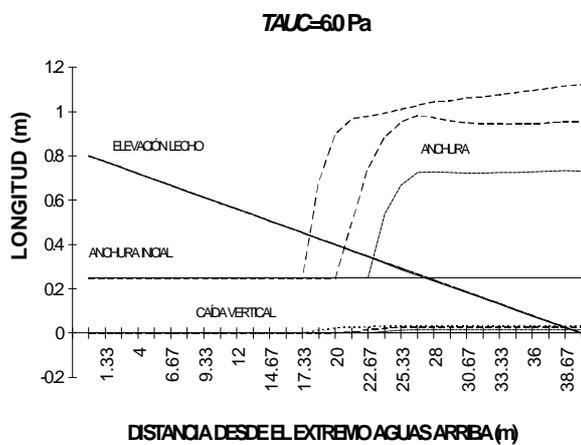
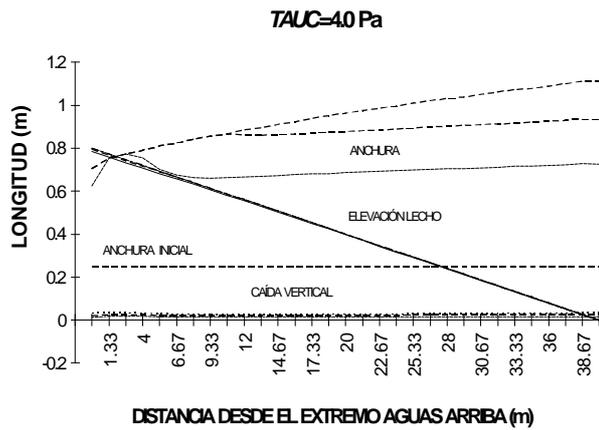
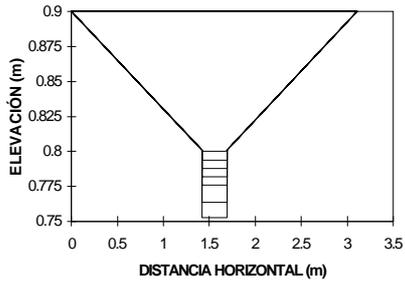
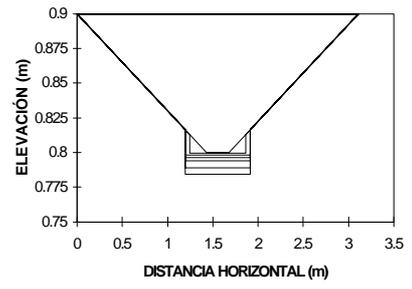


Figura 4.1.7.- Sensibilidad a la variación del esfuerzo cortante crítico τ_c (τ_{c} en la figura) y del coeficiente K . Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho. El valor de K correspondiente a cada valor de τ_c puede verse en la tabla 4.1.2.

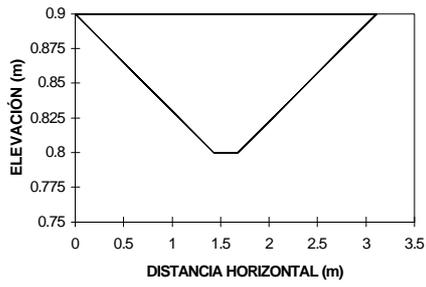
**TAUC=0.5Pa
CABECERA**



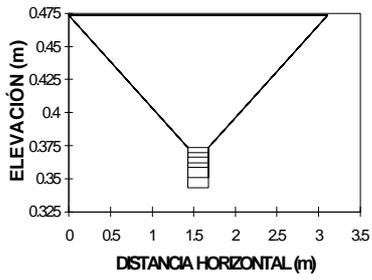
**TAUC=2Pa
CABECERA**



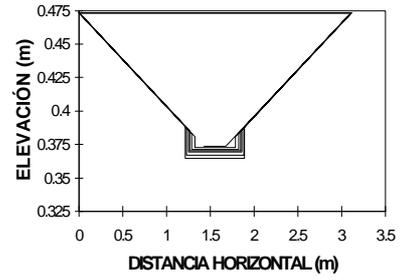
**TAUC=6Pa
CABECERA**



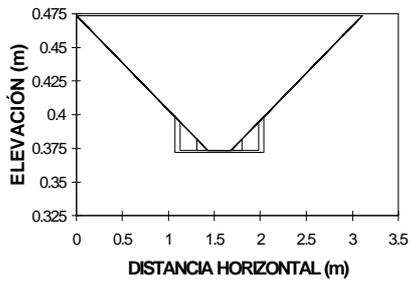
**TAUC=0.5Pa
SECCIÓN INTERMEDIA**



**TAUC=2Pa
SECCIÓN INTERMEDIA**



**TAUC=6Pa
SECCIÓN INTERMEDIA**



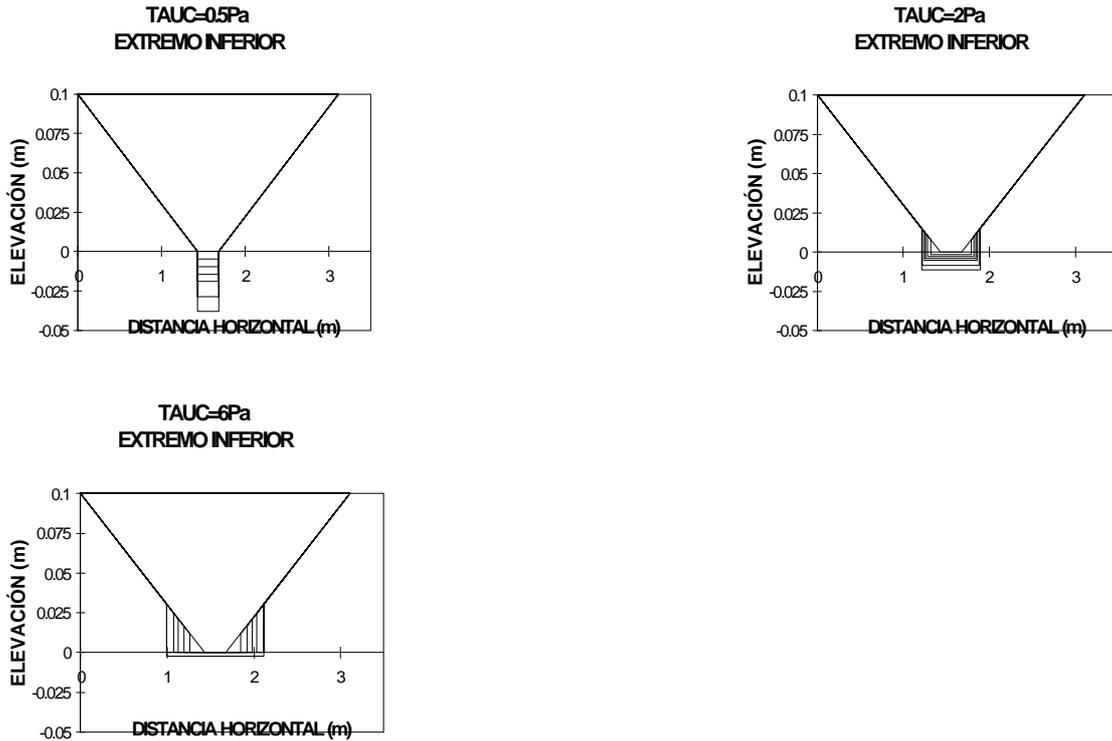


Figura 4.1.8.- Sensibilidad a la variación del esfuerzo cortante crítico τ_c (tauc en la figura) y del coeficiente K. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho. El valor de K correspondiente a cada valor de τ_c puede verse en la tabla 4.1.2.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE C_1 , COEFICIENTE PARA CALCULAR EL ESFUERZO CORTANTE EN EL LECHO

De manera similar a como ocurría con el esfuerzo cortante crítico τ_c y el coeficiente K estudiados anteriormente, la variación de este parámetro (ver ecuación 3.23) influye en el reparto de la erosión entre paredes y lecho. Su valor real depende de la forma del cauce y del calado, y su variación está restringida a un intervalo relativamente estrecho. En este análisis estudiamos valores de C_1 entre 0.8 y 1.6. La forma del cauce va variando durante la ejecución del programa, y por lo tanto, también lo irá haciendo el valor del coeficiente C_1 propio de cada caso, aspecto no considerado en el modelo. Este análisis nos ilustrará la transcendencia de considerar un único valor constante de parámetro durante toda la ejecución.

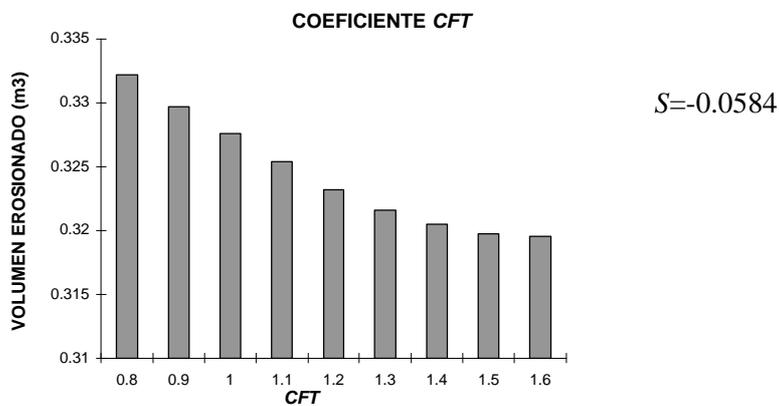


Figura 4.1.9.- Sensibilidad a la variación en el coeficiente para calcular el esfuerzo cortante en el lecho C_{τ}

La figura 4.1.9 nos muestra cómo apenas tiene transcendencia en lo que se refiere a pérdidas totales. Se comporta de manera parecida a τ_c y K : controlando la anchura y profundidad del cauce, aspecto para el que resulta de importancia, como puede apreciarse en la figura 4.1.10, aunque no tanta como los citados parámetros. Puede concluirse que el considerar un valor único durante toda la ejecución no reviste importancia al menos en los casos en los que se alcanza de manera rápida una sección de forma estable, como la sección rectangular que frecuentemente aparece. Sería deseable, de todos modos, contar con algún método de corrección.

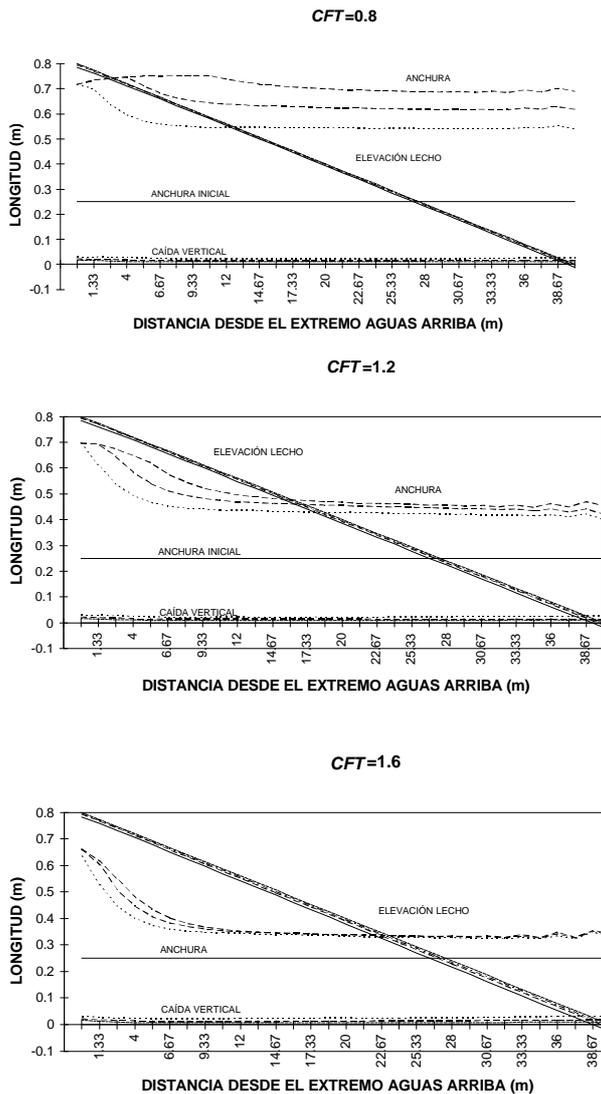


Figura 4.1.10.- Sensibilidad a la variación del coeficiente C_{τ} . Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE LA ANCHURA INICIAL DEL LECHO

La determinación de este parámetro es difícil en un cauce en el que potencialmente aparecerá una cárcava. Por eso es de mucho interés analizar la transcendencia que tiene su estimación. De acuerdo con la figura 4.1.11, este parámetro afecta, aunque de manera ligera, a la magnitud de la erosión total: cuanto más ancho es el lecho, menor es la velocidad del flujo y la velocidad cortante, disminuyendo la capacidad de transporte. Sin embargo, como puede verse en la figura 4.1.12, el mayor efecto lo ejerce este

parámetro sobre la modificación de la anchura final que alcanzará el cauce: a partir de un cierto valor de anchura inicial, se produce erosión sólo en el lecho o casi, dedicándose toda o casi toda la capacidad de transporte disponible a erosionarlo. En los gráficos para los casos de anchura del lecho igual a 1 y 2 m (figura 4.1.12) a penas se aprecia erosión, a pesar de que, de acuerdo con la figura 4.1.11, se producen pérdidas de unos 0.25 m³. Ello es debido a la escala, ya que los descensos en el lecho, y por tanto también la caída vertical, son muy pequeños pero, como se producen en una gran anchura, se origina una erosión importante. Parece ser que cualquier valor razonable puede aportar resultados suficientemente satisfactorios al estudiar la erosión por cárcavas efímeras. En efecto, en la figura 4.1.12 vemos que, tanto con una anchura inicial de 0.25m como de 0.5m, la anchura final ha sido en ambos casos muy parecida y próxima a 0.5m, y las pérdidas totales casi idénticas.

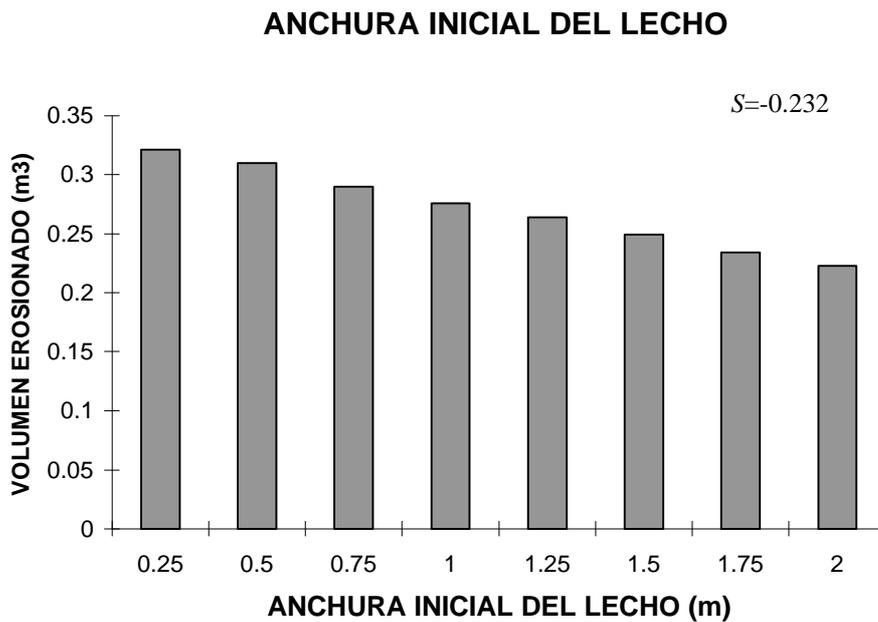


Figura 4.1.11.- Sensibilidad a la variación en la anchura inicial del lecho.

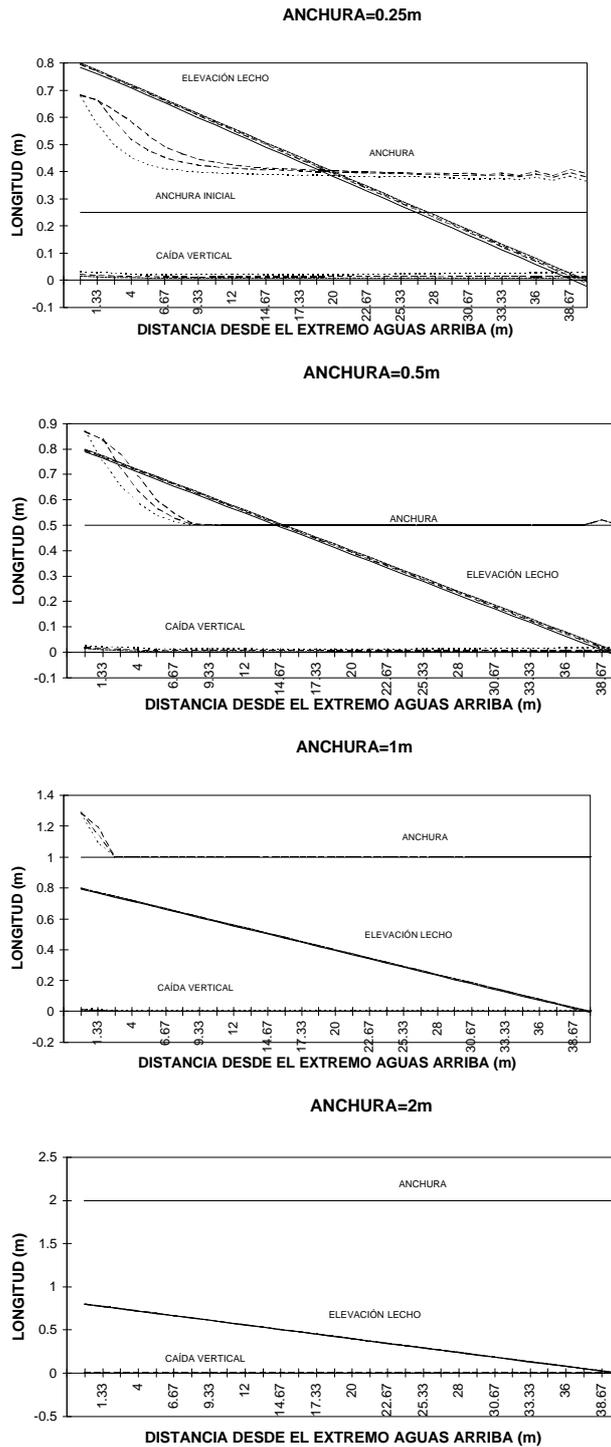


Figura 4.1.12.- Sensibilidad a la variación de la anchura inicial del lecho. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE LA PENDIENTE DE LAS LADERAS

En la figura 4.1.13 se expresan las pérdidas en función de la pendiente unitaria de las laderas de la parcela que vierten al cauce de la cárcava. El gráfico de la derecha detalla en las pendientes más bajas, más próximas a las que son frecuentes en cárcavas efímeras, observándose una mayor sensibilidad. Este gráfico posibilita obtener un coeficiente de sensibilidad más próximo a la hipótesis de linealidad. Las pendientes más elevadas consideradas en este análisis no son habituales en parcelas normales, pero

pueden darse en la proximidad de las zonas más deprimidas de aquéllas que llevan mucho tiempo padeciendo erosión por cárcavas, con un destacado encajamiento del cauce.

De manera similar a como ocurría al disminuir la anchura inicial del lecho, un aumento de la pendiente de los taludes implica, para un mismo caudal, un incremento de la velocidad y de la capacidad de transporte, aumentando la erosión. Se alcanza un punto a partir del cuál prácticamente no hay aumento de la erosión. La sensibilidad es ligeramente superior a la obtenida para la variación de la anchura inicial. En las figuras 4.1.14 y 4.1.15 se aprecia también la influencia que la variación de este parámetro tiene en la anchura final obtenida. Cuanto mayor es la pendiente de los taludes, menor es la anchura final alcanzada y menor es el nivel del lecho. Varias son las causas que inciden en este comportamiento. Por un lado, para un mismo caudal, mayor es el calado al aumentar la pendiente de los taludes, lo que hace aumentar el radio hidráulico, que a su vez aumenta la erosión calculada en el lecho (ecuaciones 2.23 y 2.24). Además cuanto mayor es la pendiente de los taludes, mayor es la masa que es necesario eliminar de los laterales para conseguir un aumento de anchura.

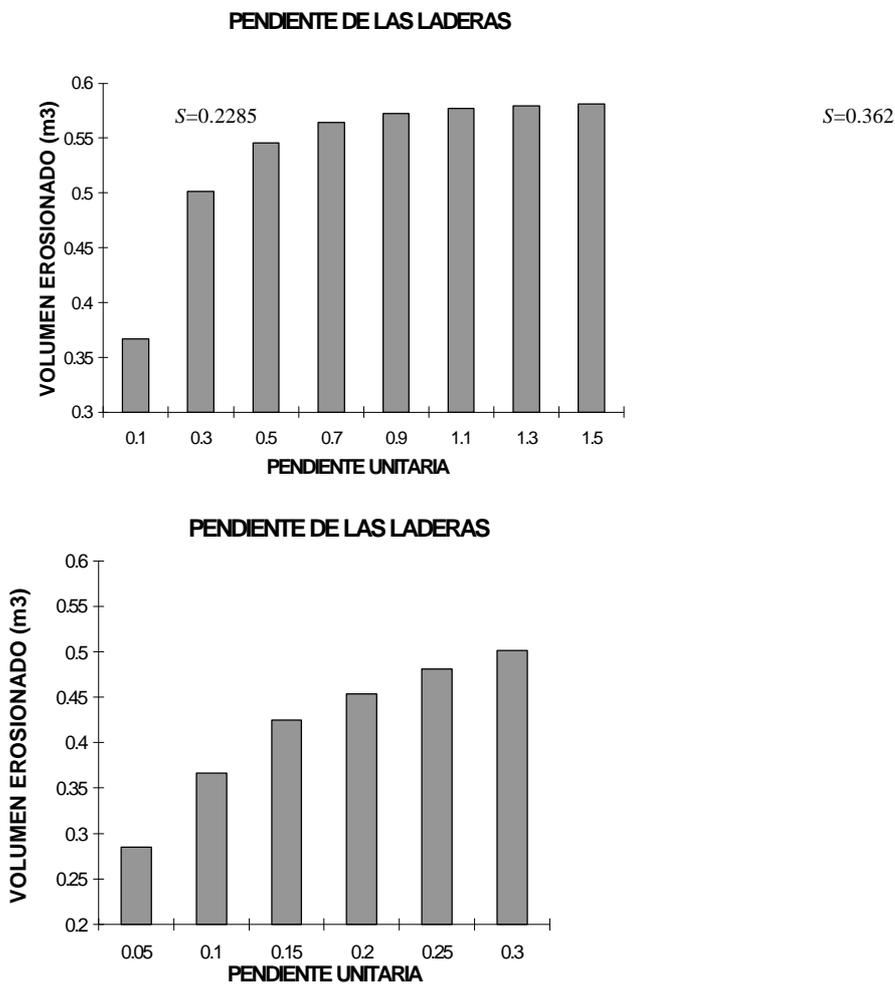


Figura 4.1.13.- Sensibilidad a la variación en la pendiente de las laderas.

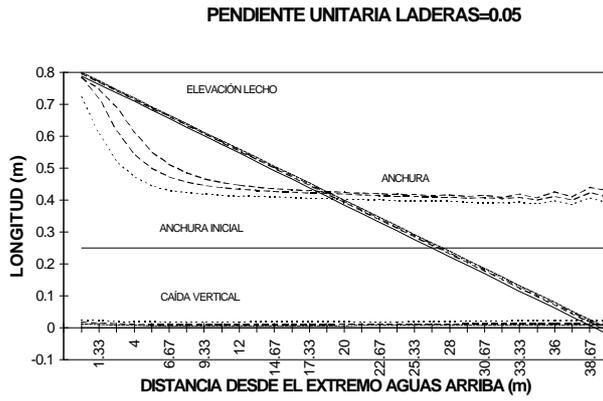
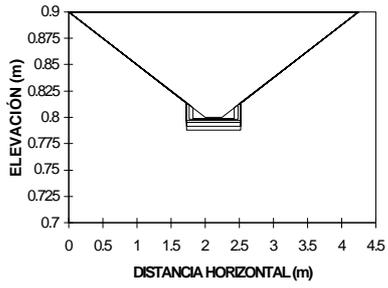
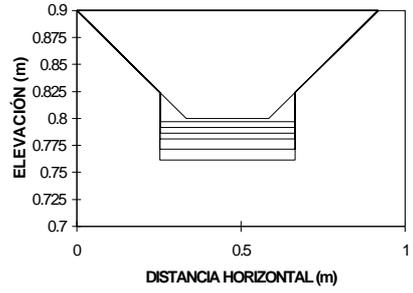


Figura 4.1.14.- Sensibilidad a la variación de la pendiente de las laderas. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

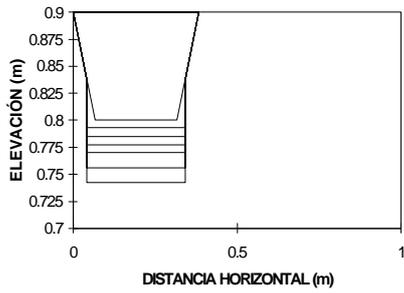
**PENDIENTE UNITARIA LADERA=0.05
CABECERA**



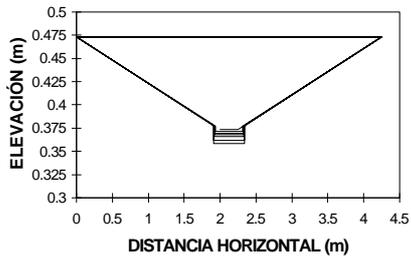
**PENDIENTE UNITARIA LADERA=0.3
CABECERA**



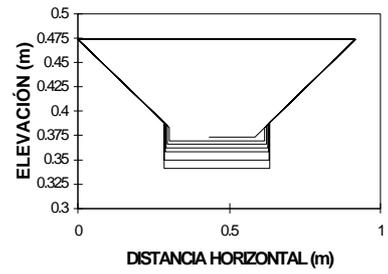
**PENDIENTE UNITARIA LADERA=1.5
CABECERA**



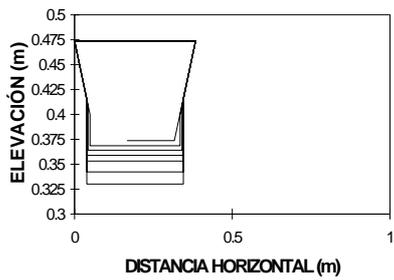
**PENDIENTE UNITARIA LADERA=0.05
SECCIÓN INTERMEDIA**



**PENDIENTE UNITARIA LADERA=0.3
SECCIÓN INTERMEDIA**



**PENDIENTE UNITARIA LADERA=1.5
SECCIÓN INTERMEDIA**



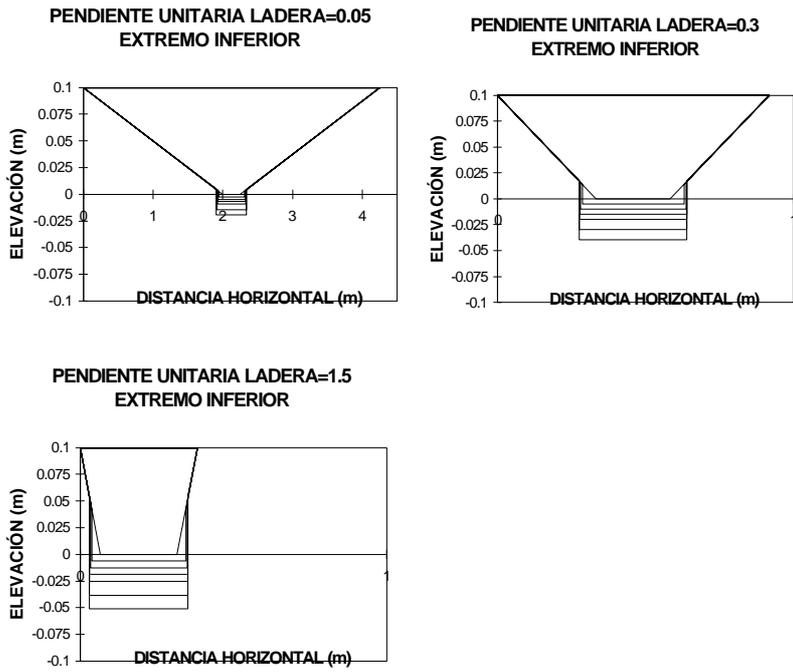


Figura 4.1.15.- Sensibilidad a la variación de la pendiente de las laderas. Secciones transversales en extremo superior, posición intermedia y extremo inferior.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE n DE MANNING

Las figuras 4.1.16 y 4.1.17 muestran el efecto tan drástico que tiene la variación del coeficiente de Manning sobre las pérdidas totales de suelo y la forma del cauce, siendo mayor el efecto de la variación con valores pequeños de n . Este importante efecto se explica porque, al aumentar n , aumenta el calado, disminuyendo la velocidad y por tanto la capacidad de transporte. El aumento del calado tiene también como consecuencia un aumento del esfuerzo cortante en el lecho, sin apenas transcendencia, ya que prevalece el efecto de la baja capacidad de transporte. Este estudio pone de relieve cómo la vegetación, y cualquier circunstancia que incremente la aspereza, produce un efecto de disminución importante de la capacidad de transporte de la corriente.

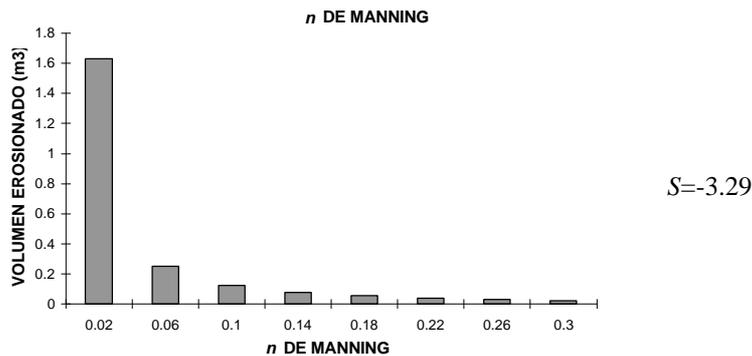
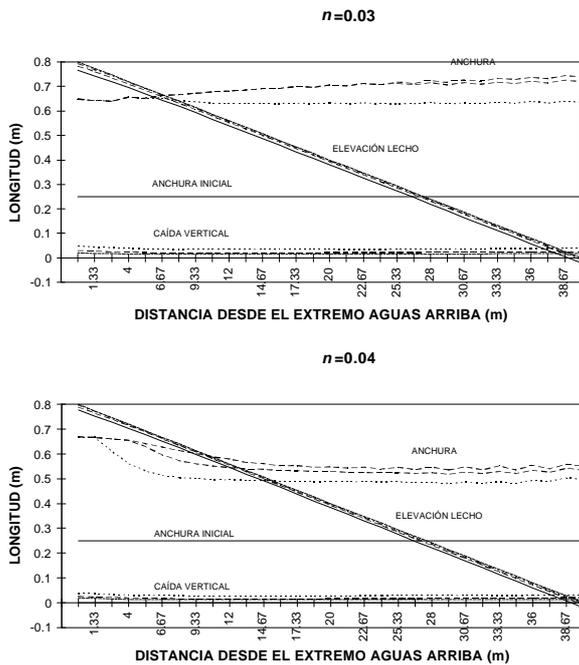


Figura 4.1.16.- Sensibilidad a la variación del coeficiente n de Manning.



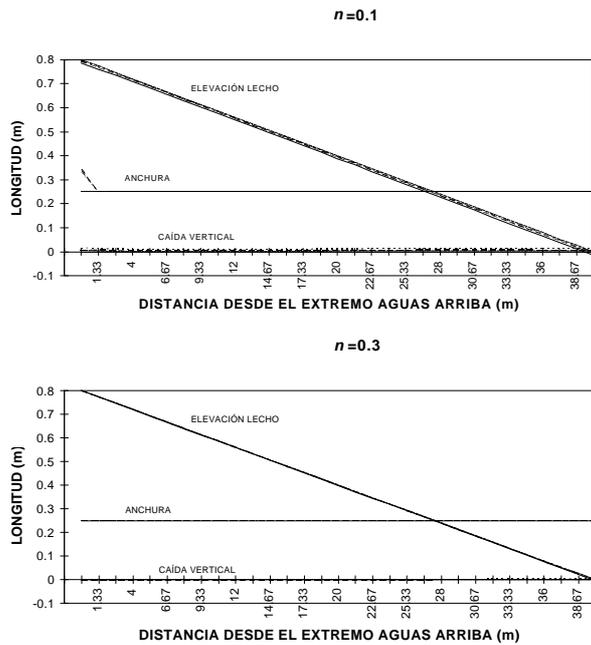


Figura 4.1.17.- Sensibilidad a la variación del coeficiente n de Manning. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN EN LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDAS POR REMOLINOS

El modelo se muestra prácticamente insensible a la variación de estos parámetros entre 0.1 y 1.0.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO APARENTE DEL SUELO γ

El discreto valor del coeficiente de sensibilidad (figura 4.1.18) indica que el volumen total erosionado es prácticamente insensible a la variación de este parámetro. Interviene únicamente en el cálculo de la erosión del lecho, de modo que en cierta manera condiciona la forma de la sección transversal: cuanto mayor es el valor de γ , menor es la erosión del lecho (ecuación 3.24). Este efecto puede verse en la figura 4.1.19, en la que se ilustra la evolución de los niveles del lecho y de la anchura para $\gamma=13000$ y $\gamma=16000$ N/m^3 , en el instante final. La variación del parámetro es de poca importancia también para la elevación del lecho. La explicación al leve crecimiento de la erosión al aumentar el peso específico aparente hay que buscarla en ligeros aumentos de la capacidad de transporte por modificaciones en la geometría de la sección.

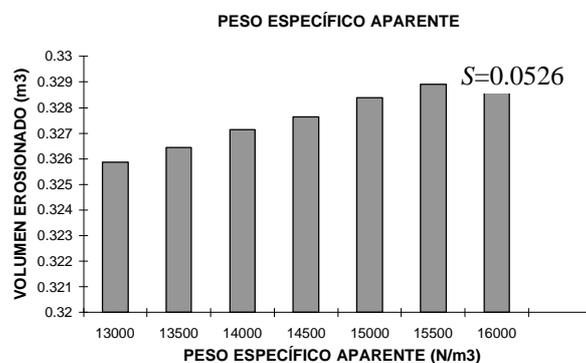


Figura 4.1.18.- Sensibilidad a la variación del peso específico aparente γ .

INFLUENCIA DEL PESO ESPECÍFICO APARENTE EN ANCHURA Y ELEVACIÓN DEL LECHO

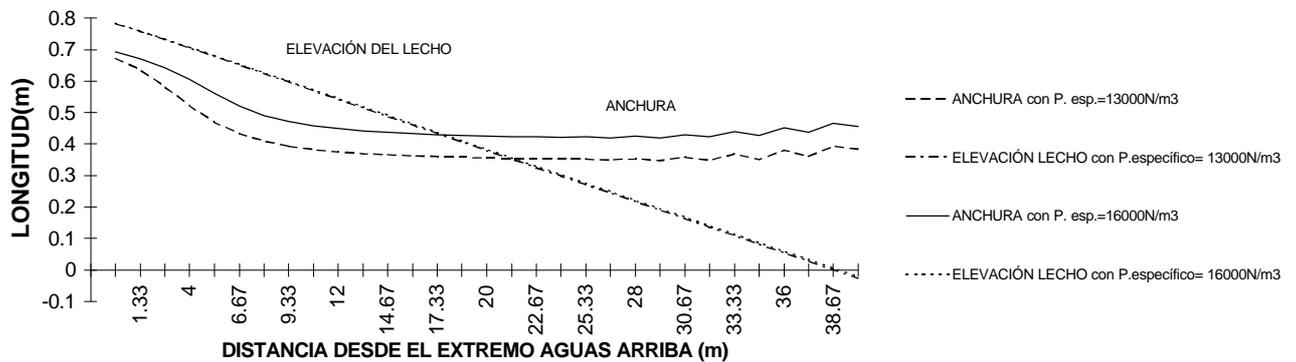


Figura 4.1.19.- Sensibilidad de anchura y elevación del lecho a la variación del peso específico aparente

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE LA POROSIDAD

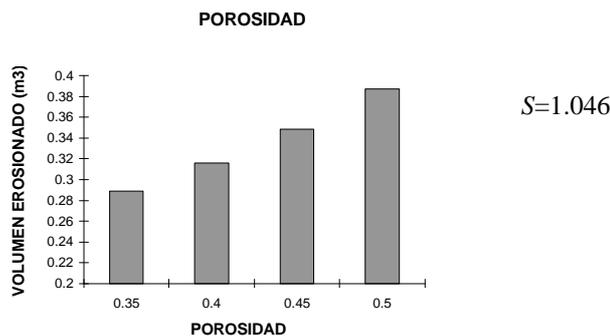


Figura 4.1.20.- Sensibilidad a la variación de la porosidad.

La porosidad interviene en la ecuación de continuidad del sedimento. Puede apreciarse (ver subrutina BELVDA, solución numérica de la ecuación) que a mayores valores de porosidad, la capacidad de transporte disponible aumenta. La capacidad de transporte disponible expresa el volumen de suelo por unidad de longitud que se erosiona en cada sección y en cada paso de tiempo. Hay que recalcar que la alta sensibilidad encontrada se refiere a volumen de suelo. Como se indicará en el párrafo siguiente, no hay que identificar esta respuesta con la de pérdidas de masa, al intervenir la porosidad.

INFLUENCIA DE LAS VARIACIONES EN PESO ESPECÍFICO APARENTE Y POROSIDAD CONJUNTAMENTE

Peso específico aparente y porosidad están directamente ligados, por lo que conviene reflexionar sobre el efecto de la variación simultánea de ambos parámetros. Un suelo más poroso posee un menor peso específico. De los análisis precedentes, queda claro que en un suelo con una porosidad mayor aumenta el volumen erosionado con respecto a otro suelo menos poroso, priorizándose la erosión en el lecho. Por el contrario, en suelos más densos y con menor porosidad, el volumen erosionado es menor, priorizándose la erosión en las paredes. Al ser la variación de la erosión total, como acabamos de comprobar, prácticamente insensible al peso específico, no sería necesario proceder a un análisis conjunto desde el punto de vista de la erosión en volumen: es suficiente con analizar la influencia de la porosidad, siendo conscientes de la transcendencia de variar el peso específico.

Sin embargo, no hay que olvidar que la variable dependiente que estamos considerando en este análisis es el volumen erosionado, al igual que en los análisis referentes a los anteriores parámetros. En los citados casos, para obtener la masa de suelo perdido, que es realmente el dato verdaderamente significativo, bastaría con multiplicar el volumen por la densidad aparente del suelo. En este caso es necesario analizar como variable dependiente el peso (o masa) de suelo perdido, variable que debe de mostrarse muy poco sensible a esta variación, dada la naturaleza del modelo: la capacidad de transporte, entendida como masa de sedimentos transportada por unidad de tiempo, verdadera controladora de la respuesta del modelo, no se ve influida directamente por estos parámetros.

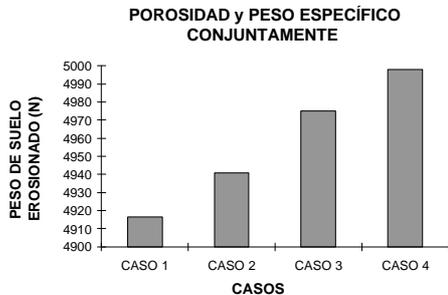


Figura 4.1.21.- Influencia de la variación de porosidad y peso específico conjuntamente.

En la figura 4.1.21 se aprecia la respuesta en peso de suelo erosionado frente a la variación conjunta de porosidad y peso específico aparente, quedando patente la muy poca transcendencia de estas variaciones. En la tabla 4.1.3 se indican los valores de peso específico y porosidad correspondientes a cada uno de los casos considerados, asumiendo una densidad relativa de las partículas minerales del suelo de 2.65.

CASOS	POROSIDAD	PESO ESP. APARENTE (N/m ³)
1	0.35	16897.7
2	0.4	15597.9
3	0.45	14298.1
4	0.5	12998.2

Tabla 4.1.3.- Valores de porosidad y peso específico aparente en cada uno de los casos considerados.

SENSIBILIDAD A LA CELERIDAD DE LAS PERTURBACIONES DEL LECHO c_b

La figura 4.1.22 nos ilustra la poca importancia que, cumpliéndose las condiciones de estabilidad, reviste la variación de este parámetro.

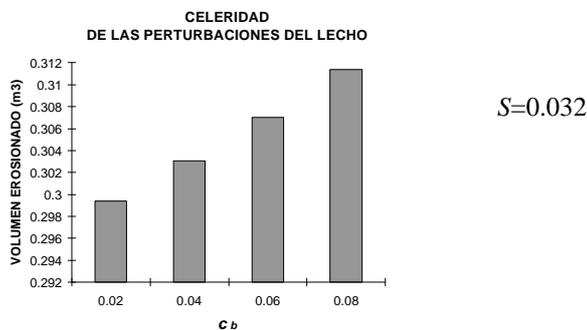


Figura 4.1.22.- Influencia de la variación de la celeridad de las perturbaciones del lecho c_b .

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA

Se observa cómo la sensibilidad es bastante alta, disminuyendo la erosión al aumentar la temperatura (figura 4.1.23). Ello ocurre fundamentalmente por la disminución de la viscosidad cinemática del agua al aumentar la temperatura, que a su vez influye de manera importante en la capacidad de transporte, dependiente de la viscosidad. En cualquier caso, la estimación aproximada de este parámetro no reviste dificultad.

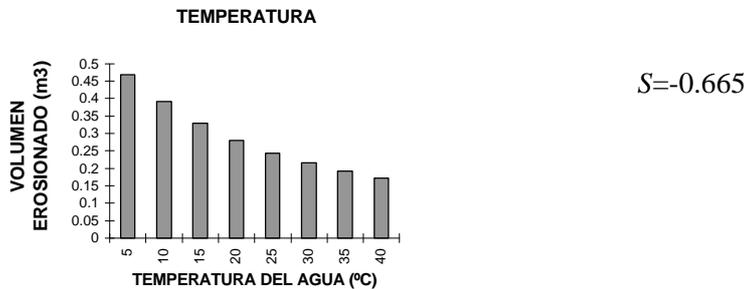


Figura 4.1.23.- Sensibilidad a la variación de la temperatura del agua.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE FORMA DE COREY (CSF) EN LA ECUACIÓN DE CAÍDA DE DIETRICH

La sensibilidad es importante (figura 4.1.24), aunque la trascendencia de este hecho no es mucha: según Dietrich (1982), en la mayoría de las situaciones, el valor de *CSF* se sitúa entre 0.5 y 0.8, valores entre los que la variación de la salida es muy limitada. En la práctica, el valor recomendado es de 0.7 (Dietrich, 1982).

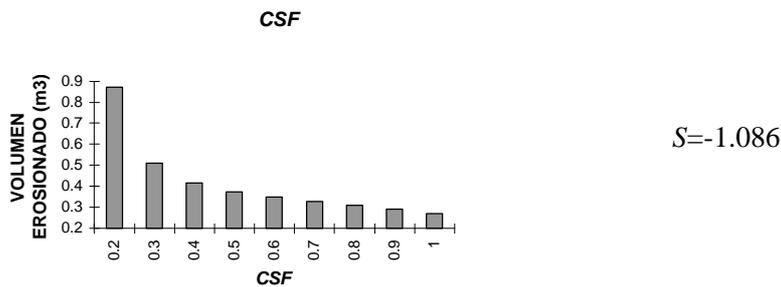


Figura 4.1.24.- Sensibilidad a la variación del coeficiente de forma de Corey (CFS).

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE REDONDEZ DE POWERS (P) EN LA ECUACIÓN DE CAÍDA DE DIETRICH

La sensibilidad a este parámetro es muy baja (figura 4.1.25), de modo que es suficiente considerar el valor recomendado para sedimentos naturales de $P=3.5$ (Dietrich, 1982).

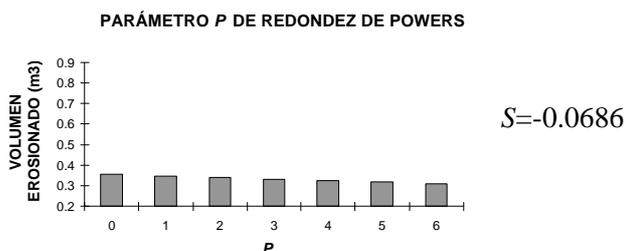


Figura 4.1.25.- Sensibilidad a la variación del parámetro P de forma de Powers.

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS d

La sensibilidad es muy grande, sobre todo con tamaños pequeños de partículas, como puede verse en la figura 4.1.26. Las figuras 4.1.27 y 4.1.28 nos permiten ver la importancia de este parámetro en la forma del cauce.

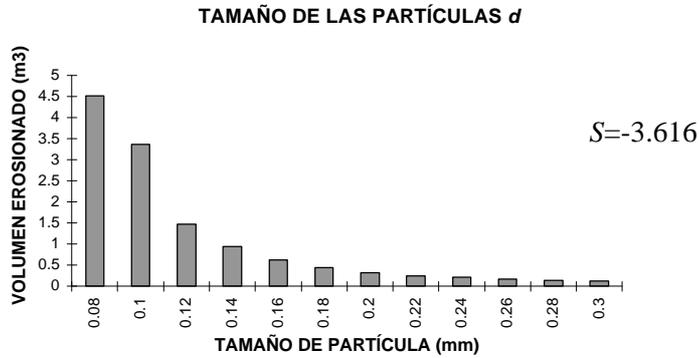


Figura 4.1.26.- Sensibilidad a la variación del tamaño de las partículas d .

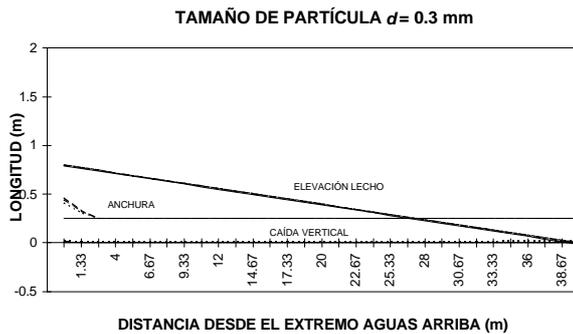
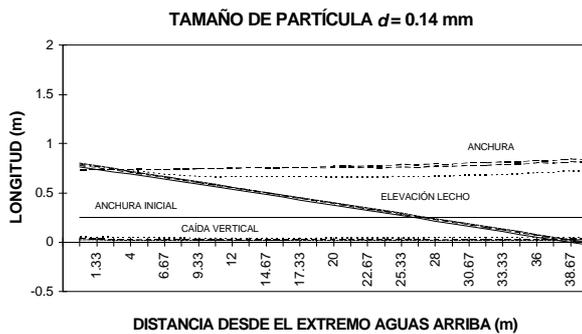
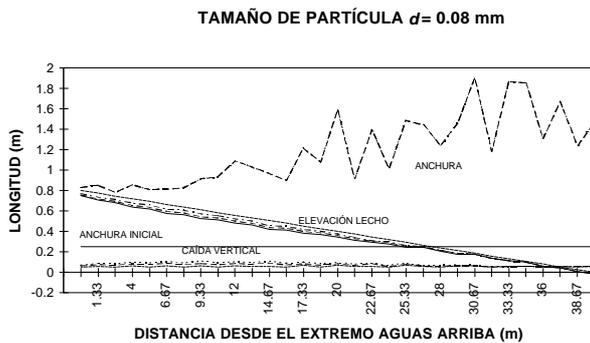
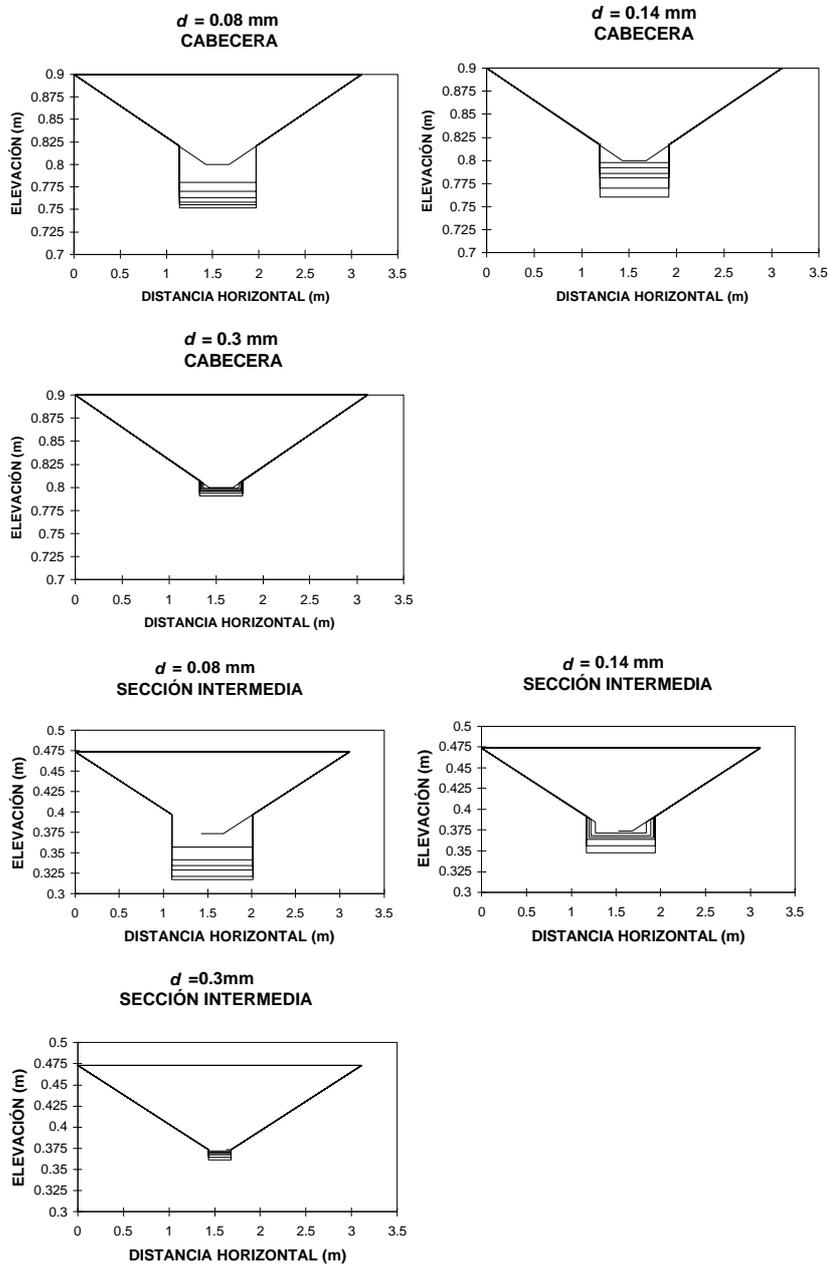


Figura 4.1.27.- Sensibilidad a la variación del tamaño de las partículas d . Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.



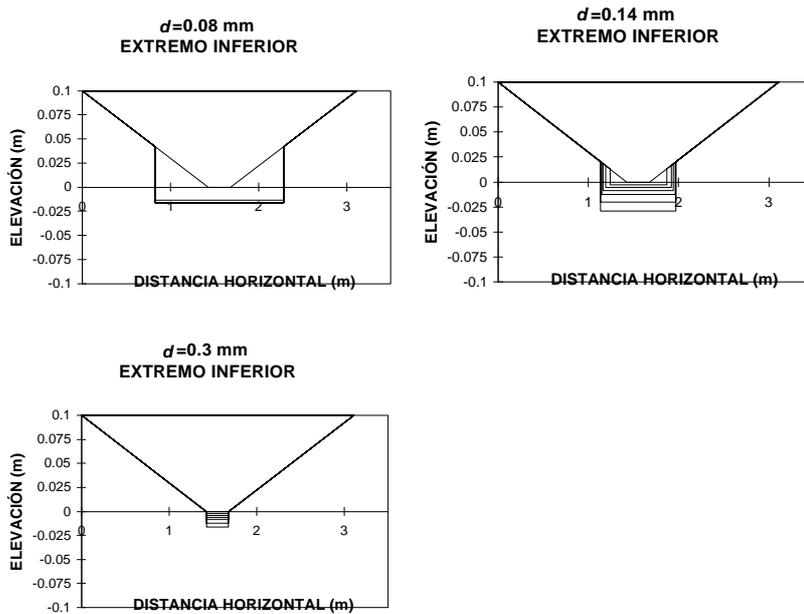


Figura 4.1.28.- Sensibilidad a la variación del tamaño de la partícula d . Secciones transversales en extremo superior, posición intermedia y extremo inferior.

Con el menor tamaño de partícula, se produce un rápido ensanchamiento, de modo que con posterioridad al mismo sólo se erosiona el lecho. El ensanchamiento es mayor aguas abajo, mientras que la erosión del lecho es mayor aguas arriba. La explicación puede ser sencilla. En los primeros instantes, al aumentar el caudal aguas abajo, aumenta la capacidad de transporte disponible, erosionándose todo el cauce fuertemente. Posteriormente, una vez establecida la anchura, llega aguas abajo agua muy cargada de sedimentos, con poca capacidad de transporte disponible, que apenas aumenta la degradación ya existente. La erosión que se produce ya sólo afecta al lecho, probablemente porque el calado es menor que T (figura 3.3, figura 3.5).

Con partículas de 0.14 mm, el ensanchamiento y profundización del cauce prosiguen en varios instantes, con excepción del extremo aguas arriba, donde el ensanchamiento es muy rápido. Con partículas de 0.3 mm, la erosión se produce fundamentalmente en el lecho. Este comportamiento da a entender que cuanto mayor es el tamaño de las partículas, más se favorece relativamente la erosión en el lecho. Ello se explica porque, cuanto mayor es el tamaño, menor es la capacidad de transporte disponible, y más fácilmente se cumple la condición de que el arranque del lecho por sí solo complete la capacidad de transporte disponible (ver figura 3.5).

SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS TRANSPORTADAS

La sensibilidad es incluso mayor que la estimada para el tamaño de las partículas (figura 4.1.29). Con el aumento de densidad ocurre algo similar a lo que comentábamos en el párrafo anterior a cerca del aumento del tamaño de las partículas (figuras 4.1.30 y 4.1.31): aumenta relativamente la erosión en el lecho.

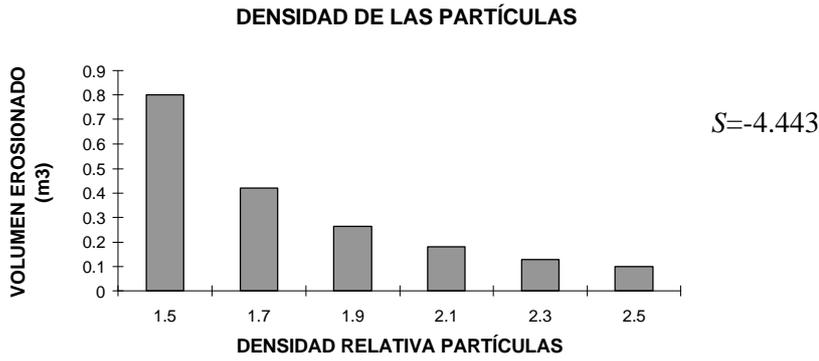


Figura 4.1.29.- Sensibilidad a la variación de la densidad de las partículas.

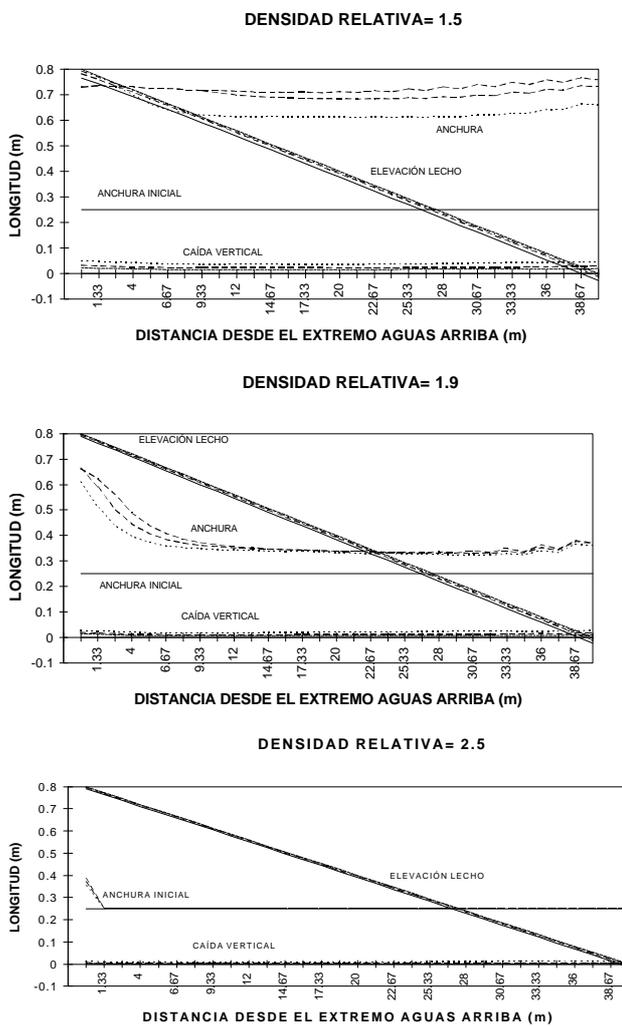
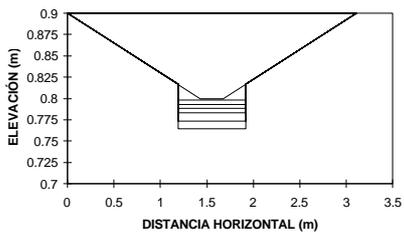
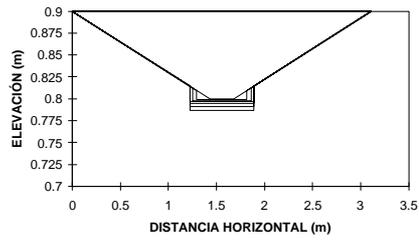


Figura 4.1.30.- Sensibilidad a la variación de la densidad de las partículas. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

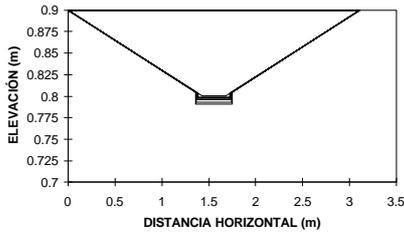
**DENSIDAD RELATIVA= 1.5
CABECERA**



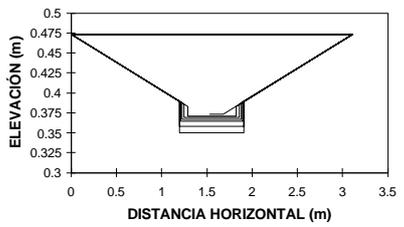
**DENSIDAD RELATIVA= 1.9
CABECERA**



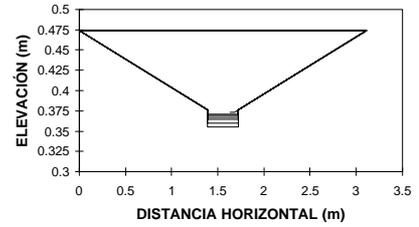
**DENSIDAD RELATIVA= 2.5
CABECERA**



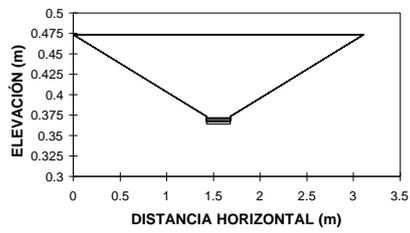
**DENSIDAD RELATIVA=1.5
SECCIÓN INTERMEDIA**



**DENSIDAD RELATIVA=1.9
SECCIÓN INTERMEDIA**



**DENSIDAD RELATIVA= 2.5
SECCIÓN INTERMEDIA**



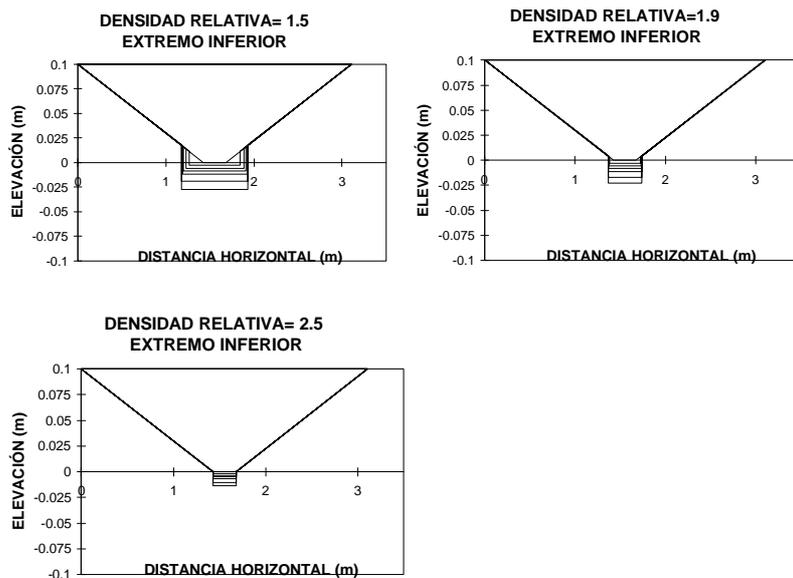


Figura 4.1.31.- Sensibilidad a la variación de la densidad de la partícula. Secciones transversales en extremo superior, posición intermedia y extremo inferior.

4.1.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS

A continuación se procede a resumir los aspectos más relevantes encontrados tras este análisis de sensibilidad.

Desde el punto de vista de la sensibilidad, podríamos distinguir dos tipos fundamentales de parámetros: los que afectan a la capacidad de transporte directamente y los que afectan directamente a la geometría de la sección (repartición de erosión entre paredes y lecho). Los parámetros del primer tipo son: pendiente longitudinal, coeficiente n de Manning, temperatura del agua, porosidad, coeficiente de forma de Corey (CFS) y tamaño y densidad de las partículas. De manera indirecta, estos parámetros también afectan, obviamente, a la forma de las secciones. Por ejemplo, partículas densas y gruesas, parecen favorecer relativamente la erosión del lecho. Los parámetros que afectan directamente a la forma de la sección son: esfuerzo cortante crítico τ_c , coeficiente K en la ecuación para estimar la erosión en el lecho, coeficiente C_τ para estimar el esfuerzo cortante en el lecho, y peso específico aparente del suelo γ_s . Estos parámetros también afectan indirectamente a la capacidad de transporte, debido a cambios en la forma del cauce. Además, podría definirse un tercer tipo de parámetros: los que afectan directamente tanto a la capacidad de transporte como a la geometría de la sección, y son la anchura del lecho y la pendiente de las laderas.

La tabla 4.1.4 nos muestra a modo de resumen las sensibilidades encontradas para los diversos parámetros. En cuanto a los parámetros τ_c , K , porosidad y γ_s , al realizarse un análisis conjunto de τ_c y K por un lado, y de porosidad y γ_s , no se ha calculado el coeficiente S . Conviene destacar que se ha encontrado frecuentemente una respuesta claramente no lineal de las pérdidas en función de ciertos parámetros, por lo que el coeficiente de sensibilidad representa sólo aproximadamente la respuesta del modelo.

PARÁMETRO	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD (S)
Pendiente longitudinal SL	1.198
Coficiente para el esfuerzo cortante C_τ	-0.0584
Anchura inicial del lecho	-0.232
Pendiente de las laderas	0.362
Celeridad perturbaciones del lecho c_b	0.032
n de Manning	-3.290

Temperatura del agua	-0.665
Factor de forma de Corey (<i>CFS</i>)	-1.086
Factor de redondez de Powers (<i>P</i>)	-0.068
Tamaño de las partículas (<i>d</i>)	-3.616
Densidad de las partículas	-4.443

Tabla 4.1.4.- Coeficientes de sensibilidad obtenidos para los principales parámetros.

Las mayores sensibilidades del modelo, considerando como variable dependiente el volumen de suelo erosionado, se han encontrado para los parámetros del primer grupo. El modelo se muestra muy poco sensible a los del segundo grupo atendiendo a la citada variable dependiente, pero si la variable dependiente es la anchura o la profundidad del cauce, las sensibilidades son muy elevadas. La explicación de que variaciones importantes en la forma del cauce no tengan apenas transcendencia en las pérdidas totales, viene del hecho de que la capacidad de transporte, auténtico factor controlador de la respuesta del modelo, no varía de manera importante con modificaciones relativamente bruscas de la geometría del cauce. Esto viene corroborado por la sensibilidad, relativamente baja, a variaciones en anchura y pendiente de las laderas. Por tanto, los parámetros del segundo grupo, aunque son poco importantes a la hora de explicar las variaciones en erosión total, pueden ser muy importantes para explicar la forma de la sección.

Las sensibilidades encontradas para el tercer tipo de parámetros en cuanto a pérdidas de suelo totales son muy inferiores a las encontradas para el primer tipo, pero probablemente superiores a las del segundo, lo cuál es lógico, ya que influyen directamente tanto en la capacidad de transporte como en la geometría. Estos parámetros también tienen gran transcendencia a la hora de determinar la anchura y profundidad del cauce.

Queda claro cómo los parámetros a los que el modelo es más sensible son densidad de partícula, tamaño de las mismas, coeficiente de Manning y pendiente longitudinal del lecho. La estimación de algunos de estos parámetros tan importantes presenta grandes dificultades, como es el caso del tamaño y densidad de las partículas (Young, 1980; Alberts et al., 1980). Vista también la enorme sensibilidad a pequeñas variaciones del coeficiente de Manning para valores bajos de mismo, el problema es similar ya que, si bien el estimar *n* aproximadamente no presenta en general dificultades, sí las presenta una estimación precisa. Estos tres serían, por tanto, los parámetros que considera más adecuados a la hora de proceder a una calibración. Una vez calibrada con estos parámetros la pérdida total de suelo, puede procederse a calibrar el modelo para ajustar la forma de la sección con parámetros como τ , *K*, *CFT*, peso específico aparente o anchura inicial, parámetro este último de difícil definición, ya que como se ha comentado, estos parámetros apenas influyen en las pérdidas totales. Ni las pérdidas totales ni la forma de la sección resultan muy sensibles a variaciones en la anchura inicial del lecho y en la pendiente de las laderas, parámetros ambos difíciles de determinar con precisión, dentro de rangos habituales en el estudio de cárcavas efímeras. Por tanto, valores razonables de dichos parámetros pueden arrojar resultados suficientemente aproximados.

A la vista de estos resultados y a falta de una validación, la respuesta general del modelo puede considerarse como coherente. Queda de momento abierta la discusión de si un modelo que considera que la erosión está limitada por el transporte puede servir para casos generales, es decir, con suelos claramente cohesivos.

4.2. - OTROS ESTUDIOS SOBRE LA RESPUESTA DEL MODELO

Se analizan a continuación diversos aspectos del modelo que completan la información sobre el mismo. Podrían analizarse multitud de situaciones. Se ha optado por algunas con claro interés para el estudio de cárcavas.

4.2.1. - INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL TRAMO, L

Planteamos en primer lugar analizar la respuesta del modelo, partiendo de la misma situación de referencia utilizada en el análisis de sensibilidad estricto del apartado 4.1, a modificaciones de la longitud del tramo. La modificación se realiza incrementando DX , fijado en 30 el número de subtramos (JR). El incremento de tiempo DT y el número de pasos de tiempo NT se establecen convenientemente, de acuerdo con los criterios de estabilidad y convergencia discutidos con anterioridad. En la tabla 4.2.1 pueden verse los casos considerados, los números de pasos de tiempo, la duración en cada caso del paso de tiempo, y los pasos de tiempo en los que se imprimen datos en las figuras 4.2.2 y 4.2.3. En la figura 4.2.1 se aprecia la relación lineal entre las dos variables. El aumento de caudal debido al aporte lateral explica este hecho. Sin ese aporte, es lógico pensar que, a partir de una cierta distancia, la capacidad de transporte disponible se hace nula y no se produce erosión.

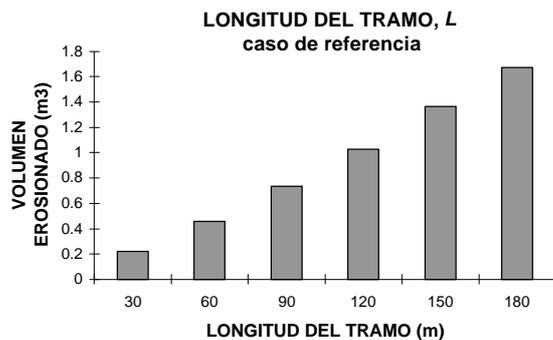


Figura 4.2.1.- Influencia de la longitud del tramo en el volumen de suelo erosionado, caso de referencia.

LONGITUD DEL TRAMO (L) (m)	Nº PASOS DE TIEMPO (NT)	DURACIÓN DEL PASO DE TIEMPO DT (min)	PASOS DE TIEMPO DE IMPRESIÓN
15	320	0.0625	50, 100, 150, 200, 250, 320
30	160	0.125	30, 60, 90, 120, 150, 160
90	50	0.4	5, 10, 20, 30, 40, 50
180	30	0.6667	5, 10, 15, 20, 25, 30

Tabla 4.2.1.- Longitudes de los tramos estudiados, número y duración de pasos de tiempo, y pasos de tiempo de impresión (figuras 4.2.2 y 4.3.3), en las simulaciones realizadas.

Las figuras 4.2.2 y 4.2.3 muestran, de la misma manera a como se realizaba en el anterior apartado 4.1, la variación de caída vertical, elevación y anchura del lecho, así como las secciones transversales del extremo aguas arriba, sección intermedia y extremo aguas abajo. Las secciones transversales se representan en seis instantes, además del inicial. En la tabla 4.2.1 se indican, para cada caso, los pasos de tiempo de impresión. Como puede comprobarse, la duración total de cada simulación es de 20 minutos. En las figuras en las que se representan anchura del lecho, caída, y elevación del lecho, cada variable se representa en tres instantes distintos además del instante inicial, que corresponden en cada caso a la segunda, cuarta y sexta cifra indicada en la columna de la derecha de la tabla 4.2.1.

No hay grandes diferencias entre los tamaños y formas de las secciones de tramos largos o cortos, con excepción de la sección de cabecera. ¿Cómo explicar que la anchura en el extremo aguas arriba sea mayor cuando se estudian tramos cortos? Lo lógico es que el flujo aguas arriba fuese muy parecido en todos los casos. Lo que ocurre es que el cálculo del flujo gradualmente variado comienza con valores muy diferentes en cada caso, y además los números de pasos de tiempo NT , la longitud de los subtramos DX , etc., son diferentes, con lo que es lógico pensar que el comportamiento del modelo pueda no ser idéntico. Además, dada la muy baja pendiente de las laderas, pequeñas diferencias en capacidad de transporte calculadas se traducen en variaciones importantes de anchura, por lo que este comportamiento no es tan extraño. Sí se aprecia que, cuanto más lejos nos situamos del extremo aguas arriba, dentro de cada caso, y entre casos, más estrecha se hace la sección. Esto se explica porque, cuanto más aguas abajo nos encontremos, si el caudal no aumenta lo suficiente, y parece no ser el caso, menor va siendo la capacidad de transporte disponible. De este modo es fácil que se cumpla la condición de que toda la capacidad de transporte disponible se complete con material del lecho, según calcula el programa. En este caso, el programa procede asignando erosión únicamente en el lecho (figura 3.5).

Cuanto más largo es el tramo analizado, la anchura del cauce se hace ligeramente menor, no sólo en cabecera, sino en la totalidad del tramo. La explicación debe de venir también por el hecho aludido de que las condiciones de cálculo de las variables hidráulicas no son idénticas. De cualquier manera, excepto en el extremo aguas arriba, las diferencias son, muy pequeñas.

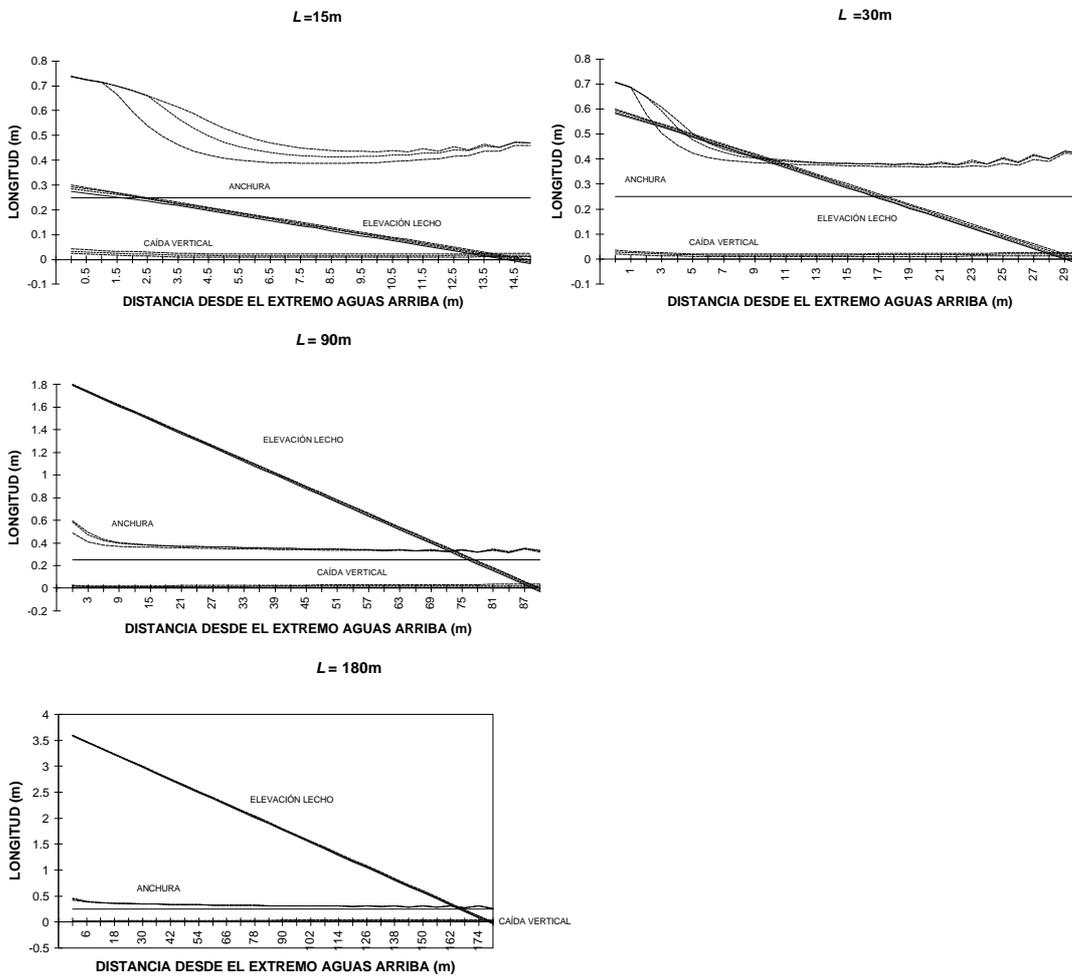
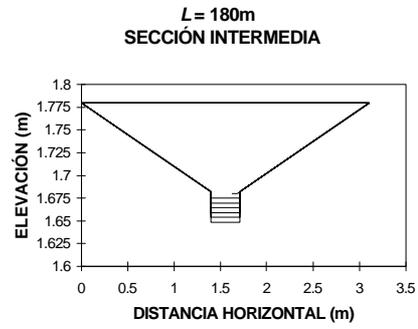
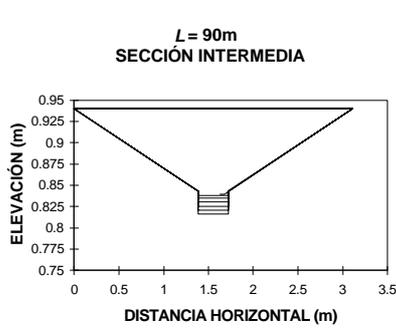
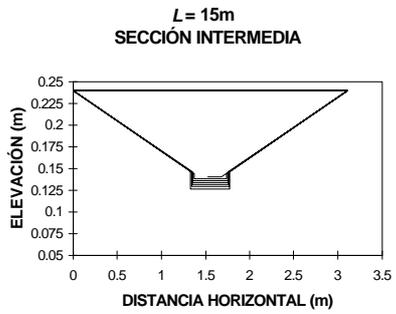
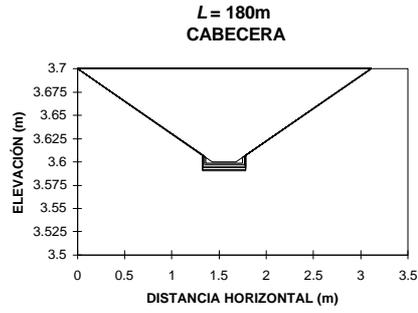
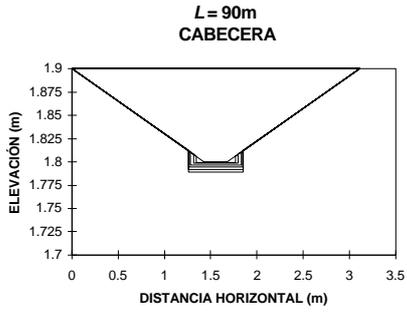
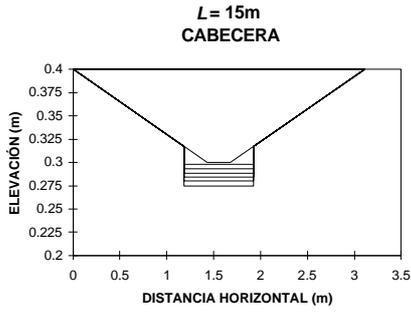


Figura 4.2.2.- Influencia de la longitud del tramo. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.



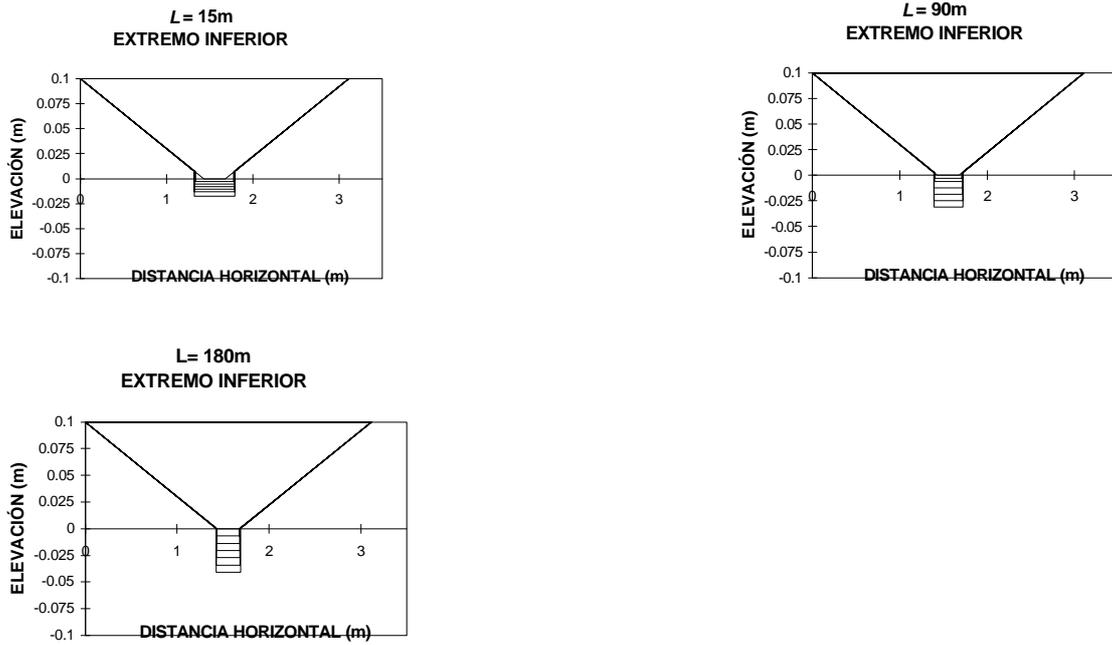


Figura 4.2.3.- Influencia de la longitud del tramo. Secciones transversales en extremo superior, posición intermedia y extremo inferior.

4.2.2. - INFLUENCIA DE NO CONSIDERAR APORTE LATERAL Y EN ESTE CASO, DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL AGUAS ARRIBA

En ciertos casos de estudio de cárcavas, es necesario centrarse en tramos cortos, en pequeños fragmentos de una cuenca, en los que carece de sentido considerar aporte lateral. Interesa además, en esas condiciones, conocer la trascendencia de posibles variaciones del caudal aportado por el extremo aguas arriba. Partimos de la situación de referencia del apartado 4.1, obviamente, sin aporte lateral, y utilizando caudales en cabecera mayores.

La figura 4.2.4 nos muestra la relación entre el caudal aportado y las pérdidas, apreciándose una estrecha relación lineal. Aunque el caudal no es un parámetro, es de interés el dato del coeficiente de sensibilidad, calculado de la misma manera que en el subapartado anterior 4.1. Su valor, $S=1.236$, es elevado, pero menor que el encontrado para bastantes parámetros.

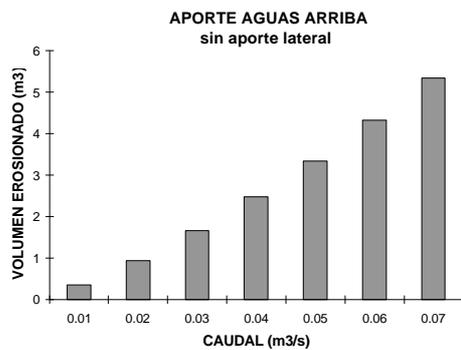


Figura 4.2.4.- Influencia de la variación en el aporte aguas arriba sin considerar aporte lateral.

Las figura 4.2.5 ilustra la caída y la elevación y anchura del lecho, como en figuras similares anteriores. Estas figuras, junto con los propios datos de pérdidas de suelo, ayudan grandemente a comprender el efecto del aporte lateral de agua. La claridad de los resultados expuestos en estas gráficas hacen innecesaria la representación de secciones transversales. Los instantes de impresión en estas figuras son los mismos que los considerados para el análisis de sensibilidad a las variaciones de los parámetros del apartado 4.1, es decir: instante inicial, y pasos de tiempo 20, 40, y 80.

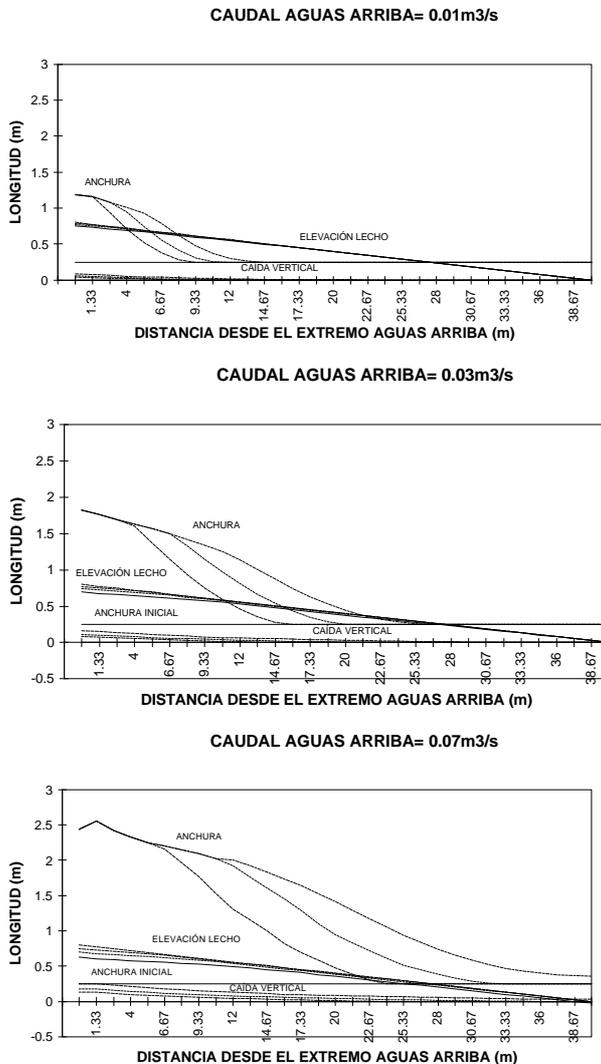


Figura 4.2.5.- Influencia de la variación del caudal aguas arriba, sin aporte lateral. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

Obviamente, la no consideración de caudal lateral se traduce en una drástica disminución de la erosión. Así por ejemplo (no reflejado en las figuras anteriores), para el caudal aguas arriba del caso de referencia (2 l/s), pasamos de los aproximadamente 0.32 m³ considerando aporte lateral, a 0.03 m³. Además, los cambios en la forma del cauce son muy grandes. Al irrumpir bruscamente un caudal importante en el cauce (10, 30, 70 l/s), se produce una muy brusca degradación aguas arriba, consistente tanto en un gran ensanchamiento como en un importante descenso del lecho, degradación tanto mayor cuanto mayor sea el caudal. Al no haber un aumento de la capacidad de transporte por no aumentar el caudal, la degradación va disminuyendo hacia aguas abajo, hasta que se alcanza una posición en la que no tiene lugar ya erosión alguna. A este respecto, es una excepción el caso del caudal de 70 l/s, que produce una degradación grande que se transmite hasta el mismo extremo inferior.

Un estudio adicional para ilustrar la trascendencia de la variación de la longitud del tramo sin aporte lateral, se hace innecesario: habrá también una posición a partir de la cuál prácticamente no habrá erosión.

4.2.3. - INFLUENCIA DE INCREMENTOS DE CAUDALES CONSIDERANDO APORTE LATERAL

Se estudia a continuación la trascendencia de variar el aporte global de agua, tanto lateral como por el extremo aguas arriba, lo que podría relacionarse con la ocurrencia de lluvias de diferentes intensidades. Se trata del mismo caso (de referencia) utilizado en el apartado 4.1.

En la tabla 4.2.2 se especifican los caudales considerados. El criterio de incremento, consistente en la multiplicación de los valores aguas arriba y aguas abajo por un factor de 1 a 5, es arbitrario, pero se estima que es adecuado dado el objeto del análisis.

CASOS	Q aguas arriba (m^3/s)	Q aguas abajo (m^3/s)	Q lateral ($m^3/s/m$)
CASO 1	0.002	0.009	0.000175
CASO 2	0.004	0.0018	0.00035
CASO 3	0.006	0.027	0.000525
CASO 4	0.008	0.036	0.0007
CASO 5	0.01	0.045	0.000875

Tabla 4.2.2.- Caudales considerados.

En la figura 4.2.6 se observa cómo, lógicamente, el aumento de la erosión con el caudal es muy importante.

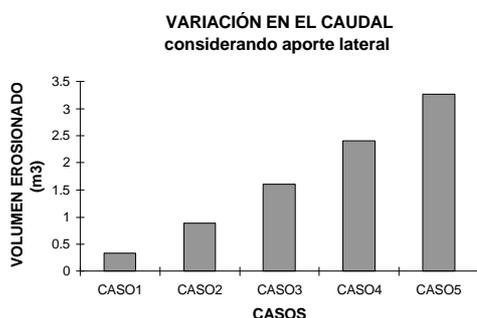


Figura 4.2.6.- Influencia de la variación en el caudal considerando aporte lateral.

La modificación de la forma del cauce puede apreciarse en la figura 4.2.7. Los pasos de tiempo de impresión son los habituales: 20, 40, 60 y 80. Al incrementarse los caudales, aumenta tanto la erosión lateral como la del lecho. Pero lo que más llama la atención es la variación de la anchura. A caudales más bajos, a partir de $X \approx 10$ m, permanece casi invariable con la posición y con el tiempo. Sin embargo, con los valores mayores, la corriente posee capacidad de transporte suficiente como para seguir ensanchando el cauce durante todo el periodo de ejecución.

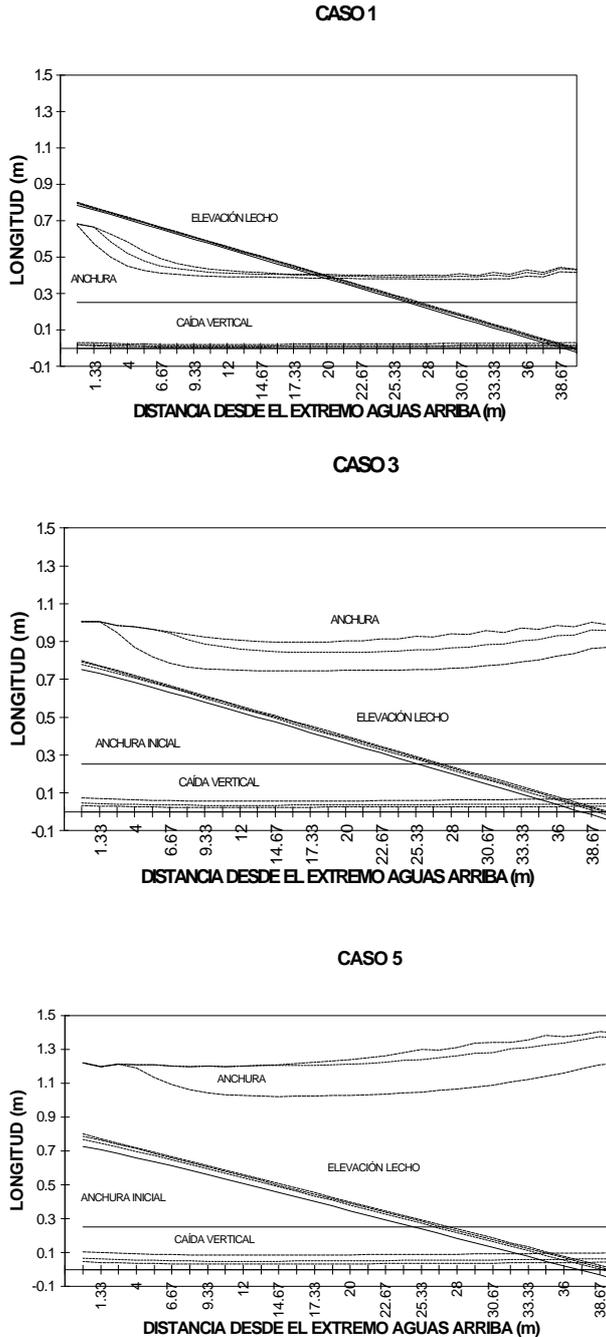


Figura 4.2.7.- Influencia de la variación de los caudales, considerando aporte lateral. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

4.2.4. - INFLUENCIA DE CONSIDERAR O NO UN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO EQUILIBRADO

Ha quedado expresado en diferentes discusiones anteriores el hecho de que el modelo tiende a estimar degradaciones muy importantes del cauce, en principio exageradas en los extremos superiores, sobre todo en la anchura. Ello tiene transcendencia en los procesos que ocurren aguas abajo pues, desde el primer subtramo, contamos con un flujo fuertemente cargado de sedimentos. La causa más probable de esto es una sobreestimación de la capacidad de transporte del flujo mediante el uso directo de las ecuaciones de capacidad de transporte que, como se vio en el apartado 3.1, están desarrolladas para el estudio de

transporte de sedimentos en condiciones de equilibrio. Diversos investigadores han afrontado el estudio de las correcciones necesarias a introducir en las ecuaciones de capacidad de transporte, para su uso en casos donde las condiciones no son las propias de un transporte equilibrado.

En este trabajo utilizaremos el método propuesto por Bell y Sutherland (1983). Como se recordará (apartado 3.1), está desarrollado para condiciones de no equilibrio causadas por la irrupción, sobre un lecho erosionable, de un caudal constante de agua clara. Aunque no es ése el caso más común en cárcavas efímeras, no existen prácticamente métodos alternativos. Dado que la geometría medida en cárcavas (ver capítulo 2 y anejo I) no se corresponde con la tendencia mostrada por el modelo, que en general indica una súbita y gran erosión aguas arriba, es de gran interés analizar la respuesta del modelo considerando el método propuesto por los citados autores. Con el fin de cubrir un abanico amplio de posibilidades se plantean tres casos de estudio que abarcan las circunstancias de mayor interés: el caso de referencia manejado a lo largo de este capítulo 4, pues permite una fácil comparación con los casos analizados hasta este punto; un caso de aporte tanto lateral como por el extremo aguas arriba pero con un caudal elevado; un caso de caudal también elevado pero aportado únicamente por el extremo aguas arriba. En todos los casos, se analiza la respuesta del modelo en función del parámetro α' de la ecuación 3.21.

CASO DE REFERENCIA

Se plantea un análisis de sensibilidad a la variación del parámetro α' , variándolo entre 0 y 1. La sensibilidad (figura 4.2.8), atendiendo al volumen de suelo erosionado, es bastante elevada, y es directamente comparable con los resultados del análisis de sensibilidad del apartado 4.1, realizado con el mismo caso de referencia.

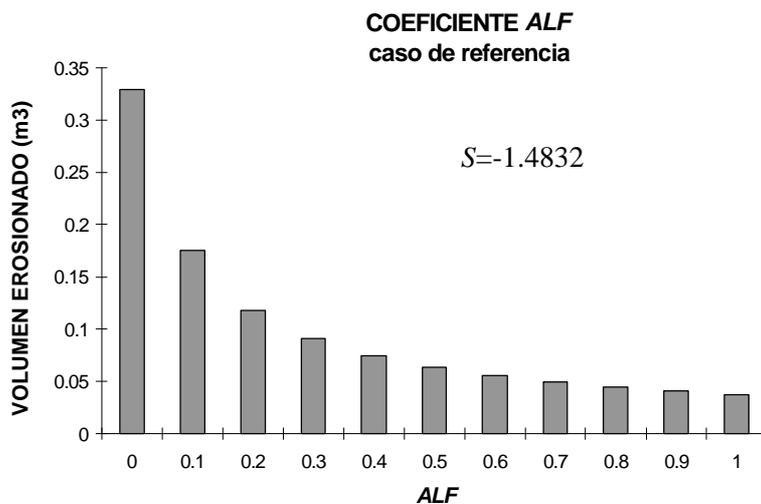
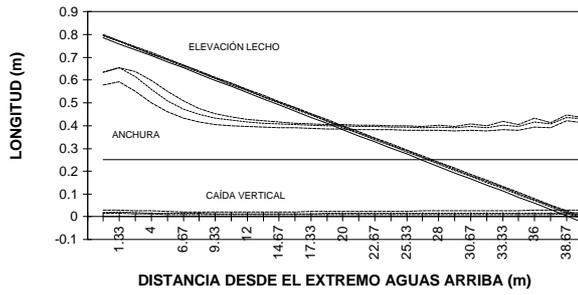


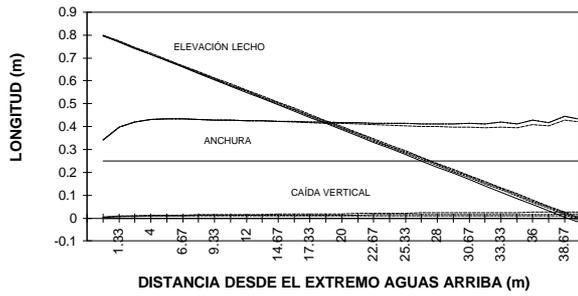
Figura 4.2.8.- Sensibilidad a la variación del parámetro α' , caso de referencia.

De la figura 4.2.9 podemos obtener diversas conclusiones.

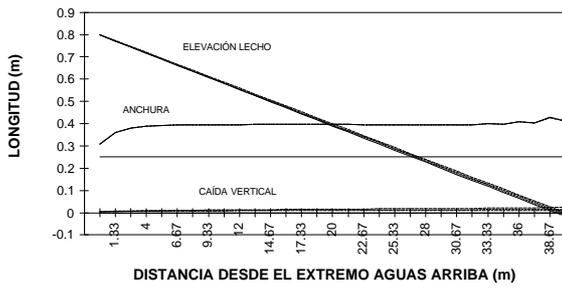
CASO DE REFERENCIA $ALF=0.0$



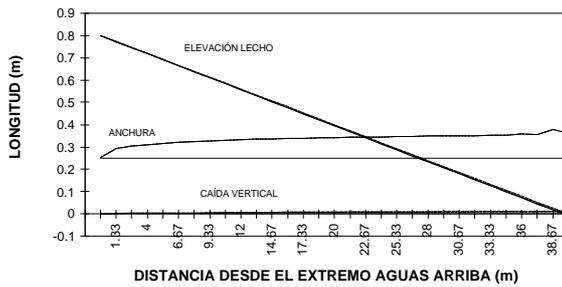
CASO DE REFERENCIA $ALF=0.05$



CASO DE REFERENCIA $ALF=0.1$



CASO DE REFERENCIA $ALF=0.4$



CASO DE REFERENCIA $ALF=1.0$

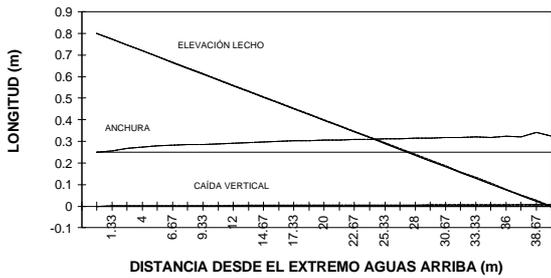


Figura 4.2.9.- Sensibilidad a la variación del parámetro α' , caso de referencia. Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

Con $\alpha'=0$, la respuesta es muy parecida al caso de no considerar un transporte de sedimentos no equilibrado. De hecho, si $\alpha'=0$, sólo se introduce una ligera modificación de la capacidad de transporte con la posición. En este caso, de acuerdo con la ecuación de Bell y Sutherland, la capacidad de transporte en el extremo aguas arriba es 0. Sin embargo, la anchura, y la erosión en general aguas arriba no es nula, ya que el programa calcula la capacidad de transporte en el extremo superior basándose también en la capacidad de transporte en zonas próximas. Pero, al introducir $\alpha'=0.05$ se produce ya un importante cambio: desde el primer instante, la anchura en el extremo superior se comporta de manera opuesta a cómo lo hacía: lejos de aumentar instantánea y bruscamente, aumenta de manera mucho más suave y gradual, adquiriéndose la anchura casi definitiva en los primeros instantes, muy similar para todas las posiciones.

Ello puede explicarse en parte por la disminución con el tiempo de la capacidad de transporte, de modo que la capacidad de transporte disponible queda satisfecha con materiales del lecho. Pero, sobre todo, porque, tras un importante ensanchamiento, el calado será probablemente menor que la caída vertical T (figura 3.3), condición que hace que en el programa sólo se contabilice erosión en el lecho (figura 3.5). La pérdida de suelo para $\alpha'=0.05$ es bastante parecida, aunque lógicamente inferior, a la del caso de referencia o a la del caso con $\alpha'=0$. Concretamente, el volumen erosionado es de 0.239 m^3 . Conforme aumentamos el valor de α' , más gradual es el ensanchamiento y menores valores alcanza, a la vez que disminuye drásticamente la magnitud de la erosión total. Al contrario del caso de referencia sin transporte no equilibrado, en el que la anchura tiende a crecer bruscamente en el extremo aguas arriba e ir aumentando o mantenerse después, con la introducción de un valor de $\alpha' > 0$ pero pequeño, se consigue mantener un valor similar de volumen erosionado, con una anchura y una erosión del lecho crecientes en sentido aguas abajo. Ello responde mucho más a la realidad observada en cárcavas efímeras.

CASO DE FLUJO CON CAUDAL ELEVADO, CON APOORTE TANTO LATERAL COMO POR EL EXTREMO AGUAS ARRIBA: CASO 3 DEL APARTADO 4.2.3

El comportamiento es muy similar al anteriormente descrito, por lo que no se incluyen mas figuras. La sensibilidad encontrada a la variación del parámetro también es elevada, concretamente $S=-1.591$. La erosión total, con $\alpha'=0.05$ se reduce a 1.133 m^3 .

CASO DE APOORTE DE CAUDAL ELEVADO POR EL EXTREMO AGUAS ARRIBA ÚNICAMENTE: CASO 7 DEL APARTADO 4.2.2 ($Q=0.07 \text{ m}^3/\text{s}$)

La figura 4.2.10 nos ilustra sobre la sensibilidad a la variación de α' . El coeficiente de sensibilidad en este caso es ligeramente superior al encontrado para los dos casos anteriores

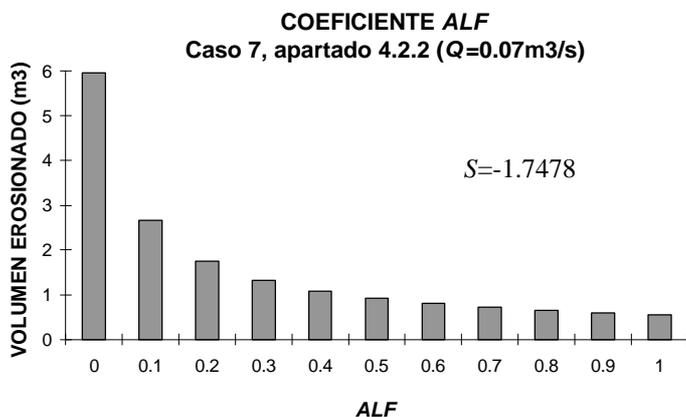
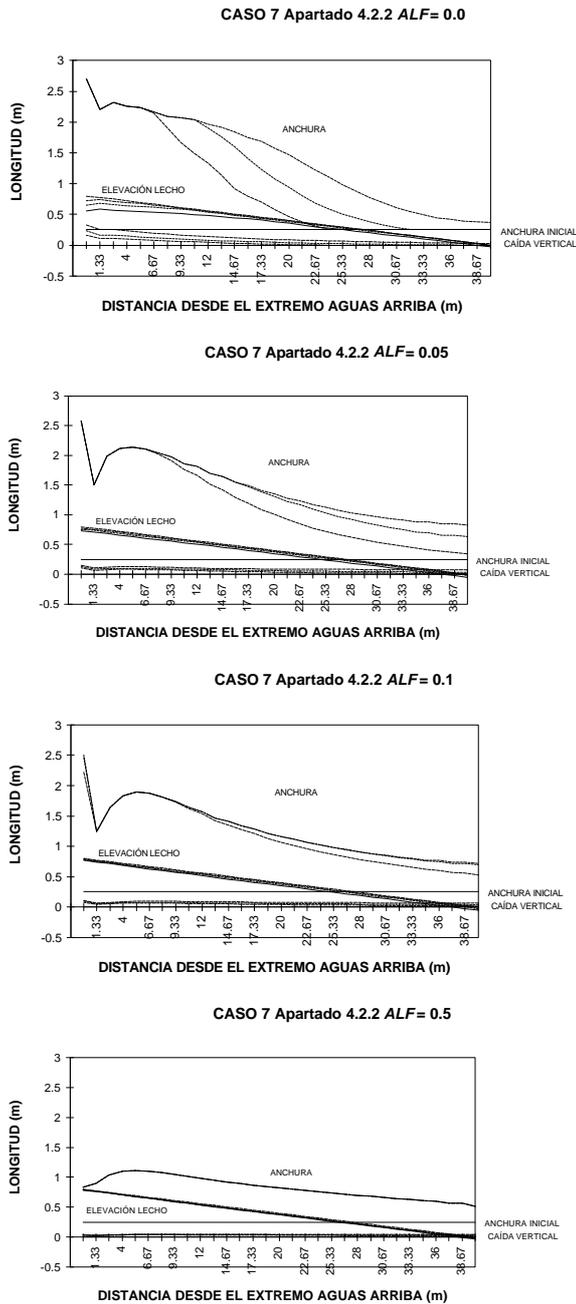


Figura 4.2.10.- Sensibilidad a la variación del parámetro α' , caso 7 del apartado 4.2.2 ($Q=0.07m^3/s$).

En la figura 4.2.11 se comprueba que, con la incorporación de la hipótesis de transporte no equilibrado, se produce una clara amortiguación de la erosión, ya perceptible con valores de $\alpha'=0.05$, de manera que se reduce algo el ensanchamiento aguas arriba, y se incrementa claramente aguas abajo con respecto al caso de referencia, haciendo más realista el comportamiento del modelo. La erosión total, con $\alpha' = 0.05$ se reduce a $3.836m^3$. Valores de α' de 0.1 y mayores se traducen además en una muy grande disminución de la magnitud de la erosión.



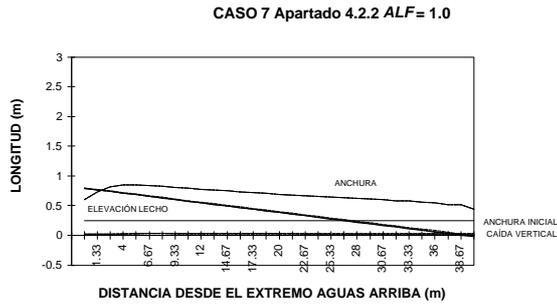


Figura 4.2.11.- Sensibilidad a la variación del parámetro σ , caso 7 del apartado 4.2.2 ($Q=0.07m^3/s$). Variación de anchura del lecho, caída vertical y elevación del lecho.

4.2.5. - INFLUENCIA DE LA DURACIÓN DEL EPISODIO

Es de interés comprobar si el modelo permite simular de manera adecuada los efectos de la duración de las lluvias, lo que ofrece atractivas posibilidades a la hora de analizar el fenómeno de la erosión por cárcavas. Así, por ejemplo, lluvias suaves de duración prolongada darían lugar a cárcavas estrechas y profundas, mientras que lluvias de gran intensidad originarían cárcavas anchas y poco profundas (Poesen y Govers, 1990).

Se han simulado duraciones de 25, 75, 125, 175 y 225 minutos para el caso de referencia, sin considerar transporte no equilibrado. Los gráficos que mejor ilustran los resultados son los de las secciones transversales. La figura 4.2.12 podría ser un ejemplo de respuesta lluvias continuadas. Se muestran las secciones correspondientes a los casos de 25, 125 y 225 minutos de simulación. Los instantes en los que se imprime la forma del cauce son 0 (instante inicial), 2.5, 5, 10, 15, 20 y 25 minutos para el primer caso; 0, 12.5, 25, 50, 75, 100 y 125 minutos para el segundo, y 0, 12.5, 25, 75, 125, 175 y 225 minutos para el tercero. Como resulta lógico, las mayores duraciones se traducen en mucho mayores pérdidas. Una vez alcanzada la anchura definitiva, la erosión prosigue únicamente en el lecho, originándose secciones con baja relación anchura-profundidad (RAP), como ocurre en cárcavas producidas por lluvias prolongadas de baja intensidad (Poesen y Govers, 1990). En el extremo aguas abajo, un incremento en la duración del episodio en 100 min (paso de 125 a 225 min) se traduce sólo en un muy ligero aumento de la erosión. Ello es debido a que la capacidad de transporte disponible en el extremo inferior es pequeña, al llegar el agua a dichas posiciones muy cargada de sedimentos.

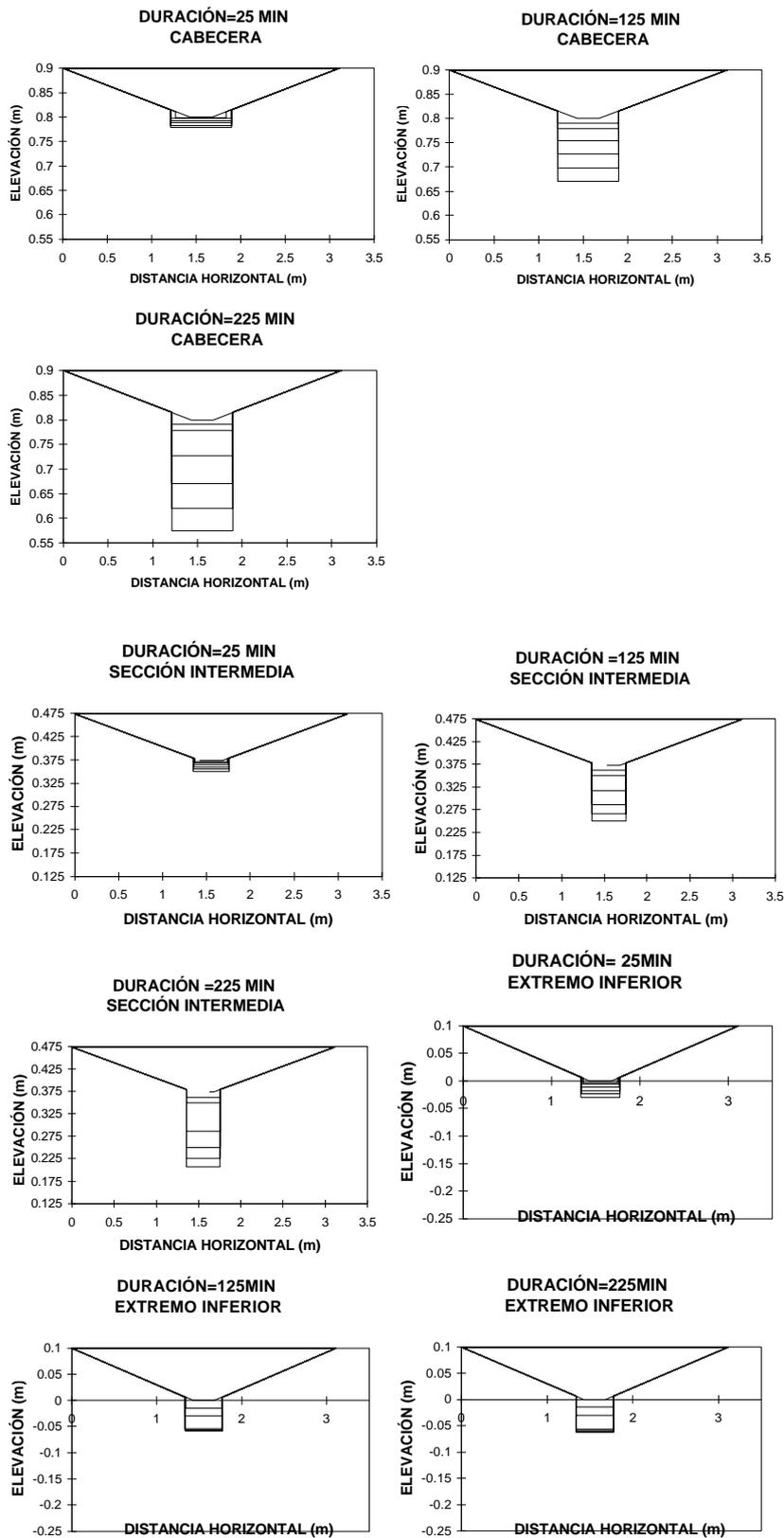


Figura 4.2.12.- Influencia de la duración del episodio. Secciones transversales en extremo superior, posición intermedia y extremo inferior.

Como resumen del subapartado 4.2 hay que destacar que el modelo responde de una manera coherente en todos los aspectos estudiados: longitud del tramo, presencia o ausencia de aportes laterales, variaciones en el caudal, duración de la simulación. La conclusión más interesante hace referencia a la utilización de un transporte de sedimentos no equilibrado. Su uso, con valores bajos de ρ' , proporciona una respuesta en cuanto a pérdidas de suelo similar a la de no utilización del citado método, con una cantidad de suelo erosionado algo inferior, pero con una morfología del cauce mucho más conforme con lo que cabe esperar en casos reales.

4.3. - VALIDACIÓN DEL MODELO

De acuerdo con el ya citado esquema de Nearing et al. (1994), validar sería, en sentido estricto, aplicar el modelo, comprobando su respuesta, a casos diferentes de los considerados para la fase de estimación de parámetros (calibración). Dada la escasez de datos, sobre todo de caudales, no ha podido realizarse una estimación de parámetros mediante calibración, por lo que no es posible una validación en consonancia con la definición expuesta. Por lo tanto, en el presente trabajo, se va a realizar un desarrollo diferente. Entenderemos por validar el comprobar si el modelo arroja resultados coherentes, adecuados, o no. Esta comprobación la realizaremos fundamentalmente mediante la calibración del modelo para un caso real medido, aceptando algunas hipótesis, y examinando si, con valores razonables de los parámetros, la forma del cauce y las pérdidas estimadas se parecen a la realidad.

Se calibrará el modelo para la cárcava de la cuenca de Cobaza (figuras 2.12 y I.1.3), medida con detalle a finales de agosto de 1996. Dicha cárcava se originó y sufrió el efecto de diversas lluvias, pero, de acuerdo con las observaciones realizadas, cabe pensar que la mayor parte de las pérdidas, si no todas, se debieron a la intensa lluvia del 22-1-96 (figura 2.6). Es una cárcava de un tamaño muy considerable. Dado su gran tamaño y la claridad de las formas que presenta, es ideal para realizar la citada calibración. Además, es un ejemplo claro de cárcava efímera propiamente dicha, lo que permite estimar los caudales que circulan por ella de manera más adecuada, al provenir toda el agua de la cuenca que constituye la parcela. Las hipótesis que realizamos para proceder a la calibración son: primeramente, que la cárcava se debe a la lluvia del 22-1-96 únicamente, hipótesis similar a la considerada en el modelo EGEM (USDA-SCS, 1992), en el que las pérdidas de un año se atribuyen a la lluvia más importante; en segundo lugar, que podemos estimar los caudales adecuadamente mediante un modelo de simulación. Se presentan incertidumbres, por lo que los resultados de apartado hay que tomarlos con precaución. Para realizar otros estudios similares pueden también utilizarse otros datos, no exentos de limitaciones, como son:

a) Medición detallada de la cárcava formada en La Matea II, realizada inmediatamente después de su formación el día 5-12-96. La humedad del suelo al comienzo de la precipitación y la propia precipitación son conocidas, así como la topografía detallada de la cuenca (figuras 2.6, 2.13 y 2.34). Sin embargo, la cárcava formada es muy pequeña (figura 2.36, tabla 2.10) y resulta poco adecuado calibrar con valores que cubren márgenes tan estrechos.

b) Circunstancia idéntica en la cárcava de La Abejera 0, de la que hay datos además de la forma del fondo de la cuenca en la que apareció la cárcava (figuras 2.9, 2.34, 2.35 y 2.37). La cárcava es algo mayor, y con una forma más marcada, pero el tamaño tampoco es suficiente.

A pesar de la limitada calidad de los datos disponibles de La Matea II y la Abejera 0, también se intentará una calibración con ellos, dada la ausencia de datos alternativos. En resumen, el proceso completo a seguir constará de los siguientes pasos:

1) Aplicación del modelo a la cuenca de Cobaza con la lluvia del 22-1-96. Calibración, primeramente del volumen total erosionado, y después también de la forma, tanto considerando transporte de sedimentos no equilibrado como no haciéndolo. Crítica de la similitud modelo-realidad con los valores de los parámetros obtenidos. Aplicación del modelo, con los mismos valores de los parámetros, a otra lluvia. Crítica de los resultados.

2) Aplicación del modelo a la cuenca de La Matea II con la lluvia del 5-12-96. Calibración volumétrica y también de forma si es posible, partiendo de la misma situación de referencia utilizada en el estudio con Cobaza. Crítica de la similitud modelo-realidad y de los valores de los parámetros obtenidos. Se descarta partir de los valores de los parámetros obtenidos en la calibración con Cobaza, sobre todo, porque se trata de una cárcava mucho más pequeña, de manera que se puede considerar que se trata de casos muy diferentes.

3) Lo mismo que lo explicado para La Matea II, con la cuenca de La Abejera0.

4.3.1. - ESTUDIO CON LA CUENCA DE COBAZA

En primer lugar se estiman los hidrogramas de escorrentía correspondientes a la lluvia del 22-1-96, utilizando el modelo KINEROS (Woolhiser et al., 1990). La definición de planos y canales que dicho modelo requiere se obtuvo a partir del plano topográfico de la cuenca (figura 2.12), que se estructuró en cinco planos y dos canales (figura 4.3.1). El extremo aguas arriba del canal superior (canal 1), se considera que coincide con el extremo superior de la propia cárcava medida (figura 2.12). El plano vertiente a la cabecera del canal (plano 1) corresponde a la superficie de la cuenca por encima del citado extremo superior. El tramo al que se aplica el modelo para cárcavas es el formado por la suma del canal 1 y el canal 2, tramo que en su extremo aguas arriba recibe la aportación del plano 1. La longitud del canal a considerar en el modelo no es en principio muy importante siempre que sea suficientemente largo, ya que el propio modelo puede teóricamente localizar la posición de la cabecera. En este caso, el tramo considerado sería un límite máximo, pues es el alcanzado

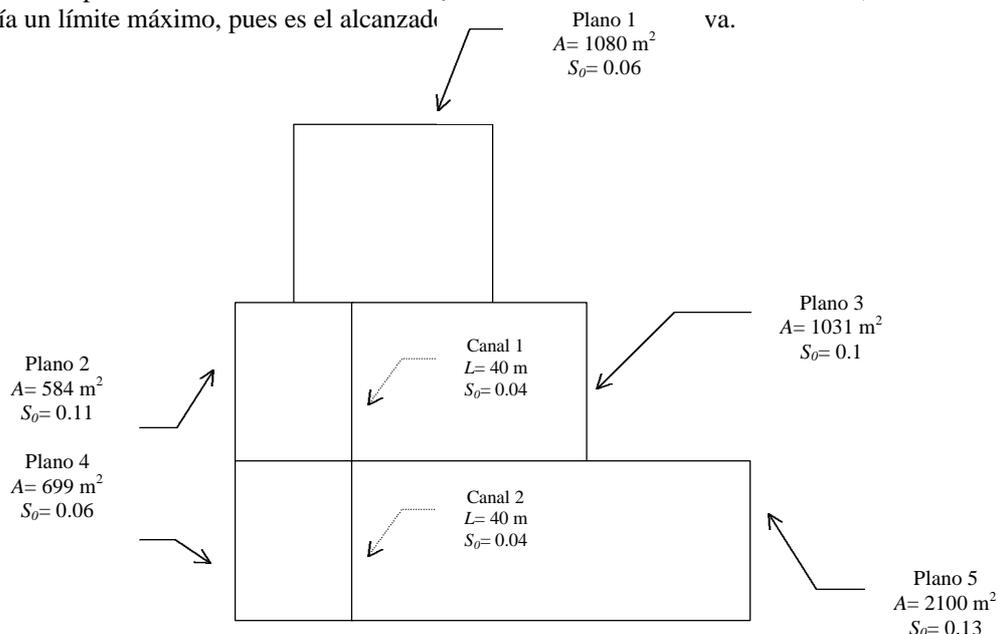


Figura 4.3.1.- Representación esquemática de la cuenca de Cobaza. A es el área de α longitud de los canales y S_0 la pendiente.

Al ser el mismo el tipo de suelo, los parámetros utilizados en KINEROS en esta ocasión son los mismos que los utilizados en el análisis de sensibilidad del apartado 4.1 (tabla 4.1.1), aunque en esta ocasión se cree más adecuada una saturación relativa inicial de 0.8 (figura 2.34). En la figura 4.3.2 se muestran los hidrogramas estimados a la salida del plano 1 y a la salida de la cuenca (extremo aguas abajo del canal 2). De acuerdo con la metodología expuesta en el apartado 4.1, el caudal constante que en el modelo de cárcavas se introduce por el extremo aguas arriba, se estima en 3.14 l/s, y el que marcha por el extremo aguas abajo, en 15.4l/s, con una duración de 20 min. El caudal lateral uniforme, por tanto, es de 0.153 l/s/m.

HIDROGRAMAS EN COBAZA
22-1-96

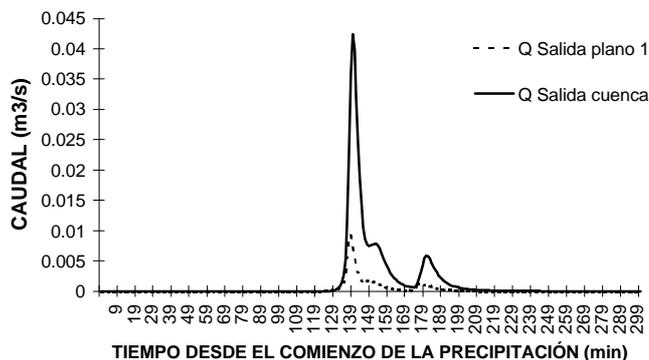


Figura 4.3.2.- Hidrogramas estimados en la cuenca de Cobaza para la lluvia de 22-1-96.

Se realiza en primer lugar una simulación con los valores de los parámetros y otros datos de entrada estimados, y que se corresponden a los planteados en la situación de referencia del análisis de sensibilidad del apartado 4.1, con las únicas modificaciones con respecto a ese caso, obligadas, que se indican a continuación:

$\Delta x = 2.6667\text{m}$, para contabilizar los 80 m de longitud del canal.

S_o (pendiente longitudinal del lecho)=0.04, que es la estimada para el fondo de la cuenca.

$BSLP$ (pendiente inversa de las laderas)=8.0, ya que se dispone de datos medidos que aconsejan una cifra de ese orden (figura I.1.3).

Temperatura del agua= 10°C

$INE=1$. (archivo TEST.INP, ver anejo III), $\alpha'=0.05$. Es decir, se considera un transporte no equilibrado con un bajo valor de α' , de acuerdo con las conclusiones obtenidas del análisis de sensibilidad del apartado 4.1.

Con estos valores, la pérdida de suelo global estimada por el modelo es de 2.99 m^3 , algo en principio razonable, ya que el valor total de las pérdidas medidas en agosto de 1996 es de 5.5 m^3 , y los parámetros han sido simplemente estimados. Los resultados del modelo pueden verse en las figuras 4.3.3 y 4.3.4. En todas las gráficas, los pasos de tiempo de impresión son los mismos que se indicaron para otras similares en el apartado 4.1.: 0, 20, 40, y 80 en las gráficas de caída-elevación-anchura; 0,10,20,30,40,60 y 80 para las gráficas de secciones transversales.

La estimación de la forma del cauce no es tampoco descabellada ni demasiado alejada de la realidad. Sin embargo, se observa un ensanchamiento del lecho casi instantáneo en toda la longitud simulada, y una degradación que va creciendo sin interrupción conforme nos situamos más hacia el extremo aguas abajo. Esta tendencia no se corresponde adecuadamente con la realidad (figura I.1.3, figura 4.3.8), donde la degradación alcanza un máximo en posiciones intermedias, y un mínimo en los extremos.

CUENCA DE COBAZA, SIN CALIBRACIÓN, $\alpha=0.05$

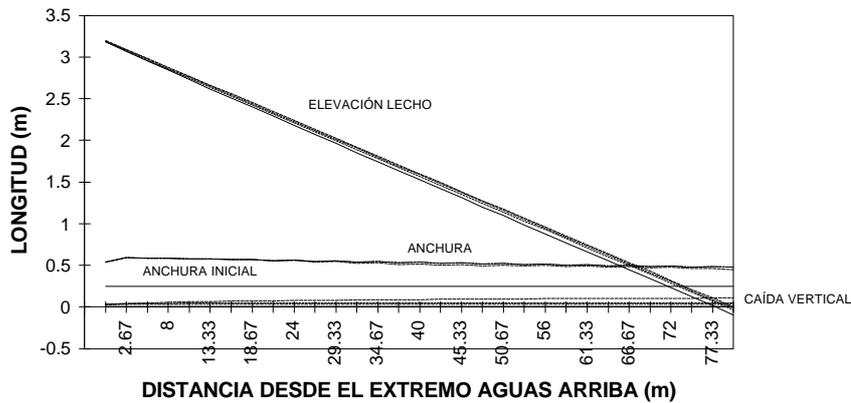


Figura 4.3.3.- Cuenca de Cobaza sin calibración, $\alpha=0.05$. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

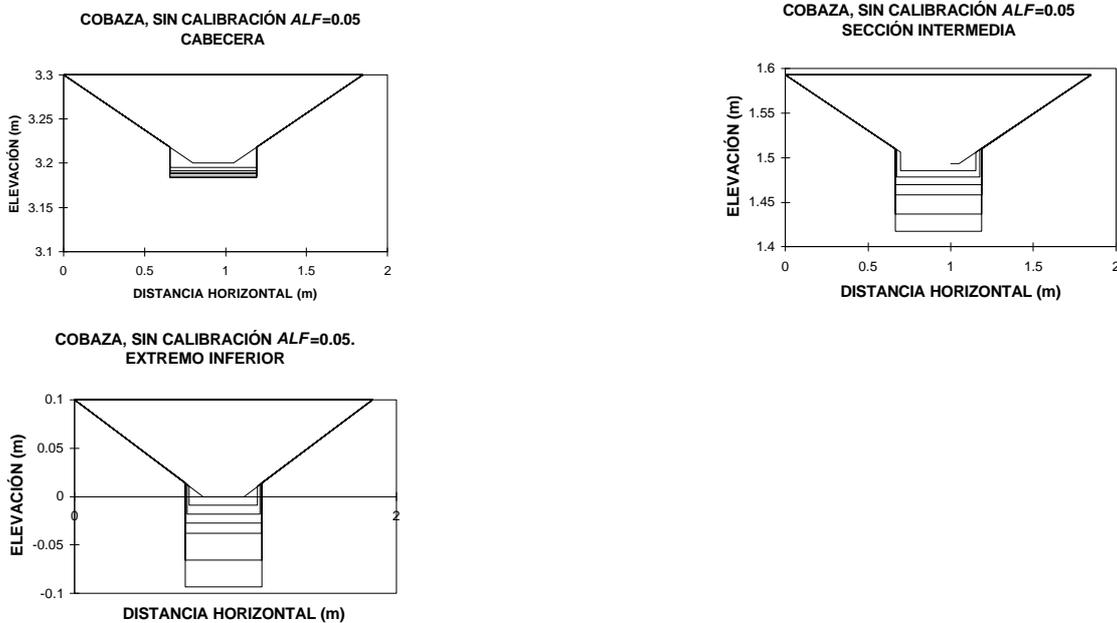


Figura 4.3.4.- Cuenca de Cobaza sin calibración, $\alpha=0.05$. Secciones transversales del cauce en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo.

Continuando con la evaluación, y de acuerdo a como se explicó en los primeros párrafos de este apartado, vamos a hacer la hipótesis de que todas las pérdidas se deben a la lluvia del 22-1-96, y a calibrar el modelo en consecuencia. Primeramente, calibraremos en base a las pérdidas totales. Utilizaremos para ello los parámetros a los que las pérdidas son más sensibles: tamaño y densidad de las partículas. Reduciendo el tamaño de partícula a 0.17mm y su densidad relativa a 1.705, manteniendo intacto lo demás, se obtienen unas pérdidas de 5.5m³. Las características simuladas del cauce se aprecia en las figuras 4.3.5 y 4.3.6, donde la profundidad y la anchura son crecientes en el sentido aguas abajo. Las anchuras alcanzadas, del orden de 0.7 m, son mayores que las reales, y las caídas verticales, de unos 14 cm, menores (figura 4.3.8). Además, en el caso real, las secciones más erosionadas se encuentran en las zonas centrales de la cárcava, y no en los extremos (figuras 2.3.7 y I.1.3). En el caso simulado es menor la erosión aguas arriba, pero no sufre un proceso de crecimiento-decrecimiento aguas abajo.

**CUENCA DE COBAZA, CALIBRACIÓN VOLUMÉTRICA
ALF=0.05**

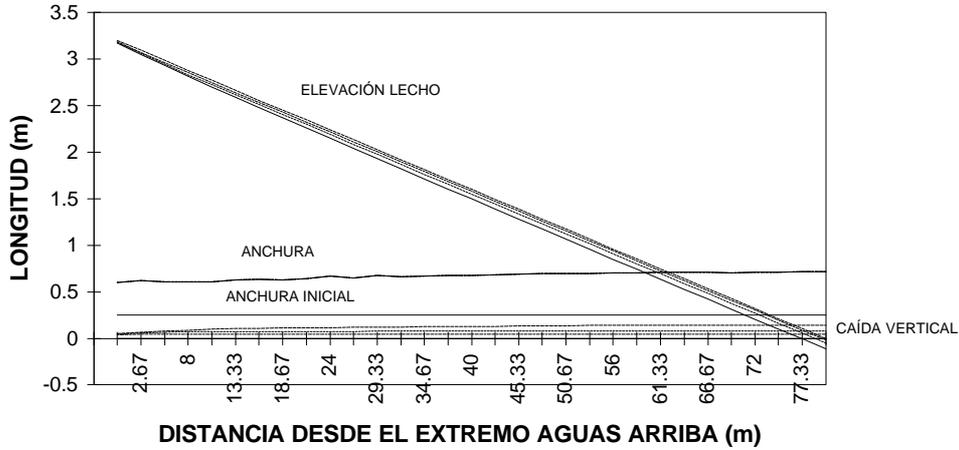


Figura 4.3.5.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica, $\alpha' = 0.05$. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

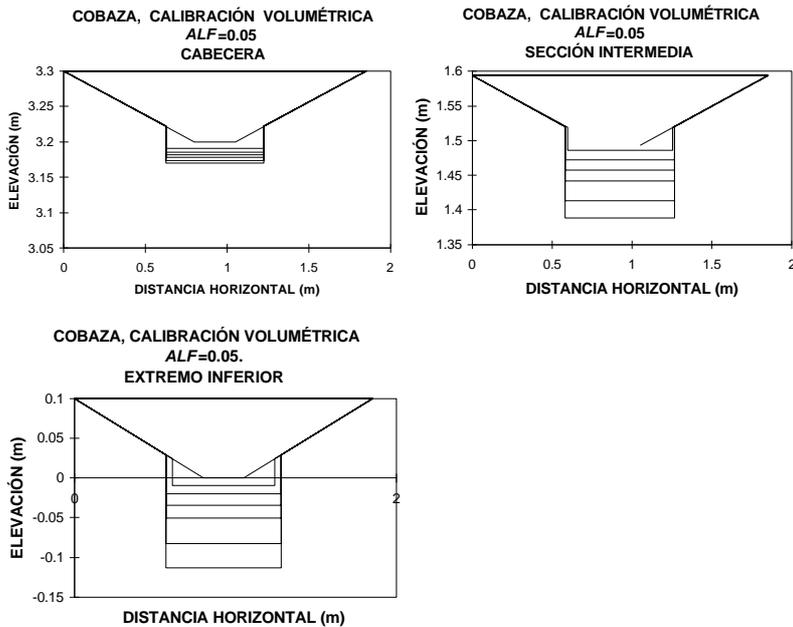


Figura 4.3.6.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica, $\alpha' = 0.05$. Secciones transversales del cauce en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo.

Vamos a estudiar a continuación la modificación de los valores de los parámetros, de manera que pueda obtenerse una forma del cauce más adecuada a la realidad observada. Para proceder a esta calibración deberán de utilizarse aquellos parámetros que más influyen en la forma de la sección, que son, de acuerdo con el análisis de sensibilidad, esfuerzo cortante crítico τ_c y coeficiente K (ecuación 3.25), anchura inicial del lecho y peso específico del suelo. Además, dado que las modificaciones en los citados parámetros se traducen también en ligeras modificaciones en los volúmenes totales estimados, se hace necesario modificar ligeramente también los valores de tamaño y densidad de las partículas.

Un resultado bastante coherente se alcanza con una anchura inicial del lecho de 0.25m, $\tau_c= 0.7\text{Pa}$, $K=8.80\text{min}^{-1}$, tamaño de partículas $d= 0.178\text{mm}$, densidad relativa de las mismas de 1.75, y $\alpha'=0.05$, permaneciendo invariables el resto de los parámetros con respecto a la situación anterior.

Las pérdidas totales estimadas son ahora de 5.75 m^3 . Como puede verse en las figuras 4.3.7 y 4.3.8, la profundidad máxima simulada del cauce alcanza casi los 24 cm, y la anchura en las secciones intermedias se sitúa alrededor de los 30cm, valores todos muy similares a los medidos en campo. En la figura 4.3.8 se añaden secciones medidas en campo del anejo I (figura I.1.3), representadas a la misma escala que las secciones obtenidas por el modelo, con el fin de poder comparar mejor. Cada sección simulada se acompaña de tres secciones medidas, que corresponden a las posiciones de cabecera, segmentos intermedios y posiciones inferiores. Como puede observarse, se simula la tendencia observada en campo de que la degradación va incrementándose en el sentido aguas abajo hasta una cierta posición, a partir de la cual la degradación vuelve a decrecer, adquiriendo ésta poca importancia en los extremos finales. La información se completa con la figura 4.3.9, donde se observa la evolución del nivel del agua y del lecho. También aquí se observa bien cómo la máxima degradación del lecho se da en los subtramos intermedios. Ello se explica porque la capacidad de transporte disponible del flujo va siendo cada vez menor aguas abajo, a pesar del aumento del caudal, debido a la alta carga de sedimentos del flujo.

Como comportamientos anómalos, destaca el de la anchura en los primeros metros en el extremo aguas arriba, que es algo exagerada, a pesar de considerar un transporte no equilibrado, aunque esto se produce sólo en un tramo muy corto. En consecuencia, la máxima profundidad no se da en las posiciones de máxima anchura, aunque sí en las proximidades. Los valores de calibración de K y τ_c corresponden a un suelo muy poco cohesivo, y muy erosionable, como es el caso, aunque quizás resulten algo exagerados. El bajo valor de τ_c explica que la excavación de la cárcava comience en el propio extremo aguas arriba, a pesar del muy bajo valor del caudal y del esfuerzo cortante del flujo allí. De cualquier manera, la cárcava real también se encuentra desarrollada en toda la longitud del canal. En los casos anteriores (sin calibración para la forma), con $\tau_c= 1.5\text{Pa}$, también ha comenzado la erosión en el extremo aguas arriba.

De todos modos, la respuesta del modelo cabe calificarla de prometedora, pues el parecido entre realidad y resultados del modelo es muy grande, y utilizando valores de los parámetros muy en relación con lo que cabe esperar.

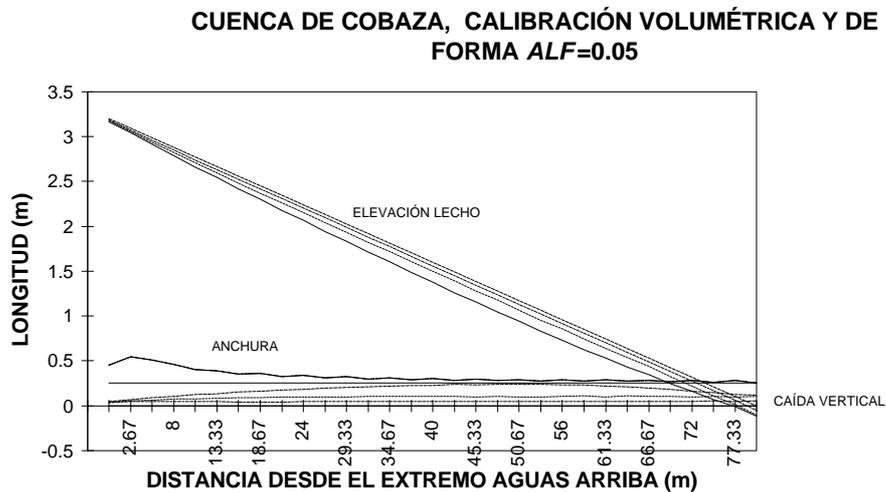
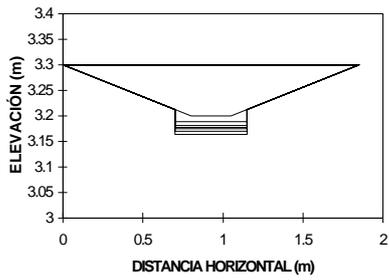
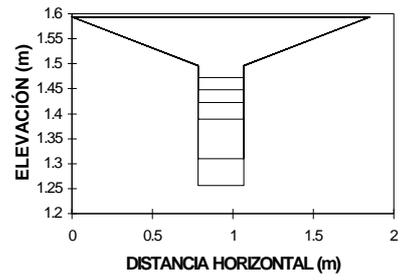


Figura 4.3.7.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica y de forma, $\alpha'= 0.05$. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

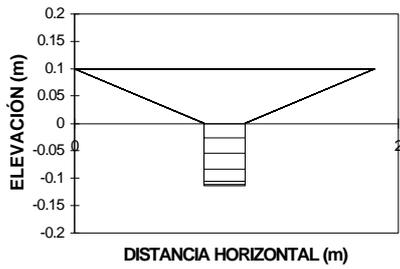
COBAZA, CON CALIBRACIÓN $ALF=0.05$
CABECERA



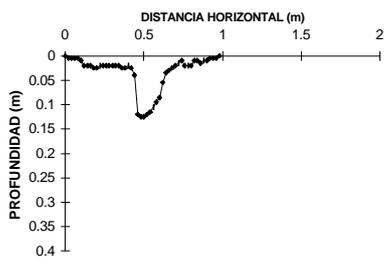
COBAZA, CON CALIBRACIÓN $ALF=0.05$
SECCIÓN INTERMEDIA



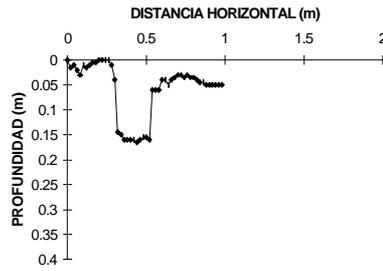
COBAZA, CON CALIBRACIÓN $ALF=0.05$.
EXTREMO INFERIOR



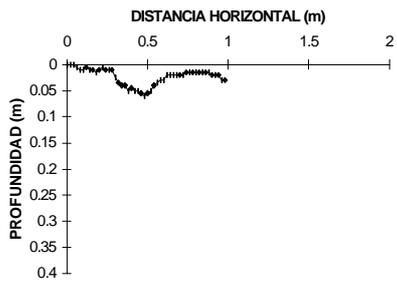
SECCIÓN 19(14)
EXTREMO AGUAS ARRIBA



SECCIÓN 14(9), POSICIÓN INTERMEDIA



SECCIÓN 6(1), EXTREMO AGUAS ABAJO



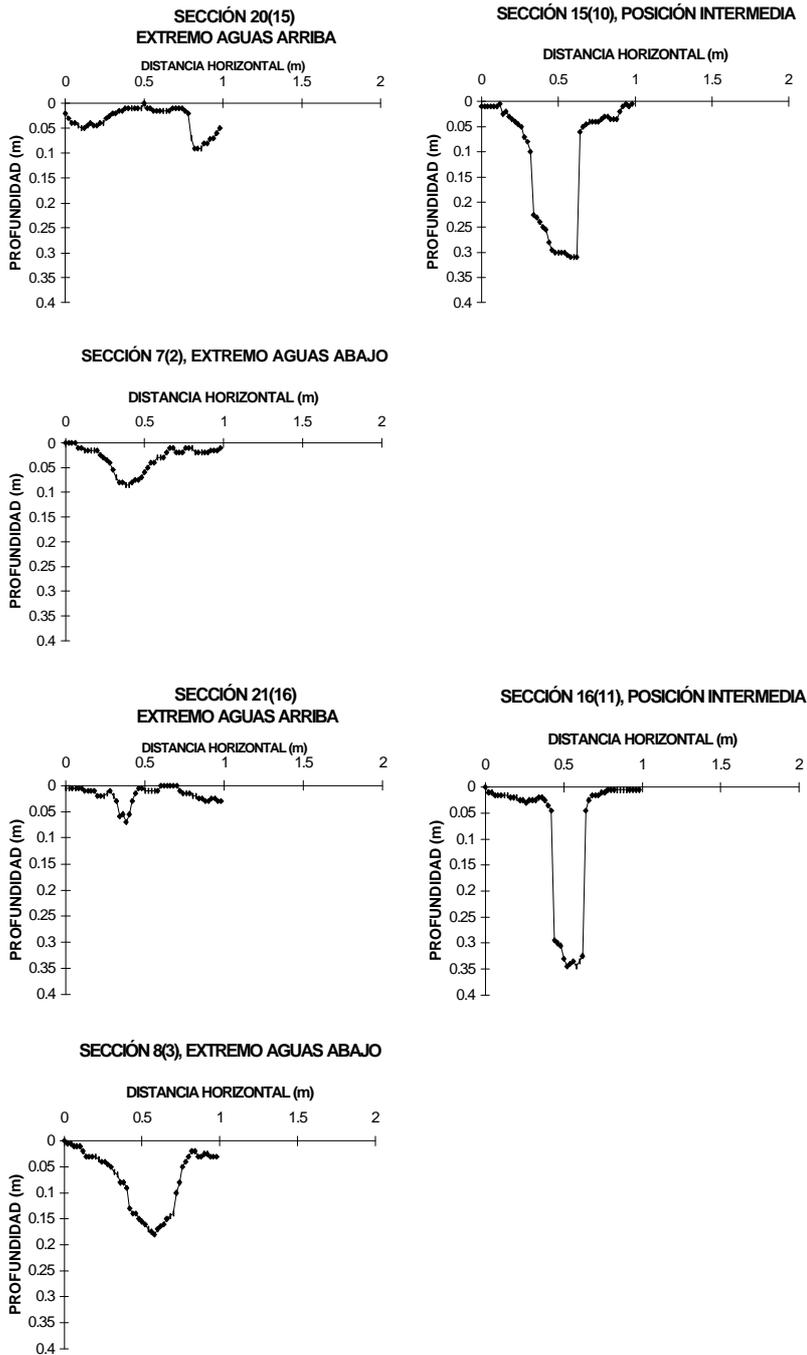


Figura 4.3.8.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica y de forma, $\alpha' = 0.05$. Secciones transversales del cauce, simuladas, en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo. Comparación, a escala similar, con tres secciones medidas en cada una de las citadas posiciones.

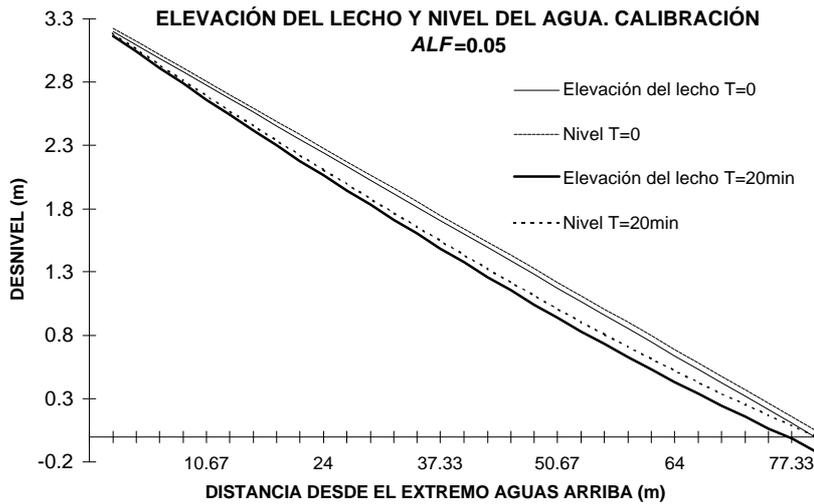


Figura 4.3.9.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica y de forma, $\alpha^* = 0.05$. Elevación del lecho y nivel de agua en los instantes inicial y final.

Como complemento del estudio, se procede también a la calibración del modelo sin considerar transporte no equilibrado, haciendo 0 a la variable *INE* (archivo de entrada de datos TEST.INP, anejo III). Una respuesta adecuada sería interesante, teniendo en cuenta el desconocimiento existente sobre los valores de σ' . Los valores finales de los parámetros son similares: $\tau_c = 0.8$ Pa, $K = 7.73 \text{ min}^{-1}$, tamaño de partículas $d = 0.2 \text{ mm}$, densidad relativa de las mismas, 1.7. Las pérdidas estimadas totales son de 5.64 m^3 . La forma del cauce simulada es similar, aunque, lógicamente, es algo más ancho y profundo aguas arriba que cuando se utiliza la hipótesis de transporte no equilibrado (figuras 4.3.10, 4.3.11 y 4.3.12). La profundidad máxima alcanzada es también menor, y también se simula adecuadamente la evolución decreciente después (sentido aguas abajo) de la degradación del cauce, aunque no la creciente desde el extremo aguas arriba (figura 4.3.12). Por tanto es mejor la respuesta del modelo considerando transporte de sedimentos no equilibrado.

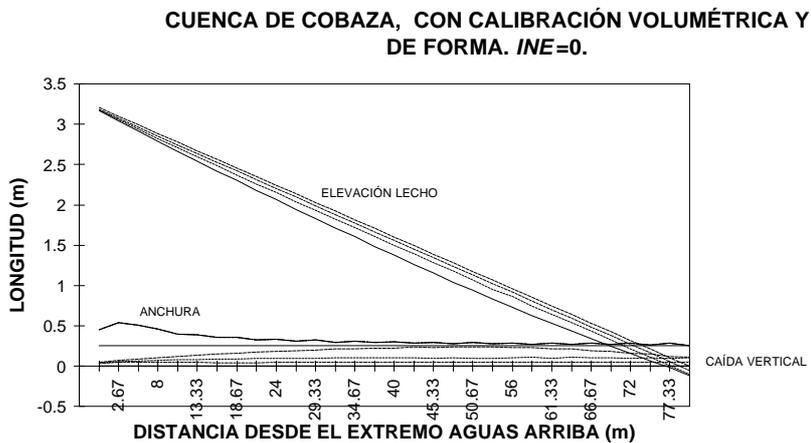


Figura 4.3.10.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica y de forma. Sin hipótesis de transporte no equilibrado ($INE=0$). Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

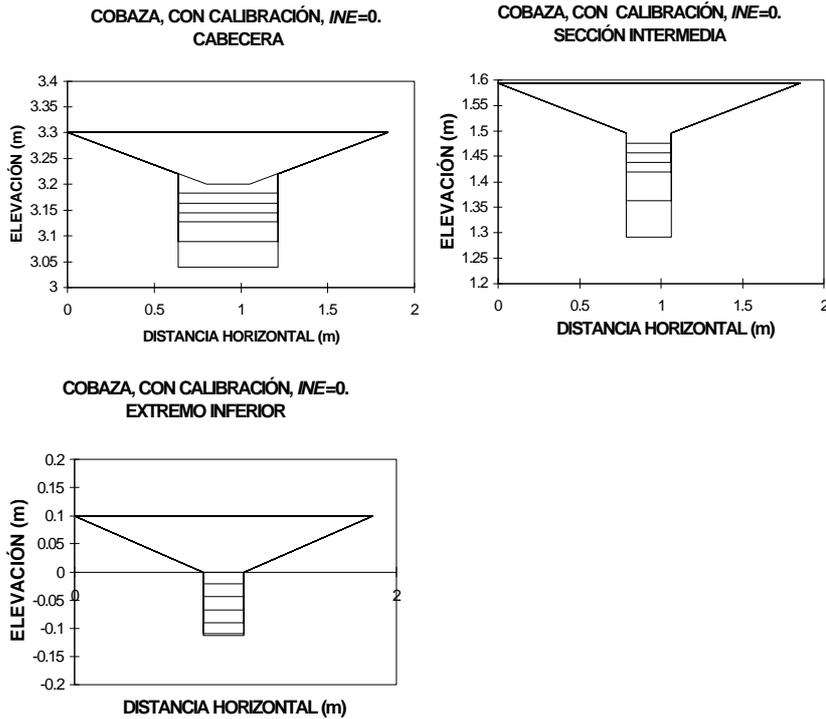


Figura 4.3.11.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica y de forma. Sin hipótesis de transporte no equilibrado ($INE=0$). Secciones transversales del cauce en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo.

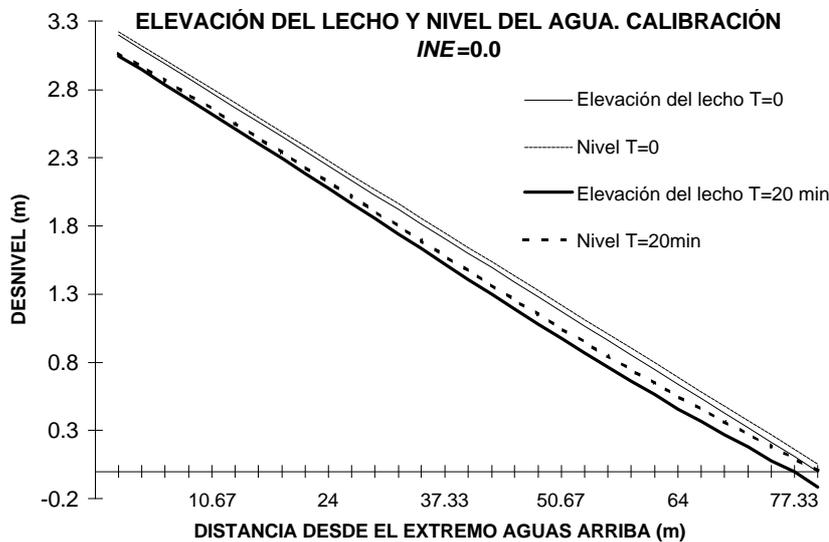


Figura 4.3.12.- Cuenca de Cobaza con calibración volumétrica y de forma. Sin hipótesis de transporte no equilibrado ($INE=0$). Elevación del lecho y nivel de agua en los instantes inicial y final.

Una vez realizado este ejercicio de calibración, es de interés comprobar si la respuesta del modelo es también coherente con otras lluvias en la misma cuenca de Cobaza, utilizando los valores de los parámetros obtenidos en el proceso de calibración anterior. Para ello, se aplican a esta cuenca los caudales resultantes de la lluvia del día 5-12-96, cuyo hietograma puede verse en la figura 2.6. Es una lluvia muy distinta a la utilizada en la calibración, al ser muy larga y poco intensa.

Los hidrogramas a utilizar, obtenidos mediante el modelo KINEROS, se pueden observar en la figura 4.3.13. Los valores de los parámetros son los mismos que los del caso anterior y que los del análisis de sensibilidad (tabla 4.1.1), con la excepción de la saturación relativa inicial, que se considera de 0.65 (figura 2.34). Aplicando la metodología ya habitual, considerando únicamente el pico máximo, el caudal constante a aplicar por el extremo aguas arriba es de $0.00086\text{m}^3/\text{s}$ para una duración de 120 min, el caudal que marcha por el extremo aguas abajo es de $0.0043\text{m}^3/\text{s}$, y por lo tanto, el caudal lateral constante, para la misma duración, es de $0.0000437\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. El resultado del modelo de cárcavas no puede contrastarse con la realidad, ya que en el momento en que cayó la lluvia, la parcela se hallaba cubierta de vegetación al haber sido sembrada mediante siembra directa. Se encontraba presente la cárcava formada el año anterior. Sin embargo, sí puede hacerse una comparación con lo ocurrido en otras parcelas próximas cuyo suelo se encontraba casi desnudo: en algunas de ellas, se produjeron cárcavas, aunque pequeñas (ver apartado 2.3.6, en el que se describe precisamente lo ocurrido en ciertas cuencas tras la lluvia del 5-12-96).

COBAZA: HIDROGRAMAS ESTIMADOS 5-12-96

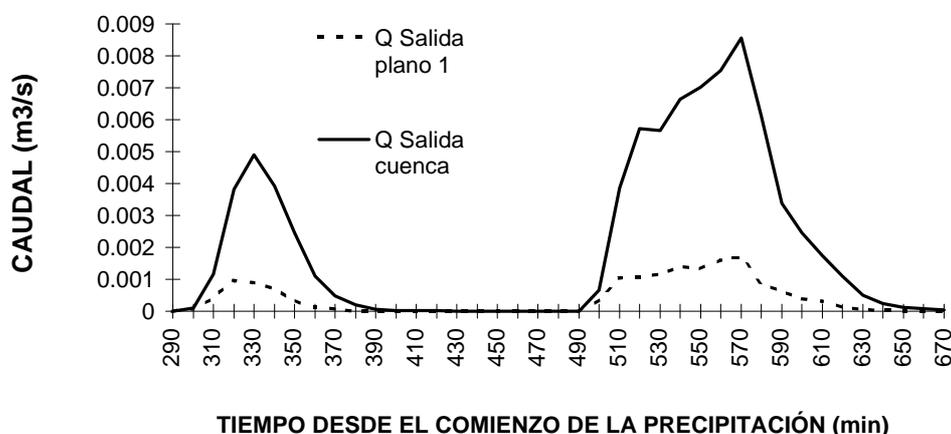


Figura 4.3.13.-Hidrogramas de escorrentía estimados en la cuenca de Cobaza para la lluvia del 5-12-96.

En la ejecución del modelo para cárcavas, como ya se ha dicho, se introducen los valores de los parámetros finalmente obtenidos en el proceso de calibración, con transporte de sedimentos no equilibrado, y con la salvedad de que, al ser los caudales mucho más bajos, parece conveniente elevar el coeficiente de Manning a 0.07. Además, de acuerdo con la duración del episodio, el paso de tiempo es $DT=0.35$ min, y el número de pasos de tiempo es $NT=480$.

Las pérdidas que así se obtienen son de 1.80m^3 , mucho menores que las producidas en la lluvia de enero de ese mismo año. En las figuras 4.3.14, 4.3.15 y 4.3.16 pueden verse las características del cauce obtenido. Los pasos de tiempo de impresión son 0, 100, 300 y 480 en la figura 4.3.14, y 0, 50, 100, 200, 300, 400 y 480 en la figura 4.3.15. Se aprecia cómo en este caso el modelo no reproduce ningún tipo de ensanchamiento, sino únicamente una degradación del lecho, creciente en sentido aguas abajo. El que no haya ensanchamiento se explica por el bajo valor del caudal, lo que es muy coherente. Piénsese por ejemplo en el dato ya comentado que Poesen y Govers (1990) aportan con respecto a la respuesta de diferentes lluvias. Según estos autores, lluvias largas pero de intensidad moderada producirían cárcavas con valores pequeños de la relación anchura-profundidad ($RAP < 1$). Aunque el valor de las pérdidas obtenido por el modelo es mucho menor que el que se obtiene aplicando la lluvia del 22 de enero, parece que 1.8m^3 es una cifra muy elevada. En efecto. Si consideramos como aproximadamente válida la relación entre el índice API y las pérdidas por cárcavas efímeras, podemos justificar esta afirmación. Si nos fijamos en la tabla 2.12, las pérdidas en La Abejera 0, con un valor de $API=1278.6$, han sido de 0.272 para la misma lluvia del 5 de diciembre. Teniendo en cuenta (figura 2.17) que el valor de API para Cobaza es de aproximadamente 600, deducimos que el valor de las mismas en esta cuenca habrían sido menores de 0.2m^3 . De todos modos, hay una serie de razones no relacionadas con el modelo que pueden explicar estas anomalías. Por ejemplo, que las estimaciones de pérdidas con el índice API hay que

tomarlas con enorme prevención, ya que corresponden a una escasa cantidad de datos y, para la lluvia del 5 de diciembre, se refieren a cárcavas de un tamaño muy pequeño, para las que la utilidad de dicho índice puede ser dudosa. Además, no olvidemos que la calibración del modelo para cárcavas se ha realizado suponiendo que todas las pérdidas se deben a una única lluvia, lo que puede no ser cierto, por lo que el modelo, así calibrado, estaría sobrevalorando las pérdidas debidas a eventos concretos.

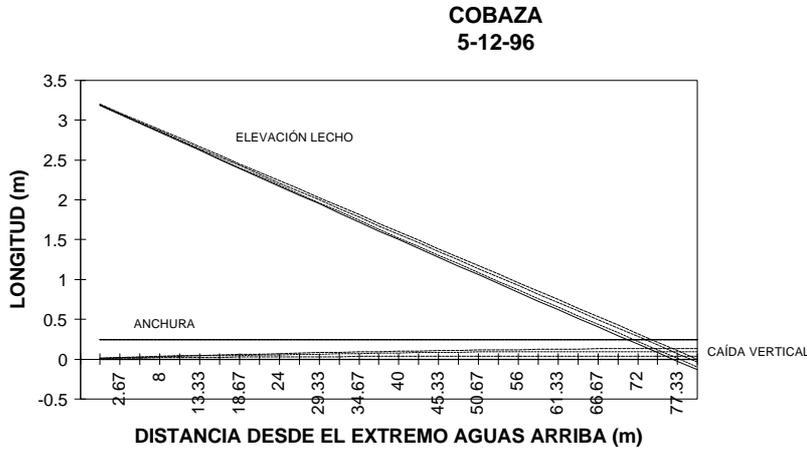


Figura 4.3.14.- Cuenca de Cobaza. Respuesta a la lluvia del 5-12-96 con valores de los parámetros obtenidos en la calibración con la lluvia del 22-1-96. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

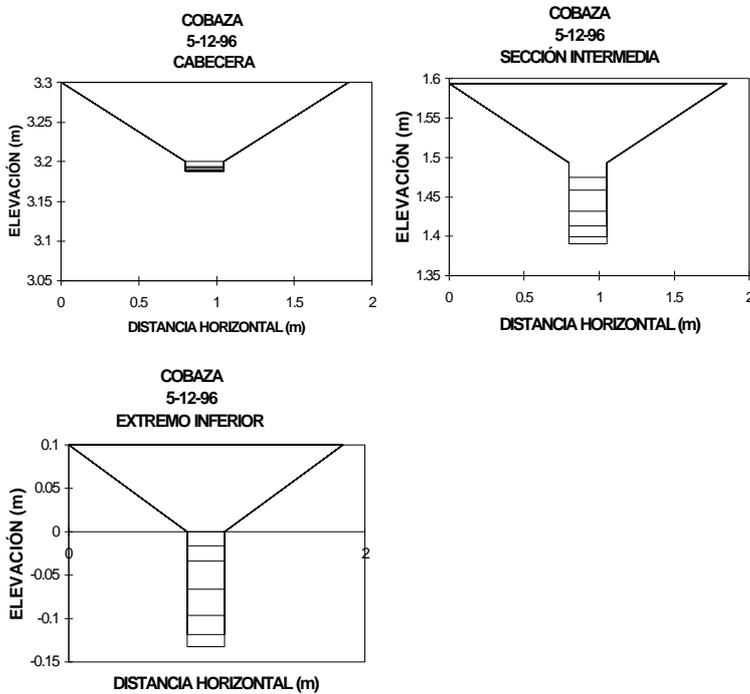


Figura 4.3.15.- Cuenca de Cobaza. Respuesta a la lluvia del 5-12-96 con valores de los parámetros obtenidos en la calibración con la lluvia del 22-1-96. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

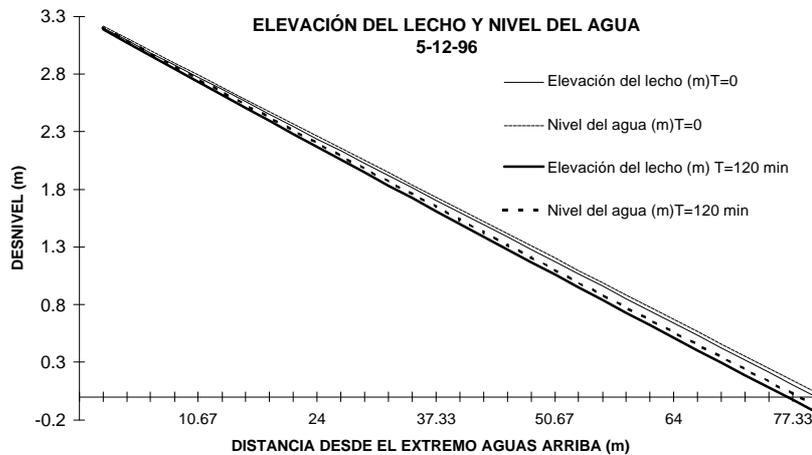


Figura 4.3.16.- Cuenca de Cobaza. Respuesta a la lluvia del 5-12-96 con valores de los parámetros obtenidos en la calibración con la lluvia del 22-1-96. Elevación del lecho y nivel de agua en los instantes inicial y final.

4.3.2. - ESTUDIO CON LA CUENCA DE LA MATEA II

De acuerdo con el proceso a seguir descrito en los primeros párrafos del apartado 4.3, se calibró el modelo para la cuenca de La Matea II con la lluvia del 5-12-96 (figura 2.6). La topografía de esta pequeña cuenca puede observarse en la figura 2.13. Primeramente se ha de estimar el caudal a introducir en el modelo para cárcavas mediante KINEROS. La esquematización de la cuenca en planos y canales realizada puede verse en la figura 4.3.17. Los parámetros utilizados en KINEROS son los mismos que los utilizados en los subapartados anteriores, con la salvedad de que la conductividad en saturación se incrementa a 5mm/hr, al tratarse de suelos de las zonas superiores del área de estudio, algo más permeables (tabla 2.5). La saturación relativa inicial, de acuerdo con las mediciones realizadas (figura 2.34) se estima en 0.65. La cárcava se halla situada en el extremo aguas abajo de la cuenca, ocupando una longitud de escasamente 7.2 m. Como canal para introducir en la simulación de la excavación de la cárcava, se considera el correspondiente a toda la longitud de la cárcava presente al final de agosto de 1996, mucho mayor, de longitud 24 m y pendiente aproximada del 8%, siguiendo los mismos razonamientos que sobre el mismo tema se hacían al comienzo del apartado 4.3.1. Mediante KINEROS se estiman los hidrogramas en la cabecera de este canal (canal 1), y en su extremo aguas abajo, de acuerdo con los procedimientos habituales. Dichos hidrogramas pueden apreciarse en la figura 4.3.18.

Como se ve, se trata de caudales muy bajos, y la duración del caudal punta es breve en comparación con Cobaza, todo ello debido al pequeño tamaño de la cuenca. El caudal constante a introducir por el extremo aguas arriba para una duración de 40 minutos se estima en 1.63l/s, el caudal saliente por el extremo aguas abajo para esa misma duración, en 1.88l/s, y por tanto, el caudal lateral, en $1.04 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Al igual que cuando se hizo el estudio sobre la cuenca de Cobaza, y como se ha comentado en los primeros párrafos del apartado 4.3, partimos para la calibración de la situación de referencia del análisis de sensibilidad, que recoge valores de los parámetros en general razonables para este caso, incluyendo un transporte no equilibrado con $\alpha' = 0.05$. Los valores de Δx y Δt se adaptan, de modo que $\Delta x = 0.8\text{m}$, $\Delta t = 0.1\text{min}$, y $NT = 400$. La pendiente longitudinal del lecho es de 0.08. Además, los valores de algunos otros parámetros deben de modificarse. Las pendientes de las laderas, son más suaves en esta cuenca, de modo que al ángulo que forman con la horizontal se reduce a 2° , con lo que $BSLP = 28.6$; la anchura del cauce en consecuencia es mayor, fijándose en 0.35m; al ser tan bajos los caudales, y por tanto los calados, parece aconsejable aumentar el coeficiente de Manning a $n = 0.08$.

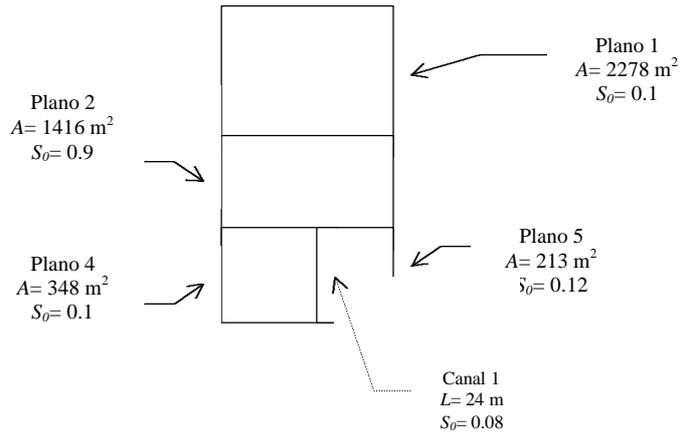


Figura 4.3.17.- Representación esquemática de la cuenca de La Matea II. A es el área de cada plano, L es la longitud de los canales y S_0 la pendiente.

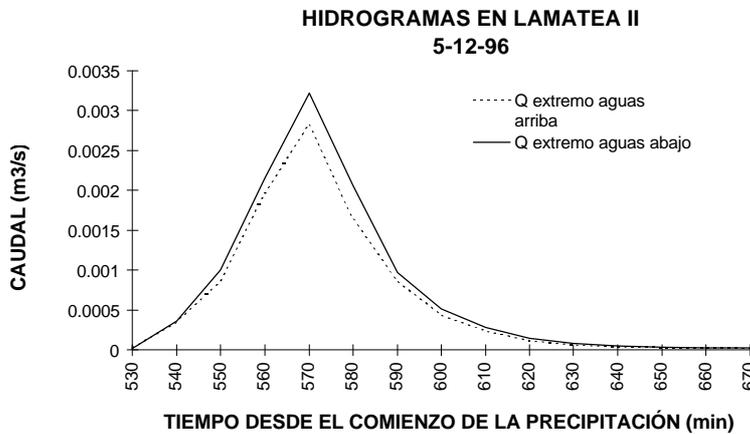


Figura 4.3.18.- Hidrogramas estimados en la cuenca de La Matea II para la lluvia de 5-12-96.

Con estos datos, el valor de la erosión es de 0.21 m^3 , muy próximo a la realidad medida. Sin embargo, la forma del cauce no queda tampoco bien simulada, como puede verse en las figuras 4.3.19 y 4.3.20, comparándola con la real (figura 2.36). Los pasos de tiempo de impresión para la figura 4.1.19 son 0, 50, 200 y 400, y para la figura 4.1.20, 0, 10, 50, 100, 200, 300 y 400. Sigue ocurriendo que, según el modelo, la erosión tiene lugar en todo el cauce, mientras que la cárcava real es de sólo 7.7m. Además, la anchura estimada es exagerada, aunque la máxima degradación sí se da en las secciones centrales, y las profundidades calculadas son menores que las medidas, entre otras causas, porque se erosiona todo el tramo. Modificando los valores de K y τ_c no se consigue una mejora dentro de unos valores razonables, por lo que hemos de concluir que con estos valores tan bajos de caudal, no ha sido posible en este caso simular adecuadamente la forma del cauce ni su longitud.

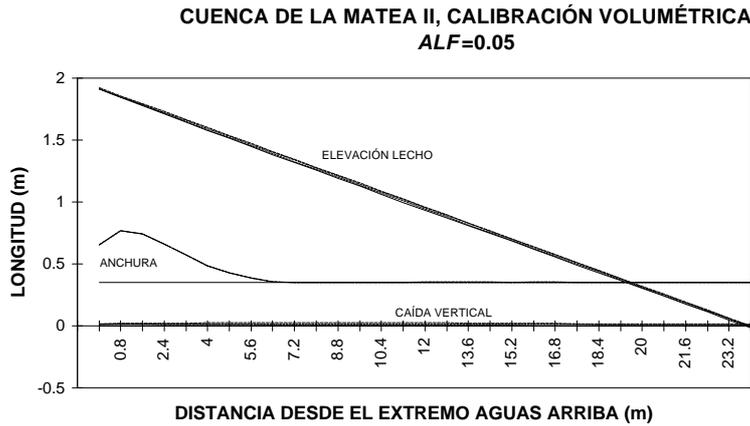


Figura 4.3.19.- Cuenca de La Matea II con calibración volumétrica, lluvia del 5-12-96, $\alpha' = 0.05$. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

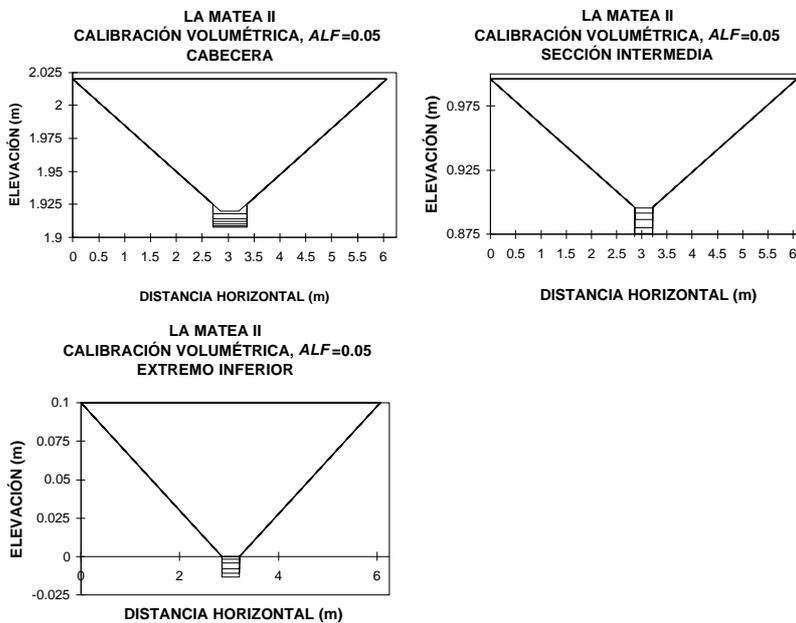


Figura 4.3.20.- Cuenca de La Matea II con calibración volumétrica, lluvia del 5-12-96, $\alpha' = 0.05$. Secciones transversales del cauce en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo.

4.3.3. - ESTUDIO CON LA CUENCA DE LA ABEJERA 0.

Para finalizar este apartado sobre validación del modelo, se procede a su calibración para la cuenca de La Abejera 0, con la lluvia del 22-1-96 (figura 2.6). La topografía de la cuenca puede observarse en la figura 2.9. Primeramente se ha de estimar el caudal a introducir en el modelo para cárcavas, siguiendo el mismo método que en los casos anteriores, con KINEROS. La esquematización de la cuenca en planos y canales realizada puede verse en la figura 4.3.21. La cárcava se halla situada en el extremo aguas abajo de la cuenca, ocupando una longitud de escasamente 16.6 m. En el apartado 2.3.6 se describe cómo la cárcava se sitúa justo ocupando el mismo tramo de máxima pendiente (alrededor del 7.5%) que ocupaba la cárcava medida en febrero de 1996 (ver figura 2.10). La cabecera, por tanto, se situaría aproximadamente en la posición del cambio de pendiente. Así, como canal para estudiar en la simulación con el modelo de cárcavas se considera todo el propio tramo de máxima pendiente, coincidente con la longitud de la cárcava que nos ocupa, y se situaría inmediatamente por debajo del canal 2 de la figura 4.3.21. Dada la

escasa longitud en relación al tamaño de la cuenca, el aporte lateral se considera despreciable. En consecuencia, mediante KINEROS se estima el hidrograma en la cabecera de este canal, hidrograma que puede observarse en la figura 4.3.22. Los parámetros utilizados en KINEROS son los mismos que los utilizados en el subpartado anterior, con la excepción de la saturación relativa inicial, que de acuerdo con las mediciones realizadas (figura 2.34) se estima en 0.7. En comparación con La Matea II, la escorrentía es de mucho mayor duración, y el caudal punta es también mayor, como corresponde a una cuenca bastante más grande. El caudal medio constante a introducir por el extremo aguas arriba para una duración de 70 minutos se estima en 4.7 l/s.

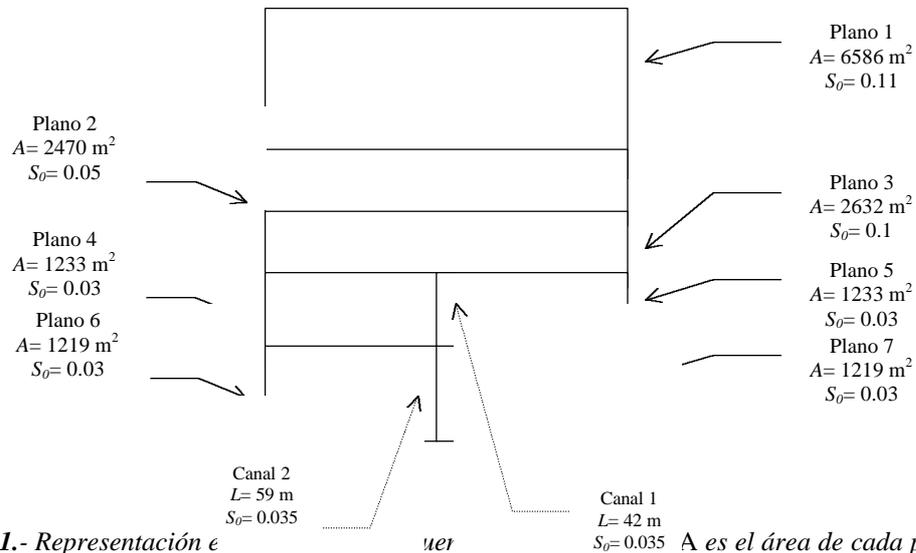


Figura 4.3.21.- Representación de los planos de sección transversal, la longitud de los canales y S₀ la pendiente. El canal estudiado con el modelo de cárcavas

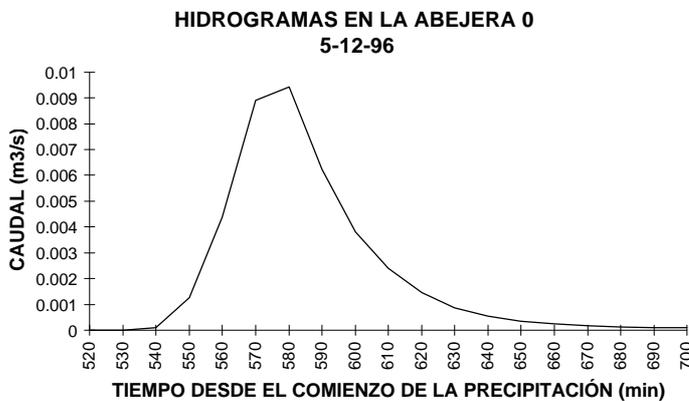


Figura 4.3.22.- Hidrograma estimado en la cuenca de La Abejera 0 para la lluvia de 5-12-96.

En el modelo de cárcavas, como ya se ha comentado, partimos básicamente de la situación de referencia utilizada en el análisis de sensibilidad y en el estudio con la cuenca de Cobaza, que recoge valores de los parámetros en general razonables para este caso, incluyendo un transporte no equilibrado con $\alpha'=0.05$. Los valores de Δx y Δt se adecuan al caso, de modo que $\Delta x = 0.5334\text{m}$, $\Delta t = 0.0875\text{min}$ y $NT=800$. La pendiente longitudinal del lecho es la citada, del 7%. Como en el caso de la cuenca de La Matea II, también en éste hay algunos otros parámetros cuyo valor debe modificarse. Parece aconsejable aumentar el coeficiente de Manning, dados los bajos calados, de modo que $n=0.08$. En estas circunstancias, el valor de la erosión estimada es de 0.615m^3 , alejada del valor medido, que fue de 0.272m^3 . La forma del cauce tampoco queda bien simulada: la anchura es exagerada, y las caídas demasiado bajas.

Como en casos anteriores, se procede a calibrar el modelo primeramente con respecto al volumen de suelo perdido, utilizando los parámetros de tamaño y densidad de las partículas. Con tamaño $d=0.235\text{mm}$ y una densidad relativa de 2.0 las pérdidas son de 0.284m^3 , prácticamente iguales a las medidas. Ha sido necesario aumentar bastante el valor de estos parámetros en comparación con el caso de la cuenca de La Matea II, y sobre todo, en relación al caso de Cobaza. En las figuras 4.3.23 y 4.3.24 se observan las características del cauce. Los pasos de tiempo de impresión son, para la figura 2.4.23, 0, 100, 400 y 800, y para la figura 4.3.24, 0, 50, 100, 200, 400, 600 y 800.

La anchura aguas arriba es excesiva, y la profundidad de la cárcava es menor que la observada.

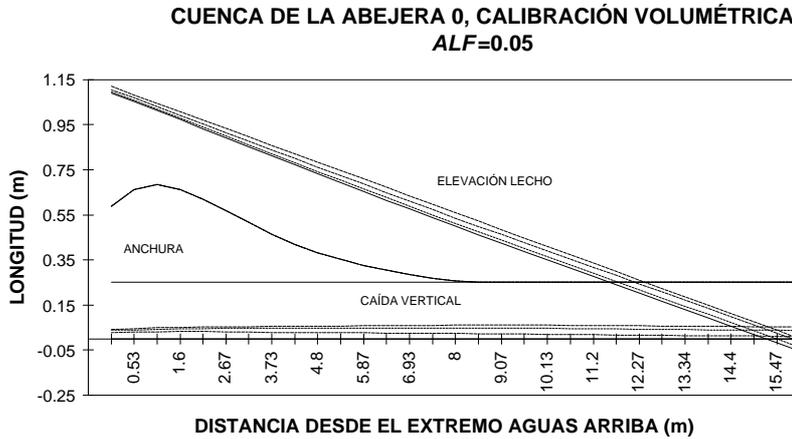


Figura 4.3.23.- Cuenca de La Abejera 0 con calibración volumétrica, lluvia del 5-12-96, $\alpha' = 0.05$. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.

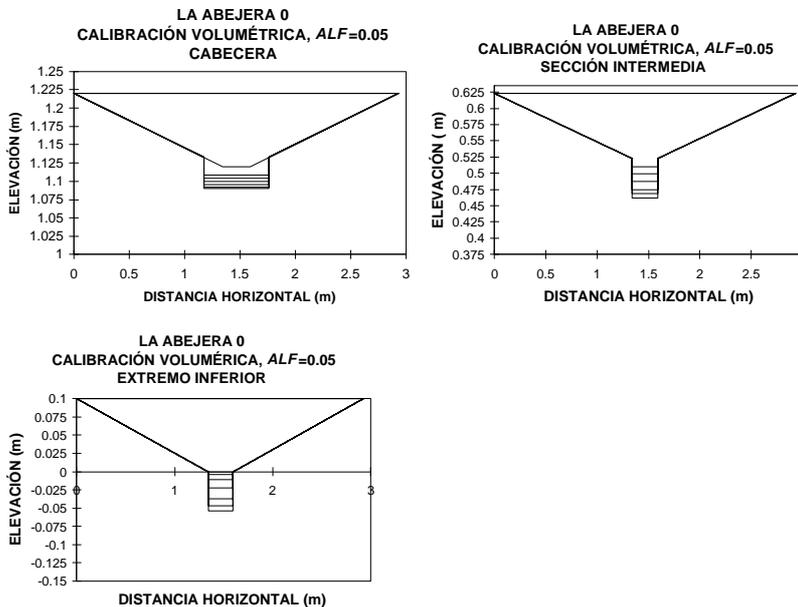


Figura 4.3.24.- Cuenca de La Abejera 0 con calibración volumétrica, lluvia del 5-12-96, $\alpha' = 0.05$. Secciones transversales del cauce en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo.

Mejores resultados se obtienen con $\tau_c = 0.7\text{Pa}$ y $K = 8.80\text{min}^{-1}$, manteniendo los mismos valores del resto de los parámetros. Las pérdidas totales son ahora de 0.285m^3 . Las características del cauce pueden observarse en las figuras 4.3.25 y 4.3.26. En la figura 4.3.26 se han incorporado reproducciones de las secciones transversales medidas, correspondientes a posiciones similares a las simuladas, y a la misma

escala aproximadamente, con el objeto de poder comparar mejor los resultados de la simulación y la realidad, como se hace en la figura 4.3.8 para la cuenca de Cobaza.

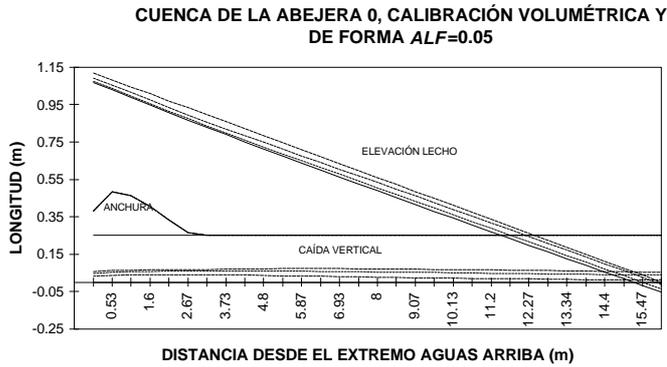
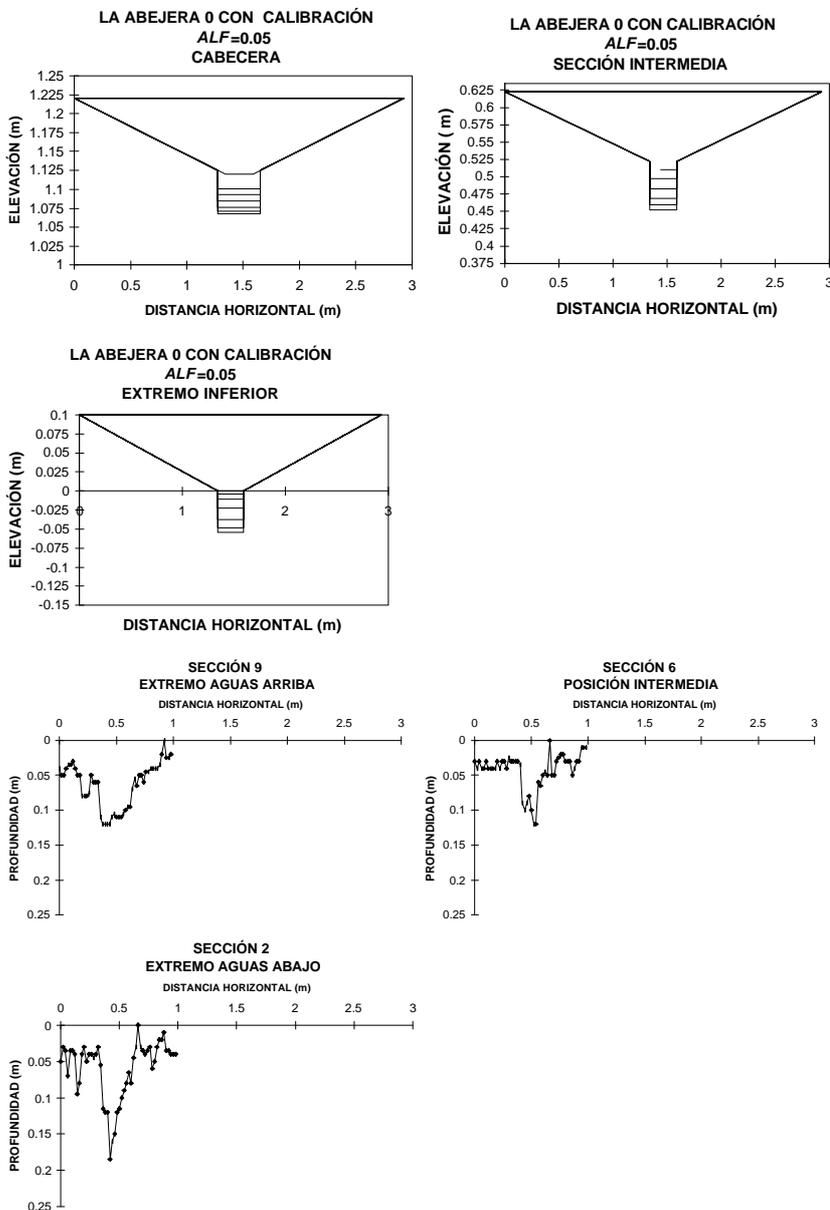


Figura 4.3.25.- Cuenca de La Abejera 0 con calibración volumétrica y de forma, $\alpha^*=0.05$. Variación de la caída vertical, y de la elevación y anchura del lecho.



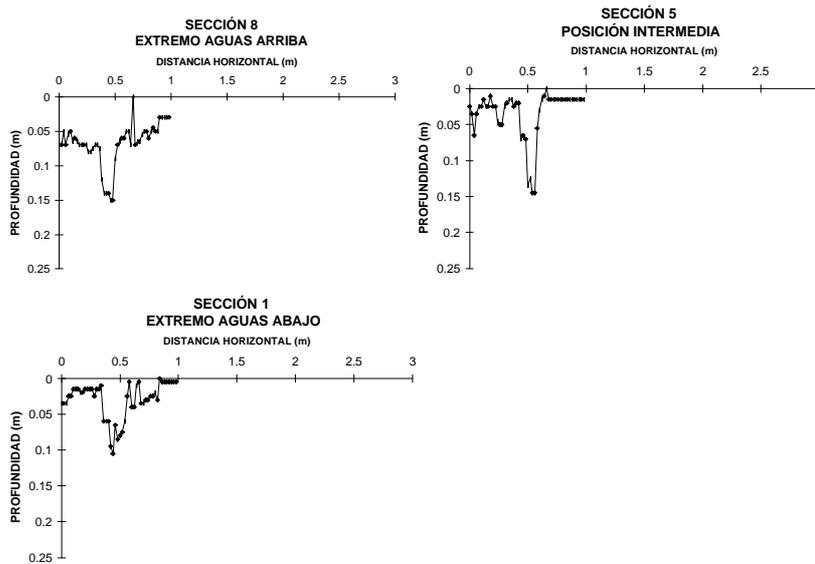


Figura 4.3.26.- Cuenca de La Abejera 0 con calibración volumétrica y de forma, $\alpha' = 0.05$. Secciones transversales del cauce, simuladas, en el extremo superior, sección intermedia y extremo aguas abajo. Comparación, a escala similar, con dos secciones medidas en cada una de las citadas posiciones.

La anchura ha disminuido en cabecera, siendo muy similar a la real, que no es estrecha. La profundidad en la cabecera y en la sección intermedia ha aumentado, manteniéndose la profundidad bastante uniforme en todo el tramo, y parecida a la que aparece en la realidad. Por tanto, se ha conseguido una simulación que podemos calificar de bastante adecuada, considerando el pequeño tamaño de la cárcava y la irregularidad de las formas de las secciones.

4.3.4. BREVE DISCUSIÓN GENERAL

Sin olvidar que los datos de campo disponibles son poco adecuados, el aspecto más importante es que el modelo ha podido ser calibrado de manera que simula adecuadamente la realidad, con valores razonables de los parámetros, no muy alejados de las estimaciones iniciales. Incluso la utilización de valores de parámetros simplemente estimados ha arrojado resultados realistas. Esta afirmación es mucho más cierta en el caso de cárcavas grandes como Cobaza, circulando caudales importantes, y en la que no ha sido necesario simular la formación de una cabecera. Ya se ha indicado que no hay certeza absoluta de que la cárcava de Cobaza se deba a la lluvia del 22 de enero de 1996, y que el dato del caudal es simplemente algo aproximado. Sin embargo, es razonable pensar que la realidad no estará demasiado alejada de estas suposiciones. Por tanto, si el modelo se ha podido calibrar adecuadamente bajo estas suposiciones, puede aceptarse que también se podrá calibrar adecuadamente en esas otras condiciones próximas y reales.

No se ha podido simular la aparición de una cabecera en el caso de La Matea II, único en el que la longitud de la cárcava no coincidía con la longitud del canal inicial. Los bajos caudales y el pequeño tamaño de la cárcava hacen de éste un caso quizás demasiado peculiar. En el caso de La Abejera 0, con limitaciones similares a las de La Matea II, se ha conseguido una simulación adecuada, aunque los valores de tamaño y densidad de las partículas necesarios para calibrar el modelo han sido bastante diferentes en relación a los de la cuenca de Cobaza. No se ha seguido ningún método concreto de optimización. De haberlo hecho, quizás se habrían conseguido valores finales más parecidos.

La utilización de la hipótesis de transporte no equilibrado no aparece como imprescindible para obtener buenas estimaciones con valores razonables de los demás parámetros, aunque tenerla en consideración con valores bajos de ρ' (ecuación 3.21) mejora claramente los resultados sin modificar grandemente las estimaciones de capacidad de transporte.

Este modelo incorpora muchos de los procesos implicados en la erosión por cárcavas, lo que constituye una herramienta de interés para el estudio pormenorizado del fenómeno. Hay procesos que no están incorporados, pero a la vista de los resultados positivos, no parecen ser de importancia primordial.

4.4. - APLICABILIDAD DEL MODELO

La disponibilidad de un modelo de este estilo permite ayudar a estudiar diversas cuestiones, como identificación de factores clave y de su importancia relativa. Por ejemplo, se ha visto cómo el coeficiente n de Manning es un factor fundamental. Este coeficiente está relacionado con la cubierta vegetal y con el manejo del suelo. En caso de no practicar el no laboreo, podría aconsejarse, desde el punto de vista de la erosión por cárcavas, un laboreo que aumente la aspereza en los periodos críticos.

Convenientemente calibrado, podría servir para estimar las pérdidas de suelo debidas a cárcavas efímeras en grandes extensiones de condiciones homogéneas, y para identificar áreas críticas donde extremar las posibles medidas de control. Desde este punto de vista, para todas estas aplicaciones se hace imprescindible contar con datos detallados de intensidad de precipitación, así como de modelos hidrológicos calibrados y operativos. Con el modelo calibrado podrían obtenerse tablas y gráficos del estilo a los de la figura 2.17 (índice *API*), para diferentes condiciones de lluvia, cubriendo amplios rangos de valores de áreas y pendientes.

Podría pensarse que, una vez calibrado el modelo para condiciones concretas de suelo y manejo, es ya aplicable a áreas de parecidas circunstancias. Ello en buena medida es cierto, pero hay parámetros como la anchura inicial del lecho, o la pendiente de los taludes, que no son propios de un tipo de suelo o manejo, sino que dependen de la topografía concreta de cada lugar. La estimación adecuada de estos parámetros no está aún resuelta. De todos modos, hay que recordar que la sensibilidad del modelo a estos parámetros no es muy grande en el rango de valores típico en cárcavas efímeras.

Como aspecto limitante para la utilización práctica surge el tema de la situación de cabeceras, no cubierto como tal por el modelo. La aplicación del modelo parece mucho más adecuada en casos en los que la hipótesis de limitación por transporte es más claramente aplicable, ya que es fácil que la degradación comience por el propio extremo aguas arriba. La citada hipótesis es razonable en circunstancias de suelo muy erosionable, flujos muy enérgicos, o mejor, en casos en los que se dan ambas circunstancias, en los que la situación de la cabecera reviste menor importancia, y es menos incierta: aparecerá prácticamente en el extremo aguas arriba del cauce considerado, ya desde los primeros instantes, como ocurre en la cuenca de Cobaza, lo que en la práctica equivale a la aproximación de la forma de la cuenca considerada en el modelo EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model) (ver figura 1.4.1).

Dado que el modelo sólo simula eventos concretos, hay que pensar, para la utilización del modelo en la aplicaciones citadas, en la circunstancia más crítica durante la campaña. En el caso de las tierras estudiadas en esta tesis, se trataría de las lluvias de finales de otoño e invierno.

Tratando sobre otras limitaciones, hay que recordar que el modelo no contempla el depósito del suelo erosionado, con las consecuencias que esta hipótesis pueda suponer, como lo que respecta a modificaciones en las condiciones del flujo aguas arriba de la zona de depósito. Ya que el modelo considera un único valor de la pendiente, el tramo a simular debe de mostrar una pendiente razonablemente uniforme. La aplicación del modelo debe de limitarse a suelos que puedan considerarse homogéneos en profundidad, y en los que los derrumbes de materiales laterales sean despreciables, como es el caso de la mayoría de las cárcavas efímeras.

5. 5.- CONCLUSIONES Y ORIENTACIONES PARA EL FUTURO.

De la revisión bibliográfica se concluye que, en el caso de España, y de Navarra en particular, el desconocimiento de la magnitud del problema de la erosión de suelo es muy grande, a pesar de que es considerado por muchos como un problema importante. Tampoco hay un conocimiento adecuado de las pérdidas que serían tolerables en las diversas circunstancias. Este desconocimiento es aún mayor en lo que respecta a la erosión por cárcavas efímeras, a pesar de que puede ser causante de una gran parte de las pérdidas de suelo en terrenos de cultivo de ambientes mediterráneos, de acuerdo con los escasos estudios existentes. Los procesos implicados en la erosión por cárcavas han sido todavía poco estudiados, en especial los relacionados con la migración de cabeceras. Además, los intentos de relacionar la erosión por cárcavas efímeras con parámetros topográficos sencillos ha sido en general un fracaso. De aquí se deduce el interés de contar con modelos basados en procesos físicos.

Las pérdidas de suelo debidas a cárcavas efímeras detectadas en una zona cultivada, elegida casi al azar, en el restringido entorno de unos suelos altamente erosionables del sudeste de Navarra, pueden calificarse de puntualmente muy importantes, durante dos años consecutivos, sin lluvias excepcionales. En efecto, en diversas subcuencas se han medido pérdidas máximas que oscilan entre 1.5 y 2.7kg/m²/año, claramente por encima de las tolerancias generalmente admitidas, pérdidas debidas exclusivamente a cárcavas efímeras, cuando es evidente que en la zona también se da erosión laminar y en surcos en los terrenos de cultivo. Si bien es importante tener conocimiento de la existencia de estos hechos, no lo es menos conocer la extensión de terreno a la que afectan, trabajo que queda por hacer. Un paso previo sería la identificación y cuantificación de las áreas ocupadas por este tipo de suelo, para lo que a su vez sería necesaria una detallada caracterización de estos suelos. Debe de estudiarse el cambio de uso definitivo de las áreas más sensibles si se quiere evitar la pérdida total del suelo a corto plazo, así como el uso generalizado de manejos poco impactantes, como el no laboreo.

Se han identificado en la zona de estudio, sometida recientemente a concentración parcelaria, y de acuerdo con el origen del agua, tres tipos fundamentales de cárcavas efímeras: cárcavas efímeras originadas por flujos provenientes del exterior de la parcela, generalmente por situarse la parcela en la trayectoria de redes de desagüe, principalmente naturales; cárcavas efímeras asociadas a discontinuidades, como pequeños taludes en las parcelas junto a los bordes de caminos; cárcavas efímeras propiamente dichas, es decir, las formadas por flujos provenientes de las propias parcelas. Al final del periodo octubre 1995-octubre 1996, el 57.1% de estas pérdidas fueron causadas por el primer tipo de cárcava; las cárcavas asociadas a discontinuidades supusieron el 23.3%, mientras que las cárcavas efímeras propiamente dichas fueron responsables del 19.6% de las pérdidas. Así, el 80.4% de las pérdidas se han producido como consecuencia de acciones no ligadas estrictamente al cultivo, sino de una ordenación poco cuidada de acuerdo con la red de desagüe y sin medidas de protección. La peculiaridad de las cárcavas asociadas a discontinuidades se pone de relieve, ya que requieren menores áreas y pendientes para producir pérdidas iguales o superiores a las de los otros tipos de cárcavas.

La época más crítica para la aparición de cárcavas efímeras parece ser el final del otoño y el comienzo del invierno, pues el suelo se haya poco protegido, con el cultivo, generalmente cereal, recién germinado, la humedad del suelo suele ser muy alta, y las precipitaciones pueden ser abundantes e intensas. En esas condiciones críticas, la intensidad mínima capaz de generar cárcavas se sitúa en el entorno de los 12mm/hr. Se ha encontrado una extrema sensibilidad a la intensidad de la precipitación en esa época crítica. Otra circunstancia crítica es el verano, después de la cosecha del cereal. Puede ser una circunstancia crítica secundaria, porque la humedad del suelo es menor, la probabilidad de lluvias es también menor, aunque puedan ser intensas, y porque los restos del cultivo protegen en parte al suelo, al menos hasta que son quemados o enterrados. De todos modos, una lluvia importante en agosto de 1997 ha causado erosión espectacular, laminar, en surcos y en cárcavas, en casi todas las parcelas de la zona de estudio que se encontraban labradas y desprovistas de vegetación, mientras que apenas ha causado daños en parcelas protegidas. Esto pone de relieve una vez más la eficacia de la cubierta vegetal en la protección del suelo, por lo que técnicas como la siembra directa pueden ser muy interesantes.

Estas observaciones destacan la importancia de acontecimientos aislados de lluvia, pues la casi totalidad de las pérdidas del periodo octubre 1995- octubre 1996 se deben a la lluvia del 22 de enero, y casi la totalidad de las del periodo octubre 1996-agosto 1997 se deben a la del 20 de agosto. La extrema

importancia de la intensidad, incluso actuando durante muy breves minutos, pone de manifiesto la necesidad de contar con datos muy precisos de esta variable. Brevísimos periodos de alta intensidad durante periodos críticos pueden bastar para causar la casi totalidad de las pérdidas de un año, como se ha visto en la lluvia del 22-1-96. Una caracterización adecuada de las precipitaciones en las épocas críticas podría ilustrar grandemente la probabilidad de pérdidas importantes.

En cuanto a las medidas posibles de control, se hace necesario plantear adecuadamente los objetivos perseguidos, y la viabilidad de las medidas desde un punto de vista económico y ambiental, sin olvidar la necesidad de integrar todo en una política de ordenación más global. Además, no hay experiencias sobre la efectividad e idoneidad de las posibles medidas en nuestro entorno.

La pequeña magnitud de la mayoría de las cárcavas encontradas, aunque no por ello poco importantes, no permite su detección mediante fotografías aéreas, por lo que su utilización para realizar mediciones causaría una clara infravaloración. El método utilizado para la medición de cárcavas ha resultado útil. Sin embargo, de cara a mediciones frecuentes de gran cantidad de secciones resulta muy conveniente disponer de algún sistema automatizado.

Mediante índices topográficos como *API* ha sido posible estimar la pérdida de suelo debida a cárcavas efímeras propiamente dichas, aunque el escaso número de puntos tratados hace que haya que tomar con mucha precaución este resultado. Suponiendo que se confirme esta buena respuesta del índice, su uso en la práctica requeriría de colecciones de datos mucho más extensas, tanto de pérdidas de suelo en condiciones diversas, como de registros pluviográficos.

En la zona de estudio se han encontrado otras variadas formas de erosión además de las citadas en parcelas cultivadas, causantes de grandes pérdidas de suelo, por lo que, a nivel de cuenca mayor que las parcelas, las pérdidas también pueden ser muy importantes. En las zonas no cultivadas se han detectado abundantes surcos y cárcavas permanentes, y la degradación de cunetas, drenes perimetrales y colectores de avenamiento ha aportado muy grandes cantidades de sedimentos, posiblemente muchísimo mayores que las causadas por cárcavas efímeras, durante los pocos años de vida de estas obras. A modo de ejemplo, en un colector de avenamiento de 600m de longitud, que drena unas 40ha se ha medido una pérdida de unos 2200m³ al cabo de unos 10 años de existencia. Este hecho pone también de relieve la necesidad de contar con métodos y criterios más adecuados para el diseño de estas estructuras. Al igual que se comentaba anteriormente, es necesario conocer la extensión en la que se producen problemas de este estilo.

Por tanto, las acciones llevadas a cabo recientemente en la zona como consecuencia de la concentración parcelaria, como construcción de caminos, colectores, cunetas y reordenación de las parcelas, han causado un impacto muy negativo desde el punto de vista de las pérdidas de suelo, y debe ser algo a tener en consideración a la hora de emprender acciones futuras, incluida la puesta en riego, en este área y en otras de características similares.

Simple observaciones llevadas a cabo en otras zonas de Navarra tenidas como poco afectadas por erosión indican la importancia que las pérdidas de suelo han tenido este año, por cárcavas efímeras y por otros tipos de erosión, por lo que el problema puede ser más importante de lo que pudiera parecer.

De todo esto se deduce la necesidad de realizar programas continuados de mediciones con el fin de conocer realmente la situación, punto de partida imprescindible para cualquier acción posterior. La disponibilidad de datos posibilitaría la puesta a punto de modelos de simulación, capaces de estimar las consecuencias a largo plazo de las situaciones actuales, y de las posibles medidas correctoras.

El modelo propuesto para el estudio de la erosión en cárcavas efímeras ha podido calibrarse con valores razonables de los parámetros, para simular la aparición y desarrollo de una cárcava medida, aunque los caudales que la originaron sólo pudieron ser estimados. El modelo simuló adecuadamente la magnitud de la erosión y la forma del cauce, incluyendo su variación espacial. Aunque el caudal no fue medido, es razonable pensar que la situación real no estará muy alejada de la utilizada en la calibración, por lo que el modelo también podrá calibrarse adecuadamente en ese caso. La hipótesis de transporte de sedimentos no equilibrado parece muy aplicable, y no ha sido necesario alejarse mucho de las estimaciones de equilibrio para conseguir resultados aceptables, aunque son necesarios estudios específicos. El uso del modelo así calibrado con otras lluvias arroja resultados coherentes. Los parámetros a los que el modelo se muestra más sensible son densidad y tamaño de las partículas y coeficiente *n* de Manning. El coeficiente *K* y el

esfuerzo cortante crítico τ_c de la ecuación para calcular la erosión en el lecho tienen gran trascendencia en la forma del cauce. Aunque el modelo está aún muy poco contrastado y evidentemente adolece de limitaciones, puede ser un buen punto de partida para abordar el estudio de los procesos de la erosión en cárcavas, pues se realizó un tratamiento que abarca una buena parte de la complejidad implicada.

Se han detectado numerosos aspectos en cuyo estudio es necesario profundizar en el futuro. Los más importantes se citan a continuación.

Resulta imprescindible la obtención de datos de campo que clarifiquen ciertos aspectos del fenómeno aún hoy poco conocidos, como el tamaño y densidad de las partículas que se erosionan por las cárcavas efímeras. También es necesario estimar mejor la capacidad de transporte de estos flujos.

La disponibilidad de datos de campo permitiría calibrar el modelo desarrollado y hacerlo aplicable. La existencia de experiencias de campo, bien con flujos de origen natural, bien con flujos artificiales, posibilitaría responder a otras preguntas, de el estilo a cómo tiene lugar realmente la evolución del cauce y la rapidez de esa evolución, si los derrumbamientos tienen o no importancia, o cómo contemplar el proceso de aparición y evolución de cabeceras. Sería conveniente, por otro lado, incorporar al modelo una componente capaz de considerar la citada cabecera, aunque hoy día no hay una metodología adecuada disponible.

Ha quedado también patente la necesidad de disponer de métodos calibrados para la estimación de hidrogramas, y lo imprescindible de contar con datos más abundantes y detallados sobre intensidad de precipitación, a la que este tipo de erosión se muestra muy sensible. Deberá también estudiarse en un futuro la incorporación al modelo de hidrogramas, y no sólo caudales punta medios. Dadas las características del flujo en las cárcavas, el considerar un régimen completamente variable en el modelo puede ser más adecuado, aunque más complejo, que el régimen hidráulico en periodo expandido. Además, podría pensarse en posibilitar al modelo para realizar simulaciones continuas, o de varios eventos.

El comportamiento del suelo rara vez es homogéneo en profundidad. De hecho, es muy frecuente que las cárcavas alcancen la suela de labor. A partir de ese momento, el crecimiento de las mismas se ve modificado. Sería de interés introducir la posibilidad de considerar un crecimiento de este tipo, y de los derrumbes en voladizo que tendrían lugar en consecuencia. Además, la aplicabilidad del modelo en cárcavas grandes requiere la consideración de derrumbes en bloque. La posibilidad de simular cauces con tramos de diversas pendientes y la sedimentación que tendría lugar es también un aspecto de interés.

REFERENCIAS

- Alberts, E.E., W. C. Moldenhauer y G. R. Foster, 1980. Soil Aggregates and Primary Particles Transported in Rill and Interrill Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:590-595.
- Alonso, C. V. y S. T. Combs, 1990. Streambank Erosion Due to Bed Degradation. A Model Concept. *Trans. ASAE*, 33:1239-1248.
- Alonso, C. V., Neibling, W. H. y G. R. Foster, 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Trans. ASAE*, 24:1211-1220, 1226.
- Arcement, G. J. y V. R. Schneider, 1989. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339. Denver
- Arnal, P., 1994. Laboreo de conservación. Universidad Pública de Navarra (UPNA)-Instituto Técnico de Geastión (ITG). Curso de Agricultura y Medio Ambiente. Pamplona, 21-25 Noviembre 1994.
- Arulanandan, K., E. Gillogley y R. Tully, 1980. Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils. Tech. Report GL-80-5. U.S. Army Engineers, Waterways Experimentation Station, Wicksburg.
- ASCE Task Committe on Flood Hazard Analysis on Alluvial Fans, 1990. Erodible channel models: state of the art review. en *Hydraulics/Hydrology of Arid Lands*. R. H. French (ed.), ASCE, Nueva York, pp 428-434.
- Bell, R. G. y A. J. Sutherland, 1983. Non-equilibrium bed load transport by steady flows. *J. of Hydr. Engng.*, 109: 251-367.
- Benito, G., M. Gutiérrez y C. Sancho, 1992. Erosion Rates in Badland Areas of the Central Ebro Basin (NE-Spain). *Catena* 19: 269-286.
- Bennett, J. P., 1974. Concepts of Mathematical Modeling of Sediment Yield. *Water Resources Research*, 10:485-492.
- Bennett, S., C. V. Alonso, S. N. Prasad y M. J. M. Römken, 1997. Dynamics of head-cuts in upland concentrated flows. en *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration*, S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, pp. 510-515.
- Bradford, J. M. y R. P. Piest, 1977. Gully wall stability in loess-derived alluvium. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 41:115-122.
- Bradford, J.M. y R. P. Piest, 1980. Erosional development of valley-bottom gullies in the Upper Midwestern United States. en *Thresholds in Geomorphology*, D. Coates y J.D. Vitek, eds. Allen & Unwin, Londres. pp 75-101.
- Bradford, J. M., D. A. Farrell y W. E. Larson, 1973. Mathematical evaluation of factors affecting gully stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 37:103-107.
- Bradford, J. M., R. P. Piest y R. G. Spomer, 1978. Failure sequence of gully headwalls in Western Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:323-328.
- Bresler, E., B.L. McNeal y D.L. Carter, 1982. Saline and Sodic Soils. Principles-Dynamics-Modeling. Springer-Verlag, Berlín.
- Brunsdon, D. y D. B. Prior (eds.), 1984. Slope Instability. John Wiley & Sons, Nueva York.
- Chaudhry, M. H., 1993. Open Channel Flow. Prentice Hall, Englewood Cliffs.

- Chen, Y. H., 1973. Mathematical modeling of water and sediment routing in natural channels. Ph.D. diss., Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins.
- Choudhury, S. A., 1995. Modeling and simulation of Aggradation, Degradation and Meander Bed Evolution of Alluvial Rivers. Ph.D diss., Universidad de Mississippi, Oxford.
- Chow, V.T., 1958. Open-channel Hydraulics. McGraw-Hill, Nueva York.
- Dabney, S. M., L. D. Meyer, y K. C. McGregor, 1997a. Sediment control and landscape modifications with grass hedges. en Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration, S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, pp. 1093-1099.
- Dabney, S. M., C. E. Murphree, L. D. Meyer, E. H. Grissinger, W. C. Harmon y G. B. Triplett, 1997b. Runoff and sediment yield from conventional and conservation cropping systems. en Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration, S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, pp. 983-989.
- De Ploey, J., 1988. No-tillage experiments in the Central Belgian Loess Belt. Soil Techn Ser., 1: 181-184.
- De Ploey, J., 1989. A Model for Headcut Retreat in Rills and Gullies. Catena Supplement 14:81-86.
- Del Valle de Lersundi, J. M. y J. Del Val, 1990. Procesos de erosión y análisis de sus condicionantes en una región semi-árida: la Cuenca de Cornialto (Bardenas, Navarra). Cuaternario y Geomorfología, 4: 55-67.
- Del Valle de Lersundi, J. y M. Donézar, 1995a. Erosión hídrica en las áreas cultivadas de Navarra. Navarra Agraria, 91: 25-32.
- Del Valle de Lersundi, J., y M. Donézar, 1995b. Erosión hídrica en las áreas no cultivadas de Navarra. Navarra Agraria, 90: 37-43.
- Desmet, P. J. J. y G. Govers, 1995. Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models and Their Implications for the Prediction of the Location of Ephemeral Guillies. Proceedings of the First Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information. La Haya. pp 324-330.
- De Vries, M., 1971. Solving river problems by hydraulic and mathematical models. Publication n° 76II, Delft Hydraulics Laboratory.
- Dietrich, W. E., 1982. Settling Velocity of Natural Particles. Water Resources Research, 18:1615-1626.
- Donézar, M., M. Illarregui, J. Del Val y J. Del Valle de Lersundi, 1990a. Erosión actual en Navarra. Gobierno de Navarra. Ministerio de Comercio y Turismo.
- Donézar, M., M. Illarregui, J. Del Val, y J. Del Valle de Lersundi, 1990b. Erosión potencial en Navarra. Gobierno de Navarra. Ministerio de Comercio y Turismo.
- Elías, F., y L. Ruíz, 1986. Caracterización agroclimática de Navarra. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes del Gobierno de Navarra. Madrid.
- Engman, E.T., 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 112:39-53.
- Flanagan, D. C., S. Livingston (eds.), 1995. WEPP User Summary. USDA-ARS. West Lafayette.
- Flanagan, D. C. y M. A. Nearing (eds.), 1995. USDA-Water Erosion Prediccion Project. Hillsolpe Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) NSERL Report No 10, West Lafayette.
- Foster, G. R. 1982a. Channel erosion within farm fields. Preprint 82-007. American Society of Civil Engineers. Nueva York.

- Foster, G. R., 1982b. Modeling the erosion process. en *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. C.T. Haan (ed.). ASAE, St. Joseph, pp 297-380.
- Foster, G. R., 1986. Understanding ephemeral gully erosion. In *Soil Conservation. Assessing the National Resources Inventory. Vol 2. Committee on Conservation Needs and Opportunities. Board on Agriculture. National Research Council. National Academy Press, Washington*, pp 90-125.
- Foster, G. R. y L. J. Lane, 1983. Erosion by concentrated flow in farm fields. en *Proc. of the D. B. Simons Symposium on Erosion and Sedimentation. Colorado State University. Ft. Collins*. pp. 9.65-9.82
- Foster, G. R. y L. D. Meyer. 1972a. A closed-form soil erosion equation for upland areas. en *Sedimentation (Einstein)*, Chapter 12. H. W. Shen (ed.), Colorado State University, Fort Collins. pp 12.1-12.17
- Foster, G. R. y L. D. Meyer. 1972b. Transport of soil particles by shallow flow. *Trans. ASAE*, 15:99-102.
- Foster, G. y D. Meyer. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. en *Present an Prospective Technology for Predicting sediment Yields ans Sources. Proc. Sediment-yield workshop, USDA Sediment. Lab., Oxford, Miss. USDA-ARS-S-40. Washington*. pp190-207
- Foster, G. R., L. J. Lane, J. D. Nowlin, J. M. Laflen y R. A. Young, 1980. A model to estimate sediment yield from field-sized areas: development of the model. *CREAMS A Field Scaled Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, Conserv. Report N° 26, Volume 1: Model Documentation, 3, USDA-SEA, Washintong*, pp 36-64.
- Fullen, M. A., 1985. Compaction, hydrological processes and soil erosion on loamy sands in East Shropshire, England. *J. Soil and Tillage Research*, 6:17-29.
- Giráldez, J. V., A. Laguna y P. González, 1989. en U. Schwertmann y K. Auerswald (eds.). *Soil erosion protection measures in Europe. Soil Techn. Ser. Cremlingen*, 1: 139-147.
- Giráldez, J. V. y P. González, 1994. No-tillage in clay soils under mediterranean climate: Physical aspects. *Proceedings of the EC-Workshop-I. Giessen, 27-28 June*. pp 111-118.
- Giráldez, J. V., P. González, R. Ordóñez, A. Laguna y J. M. de Haro, 1997. Conservation tillage under extreme meteorological conditions in Southern Spain. *Proceedings of the EC-Workshop-III. Évora, 1-2 April, 1996*. pp 119-125.
- Govers, G., 1991. Time dependency of runoff velocity and erosion: the effect of the initial soil moisture profile. *Earth Surf. Proc. Land*, 16: 713-729.
- Govers, G. y J. Poesen, 1988. Assesment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology*, 1:343-354.
- Govers, G., W. Everaert, J. Poesen, G. Raws, G., J. De Ploey y J.P. Lautridou, 1990. A long-flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surf. Proc. and Land.*, 15: 313-328.
- Grissinger, E. H., 1996a. Reclamation of Gullies and Channel Erosion. en *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. Agassi, M. (ed.). Marcel Dekker, Nueva York, pp 301-313.
- Grissinger, E. H., 1996b. Rill and gullies erosion. en *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. Agassi, M. (ed.). Marcel Dekker, Nueva York, pp 153-167.
- Grissinger, E. H. y J. B. Murphey, 1989. Ephemeral gully erosion in the loess uplands, Gordwin Creek Watershed. Northern Mississippi, USA. en *International Training Center on Erosion and Sedimentation (ed.). Proceedings of the Fourth International Symposium on River Sedimentation, Beijing, China, June 5-9. China Ocean Press, Beijing*.

- Gutiérrez, M., G. Benito y J. Rodríguez, 1988. Piping in badlands areas of the Middle Ebro Basin, Spain. en *Geomorphic Processes. Environments with strong seasonal contrasts*. Vol. II *Geomorphic Systems*. Harvey & Sala (eds.). Catena suplement 13, pp 49-60.
- Gutiérrez, M., C. Sancho, G. Benito, J. Sirvent y G. Desir, 1994. Procesos generadores de piping en zonas de badlands en la Depresión del Ebro. en *Geomorfología en España*. J. Arnáez y J. M. García Ruíz (eds.). Sociedad Española de Geomorfología. pp 277-285.
- Hagerty, D. J., 1991a. Piping/Sapping Erosion. I: Basic Considerations. *J. Hydr. Engng.*, 117:991-1008.
- Hagerty, D. J., 1991b. Piping/Sapping Erosion. II: Identification and Diagnosis. *J. of Hydr. Engng.*, 117:1009-1025.
- Harmon, W. C., L. D. Meyer y C. V. Alonso, 1989. A new method for evaluating particle size distribution and aggregated portion of eroded sediment. *Trans. ASAE*, 32:89-96.
- Hauge, C. J., 1977. Soil erosion definitions. *California Geology*, 30:202-203.
- Jackson, T. J., J. C. Ritchie, I. White y L. LeSchack, 1988. Airborne Laser Profile Data for Measuring Ephemeral Gully Erosion. *Photogram. Eng. Rem. Sens.*, 54:1181-1185.
- Klute, A. (ed.), 1986. *Methods of soil Analysis. Part 1- Physical and mineralogical methods*. ASA Monograph n° 9. Madison.
- Knisel, W. G. (ed.), 1980. *CREAMS A Field Scaled Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*, Conserv. Report N° 26, Volume 1: Model Documentation, Chapter 3, USDA-SEA, Washintong.
- Laflen, J. M., R. E. Highfill, M. Amemiya y C. M. Mutchler, 1985a. Structures and methods for controlling water erosion. en *Soil erosion and crop productivity*. R. F. Follet y B. A. Stewart, (eds.). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp 431-442.
- Laflen, J.M., D. A. Watson y T. G. Franti, 1985b. Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. *Proc. Fourth Int.Conf. on Soil Conservation*, 3-8 de Noviembre, Maracay, Venezuela.
- Laguna, A., 1989. Análisis cuantitativo de la erosión del suelo. Tesis doctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. E.T.S.I.A.M.
- Lal, R y W. Elliot, 1994. Erodibility and erosivity. en Lal, R (ed.), *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, pp 181-208.
- Lawler, D. M., N. Harris y G. J. L. Leeks, 1997. Automated monitoring of bank erosion dynamics: applications of the Novel Photo-Electronic Erosion Pin (PEEP) system in upland and lowland river erosion. en *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration*, S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, pp. 249-255.
- Lázaro, I., 1996. Estimación de la erosión hídrica y de la escorrentía en cuencas cultivadas mediante un modelo distribuido. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- Lentz, R. D., R. H. Dowdy y R. H. Rust, 1993. Soil property patterns and topographic parameters associated with ephemeral gully erosion. *J. Soil Water Conserv.*, 48: 355-361.
- Lohnes, R. A. y R. L. Handy, 1968. Slope angles in friable loess: *J. Geol.*, 76: 247-258.
- Merkel, W.H., D.E. Woodward y C.D. Clarke, 1989. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. en *Proceedings of the International Symposium of Sediment Transport Modeling*. ASAE, St Joseph, pp. 356-361.

- Meyer, L. D., S. M. Dabney, C. E. Murphree, W. C. Harmon y E. H. Grissinger, 1997. Effects of cropland management practices on runoff and erosion. en *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration*. S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, pp. 990-995.
- Moore, I. D., G. J. Burch, y D. H. Mackenzie, 1988. Topographic Effects on the Distribution of Surface Soil Water and the location of Ephemeral Gullies. *Trans. ASAE*, 31:1098-1107.
- Morgan, R.C.P., 1986. *Soil erosion and conservation*. Longman. Londres.
- Nearing, M. A., L. D. Ascough y H. M. L. Chaves, 1989. WEPP Model Sensitivity Analysis. en *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation*. L. J. Lane y M.A. Nearing (eds.). NSERL Report n°2, West Lafayette. pp 14.1-14.33.
- Nearing, M. A., L. J. Lane y V. L. Lopes, 1994. Modeling soil erosion. en *Soil Erosion Research Methods*. Lal, R. (de.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, pp 127-156.
- Olsen, O. J. y Q. L. Florey, 1952. Sedimentation studies in open channels. Boundary shear and velocity distribution by membrane analogy, analytic and finite difference methods. Report N° Sp-34, U.S. Bureau of Reclamation, Washington.
- Osman, A. M. y C. R. Thorne, 1988. Riverbank Stability Analysis. I: Theory. *J. Hydr. Engng.*, 114:134-150.
- Patton, P.C. y S.A. Schumm, 1975. Gully Erosion, Northwestern Colorado: A Threshold Phenomenon. *Geology*, 3: 88-90.
- Piest, R. F., Bradford, J. M. y R. G. Spomer, 1975 a. Mechanisms of erosion and sediment movement from gullies. en *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*, ARS-S-40, ARS-USDA, Washington, p. 162-176.
- Piest, R. F., J. M. Bradford y G. M. Wyatt, 1975 b. Soil erosion and sediment transport from gullies. *J. Hydr. Div., ASCE*, 101: 65-80.
- Piest, R. F., L. S. Elliot, y R. G. Spomer, 1977. Erosion of the Tarkio drainage system, 1845-1976. *Trans. ASAE*, 38:429-434.
- Poesen, J., 1988. A review of the studies of mechanisms of incipient rilling and gulling in the Belgian Loess Region. *Proceedings International Symposium on Erosion in S.E. Nigeria*. Vol.1 NO.1 pp. 13-20
- Poesen, J., 1989. Conditions for Gully Formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Techn. Ser.*, 1:39-52.
- Poesen, J., 1993. Gully tipology and gully control measures in the European loess belt. en *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. S. Wicherek (ed.). Elsevier, Amsterdam. pp 221-239.
- Poesen, J. y G. Govers, 1990. Gully Erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures. en *Soil Erosion on Agricultural Land*. J. Boardman, I. D. L. Foster y J. A. Dearing (eds.). John Wiley & Sons, Londres. pp 513-530.
- Poesen, J., K. Vandaele y B. Van Wesemael, 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. en *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. D. E. Walling y B. W. Webb (eds.). IAHS Publ. n° 236. pp 251-266.
- Rauws, G. y G. Govers. 1988. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *J. Soil Sci.*, 39: 111-124.
- Rawls, W. J. y D. L. Brakensiek, 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. en *Unsaturated flow in hydrologic modeling. Theory and practice*. H. J. Morel-Seytoux (ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 275-300.

- Robinson, K. M. y G. J. Hanson, 1994. A deterministic Headcut Advance Model. *Trans. ASAE*, 37:1437-1443.
- Rothon, F. E., L. D. Meyer y F.D. Whisler, 1982. A laboratory method for predicting the size distribution of sediment eroded from surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 46:1259-1263.
- Rubio, J.L., 1995. Desertificación en la Europa Mediterránea. Seminario sobre desertificación y cambio climático. Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Santander.
- Ruiz-Flaño, P., 1993. Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo. *Geoforma Ediciones*. Logroño.
- Sancho, C., G. Benito y M. Gutiérrez, 1991. Aguas de erosión y perfiladores microtopográficos. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. nº 2. *Geoforma Ediciones*. Logroño.
- Schertz, D. L., 1983. The basis for soil loss tolerances. *J. Soil Water Conserv.*, : 10-14.
- Sharpley, S. J., S.J. Smith, J. A. Zollweg y G. A. Coleman, 1996. Gully treatment and water quality in the Southern Plains. *J. Soil Water Conserv.*, 51:498-503.
- Soil Science Society of America, 1975. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison.
- Spomer, R. G. y A. T. Hjelmfelt, 1986. Concentrated flow erosion on conventional and conservation tilled watersheds. *Trans ASAE*, 29:124-127.
- Thomas, W. A., 1972. Using a scour on deposition model to determine sediment yield, paper presented at the Sediment Yield Workshop, USDA Lab., Oxford, Miss., Nov. 1972.
- Thomas, A. W. y R. Welch, 1988. Measurement of Ephemeral Gully Erosion. *Trans. ASAE*, 31:1723-1728.
- Thorne, C. R. y A. M. Osman, 1988. Riverbank Stability Analysis. II: Applications. *J. of Hydr. Engng.*, 114:151-172.
- Thorne, C.R., L.W. Zevenbergen, E.H. Grissinger y J.B. Murphey, 1986. Ephemeral Gullies as sources of sediments. *Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference*, 1:3-152, 3-161.
- Torri, D., M. Sfalanga y G. Chisci, 1987. Threshold conditions for incipient rilling. en *Rill Erosion*. R. B. Bryan (ed.). *Catena Supplement* 8:97-105.
- Triplett, G. B., S. M. Dabney, S. R. Spurlock y L. L. Reinschmied, 1997. Management systems for soil conservation and sustainable crop productivity. en *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration*, S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). *The University of Mississippi*, pp. 1087-1092.
- USDA-SCS, 1992. *Ephemeral Gully Erosion Model. EGEM. Version 2.0 DOS User Manual*. Washington.
- Vandaele, K., 1993. Assesment of factors affecting ephemeral gully erosion in cultivated catchments of the Belgian Loam Belt. en *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. S. Wicherek (ed.). Elsevier, Amsterdam, pp 125-136.
- Vandaele, K., J. Poesen, G. Govers y B. van Wesemael, 1996a. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology*, 16:161-173.
- Vandaele, K., J. Poesen, J. R. Marques da Silva y P. Desmet, 1996b. Rates and predictability of ephemeral gully erosion in two contrasting environments. *Geomorphologie: Relief, processus, environnement*, 2:83-96.
- Wang, Y., G. R. Foster y B. N. Wilson, 1992. Distribution of Boundary Shear Stress in Erodible Channles. *ASAE Paper No.:* 92-2002.

Watson, D. A., J. M. Laflen y T. G. Franti. 1986. Estimating Ephemeral Gully Erosion. ASAE Paper n° 86-2020.

Woolhiser, D. A., 1975. Simulation of unsteady overland flow. en Unsteady Flow in Open Channels, v. II. K. Mahmood y V. Yevjevich (eds.). Water resources Publications, Fort Collins.

Woolhiser, D.A., R.E. Smith y D. C. Goodrich, 1990. KINEROS. A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. USDA-ARS-77. Washington.

Yang, C. T., 1973. Incipient motion and sediment transport. J. Hydr. Div., 99:1679-1704.

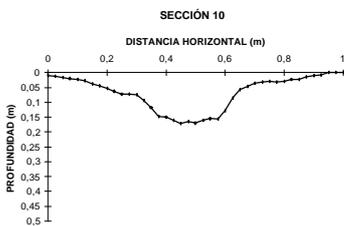
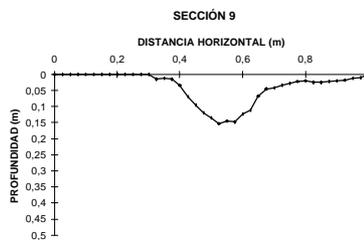
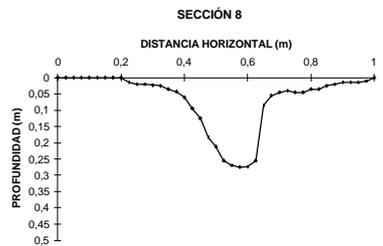
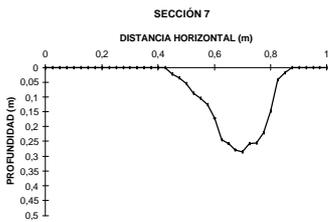
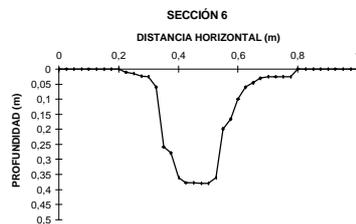
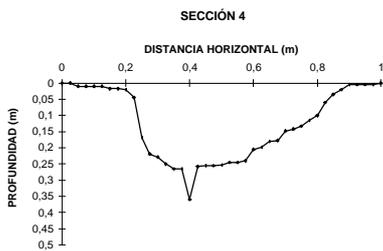
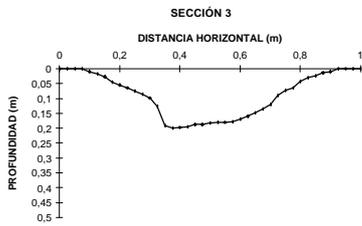
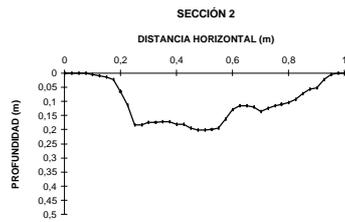
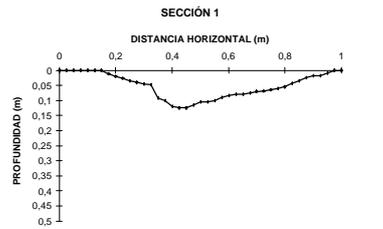
Young, R. A., 1980. Characteristics of eroded sediment. Trans. ASAE, 23: 1139-1142, 1146.

Zevenbergen, L. W., 1987. Modelling Erosion Using Terrain Analysis. Ph. D. Dissertation. Department of Geography and Earth Science. Universidad de Londres.

ANEJOS

ANEJO I

**MEDICIONES DE SECCIONES
TRANSVERSALES DE CÁRCAVAS**



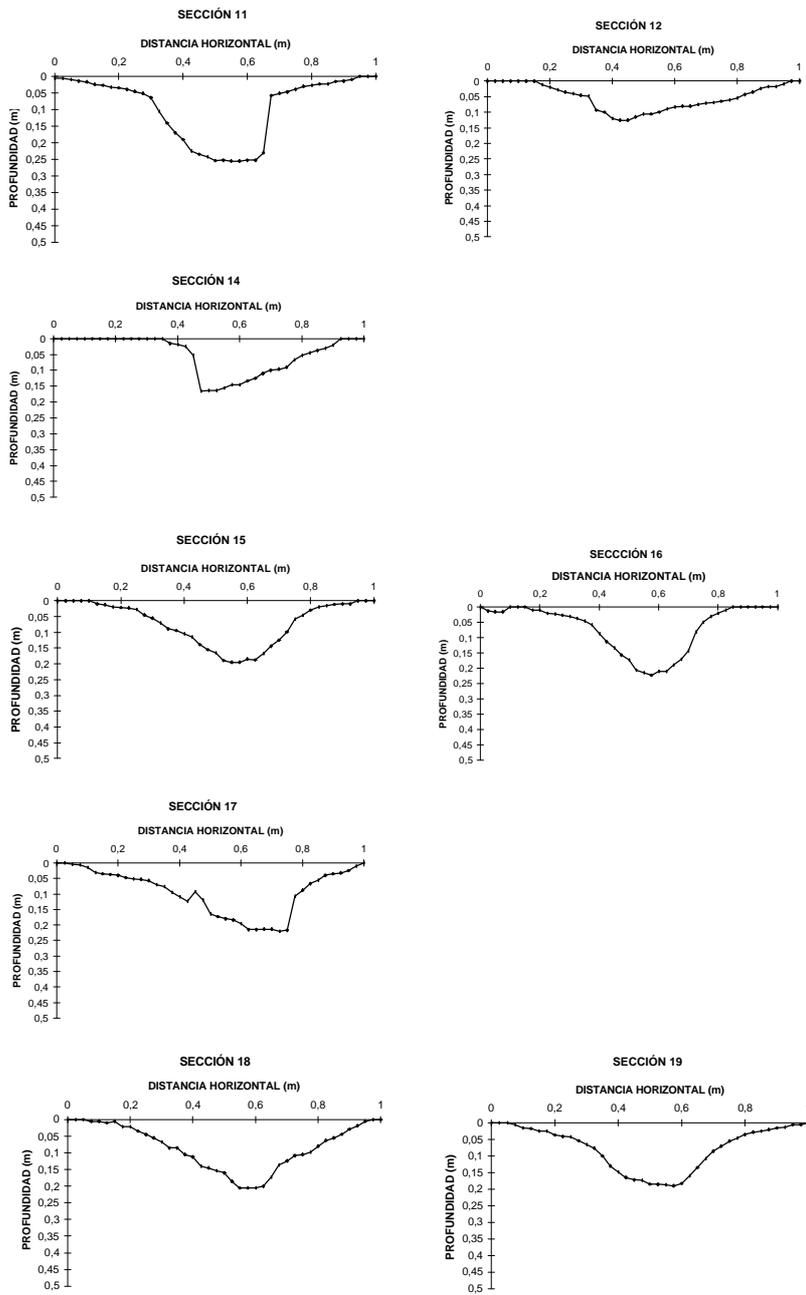


Figura I.1.1.- Perfiles transversales de las secciones controladas en la cárcava de La Abejera 0

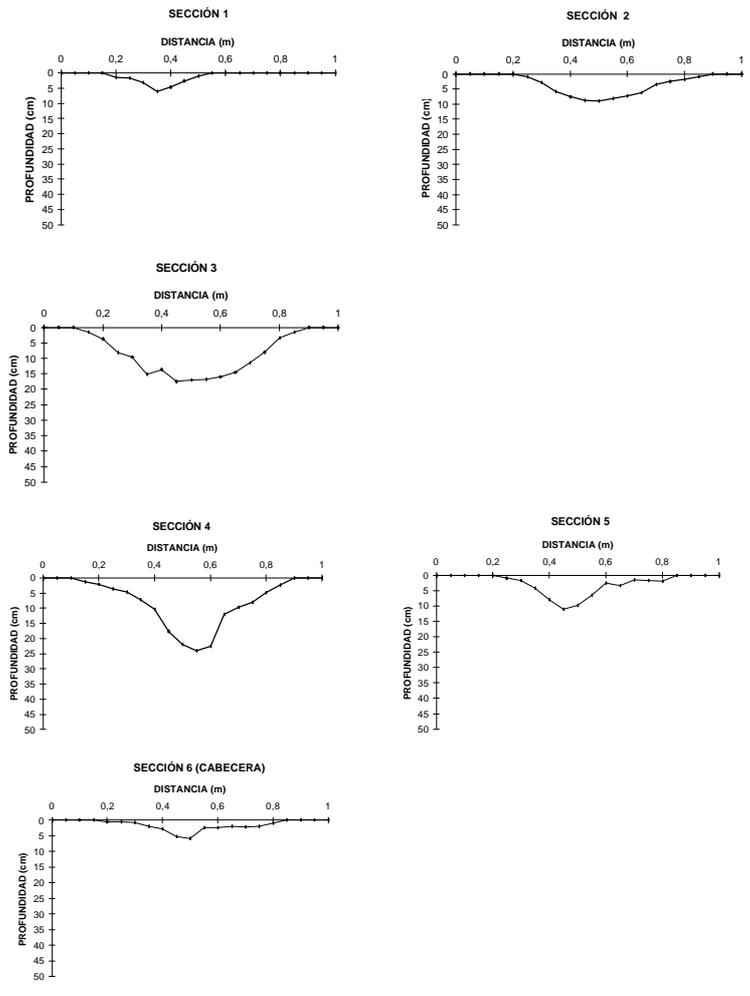
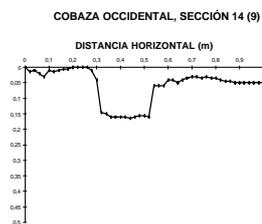
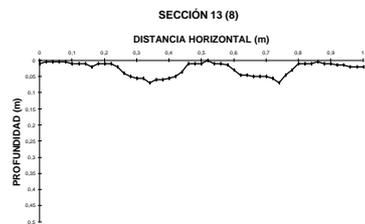
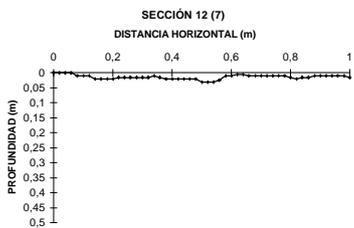
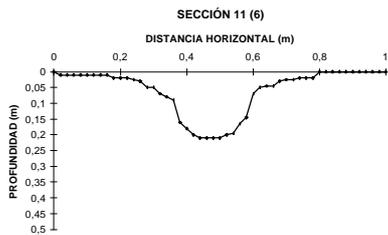
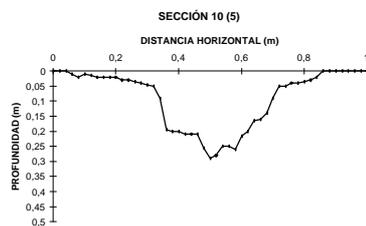
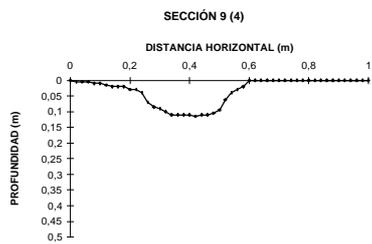
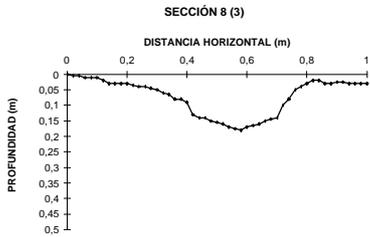
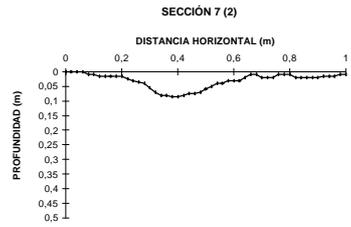
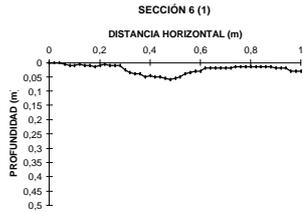


Figura I.1.2.- Secciones transversales cárcava de La Abejera 1, aproximadamente equidistantes desde el extremo aguas abajo de la cárcava



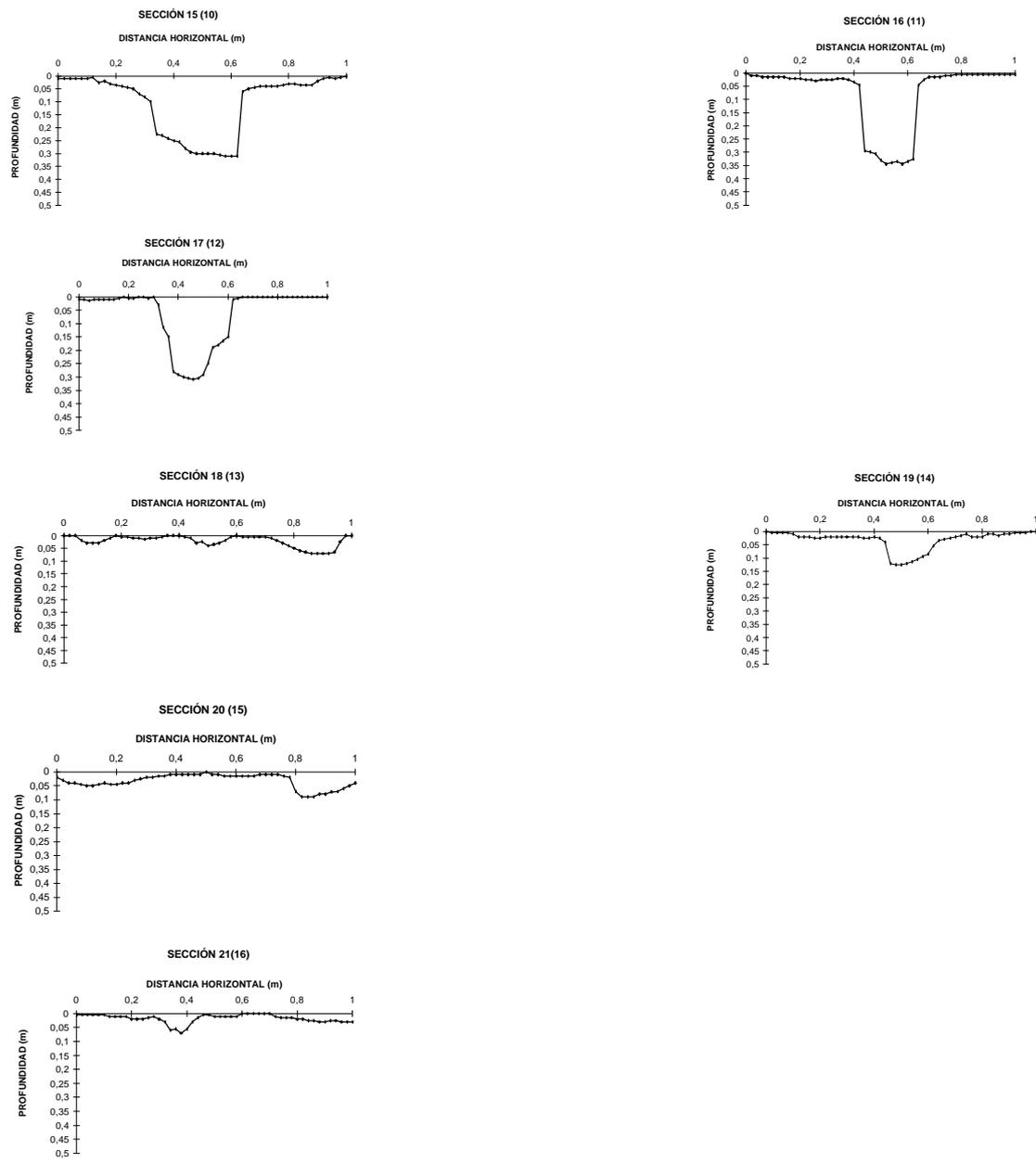
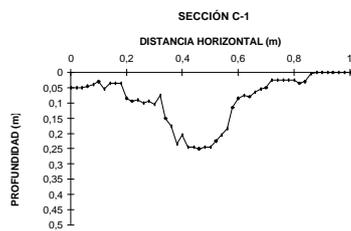
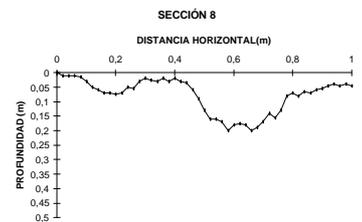
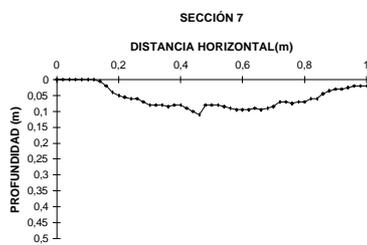
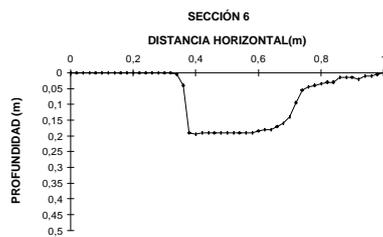
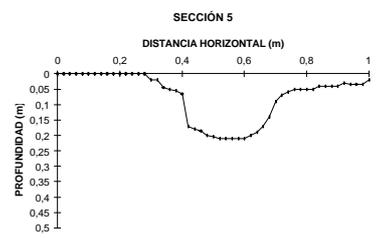
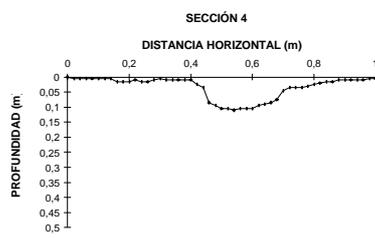
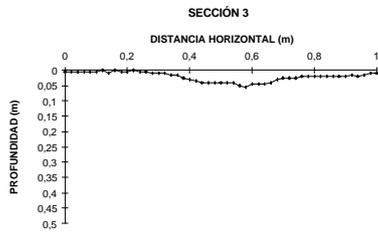
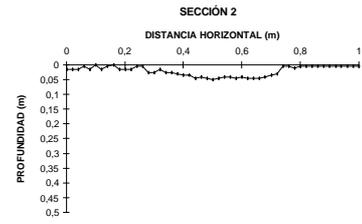
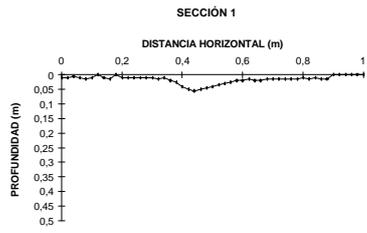
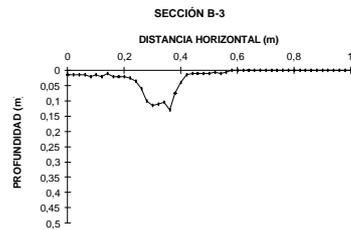
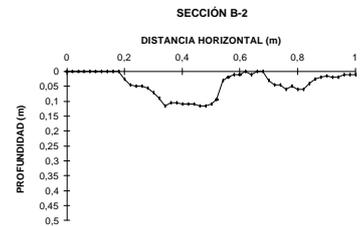
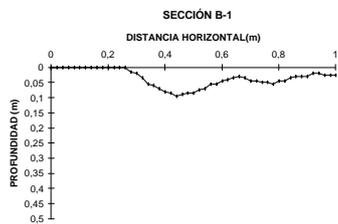
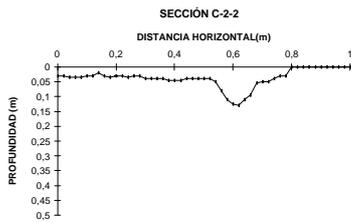
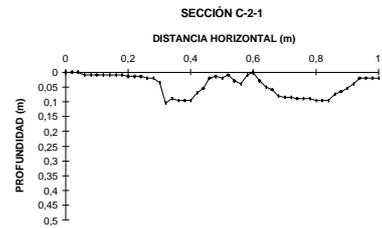
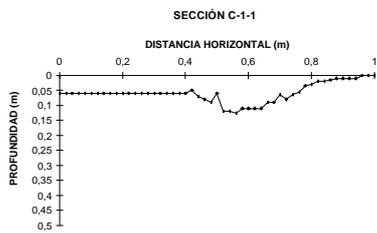
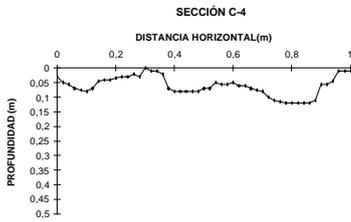
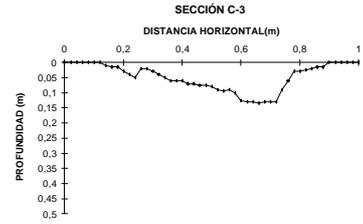
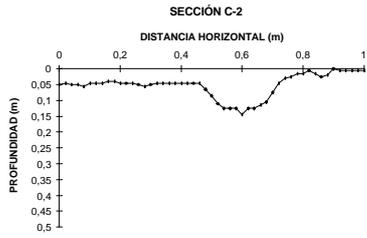


Figura I.1.3. - Perfiles transversales de las secciones controladas en la cárcava de Cobaza





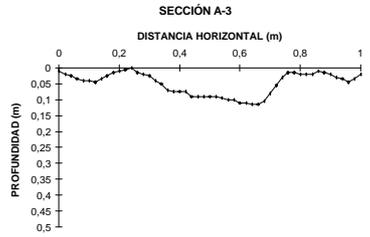
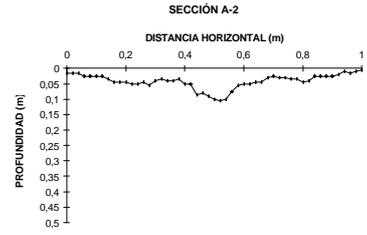
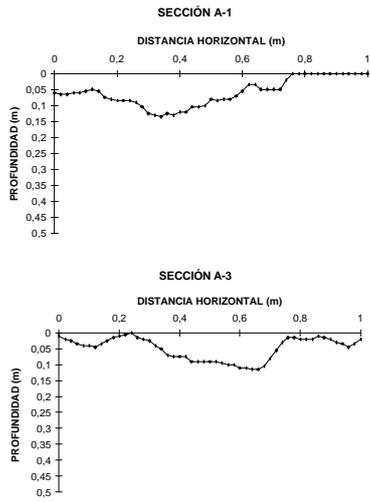
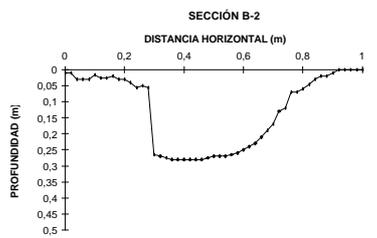
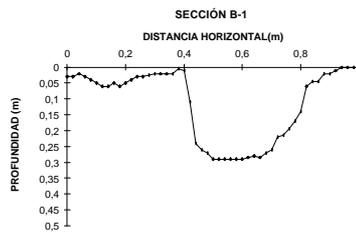
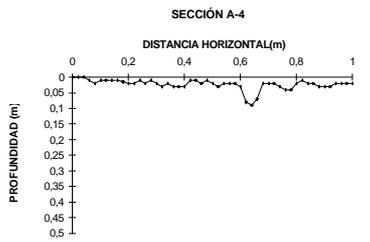
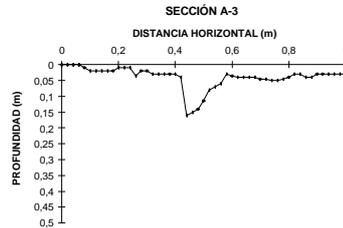
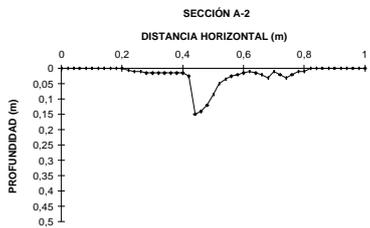
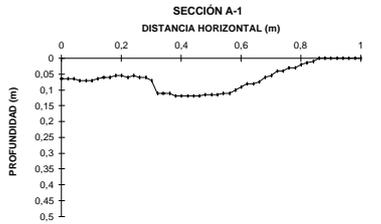


Figura I.1.4.- Perfiles transversales de las secciones controladas en la cárcava de La Matea I



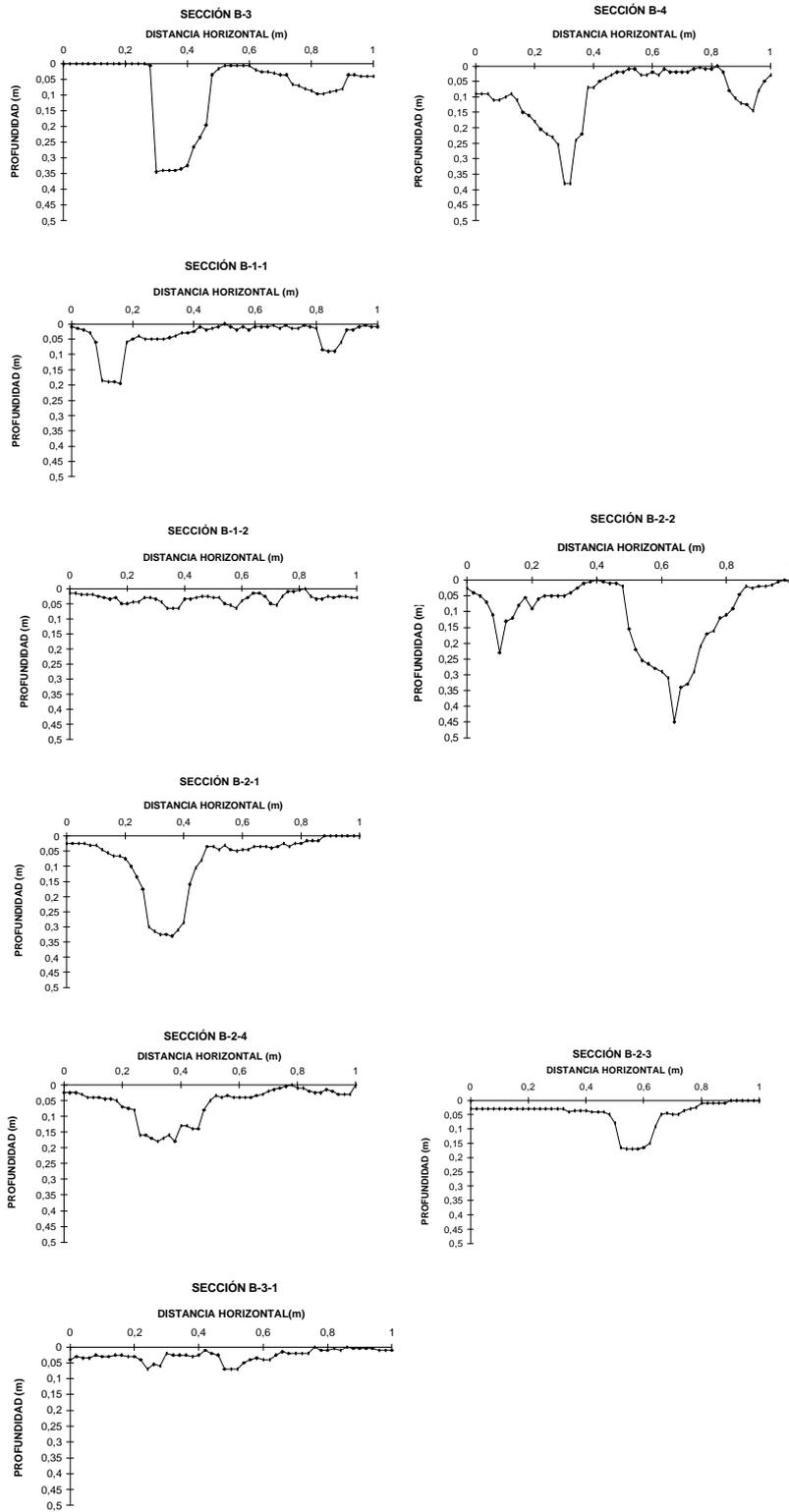


Figura I.1.5.- Perfiles transversales de las secciones controladas en la cárcava de La Matea II.

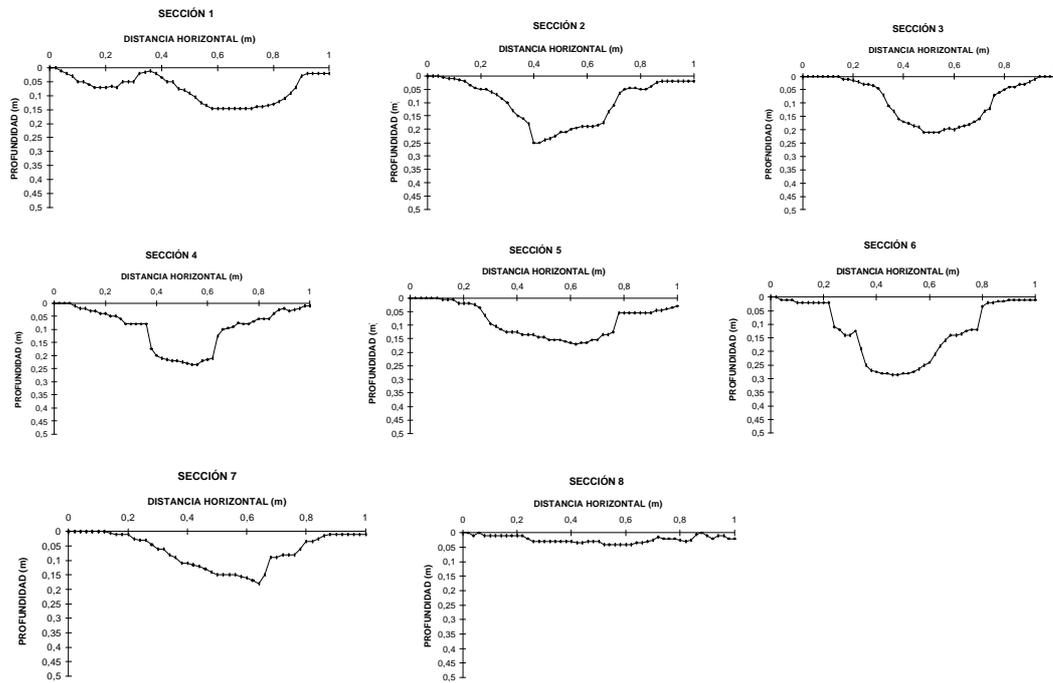


Figura I.2.1.- Perfiles transversales de las secciones medidas en el tramo superior de la cárcava de La Matea III.

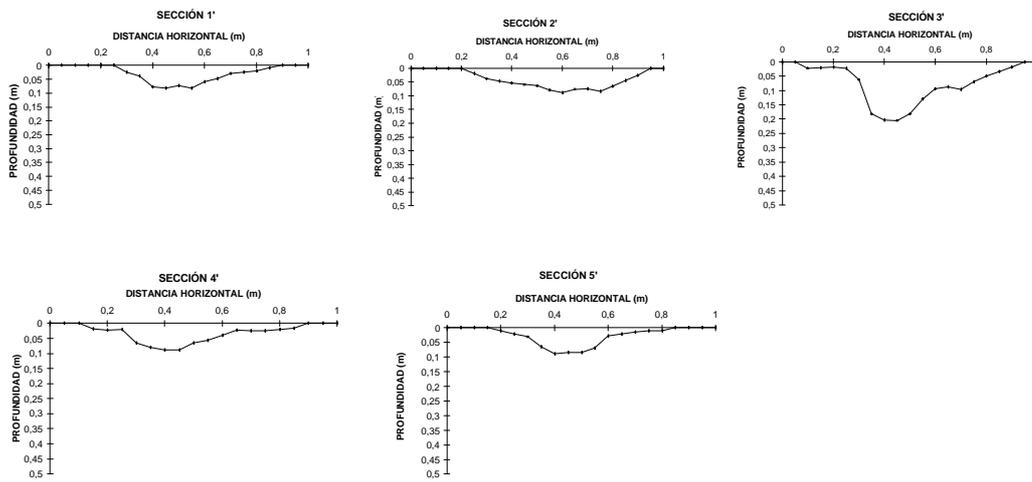


Figura I.2.2.- Perfiles transversales de las secciones medidas en el extremo final de la cárcava de La Matea III

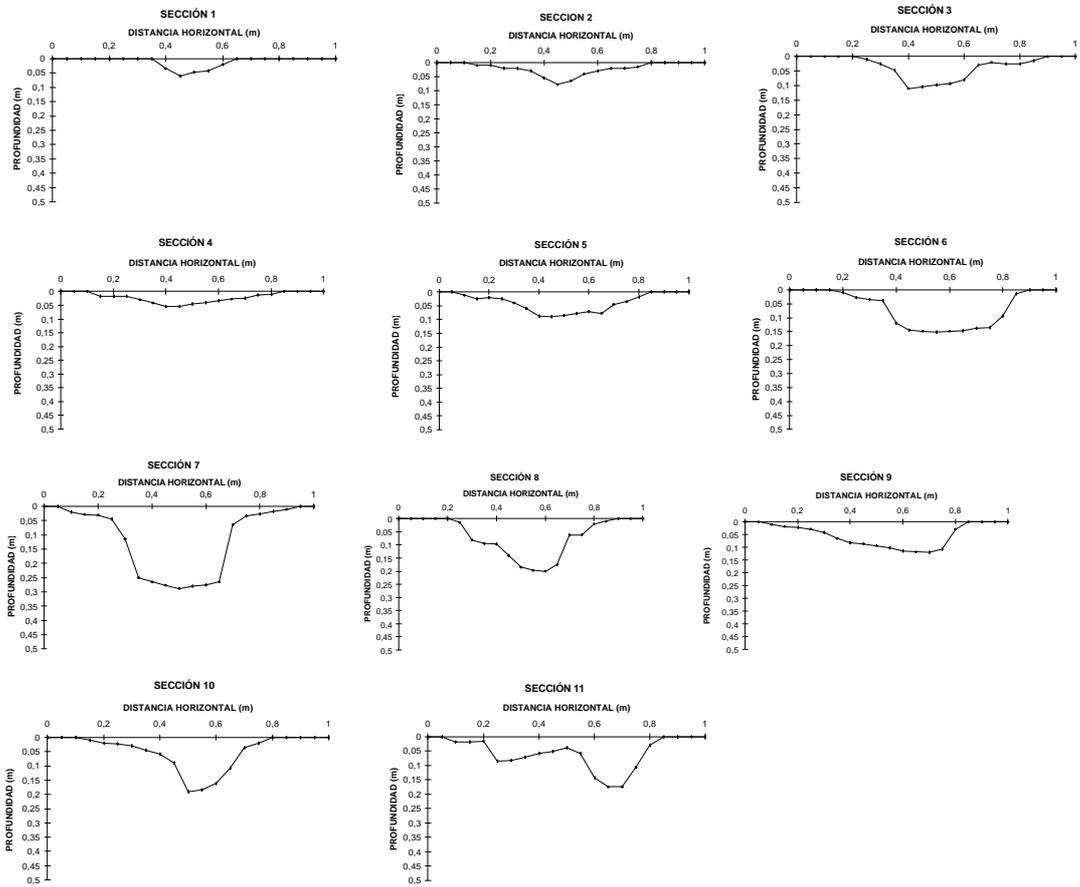


Figura I.2.3.- Perfiles transversales de las secciones medidas en la cárcava La Matea IV

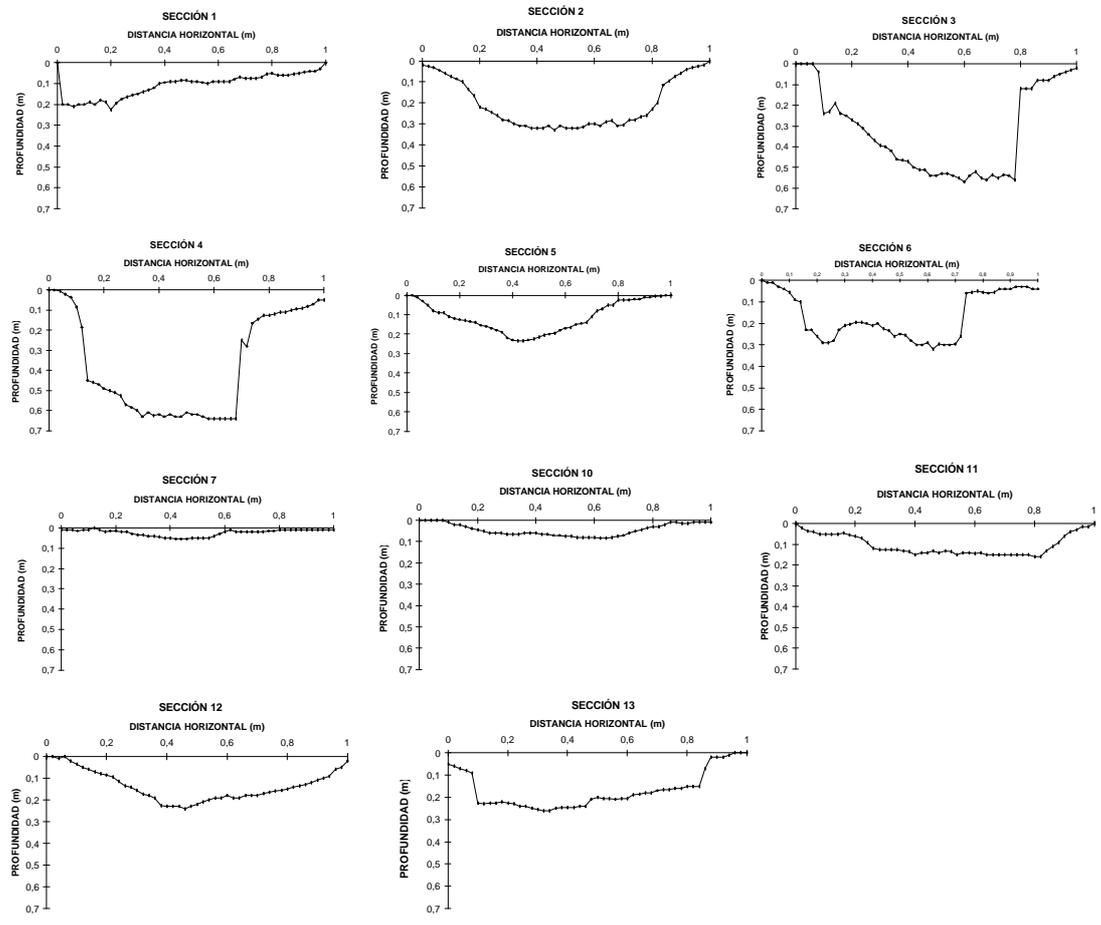


Figura I.2.4.- Perfiles transversales de las secciones medidas en la cárcava Camino III.

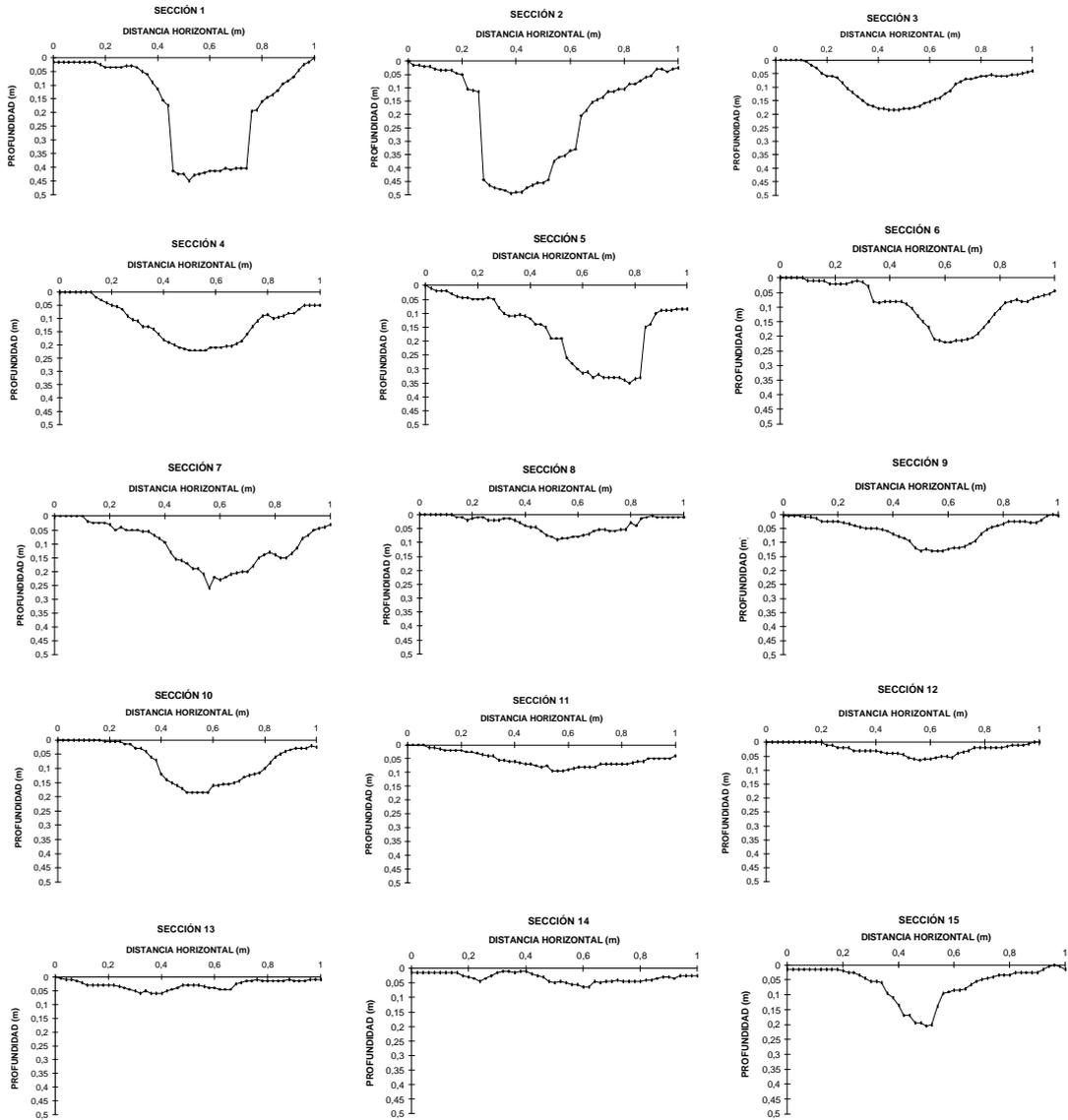


Figura I.2.5.- Peñiles transversales cárcava de Cobaza II B

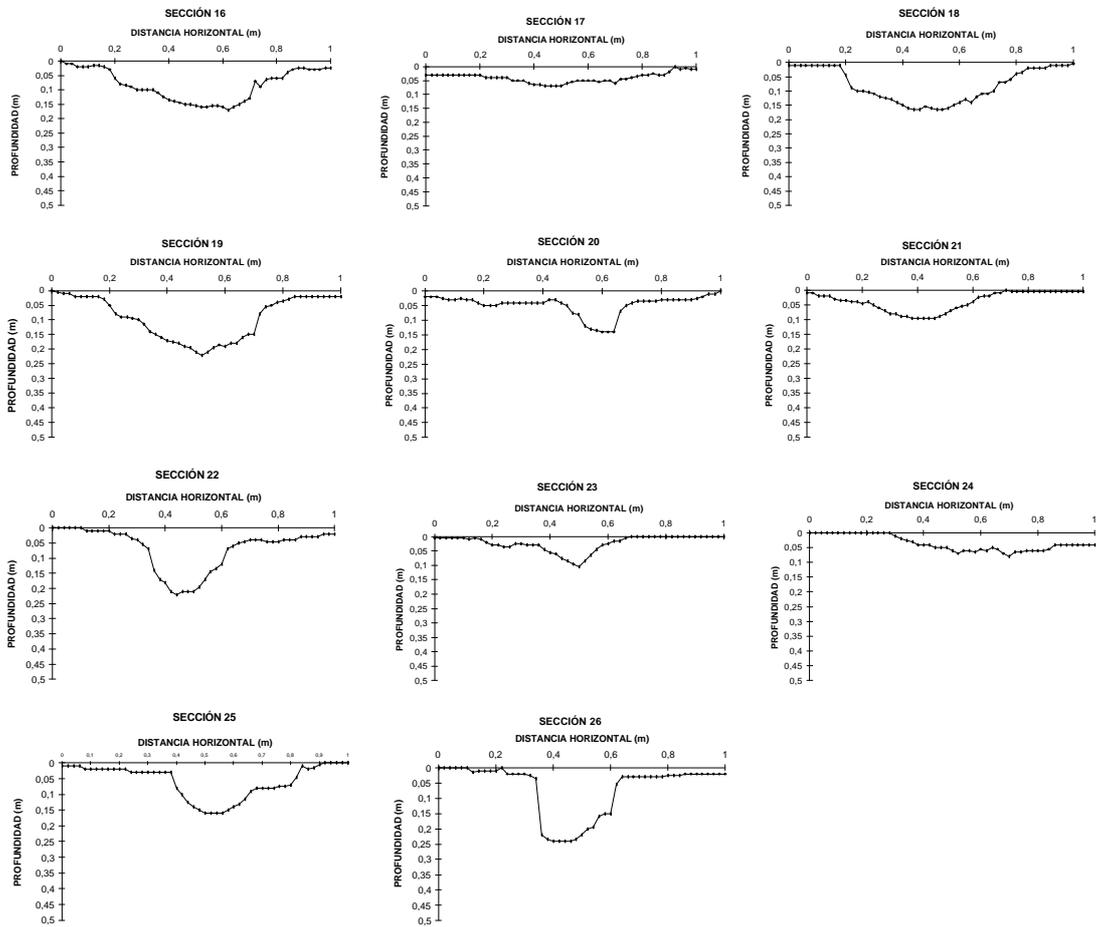


Figura I.2.5.- Pefiles transversales cárcava de Cobaza II B (continuación)

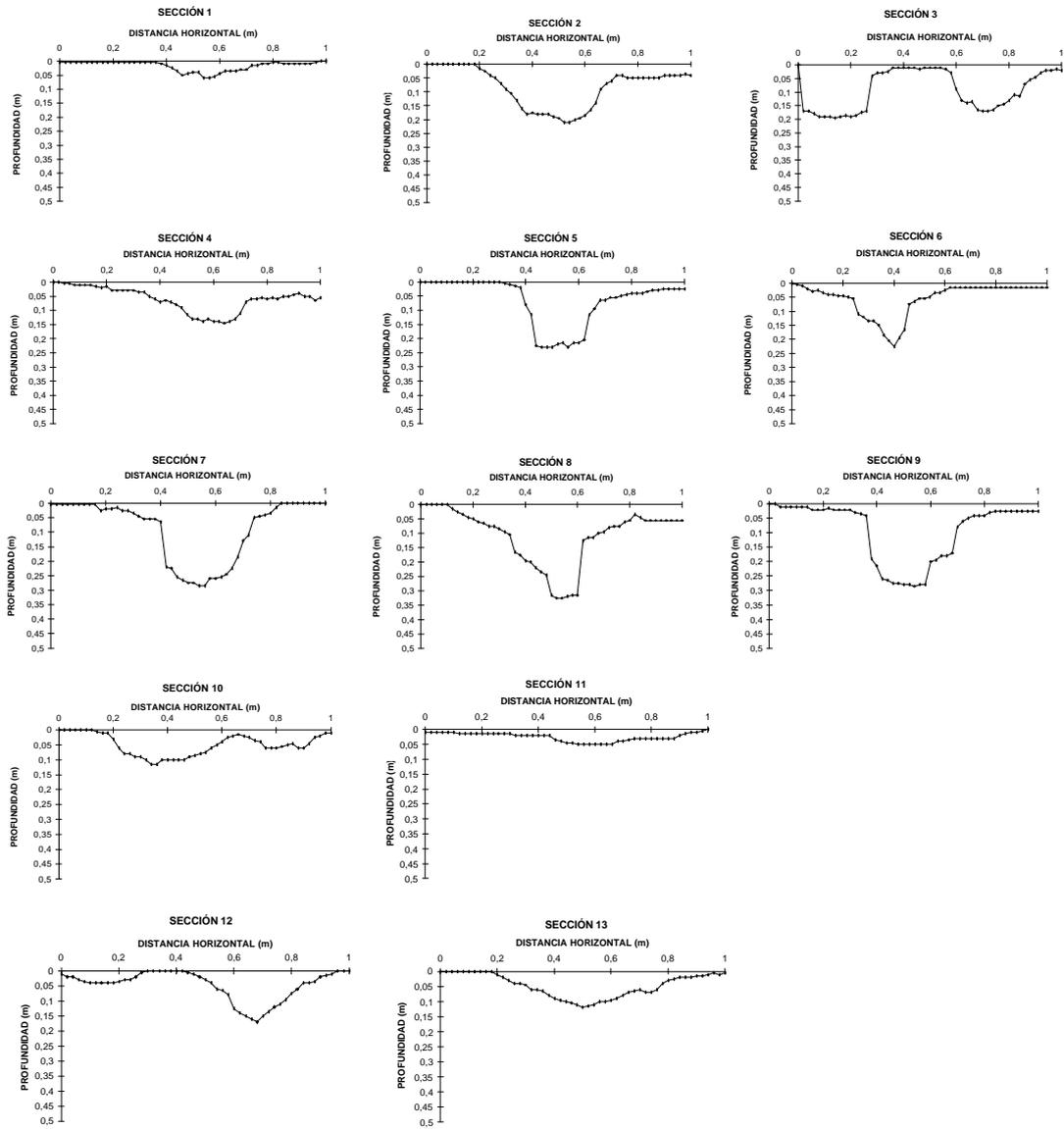


Figura I.2.6.- Perfiles transversales cárcava de Cobaza II A

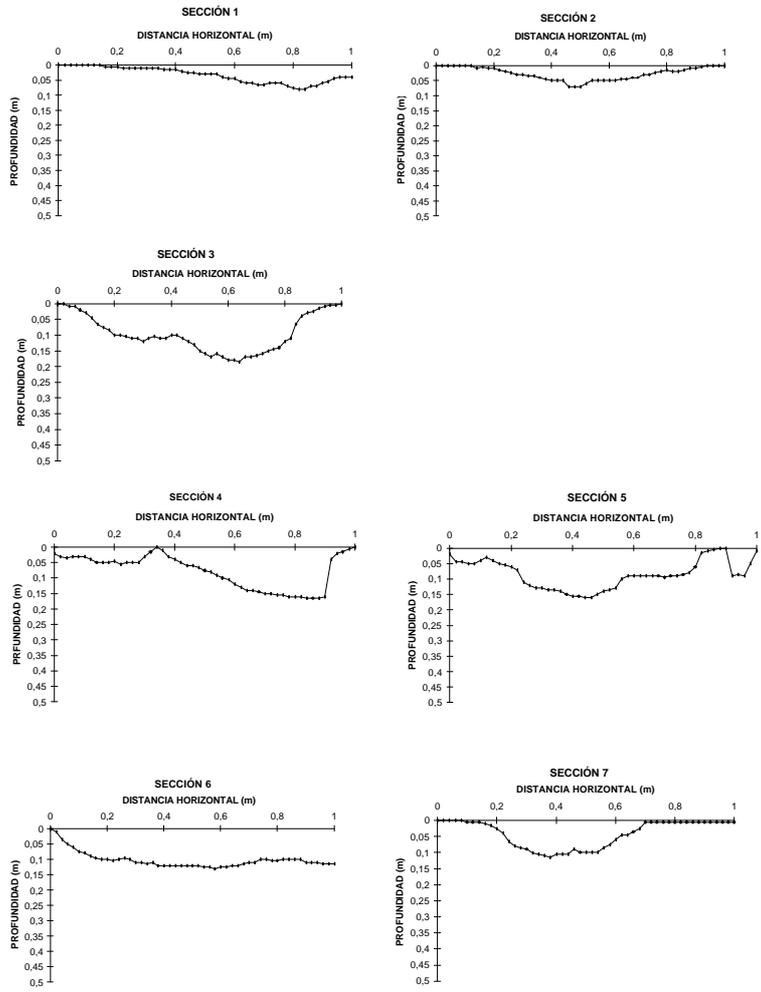


Figura I.3.1.- Secciones transversales cárcava Camino I

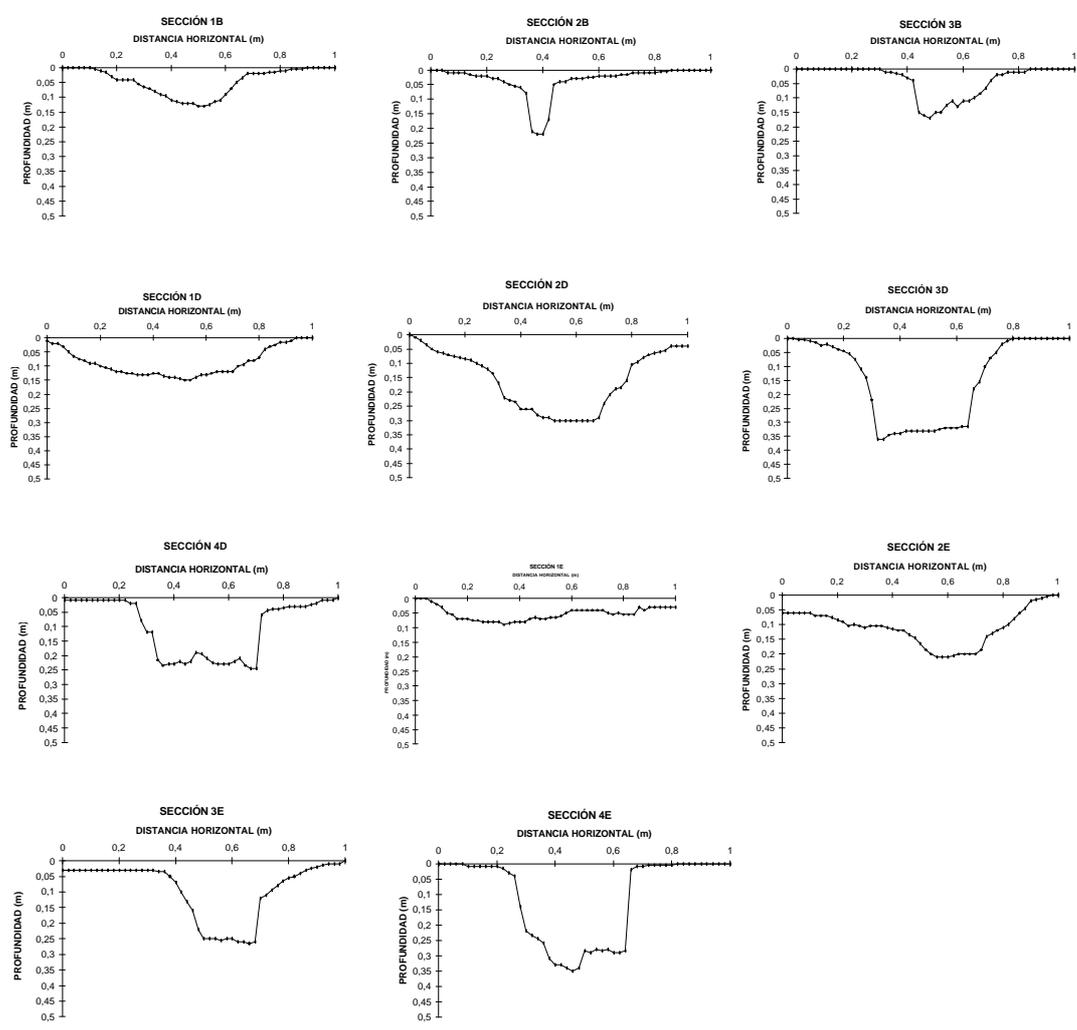


Figura I.3.2.- Perfiles transversales medidos en la cárcava de Camino IV

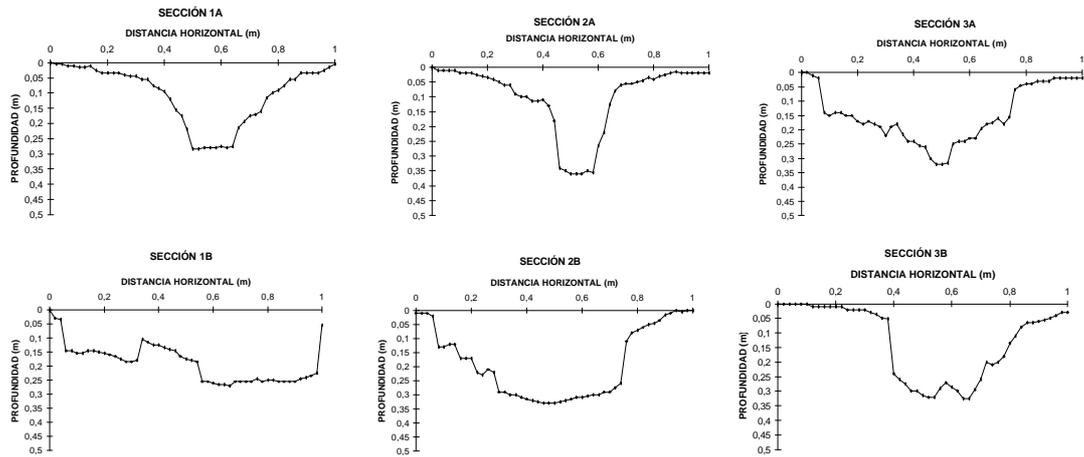


Figura I.3.3 .- Perfiles transversales medidos en la cárcava Camino V

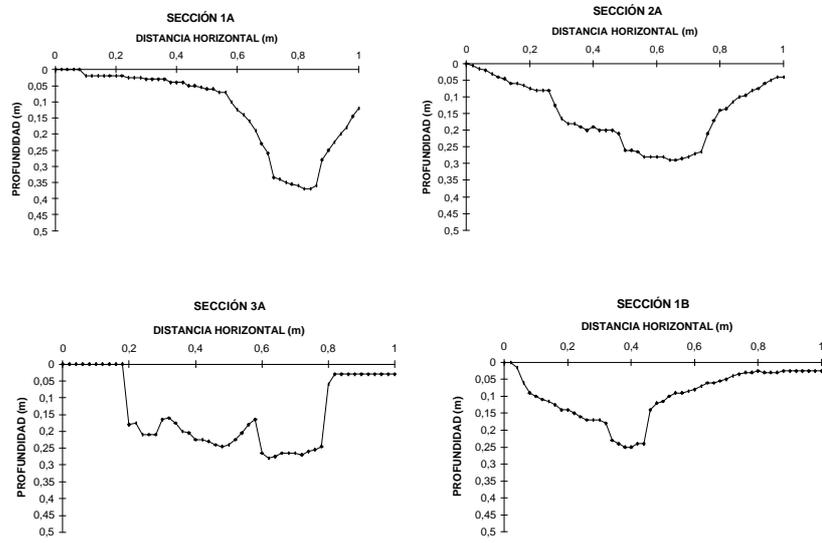
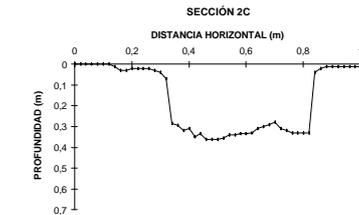
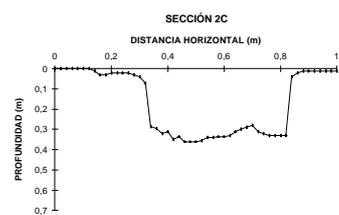
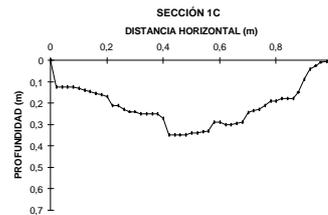
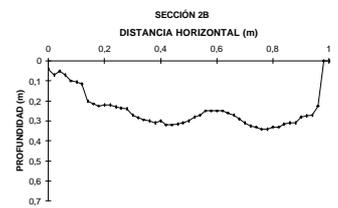
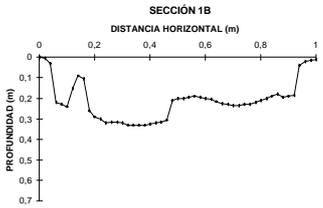
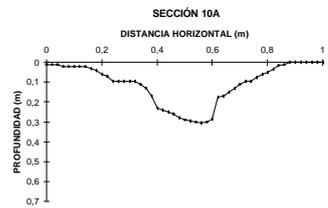
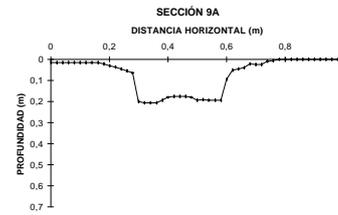
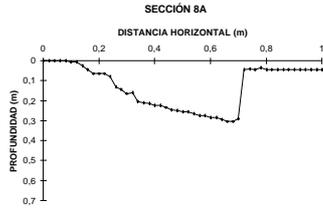
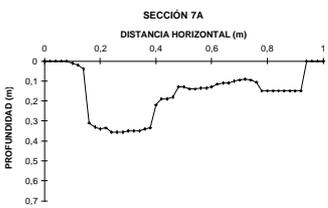
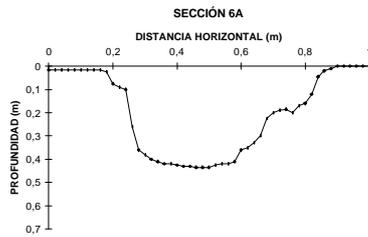
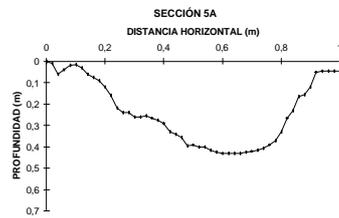
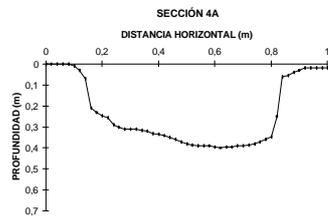
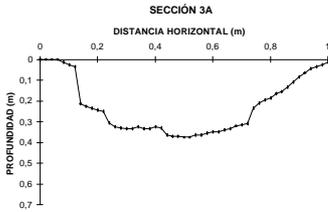
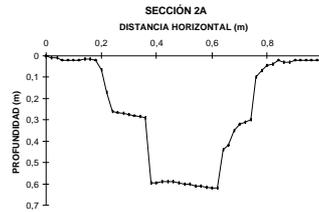
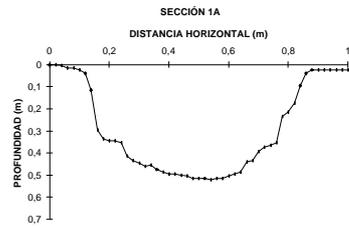


Figura I.3.4.- Perfiles transversales medidos en la cárcava Camino VI



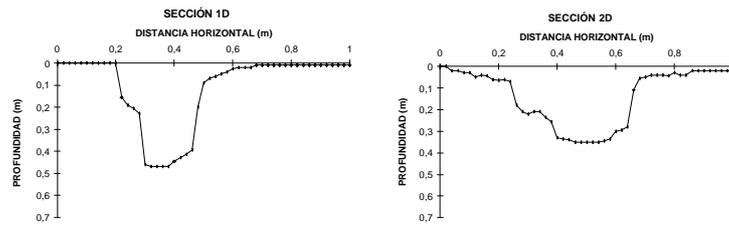


Figura I.3.5.- Perfiles transversales medidos en la cárcava de Cobaza Oriental

ANEJO II

LISTADO DEL PROGRAMA *OCE*

\$LARGE

PROGRAM OCE

```
C*****  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C*****
```

MODELO OCE

C P R O G R A M A P R I N C I P A L

```
COMMON / CBA / IND ,INL ,INR ,INS ,INP ,  
1 INE  
COMMON / CBB / JR ,JP ,NT ,DT ,DX ,  
1 GR ,XBEG  
COMMON / CBE / AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,  
1 RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,  
2 CS(101) ,HV(101) ,H(101)  
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF ,QUREF ,XN ,PAP ,  
1 SLPEQ ,CC ,CE ,BSLP(101,6)  
COMMON / CBI / CUP ,QUP(1000), IXSL ,LXSL ,QLAT(1000) ,  
1 ALF  
COMMON / CBK / NTP(6) ,NYI
```

```
C**** Archivo TEST.INP: recoge todos los datos de entrada necesarios.  
C Todos los datos son leídos como reales. Por ello, las variables  
C que en el programa son usadas como enteros deben de ser  
C transformadas mediante la sentencia IFIX.  
C  
C Archivo TEST.OUT: recoge las principales variables hidr ulicas  
C de salida del programa en los instantes elegidos, así como  
C informaciòn sobre los principales datos de entrada.  
C  
C Archivo PLOT.OUT: recoge las coordenadas de todos los puntos sig-  
C nificativos de todas las secciones transversales, en los instantes  
C elegidos.  
C  
C Archivo BED.OUT: recoge la elevaciòn del lecho en todas las sec-  
C ciones transversales en los instantes elegidos, el calado y la  
C concentraciòn de sedimentos.  
C  
C Archivo EROS.OUT: recoge la erosiòn acontecida con detalle a nivel  
C de subtramo.  
C  
C Archivo GEOM.OUT: Completa los datos para un analisis exhaustivo.  
C  
C**** Informaciòn detallada sobre los archivos de salida puede verse en  
C la subrutina PR1X.
```

```
OPEN (UNIT=1, FILE='TEST.INP', STATUS='OLD')  
OPEN (UNIT=2, FILE='TEST.OUT', STATUS='OLD')  
OPEN (UNIT=3, FILE='PLOT.OUT', STATUS='OLD')  
OPEN (UNIT=5, FILE='BED.OUT', STATUS='OLD')  
OPEN (UNIT=9, FILE='EROS.OUT', STATUS='OLD')
```

```

OPEN (UNIT=10, FILE='GEOM.OUT', STATUS='OLD')

CALL HEAD
CALL DBCO
CALL INCO
CALL SINP
CALL QSLT
CALL QSUP

IF(INS .GT. 0) CALL XSDA(0)

IF(INR.GT.0) CALL PR1X(0)
DO 2 N=1,NT
  WRITE(*,*)' Paso de tiempo ',N
  DO 1 J= 1,JP
    IF (J.EQ.1) QE(J)= QUP(N)
    IF (J.GT.1) QE(J)=QE(J-1)+QLAT(N)*DX
CCC   IF ((J.GT.1).AND.(J.GE.IXSL).AND.(J.LE.LXSL)) QE(J)=
CCC $      QE(J-1)+QLAT(N)*DX

C**** De momento, por simplificar y por la poca utilidad pr ctica, no
C     considero la posibilidad de diferenciar subtramos en los que hay
C     aporte lateral de los que no lo hay.

1     CONTINUE
      CALL BACK(N)
      IF (INS .GT. 0)THEN
        CALL XSDA(N)
        CALL BELV(N)
        CALL XSDS(N)
      END IF
      IF ((INR.GT.0).AND.((N.EQ.NTP(1)).OR.(N.EQ.NTP(2)).OR.
$      (N.EQ.NTP(3)).OR.(N.EQ.NTP(4)).OR.(N.EQ.NTP(5))
$      .OR.(N.EQ.NTP(6))))THEN
        CALL PR1X(N)
      END IF
2     CONTINUE
      STOP
500   FORMAT(5A4)
3300  FORMAT(16I5)
      END

SUBROUTINE HEAD

COMMON / CBA /  IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,
1     INE
COMMON / CBB /  JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1     GR      ,XBEG
COMMON / CBK /  NTP(6)  ,NYI

DIMENSION  DATE(40),TITLE(20),RUN(40),ANTP(6)

C**** Esta subrutina lee los bloques de inputs A, B, C, D y E, y los
C     escribe convenientemente en el archivo principal de salida,
C     TEST.OUT (unidad 2).

C**** INPUT A - Nombre de la ejecuciçn.

READ (1,100) TITLE

```

```
READ (1,200) (RUN(L),L=1,40)
WRITE(2,300) (RUN(L),L=1,40)
READ (1,100) TITLE
WRITE(2,100) TITLE
```

C**** INPUT B - Fecha de la ejecución

```
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,200) (DATE(L),L=1,40)
WRITE(2,300) (DATE(L),L=1,40)
```

C**** INPUT C - Indicadores de opciones seleccionadas.

```
C
C IND: Controlador aporte aguas arriba. (Ver subrutina QSUP)
C INL: Controlador aporte lateral. (Ver subrutina QSLT)
C INR: Controlador de escritura. (Ver PRINCIPAL)
C INS: Controlador de erosión. Si INS>0., se calcula erosión. (Ver
C PRINCIPAL).
C INP: Controlador de erosión lateral. Si INP=0., no hay erosión
C lateral, estudiándose únicamente la degradación del lecho.
C (Ver BELV). Si se utiliza esta opción, TCRT debe de ser 0,
C con el fin de estudiar la erosión de materiales no cohesivos.
C INE: Si INE=1, se considera el modelo de Bell y Sutherland (1981)
C sobre transporte no equilibrado, siempre que CUP sea igual a
C cero. Cualquier otro valor de INE distinto de cero, hace que no
C se considere esta hipótesis.
```

```
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,600) AIND,AINL,AINR,AINS,AINP,AINE
IND= IFIX(AIND)
INL= IFIX(AINL)
INR= IFIX(AINR)
INS= IFIX(AINS)
INP= IFIX(AINP)
INE= IFIX(AINE)
WRITE(2,500) IND,INL,INR,INS,INP,INE
GR=9.81
```

C**** INPUT D - Datos de discretización

```
C
C El máximo número de tramos permitido es de 100.
C El máximo número de pasos de tiempo es de 1000.
C JR= Número de subtramos
C NT= Número de pasos de tiempo
C DT= Duración del paso de tiempo (minutos)
C DX= Longitud de los subtramos (m)
C XBEG= Distancia hasta la primera sección (m)
```

```
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,600) AJR,ANT,DT,DX,XBEG
```

C**** INPUT E - Pasos de tiempo para impresión en tablas.

```
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
```

```

      READ (1,600) (ANTP(I), I=1,6)
      DO 1 I=1,6
        NTP(I)= IFIX(ANTP(I))
1     CONTINUE

```

C**** Conversi3n de minutos (lectura) en segundos.

```

      JR= IFIX(AJR)
      NT= IFIX(ANT)
      JP=JR+1
      NL=NT+1
      WRITE(2,700) JR,JP,NT,DT,DX
      DT= DT*60.

100  FORMAT(20A4)
200  FORMAT(40A2)
300  FORMAT(1X,40A2/)
500  FORMAT(5H IND=,I2,38H Indicador caudal extremo aguas arriba, /
3     5H INL=,I2,25H Indicador aporte lateral, /
4     5H INR=,I2,37H Controlador de la impresi3n /
5     5H INS=,I2,35H Controlador de c lculos erosivos /
6     5H INP=,I2,35H Controlador erosi3n lateral /
7     5H INE=,I2,35H Controlador transp. no equilibrado /)
600  FORMAT(8F10.3)
700  FORMAT(5H JR =,I10,17H Nfmero de tramos, /
1     5H JP =,I10,34H Nfmero de secciones transversales, /
2     5H NT =,I10,36H Nfmero de pasos de tiempo, /
5     5H DT =,E10.3,34H Duraci3n del paso de tiempo (min), /
6     5H DX =,F10.5,23H Longitud subtramos (m), /)
      RETURN
      END

```

SUBROUTINE DBCO

```

      COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,
1     ZREF ,EBOUND ,DREF(101) ,TCRT ,
2     CFER ,KOUNT ,KOUNTS ,CFT
      COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF ,QUREF ,XN ,PAP ,
1     SLPEQ ,CC ,CE ,BSLP(101,6)

```

C**** Esta subrutina lee el input G

C**** INPUT G - Controles aguas abajo, pendiente inicial y erodibilidad.

```

C
C     SLPEQ= Pendiente inicial del lecho (unitaria)
C     YREF= Nivel (calado + elevaci3n del lecho) en el
C           extremo aguas abajo (m).
C     ZREF= Elevaci3n del lecho extremos aguas abajo (m).
C     EBOUND= Tolerancia para la funci3n de evaluaci3n en
C            la soluci3n num,rica de ecuaciones.
C     DREF= Distancia vertical desde el lecho al extremo
C           superior de los taludes (m).
C     TCRT= Esfuerzo cortante cr3tico del suelo (Pa)
C     CFER= Coeficiente de erodibilidad (N/N.min)
C     KOUNT= Controlador pasos en soluci3n num,rica ecuaciones
C           en bloque ROOTA. En dichas subrutinas, es la
C           variable ITRMX, m ximo nfmero de iteraciones
C           permitidas en la subrutina WORK tras haber
C           encontrado el cambio de signo de la funci3n.
C     KOUNTS= Controlador pasos en soluci3n num,rica ecuaciones
C           en bloque ROOTA. En dichas subrutinas, es la

```

C variables ISTOP, máximo número de pasos permitidos
 C para encontrar el intervalo de cambio de signo.
 C CFT = Coeficiente para calcular el esfuerzo cortante
 C en el lecho, de acuerdo con Olsen y Florey (1952)

```

  READ (1,100) TITLE
  READ (1,100) TITLE
  READ (1,100) TITLE

```

C**** Aunque se leen aquí, TCRT, CFER y CFT se escriben en SINP, para
 C unificar los datos relativos al suelo.

```

  READ (1,200) YREF,ZREF,SLPEQ,EBOUND,DREF(1),TCRT,CFER
  READ (1,100) TITLE
  READ (1,200) AKOUNT, AKOUNTS, CFT
  KOUNT =IFIX(AKOUNT)
  KOUNTS=IFIX(AKOUNTS)

```

C**** YREF se utiliza en la subrutina INCO para calcular,
 C en la subrutina BACK, el perfil hidr ulico en el instante
 C inicial. ZREF y SLPEQ se usan en INCO para calcular el
 C perfil longitudinal inicial del lecho. YREF se utiliza en todo
 C momento como control aguas abajo en la subrutina BACK.

```

100 FORMAT(20A4)
200 FORMAT(7F10.4)
  RETURN
  END

```

```

SUBROUTINE INCO
COMMON / CBB / JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1  GR      ,XBEG
COMMON / CBD / CFS      ,EFS
COMMON / CBE / AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,
1  RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,
2  CS(101) ,HV(101) ,H(101)
COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF      ,
1  ZREF      ,EBOUND      ,DREF(101) ,TCRT      ,
2  CFER      ,KOUNT      ,KOUNTS      ,CFT
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF      ,QUREF      ,XN      ,PAP      ,
1  SLPEQ      ,CC      ,CE      ,BSLP(101,6)
COMMON / CBJ / BWD(101) ,QSL      ,BWDM(101)
COMMON / CBK / NTP(6) ,NYI

```

```

DIMENSION TITLE(20)

```

C**** En esta subrutina se lee el input H, que se escribe en TEST.OUT.
 C Además, establece la forma inicial del canal, su pendiente, el
 C caudal inicial y el perfil hidr ulico inicial llamando a la
 C subrutinas XSDS y BACK.

C**** INPUT H - Valores de referencia iniciales.

```

C
C      BWDRF = Anchura inicial del lecho (m)
C      BSLP = Pendiente inversa de los taludes
C      QLREF = Caudal lateral de referencia (m^2/s)
C      QUREF = Caudal de referencia por el extremo aguas
C            arriba (m^3/s)
C      XN = Coeficiente n de Manning.
C      PAP = Peso específico aparente del suelo (N/m3)

```

C CC = Coef. p,rdidas por remolino (contracciones)
 C CE = Coef. p,rdidas por remolino (expansiones)
 C YIN = Nfmero de localizaciones a estudiar en cada
 C secciñ transversal para determinaciñ de
 C coordenadas y c lculos hidr ulicos. Tiene que
 C ser >5.

```

READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,200) BWDRF(JP),BSLP(1,1),BSLP(1,2),QLREF,QUREF,XN
READ (1,100) TITLE
READ (1,201) PAP
READ (1,100) TITLE
READ (1,202) CC,CE,YIN
NYI= INT(YIN)
WRITE(2,300) BWDRF(jp),BSLP(1,1),BSLP(1,2),SLPEQ,QLREF,QUREF,XN,
$           PAP, CC, CE, YIN

```

C**** Distribuciñ inicial longitudinal de la elevaciñ del lecho y
 C de la anchura del lecho. DREF(1) ha sido ya leido. Definicñ
 C de la coordenada Z de cada secciñ. Al definir K=JP-J+1 se
 C invierte el orden de c lculo, aunque J y K crecen y decrecen en
 C el mismo sentido.

```

BWD(JP)= BWDRF(JP)
SF(JP) = SLPEQ
Z(JP) = ZREF
DO 1 J=2,JP
  DREF(J)=DREF(J-1)
  K= JP-J+1
  BWDRF(K)=BWDRF(JP)
  BWD(K)= BWDRF(K)
  Z(K)= Z(K+1) +DX*SLPEQ
1 CONTINUE

```

C**** C lculo de los par metros de fricciñ.

```

C CFS = Exponente del perimetro mojado
C EFS = Exponente del rea mojada
CFS= 4./3.
EFS= -10./3.
WRITE(2,350) CFS,EFS

```

C**** Distribuciñ inicial de caudales y de pendientes de los taludes

```

QE(1)= QUREF
BSLP(1,3)=BSLP(1,1)
BSLP(1,4)=BSLP(1,2)
DO 2 J=2,JP
  QE(J)= QE(J-1) +DX*QLREF
  BSLP(J,1)=BSLP(J-1,1)
  BSLP(J,3)=BSLP(J,1)
  BSLP(J,2)=BSLP(J-1,2)
  BSLP(J,4)=BSLP(J,2)
2 CONTINUE

```

C**** C lculo de rangos, definiciñ de la coordenada X

```

DO 4 J= 1,JP
  X(J)= XBEG +(J-1)*DX

```

4 CONTINUE

C**** C lculo del perfil hidr ulico inicial. Las variables iniciales
C del flujo son calculadas por la subrutina VACE. Previamente, en
C XSDS, se definen las coordenadas iniciales de todos los puntos
C definidos como singulares en cada sección transversal.

CALL XSDS(0)
CALL BACK(0)

100 FORMAT(20A4)
200 FORMAT(6F10.0)
201 FORMAT(3F10.3)
202 FORMAT(4F10.3)
210 FORMAT(E10.4)
300 FORMAT(5H BWD=, F10.5, 27H Anchura inicial lecho (m) /
1 5HBSLP=, F10.5, 29H Pendiente inversa talud izq. /
1 5HBSLP=, F10.5, 29H Pendiente inversa talud dch. /
1 5HSLOP=, F10.7, 29H Pendiente inicial del lecho /
2 5HQLRF=, F10.6, 32H Caudal lateral constante (m2/s) /
3 5HQURF=, F10.6, 32H Caudal aguas arriba cte. (m3/s) /
4 5H XN=, F10.5, 27H Coeficiente de Manning /
5 5HPAP =, F10.3, 26H Peso esp. aparente(N/m3) /
6 5HCC =, F10.3, 33H Coef. p,rdidas remolino (contr.) /
7 5HCE =, F10.3, 33H Coef. p,rdidas remolino (exp.) /
6 5HYIN =, F10.3, 32H n localizaciones sec. transv. /)
350 FORMAT(5H CFS=, F10.7, 31H Exponente del per;metro mojado /
1 5H EFS=, F10.6, 30H Exponente del rea mojada /)

RETURN
END

SUBROUTINE XSDS(ID)

COMMON / CBB / JR ,JP ,NT ,DT ,DX ,
1 GR ,XBEG
COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,
1 ZREF , EBOUND ,DREF(101) ,TCRT ,CFER ,
2 KOUNT ,KOUNTS ,CFT
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF ,QUREF ,XN ,PAP ,
1 SLPEQ ,CC ,CE ,BSLP(101,6)
COMMON / CBJ / BWD(101) ,QSL ,BWDM(101)
COMMON / CBK / NTP(6) ,NYI
COMMON / CBL / DAB(101) ,WS(10) ,DN(10) ,PCT(11) ,
1 NSF ,SPWT
COMMON / CBM / YP(101,99),ZP(101,99)
COMMON /DUMMY/ DAR(101),DAL(101),DHR(101),DHL(101),DBR(101),
1 DBL(101),TR(101) ,TL(101) , ER(101), ET(101), ETT,
2 TAU(101)
DIMENSION TEMP(101)

C**** Se procede al c lculo de las coordenadas de los puntos singulares
C de las secciones transversales. NYI es el nfmero de localizaciones
C estudiadas en cada sección transversal. NYI debe de ser >5
C (división por 0).

NX= JP
NY= NYI
D WRITE(9,*) ID

C**** Bucle externo que extiende los c lculos a cada una de las
 C secciones transversales. Definiciòn de las longitudes de control
 C en cada secciòn transversal. Definiciòn de la coordenada YP en
 C los puntos singulares.

```

DO 10 I=1,NX
  IF(ID.EQ.0)THEN
    TEMP(I)=DREF(I)
  ENDIF
  ZMIN=100000.0
  IF(ID.EQ.0)THEN
    DZT = DREF(I)
  ELSE
    DZT = ZP(I,1)-Z(I)
  ENDIF
  SUM=0.0
  ZMAX = Z(I)+DZT
  DOBL = DREF(I)*BSLP(I,1)-DBL(I)
  DOBR = BWD(I)+DOBL+DBR(I)+DBL(I)
  FWD = DOBR+BSLP(I,2)*TEMP(I)-DBR(I)
  YP(I,1)=0.0
  YP(I,2)=DOBL
  YP(I,3)=DOBL+1.0E-6
  YP(I,NY)=FWD
  YP(I,NY-1)=DOBR
  YP(I,NY-2)=DOBR-1.0E-6
  DY= (BWD(I)+DBR(I)+DBL(I))/FLOAT(NY-5)

```

C**** Bucle interno que extiende los c lculos a las posiciones definidas
 C por NYI. Definiciòn de las coordenadas ZP (elevaciòn) e YP
 C (distancia respecto punto extremo de la secciòn) de cada uno de
 C los puntos singulares.

```

DO 20 J= 4,NY-3
  YP(I,J)=YP(I,J-1)+DY
20 CONTINUE
DO 30 J=1,NY
  ZP(I,J)=Z(I)
  IF(YP(I,J).LE.DOBL)THEN
    IF(BSLP(I,1).GT.0.0)ZP(I,J)=ZMAX-YP(I,J)/BSLP(I,1)
    CCC IF(BSLP(I,1).GT.0.0)ZP(I,J)=Z(I)+DZT-YP(I,J)/BSLP(I,1)
    IF(ZP(I,J).GT.ZMAX .OR. J.EQ.1)ZP(I,J)=ZMAX
  ENDIF
  IF(YP(I,J).GE.DOBR)THEN
    CCC IF(BSLP(I,2).GT.0.0)ZP(I,J)=Z(I)+DZT-(FWD-YP(I,J))/
    CCC 1 BSLP(I,2)
    IF(BSLP(I,2).GT.0.0)ZP(I,J)=ZMAX-(FWD-YP(I,J))/
    1 BSLP(I,2)
    IF(ZP(I,J).GT.ZMAX .OR. J.EQ.NY)ZP(I,J)=ZMAX
  ENDIF

  IF(ZP(I,J).LT.ZMIN)ZMIN=ZP(I,J)

30 CONTINUE

D WRITE(*,666)I,(ZP(I,J),J=1,NY)
666 FORMAT(1H ,I5,21F6.3)

```

C**** La variable BMWD(J) contempla la variaciòn que sufre la anchura

```

C      inicial del lecho BWD(J): BWDM(J)= BWD(J)+DBL(I)+DBR(I).

      BWDM(I)=BWD(I)+DBL(I)+DBR(I)

C      WRITE (*,*) DBL(I)
C      WRITE (9,*) I, DOBL, DOBR, FWD

10     CONTINUE
      RETURN
      END

      SUBROUTINE ROOTA(ROOT,ERROR,F,FRSGES,STEP,ISTPMX,ITRMX,TOLERA,
1  TOLERF)
      COMMON/ROOT1/KOUNTI,KOUNTS,RTN,X1,X2,X3,Y1,Y2,Y3
      EXTERNAL F
      LOGICAL CASE,RTN,RIGHT ,BAD DTA

C**** ROOTA y las subrutinas que depende de ella, que son WORK, CHKIT,
C      MONTON, y la funci3n INGRES, se encargan de solucionar dos
C      ecuaciones dentro del conjunto de calculos hidraulicos: la
C      ecuaci3n implícita que resulta del método del paso estandar,
C      y la ecuaci3n de Manning (esta última para obtener los calados
C      normales).
C
C**** Definiciones de parámetros formales:
C
C      ROOT      = Raíz de la funci3n F(X) que se busca.
C      ERROR     = F(ROOT)
C      F         = Funci3n de dos variables cuya raíz se busca.
C      FRSGES    = Primera suposici3n de la raíz (valor inicial de
C                  prueba).
C      ISTPMX    = Máximo número de iteraciones permitido en la subrutina
C                  WORK después de haberse encontrado un intervalo en el
C                  que F cambia de signo.
C      TOLERA    = Tolerancia para la raíz. Si X1 y X2 son extremos de la
C                  raíz y  $ABS(X2-X1) \leq AMAX(1., ABS(X2), ABS(X1)) * TLRA$ ,
C                  THEN  $ROOT = (X1+X2)/2$ 
C      TOLERF    = Tolerancia para la funci3n de evaluaci3n. IF
C                   $ABS(F(X1)) \leq TOLERF$ , THEN  $ROOT = X1$ . Es también la
C                  tolerancia para la monotonia (flatness): IF
C                   $ABS(DF/DX) \leq TOLERF$ , THEN, se imprime un mensaje de
C                  aviso.
C      STEP      = Tamaño del paso en la búsqueda del intervalo en el que
C                  F cambia de signo. Debe de ser positivo.
C
C**** Definiciones de variables en el bloque COMMON / ROOT1
C
C      KOUNTI    = Número de iteraciones llevadas a cabo en la subrutina
C                  WORK.
C      KOUNTS    = Número de pasos realizados.
C      RTN       = Variable de control de retorno. SET=.T. cuando se
C                  encuentra la raíz.
C      X1,X2,X3 = Estimaciones de la raíz ordenadas de manera creciente.
C
C**** Definiciones de variables locales:
C
C      RIGHT     = Variable de control lógico. IF RIGHT=.T. THEN MARCH TO
C                  RIGHT, OTHERWISE, MARCH TO LEFT.
C
C**** Estructuraci3n del programa:
C

```

```

C      Comienzo con la inicializaci3n. Llamada a CHKIT. En CHKIT se
C      genera X y se comprueba si ABS(F(X)).LE.TOLERF. Si es cierto,
C      entonces X es la raiz. Si no, se prueba con un paso a la derecha
C      y otro a la izquierda. Si ni se encuentra la raiz ni se produce
C      cambio de signo en F, se realiza un test para decidir el camino a
C      seguir. Si despu,s de ISTEPMX pasos no se encuentra la raiz ni un
C      cambio de signo, se notifica un mensaje de error y se continfa la
C      ejecuci3n del resto del programa, volviendo al mismo (RETURN).
C      Si se encuentra cambio de signo, CHKIT llama a WORK, donde se
C      busca la raiz mediante el m,todo de la secante modificada, que
C      toma dos coordenadas de distinto signo. La tolerancia para la
C      raiz (TOLERA) indicar si hemos encontrado o no la soluci3n. La
C      subrutina MONTON se utiliza repetidamente para comprobar que F es
C      estrictamente creciente o decreciente y que X1, X2 y X3 est n en
C      orden creciente. Si no, se imprime un mensaje de error y se
C      vuelve al resto del programa.
C

```

```

C**** Declaraci3n de funciones:

```

```

      CASE(RIGHT)=(.NOT.RIGHT)

      ERROR=2.0*TOLERF
      BAD DTA = MIN0(ISTPMX,ITRMX).LE.0.OR. AMIN1(STEP,TOLERA,TOLERF).LE
1.0.0
      IF(CASE(BAD DTA))GO TO 5
          WRITE(6,400) ISTEPMX,ITRMX,STEP,TOLERA,TOLERF
          RETURN
5 CONTINUE

```

```

C**** Comienzo de la inicializaci3n

```

```

      X2=FRSGES
      KOUNTI=-1
      KOUNTS=0
      RTN =.FALSE.

```

```

C**** Fin de la inicializaci3n

```

```

      CALL CHKIT(ROOT,ERROR,F,X2,Y2,0.,X2,Y2,ITRMX,TOLERA,TOLERF)
      IF(RTN) RETURN
      CALL CHKIT(ROOT,ERROR,F,X2,Y2,-STEP,X1,Y1,ITRMX,TOLERA,TOLERF)
      IF(RTN) RETURN
      CALL CHKIT(ROOT,ERROR,F,X2,Y2,STEP,X3,Y3,ITRMX,TOLERA,TOLERF)
      IF(RTN) RETURN

```

```

C**** Y1,Y2,Y3 tienen el mismo signo, comprobaciones de monotonidad
C      y si marchar hacia la izquierda o hacia la derecha.

```

```

      CALL MONTON
      IF(RTN)THEN
          STEP=STEP*0.5
          GO TO 5
      ENDIF
      RIGHT =(Y2-Y1)*Y1.LT..0
      IF(CASE(RIGHT))GO TO 20
10      KOUNTS=INCRES(KOUNTS,ISTPMX)
          IF(RTN) RETURN
          X1=X2
          Y1=Y2
          X2=X3
          Y2=Y3

```

```

CALL CHKIT(ROOT,ERROR,F,X2,Y2,STEP,X3,Y3,ITRMX,TOLERA,TOLERF)
IF(RTN) RETURN
CALL MONTON

```

C**** Continfa hacia la derecha

```

GO TO 10
20 CONTINUE

```

C**** Si no, hacia la izquierda

```

30 KOUNTS=INCRES(KOUNTS,ISTPMX)
IF(RTN) RETURN
X3=X2
Y3=Y2
X2=X1
Y2=Y1
CALL CHKIT(ROOT,ERROR,F,X2,Y2,-STEP,X1,Y1,ITRMX,TOLERA,TOLERF)
IF(RTN) RETURN
CALL MONTON

```

C**** Continfa hacia la izquierda

```

GO TO 30

400 FORMAT(T10,'Problemas en ROOTA'/T10,'ISTPMX= ',I10,T30,'ITRMX= ',I
110,/T10,'STEP= ',T20,1PE16.8,T40,'TOLERF= ',T50,1PE16.8,T70,'TOLER
2F= ',1PE16.8)
END

```

```

SUBROUTINE CHKIT(ROOT,ERROR,F,T1,Z1,STEP,T2,Z2,ITRMX,TOLERA,
1 TOLERF)

```

```

COMMON/ROOT1/KOUNTI,KOUNTS,RTN,X1,X2,X3,Y1,Y2,Y3

```

```

LOGICAL CASE,RTN

```

```

EXTERNAL F

```

```

CASE(RTN)=(.NOT.RTN)

```

```

T2=T1+STEP

```

```

CALL F(T2,Z2)

```

```

IF(CASE(ABS(Z2).LE.TOLERF))GO TO 10

```

```

ROOT=T2

```

```

ERROR=Z2

```

```

RTN=.TRUE.

```

```

RETURN

```

```

10 CONTINUE

```

```

IF(CASE(Z1*Z2.LT..0))GO TO 20

```

```

IF(STEP.LE.0.0 )

```

```

1 CALL WORK(ROOT,ERROR,T2,Z2,T1,Z1,F,ITRMX,TOLERA,TOLERF)

```

```

IF(STEP.GT.0.0)

```

```

1 CALL WORK(ROOT,ERROR,T1,Z1,T2,Z2,F,ITRMX,TOLERA,TOLERF)

```

```

RTN=.TRUE.

```

```

RETURN

```

```

20 CONTINUE

```

C ELSE

```

RETURN

```

```

END

```

```

SUBROUTINE WORK(ROOT,ERROR,T1,Z1,T3,Z3,F,ITRMX,TOLERA,TOLERF)

```

C**** Esta subrutina encuentra la raíz de F(x) mediante el método de la secante modificada. Necesita que Z1 Z3=F(T3) sean de signo opuesto.

```
LOGICAL CASE,RTN
COMMON/ROOT1/KOUNTI ,KOUNTS ,RTN ,X1 ,X2 ,X3 ,Y1 ,Y2 ,Y3
```

```
C**** Declaración de funciones
```

```
      CASE(RTN)=(.NOT.RTN)
      IF(CASE(Z1*Z3.GE..0))GO TO 10
          WRITE(6,400)KOUNTS,T1,Z1,T3,Z3
          RETURN
10 CONTINUE
```

```
C**** Inicialización
```

```
      X1=T1
      Y1=Z1
      X3=T3
      Y3=Z3
```

```
C**** Comienzo del bucle
```

```
20 CONTINUE
   KOUNTI = KOUNTI +1
   IF(CASE(KOUNTI.GE.ITRMX ))GO TO 22
       WRITE(6,410)KOUNTS,KOUNTI,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3
       RETURN
22 CONTINUE
   X2=(Y3*X1 - Y1*X3)/(Y3-Y1)
   CALL F(X2,Y2)
   ERROR=Y2
   CALL MONTON
   IF(RTN)THEN
   IF(Y1*Y2.LT.0.0)THEN
       X2=(X1+X2)*0.5
   ELSE
       X2=(X2+X3)*0.5
   ENDIF
D   PRINT *, ' FLAG WORK',X1,X2,X3
   CALL F(X2,Y2)
   ERROR=Y2
   RTN=.FALSE.
   ENDIF
   IF(CASE(ABS(Y2).LE.TOLERF))GO TO 30
       ROOT=X2
       ERROR=Y2
       RETURN
30 CONTINUE
   IF(CASE(Y1*Y2.LT..0))GO TO 40
       AX=ABS(X2)
       AY=ABS(X1)
       SMLNF = ABS(X2-X1)-AMAX1(1.0,AX,AY)*TOLERA
       IF(SMLNF.LE.0.0)GO TO 32
           ROOT=(X2+X1)/2.
           CALL F(ROOT,ERROR)
       IF(CASE(ABS(ERROR).LE.TOLERF)) GO TO 31
           RETURN
31 CONTINUE
   X2=ROOT
```

```
C**** Si no, ir de nuevo...
```

```

        Y2=ERROR
        IF(CASE(Y1*ERROR.LT.0.0))GO TO 50
32 CONTINUE

C**** ELSE, actualizar

        X3=X2
        Y3=Y2
C    GO TO TOP OF LOOP
        GO TO 20
40 CONTINUE

C**** ELSE, CASE(Y2*Y3.LT..0)

        AX=ABS(X2)
        AY=ABS(X3)
        SMLNF = ABS(X3-X2)-AMAX1(1.0,AX,AY)*TOLERA
        IF(SMLNF.LE.0.0)GO TO 50
            ROOT=(X3+X2)/2.
            CALL F(ROOT,ERROR)
        IF(CASE(ABS(ERROR).LE.TOLERF)) GO TO 45
            RETURN

C**** Si no, ir de nuevo...

45 CONTINUE
        X2=ROOT
        Y2=ERROR
        IF(CASE(Y3*ERROR.LT.0.0))GO TO 32
50 CONTINUE

C**** Si no, actualizar

        X1=X2
        Y1=Y2

C**** Ir al comienzo del bucle

        GO TO 20

400 FORMAT(T5,' Problemas en WORK en el bloque ROOTA.Tras ',I8,' paso
1s(T1,Z1) y (T3,Z3) toman los valores',/,T10,2(1H(,1PE16.8,1H,,1P
2E16.8,1H))
410 FORMAT(T5,' Problemas en WORK en el bloque ROOTA.Tras ',I8,' STEP
1SAND'I8,' iteraciones (X1,Y1),(X2,Y2), y (X3,Y3) son',/T10,3(1H(,1P
2E16.8,1H,,1PE16.8,1H))
        END

        SUBROUTINE MONTON

C**** Usada en el conjunto ROOTA. Comprueba, con los puntos (X1,Y1),
C    (X2,Y2) Y (X3,Y3) si F(X)=Y es estrictamente creciente o
C    decreciente. Si no, aparece un mensaje de error y el programa
C    se interrumpe.

        COMMON/ROOT1/KOUNTI,KOUNTS,RTN,X1,X2,X3,Y1,Y2,Y3
        LOGICAL CASE,RTN,TEST

        CASE(TEST)=(.NOT.TEST)

        TEST =(X2.GT.X1).AND.(X3.GT.X2)

```

```

IF(CASE(.NOT.TEST))GO TO 10
  WRITE(6,400)
  WRITE(6,410)KOUNTS,KOUNTI,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3
  RTN=.TRUE.
  RETURN
10 CONTINUE
TEST=(Y3-Y2)*(Y2-Y1).GE.0.0
IF(CASE(.NOT. TEST))GO TO 20
RTN=.TRUE.
IF(Y1*Y3.LT.0.0)RETURN
  WRITE(6,420)
  WRITE(6,410)KOUNTS,KOUNTI,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3
  RETURN
20 CONTINUE
C  E L S E
  RETURN
400 FORMAT(T5,'Problemas en MONTON, en el bloque ROOTA.Ordenadas X1,X2
1,X3no est n en orden creciente')
420 FORMAT(T5,'Problemas en MONTON, en el bloque ROOTA.Y=F(X) no es mo
lnotonico ')
410 FORMAT(T5,' Tras ',I8,' pasos y ',I8,' iteraciones los valores
l finales son ',/ (5X,'X= ',1PE16.8,1H,, 'Y= ',1PE16.8,5X))
  END

FUNCTION INCRES(I,ISTPMX)
COMMON/ROOT1/KOUNTI,KOUNTS,RTN,X1,X2,X3,Y1,Y2,Y3
LOGICAL RTN
INCRES =I+1
IF(INCRES.LE.ISTPMX) RETURN

C**** Demasiados pasos. Impresiçn de mensaje de error.

WRITE(6,400)I,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3
RTN=.TRUE.
RETURN
400 FORMAT(5X,'Problemas en INCRES, en bloque ROOTA.No hay cambio de s
ligno tras ',I8,' pasos. Los valores finales son ',/ (5X,'X= ',1PE1
26.8,1H,, 'Y= ',1PE16.8,5X))
  END

SUBROUTINE BACK(N)

COMMON / CBA / IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,
1      INE
COMMON / CBB / JR       ,JP       ,NT       ,DT       ,DX       ,
1      GR       ,XBEG
COMMON / CBE / AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,
1      RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,
2      CS(101) ,HV(101) ,H(101)
COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF      ,ZREF      ,
1      EBOUND ,DREF(101) ,TCRT      ,CFER      ,KOUNT      ,
2      KOUNTS ,CFT
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF      ,QUREF      ,XN      ,PAP      ,
1      SLPEQ      ,CC      ,CE      ,BSLP(101,6)
COMMON / CBI / CUP      ,QUP(1000),IXSL      ,LXSL      ,QLAT(1000),
1      ALF
COMMON / CBJ / BWD(101) ,QSL      ,BWDM(101)
COMMON / CBL / DAB(101) ,WS(10) ,DN(10) ,PCT(11) ,
1      NSF      ,SPWT

```

EXTERNAL FOFWS,NORMD,CRITD

C**** BACK, junto con VACE y FOFWS, se encarga de calcular el
C valor de las variables hidr ulicas de cada sección y en
C cada paso de tiempo. La solución de las distintas ecuaciones se
C realiza en el bloque ROOTA. Mediante el cambio K=JP-J+1 se
C consigue que los c lculos comiencen desde el extremo aguas abajo,
C aunque J y K crecen y decrecen en el mismo sentido.

```
DO 2 J=1,JP
  K= JP-J+1
  CALL SETK(K)
  IF (J. EQ. 1) THEN
```

C**** Si YREF es >0, se asume ese valor como el existente en el extremo
C aguas abajo. Si YREF=0, se considera que el calado aguas abajo es
C el calado normal, que se calcula.
C En el resto de las secciones, el c lculo se realiza en base al
C m, todo del paso est ndar (ver FOFWS). El valor de nivel del agua
C en el instante inicial (valor inicial de prueba) se establece como
C el correspondiente a un calado que es la mitad de la altura de los
C taludes. En momentos posteriores, es el valor calculado para el
C paso de tiempo anterior.

```
IF (YREF.GT.0.0)THEN
  Y(K)= YREF
  CALL VACE(K)
ELSE
  IF(N.EQ.0)THEN
    FRGES = DREF(K)*0.5+Z(K)
  ELSE
    FRGES= Y(K)
  ENDIF
```

C**** KOUNTS y KOUNT se introducen como datos de entrada.

C Para la solución de las ecuaciones se recomienda
C la posibilidad de m s pasos. Solución: elevar KOUNT y KOUNTS
C suficientemente para todo tipo de c lculos, ya que el tiempo de
C computación no es un problema importante. Se recuerda que:

```
      KOUNT= Controlador pasos en solución num,rica ecuaciones
      en bloque ROOTA. En dichas subrutinas, es la
      variable ITRMX, m ximo número de iteraciones
      permitidas en la subrutina WORK tras haber
      encontrado el cambio de signo de la función.
      KOUNTS= Controlador pasos en solución num,rica ecuaciones
      en bloque ROOTA. En dichas subrutinas, es la
      variables ISTPMX, m ximo número de pasos permitidos
      para encotrar el intervalo de cambio de signo.
```

C**** El tamaño del paso se define para todos los casos como el
C cociente entre el calado y el número de pasos.

```
CCC      KOUNT=100
CCC      KOUNTS=100
          STEP=ABS((FRGES-Z(K))/FLOAT(KOUNT))
          TOLERA=EBOUND
          CALL ROOTA(ROOT,ERR,NORMD,FRGES,STEP,KOUNTS,KOUNT,TOLERA,
1          EBOUND)
D      PRINT *,K,Y(K),DAB(K),Y(K)-HD(K),Z(K)
          ENDIF
```

```

ELSE
    Y(K)= HD(K+1) +Z(K)
    FRGES=Y(K+1)+DX*SLPEQ

C**** El nivel de prueba inicial en el m,todo del paso est ndar se
C define como el anterior m s el desnivel geom,trico.

CCC     KOUNT=200
CCC     KOUNTS=200
        STEP=ABS((Y(K)-Z(K))/FLOAT(KOUNT))
        TOLERA=EBOUND
        EPS=EBOUND
        CALL ROOTA(ROOT,ERR,FOFWS,FRGES,STEP,KOUNTS,KOUNT,
1         TOLERA,EPS)

C**** Si en la soluci3n del m,todo del paso est ndar no se consigue una
C soluci3n dentro de la tolerancia, se supone que el calado en la
C secci3n en cuesti3n es el calado normal, que se calcula a
C continuaci3n.

        IF(ABS(ERR).GT.EPS)THEN
            FRGES=Z(K)+DREF(K)
            CALL ROOTA(ROOT,ERR,NORMD,FRGES,STEP,KOUNTS,KOUNT,
1            TOLERA,EPS)
            PRINT *,'Se asume el calado normal en la secci3n',K
        ENDIF
D PRINT *,K,Y(K),DAB(K),Y(K)-HD(K),Z(K)
    ENDIF
2 CONTINUE

RETURN
END

SUBROUTINE FOFWS(ROOT,EPS)

COMMON / CBA / IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,
1      INE
COMMON / CBB / JR       ,JP       ,NT       ,DT       ,DX       ,
1      GR       ,XBEG
COMMON / CBE / AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,
1      RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,
2      CS(101) ,HV(101) ,H(101)
COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,ZREF ,
1      EBOUND ,DREF(101) ,TCRT ,CFER ,KOUNT ,
2      KOUNTS ,CFT
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF ,QUREF ,XN ,PAP ,
1      SLPEQ ,CC ,CE ,BSLP(101,6)
COMMON / CBI / CUP     ,QUP(1000), IXSL ,LXSL ,QLAT(1000) ,
1      ALF
COMMON / CBJ / BWD(101) ,QSL, BWDM(101)

C**** En FOFWS se encuentran las funciones F(X) a solucionar
C por el bloque ROOTA. Como puede apreciarse, la subrutina consta de
C cuatro bloques bien diferenciados.

C**** A continuaci3n, junto con el bloque ROOTA, se calcula Y(J) de
C acuerdo con el m,todo del paso est ndar.
C Se utiliza la ecuaci3n Manning como predictor de la
C pendiente de la l;nea de energ;a:
C SFM= 0.5*(SF(IK)+SF(IK+1)), donde SF se calcula en VACE.
C Las p,rdidas por remolinos se calculan multiplicando la diferencia

```

C de cargas de velocidad por los coeficientes CC o CE.
 C Los valores de EBOUND (tolerancia para la raíz en ROOTA) tienen
 C significados distintos cuando resolvemos la ecuación del paso
 C estandar que cuando resolvemos la ecuación de Manning. En el
 C primer caso, se trata de diferencias de energía (en m), y en el
 C segundo, de caudal. Debe primar el criterio para el paso
 C estandar, ya que el calado normal se usa rara vez. Puede
 C plantearse la introducción de valores diferentes para cada caso.

```

Y(IK) = ROOT
CALL VACE(IK)
HE=HV(IK+1)-HV(IK)
IF(HE.GT.0.0)THEN
  HE=HE*CC
ELSE
  HE=ABS(HE)*CE
ENDIF
SFM= 0.5*(SF(IK)+SF(IK+1))
HF= SFM*DX
HT= H(IK+1) +HF +HE
EPS= (HT -H(IK))
D WRITE(*,666)IK,ROOT,EPS,HE,HF,H(IK+1),H(IK)
666 FORMAT(' FLAG',I5,6G15.5)
RETURN

```

C**** Con las siguientes sentencias, se actualiza la subrutina FOFWS
 C con respecto a BACK en lo que se refiere a la ordenación de las
 C secciones transversales.

```

ENTRY SETK(K)
IK = K
RETURN

```

C**** Calculo del calado normal de acuerdo con la ecuación de Manning.

```

ENTRY NORMD(ROOT,EPS)
Y(IK)=ROOT
CALL VACE(IK)
EPS=QE(IK)-AF(IK)*SQRT(SLPEQ)*(RA(IK)**(2.0/3.0))/XN
D PRINT *,IK,ROOT,EPS,AF(IK),RA(IK)
RETURN

```

C**** Calculo del calado critico.

```

ENTRY CRITD(ROOT,EPS)
Y(IK)=ROOT
CALL VACE(IK)
EPS=QE(IK)-AF(IK)*SQRT(GR*RA(IK))
RETURN
END

```

SUBROUTINE VACE(J)

```

COMMON / CBB / JR ,JP ,NT ,DT ,DX ,
1 GR ,XBEG
COMMON / CBD / CFS ,EFS
COMMON / CBE / AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,
1 RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,
2 CS(101) ,HV(101) ,H(101)
COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,ZREF ,

```

```

1          EBOUND  ,DREF(101) ,TCRT      ,CFER      ,KOUNT  ,
2          KOUNTS   ,CFT
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF      ,QUREF      ,XN        ,PAP      ,
1          SLPEQ    ,CC          ,CE          ,BSLP(101,6)
COMMON / CBJ / BWD(101)  ,QSL          ,BWDM(101)
COMMON / CBK / NTP(6)    ,NYI
COMMON / CBL / DAB(101)  ,WS(10)     ,DN(10)     ,PCT(11)  ,
1          NSF      ,SPWT
COMMON / CBM / YP(101,99),ZP(101,99)

```

C**** Subrutina llamada repetidamente para calcular todas las
C variables hidraulicas del flujo. Es utilizada para un cauce de forma
C cualquiera. El calculo en esta subrutina se refiere a una unica
C seccion transversal.

```

AF(J)=0.0
PE(J)=0.0

```

C**** Si no hay caudal, logicamente las variables valen 0.

```

IF(QE(J).GT.0.0)THEN
  HD(J)=0.0

```

C**** Este bucle se refiere a cada una de las localizaciones a estudiar
C en cada seccion transversal, determinadas por NYI.

```

DO 90 I=2,NYI
  DEP=Y(J)-ZP(J,I)
  IF(DEP.GT.HD(J))HD(J)=DEP
  IF(ZP(J,I-1).GE.Y(J) .AND. Y(J).GT.ZP(J,I))THEN
    DYD=YP(J,I)-(YP(J,I-1)*(Y(J)-ZP(J,I))+YP(J,I)*
1      (ZP(J,I-1)-Y(J)))/(ZP(J,I-1)-ZP(J,I))
    AF(J)=0.5*(Y(J)-ZP(J,I))*DYD+AF(J)
    PE(J)=SQRT(DYD**2+(Y(J)-ZP(J,I))**2)+PE(J)
  ELSE IF(Y(J).GT.ZP(J,I) .AND. Y(J).GT.ZP(J,I-1))THEN
    DY=YP(J,I)-YP(J,I-1)
    AF(J)=(Y(J)-0.5*(ZP(J,I)+ZP(J,I-1)))*DY+AF(J)
    PE(J)=SQRT(DY**2+(ZP(J,I)-ZP(J,I-1))**2)+PE(J)
  ELSE IF(ZP(J,I).GE.Y(J) .AND. Y(J).GT.ZP(J,I-1))THEN
    DYD=(YP(J,I-1)*(Y(J)-ZP(J,I))+YP(J,I)*
1      (ZP(J,I-1)-Y(J)))/(ZP(J,I-1)-ZP(J,I))-YP(J,I-1)
    AF(J)=0.5*(Y(J)-ZP(J,I-1))*DYD+AF(J)
    PE(J)=SQRT(DYD**2+(Y(J)-ZP(J,I-1))**2)+PE(J)
  ENDIF
D  PRINT *,I,Y(J),ZP(J,I),DY

```

90 CONTINUE

C**** En el calculo de la carga de velocidad, se supone un coeficiente
C de Coriolis alfa=1

```

RA(J) = AF(J)/PE(J)
SF(J) = XN*XN*AF(J)**EFS*PE(J)**CFS*QE(J)**2
VM(J) = QE(J)/AF(J)
FR(J) = VM(J)/(SQRT(GR*HD(J)))
HV(J) = VM(J)**2/(2.*GR)
H(J) = HV(J) +Y(J)
ELSE
  HD(J) = 0.0
  VM(J) = 0.0
  HV(J) = 0.0

```

```

      RA(J) = 0.0
      H(J) = 0.0
      SF(J) = 0.0
      FR(J) = 0.0
ENDIF

```

```

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SINP

```

```

COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,ZREF ,
1 EBOUND ,DREF(101) ,TCRT ,CFER ,KOUNT ,
2 KOUNTS ,CFT
COMMON / CBG / D50 ,SPGR(11) ,POR ,CBC
COMMON / CBL / DAB(101) ,WS(10) ,DN(10) ,PCT(11) ,
1 NSF ,SPWT
COMMON / CBM / YP(101,99) ,ZP(101,99)
COMMON / VIS / VISC

```

```

DIMENSION TITLE(20), ROUND(10), SHAPE(10), DL(11)

```

```

C**** SINP lee datos necesarios para los calculos relativos al
C transporte de sedimentos. Adem s, se mandan imprimir en el archivo
C principal de salida TEST.OUT.
C En funci3n de la temperatura, se calcula la densidad del agua y la
C viscosidad flujo. El sedimento puede considerarse dividido en
C fracciones para el calculo de la capacidad de transporte. Se
C calcula tambi,n el tamao nominal de las fracciones de sedimento,
C y la velocidad de ca;da de las part;culas transportadas,
C utilizando para ello la funci3n SETL.
C La viscosidad es necesaria para el calculo de la velocidad de
C ca;da, y la densidad del agua para determinar el esfuerzo cortante
C medio del flujo.

```

```

C**** INPUT J - Propiedades del sedimento y par metros para el calculo
C del transporte de sedimentos.

```

```

C**** D50 = Mediana de la distribuci3n del tamao de part;culas
C (fnicamente a t;tulo ilustrativo de las propiedades del
C suelo, ya que lo que se usa es DL).
C DL = Tamao de cada una de las fracciones de sedimento (mm)
C NSF = Nfmero de fracciones en las que se divide el sedimento
C PCT = Proporción de la carga total de sedimentos ocupada por
C cada una de las fracciones (tanto por uno).
C SPGR= Peso espec;fico relativo de las part;culas transportadas
C POR = Porosidad del suelo
C CBC = Coeficiente en f3rmula celeridad lecho.
C TEMP= Temperatura del agua (3C)

```

```

      NSF=1

```

```

      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,201) POR,CBC,D50

```

```

D write (*,*) cbc

```

```

C**** Se escriben aqui TCRT y CFER para unir los datos relativos
C al suelo.

```

```

READ (1,100) TITLE
READ (1,200) TEMP,XNSF,RD,SHP
WRITE(2,300) POR,CBC,D50,TCRT,CFER,CFT,RD,SHP
NSF=INT(XNSF)
READ (1,100) TITLE
READ (1,210) (DL(L),PCT(L),SPGR(L),L=1,NSF+1)

```

C**** C lculo viscosidad cinem tica del agua (m²/s)

```

T=TEMP
VISC=0.130989E-5 -0.323292E-7*(T-10.)+0.464500E-9*(T-10.)*
$ (T-15.)+0.248043E-11*(T-10.)*(T-15.)*(T-20.)-
$ 0.371600E-12*(T-10.)*(T-15.)*(T-20.)*(T-25.)

```

C**** C lculo peso espec;fico del agua (g/m³)

```

SPWT= (1019.7-0.120*(T-10.)-5.9E-3*(T-10.)*(T-15.))+4.266667E-5*
$ (T-10.)*(T-15.)*(T-20.)-5.333333E-7*(T-10.)*(T-15.)*
$ (T-20.)*(T-25.))*1000.0

```

C**** C lculo tamao nominal fracciones de sedimento (le;do en mm). Se
C define dicho tamao nominal de cada fracci;n como la media
C geom,trica entre el tamao de dicha fracci;n y la del tamao
C inmediatamente superior. Le;do DL en mm, al dividir por 1000.
C queda en m, que es como se usa en c lculos posteriores.

```

DO 6 K= 1,NSF
DN(K)= SQRT(DL(K+1)*DL(K))/1000.0
6 CONTINUE

```

C**** C lculo de las velocidades de ca;da de las fracciones de suelo
C erosionadas.

```

DO 8 K= 1,NSF

```

C**** Escala de redondeo de Powers (decimal):

```

ROUND(K)= RD

```

C**** Factor de forma de Corey (decimal):

```

SHAPE(K)= SHP

```

C**** Velocidad de ca;da (m/s):

```

WS(K)= SETL(DN(K),SPGR(K),SHAPE(K),ROUND(K),VISC)
D PRINT *,K,DN(K),WS(K)
8 CONTINUE

```

```

100 FORMAT(20A4)
201 FORMAT(5F10.0)
200 FORMAT(4F10.0)
210 FORMAT(3F10.0)
300 FORMAT(5H POR=, F10.3, 22H Porosidad del suelo /
5 5H CBC=, F10.5, 33H Coef.en f;rmula celeridad lecho /
6 5H D50=, F10.5, 33H Tamao nominal del sedimento /
7 5HTCRT=, F10.5, 32H Esfuerzo cortante cr;tico (Pa) /
8 5HCFER=, F10.5, 32H Coef. erodibilidad (N/N.min) /
9 5HCFT =, F10.5, 32H Coef. esf. cortante lecho /
9 5H RD =, F10.5, 32H Redondez (ec. de Dietrich) /

```

```

9      5HSHP =, F10.5, 32H Forma (ec. Dietrich)      /)
RETURN
END

```

```

FUNCTION SETL(DM,SPGR,SHAPE,ROUND,VISC)

```

```

COMMON / CBB / JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1      GR      ,XBEG

```

C**** Funci3n es llamada por la subrutina SINP. Calcula la
C velocidad de ca;da (m/S) de las part;culas.

```

DST= ((SPGR-1.)*GR*DM**3.)/VISC**2.
ALD= ALOG10(DST)
ALDMF= ALOG10(DST)-4.6
OMS= 1.0 - SHAPE
R1= -3.76715 + ALD*(1.92944 - ALD*(0.09815 - ALD*(0.00575
$ + ALD*0.00056)))
R2= ALOG10(1. - OMS/0.85) - (OMS**2.3)*TANH(ALDMF) +
$ 0.3*(OMS-0.5)*OMS*OMS*ALDMF
R3= (0.65 - (SHAPE/2.83)*TANH(ALDMF))**(1.0 + (3.5-ROUND)/2.5)
WST= R3*10.0**(R1+R2)
SETL= ((SPGR-1.)*GR*VISC*WST)**0.333333333
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE QSLT

```

```

COMMON / CBA / IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,
1      INE
COMMON / CBB / JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1      GR      ,XBEG
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF      ,QUREF      ,XN      ,PAP      ,
1      SLPEQ      ,CC      ,CE      ,BSLP(101,6)
COMMON / CBI / CUP      ,QUP(1000), IXSL      ,LXSL      ,QLAT(1000),
1      ALF

```

```

DIMENSION TITLE(20)

```

C**** Defini3i3n de todo lo relativo al aporte lateral de agua.
C Contempla tres posibles opciones, y de acuerdo con ellas, es
C necesario elaborar el archivo de entrada. Estas opciones se
C controlan mediante la variable INL. Si INL=0., el aporte lateral
C es constante e igual a QLREF. Si INL=1., el aporte lateral se
C realiza con arreglo a un hidrograma introducido manualmente, y que
C se lee en un input espec;fico. Si INL=2., el aporte sigue la ley
C del coseno, con par metros le;dos en otro bloque de inputs
C espec;fico.

C**** INPUT K - Tramos con aporte lateral

```

C
C      IXSL= Primera secci3n del tramo con aporte lateral
C      LXSL= Ultima secci3n del tramo con aporte lateral

```

```

READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,100) TITLE
READ (1,200) AIXSL,ALXSL
IXSL= IFIX(AIXSL)
LXSL= IFIX(ALXSL)

```

```

C**** Elección del tipo de aporte lateral

      IF (INL .EQ. 0) THEN

C**** Aporte lateral constante
      DO 1 N= 1,NT
        QLAT(N)= QLREF
1      CONTINUE
      ELSE IF (INL .EQ. 1) THEN

C**** INPUT L - Hidrograma de aporte lateral (m^2/s)
C      Los datos deben de ser introducidos en filas (no imprescindible)
C      con un máximo de ocho datos, separados por comas.

      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,200) (QLAT(N), N=1,NT)
      ELSE IF (INL .EQ. 2) THEN

C**** INPUT M - Características del aporte lateral de acuerdo
C      con la ley del coseno.
C      QPKL= Caudal pico, en m^2/s
C      QBL= Caudal de base, en m^2/s
C      TIL= Duración del hidrograma, en minutos

      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,200) QPKL,QBL,TIL
      NTIL= TIL/DT
      IF (QPKL .GT. 0.) THEN
        C1=0.5*(QPKL+QBL)
        C2=C1-QBL
        DTM=DT/60.
        TP=0.5*TIL/DTM
        DO 2 N=1,NT
          COUNT=N
          VD=COUNT*DTM
          IF (VD.LE.TIL) THEN
            QLAT(N)=C1-C2*COS(N*3.1415930/TP)
          ELSE
            QLAT(N)=QBL
          END IF
2      CONTINUE
      ELSE
        DO 3 N= 1,NT
          QLAT(N)= QBL
          IF (N .GT. NTIL) QLAT(N)= 0.0
3      CONTINUE
      END IF
      END IF
100  FORMAT(20A4)
201  FORMAT(2F10.0)
200  FORMAT(8F10.0)
      RETURN
      END

      SUBROUTINE QSUP

      COMMON / CBA /  IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,

```

```

1      INE
COMMON / CBB / JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1      GR      ,XBEG
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF      ,QUREF      ,XN      ,PAP      ,
1      SLPEQ      ,CC      ,CE      ,BSLP(101,6)
COMMON / CBI / CUP      ,QUP(1000), IXSL      ,LXSL      ,QLAT(1000),
1      ALF

```

```

DIMENSION TITLE(20)

```

```

C**** Se define aqui; todo lo relativo al aporte de agua por el extremo
C      aguas arriba.
C      Contempla tres posibles opciones, y de acuerdo con ellas, es
C      necesario elaborar el archivo de entrada. Estas opciones se
C      controlan mediante la variable IND. Si IND=0., el aporte
C      es constante e igual a QUREF. Si IND=1., el aporte se
C      realiza con arreglo a un hidrograma introducido manualmente, y que
C      se lee en un input especifico. Si IND=2., el aporte sigue la ley
C      del coseno, con par metros leidos en otro bloque de inputs
C      especifico.

```

```

C**** Elección del tipo de aporte por el extremo aguas arriba.

```

```

      IF (IND .EQ. 0) THEN

```

```

C**** Caudal constante

```

```

      DO 1 N= 1,NT
        QUP(N)= QUREF
1      CONTINUE
      ELSE IF (IND .EQ. 1) THEN

```

```

C**** INPUT N - Hidrograma (m^3/s)
C      Los datos deben de ser introducidos en filas (no imprescindible)
C      con un máximo de ocho datos, separados por comas.

```

```

      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,200) (QUP(N),N=1,NT)
      QB=QUP(1)
      ELSE IF (IND .EQ. 2) THEN

```

```

C
C**** INPUT 0 - Características del hidrograma de acuerdo con la
C      ley del coseno

```

```

C      QPK= Caudal pico, en m^3/s
C      QB= Caudal base, en m^3/s
C      TI= Duración del hidrograma, en minutos
C

```

```

      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,100) TITLE
      READ (1,*)QPK,QB,TI
      C1=0.5*(QPK+QB)
      C2=C1-QB
      DTM=DT/60.
      TP=0.5*TI/DTM
      DO 2 N=1,NT
        IF (QPK .NE. 0.) THEN
          COUNT=N

```

```

                VD=COUNT*DTM
                QUP(N)= QB
                IF (VD .LE. TI) QUP(N)=C1-C2*COS(N*3.1415930/TP)
            ELSE
                QUP(N)= QB
            END IF
2          CONTINUE
        END IF

C**** INPUT P - Concentraci3n de sedimentos que se incorporan
C      por el extremo aguas arriba y coeficiente para el modelo
C      de transporte no equilibrado de Bell y Sutherland (1983), de
C      acuerdo con lo expuesto por Choudhury (1995)

        READ (1,100) TITLE
        READ (1,100) TITLE
        READ (1,100) TITLE
        READ (1,200) CUP, ALF
        WRITE (2,300) CUP, ALF
100     FORMAT(20A4)
200     FORMAT(8F7.4)
300     FORMAT(5H CUP=, F10.3, 35H Conc. seds. aguas arriba (m^3/m^3) /
1       5H ALF=, F10.3, 35H Coef. transporte no equilibrado /)
        RETURN
        END

                SUBROUTINE XSDA(ITIME)

                COMMON / CBA /  IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,
1                INE
                COMMON / CBB /  JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1                GR      ,XBEG
                COMMON / CBE /  AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,
1                RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,
2                CS(101) ,HV(101) ,H(101)
                COMMON / CBF /  X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,ZREF ,
1                EBOUND ,DREF(101) ,TCRT ,CFER ,KOUNT ,
2                KOUNTS ,CFT
                COMMON / CBG /  D50     ,SPGR(11) ,POR     ,CBC
                COMMON / CBH /  BWDRF(101),QLREF ,QUREF ,XN     ,PAP ,
1                SLPEQ ,CC     ,CE     ,BSLP(101,6)
                COMMON / CBI /  CUP     ,QUP(1000), IXSL ,LXSL ,QLAT(1000),
1                ALF
                COMMON / CBJ /  BWD(101) ,QSL     ,BWDM(101)
                COMMON / CBL /  DAB(101) ,WS(10) ,DN(10) ,PCT(11) ,
1                NSF     ,SPWT
                COMMON / VIS /  VISC

                DIMENSION CSS(101,11)

C**** En esta subrutina se calcula la capacidad de transporte del flujo
C      en cada secci3n transversal y en cada instante, utilizando la
C      ecuaci3n de Yang, calculada en la funci3n del mismo nombre.
C      Se llama adem s a la subrutina BELVDA, que
C      resuelve la ecuaci3n de continuidad del sedimento.

C**** Bucle externo que extiende los c culos a todas las secciones. Se
C      calcula primeramente la velocidad cortante USTAR.

        DO 3 J= 1,JP

```

```

        CS(J)=0.0
        USTAR=SQRT(GR*SF(J)*RA(J))

C**** Bucle interno que extiende los calculos a cada una de las
C     fracciones en las que se ha dividido el sedimento transportado.
C     Mediante la variable CSS(J,K) se calcula la capacidad de
C     transporte total para cada fracción separadamente. La capacidad
C     de transporte total para cada sección y tramo se calcula mediante
C     CS(J,K), sumando las capacidades de transporte correspondientes a
C     cada fracción.

        DO 1 K= 1,NSF
            CSS(J,K)=YANG(INE,ITIME,ALF,DT,DN(K),VISC,USTAR,X(J),
$           VM(J),SF(J),SPGR(K),WS(K))*PCT(K)
            CS(J)=CS(J)+CSS(J,K)
1           CONTINUE
3           CONTINUE
        CALL BELVDA(ITIME)
        RETURN
        END

        FUNCTION YANG(INE,ITIME,ALF,DT,D,VISC,UST,X,V,SLOPE,SPGR,VS)

C**** C lculo de la capacidad de transporte de sedimentos
C     utilizando la fórmula de carga total de Yang (1973).

        DM= D
        A=UST*DM/VISC

C**** C lculo de la velocidad crítica

        IF (A.LT.70.) THEN
            VCW= (2.5/(ALOG10(A)-0.06))+0.66
        ELSE
            VCW= 2.05
        END IF
        ESP= (V*SLOPE/VS)-VCW*SLOPE
        IF (ESP.LE.0.) THEN
            CONC=0.0
        ELSE

C**** Expansión de la ecuación

            F1= 5.435-0.286*ALOG10(VS*DM/VISC)-0.457*ALOG10(UST/VS)
            F2= 1.799-0.409*ALOG10(VS*DM/VISC)-0.314*ALOG10(UST/VS)
            F3= ALOG10(ESP)
            E= F1+F2*F3

C**** Expresión final. Aquí, CONC figura como "concentración de
C     sedimentos en peso seco, partes por millón" (Alonso et al., 1981).

            CONC= 10.0**E
        END IF

C**** Concentración expresada como peso seco en partes por parte.

        CONC= CONC/1.E6

C**** Concentración en volumen en partes por parte.
C     CONC=Peso seco sedimento(PS)/Peso agua (PA); En volumen:
C     (PS/Peso específico sedimento)/(PA/Peso específico agua)=

```

C = (PS/PA)*(P.e.a./P.e.s)=CONC/(P.e.s./P.e.a.)=CONC/P.e.r.s.,
 C siendo P.e.r.s. el peso específico relativo del sedimento, es
 C decir, SPGR. Efectivamente:

CONC= CONC/SPGR

C**** Introducci3n del modelo propuesto por Bell y Sutherland (1983)
 C para el caso de transporte de sedimentos no equilibrado. Si INE
 C es igual a 1, se activa este modelo. En la definici3n
 C de la variable C, el tiempo est en segundos, que es la unidad
 C tiempo empleada en los c culos relacionados con la capacidad de
 C transporte.

```
IF (INE.EQ.1) THEN
  C=1/(1+ALF*ITIME*DT)
  EX=-C*X
  CONC=CONC*(1-EXP(EX))
END IF
```

```
YANG= CONC
RETURN
END
```

SUBROUTINE BELVDA(ITIME)

```
COMMON / CBA /  IND        ,INL        ,INR        ,INS        ,INP        ,
1            INE
COMMON / CBB /  JR         ,JP         ,NT         ,DT         ,DX         ,
1            GR            ,XBEG
COMMON / CBE /  AF(101)   ,QE(101)   ,VM(101)   ,PE(101)   ,
1            RA(101)   ,HD(101)   ,FR(101)   ,SF(101)   ,
2            CS(101)   ,HV(101)   ,H(101)
COMMON / CBF /  X(101)   ,Y(101)   ,Z(101)    ,YREF    ,ZREF ,
1            EBOUND   ,DREF(101) ,TCRT    ,CFER    ,KOUNT   ,
2            KOUNTS   ,CFT
COMMON / CBG /  D50       ,SPGR(11) ,POR       ,CBC
COMMON / CBH /  BWDRF(101),QLREF   ,QUREF   ,XN       ,PAP    ,
1            SLPEQ   ,CC        ,CE        ,BSLP(101,6)
COMMON / CBJ /  BWD(101) ,QSL       ,BWDM(101)
COMMON / CBL /  DAB(101) ,WS(10)   ,DN(10)   ,PCT(11) ,
1            NSF        ,SPWT
COMMON / CBI /  CUP       ,QUP(1000), IXSL    ,LXSL    ,QLAT(1000),
1            ALF
COMMON / CBX /  CR2       ,ALP
```

DIMENSION ZN(101)

C**** Esta subrutina resuelve la ecuaci3n de continuidad del sedimento
 C mediante un m,todo de diferencias finitas. Se trata del m,todo de
 C Lax modificado por De Vries. La inc3gnita es la elevaci3n del
 C lecho en el siguiente paso de tiempo. Sin embargo, el m,todo se
 C utiliza para estimar la erosi3n que el flujo es capaz de producir
 C en un determinado subtamo al cabo de un determinado paso de
 C tiempo, expresada en m3/m long. Esta erosi3n se reparte luego
 C (subrutina BELV) entre el lecho y las paredes.

```
DO 10 J= 1,JP
  IF(ITIME.EQ.1)THEN
```

```

        ZN(J)=Z(J)
    ENDIF
10    CONTINUE

C**** La celeridad de las perturbaciones del lecho (CBC) se supone
C     constante, ante la imposibilidad de conocer su evolución. De
C     acuerdo con las condiciones para la estabilidad de De Vries:

    CR2= (CBC*DT/DX) ** 2
    ALP=0.001+CR2

    IF ((ALP.GT.0.9) .AND. (ALP.LE.1)) THEN
    WRITE (*,*) 'ATENCIÓN, Alfa <1, pero próximo a 1, Alfa=',ALP
    END IF
    IF (ALP.GT.1) THEN
    WRITE (*,*) 'ATENCIÓN, INESTABILIDAD, Alfa >1, Alfa=',ALP
    END IF
    IF (ALP.LT.0.2) THEN
    WRITE (*,*) 'ATENCIÓN, Alfa muy bajo, Alfa<0.2, Alfa=',ALP
    END IF
    IF (ALP.LE.CR2) THEN
    WRITE (*,*) 'ATENCIÓN, Alfa <N§ Courant'
    END IF

c**** C lculo del nuevo perfil longitudinal del lecho. Se utiliza una
C     extrapolación lineal para obtener la elevación del lecho en el
C     extremo aguas arriba imaginario (ZUPIMG), idem. extremo aguas abajo
C     imaginario (ZDNIMG)

    ZUPIMG= 2. * ZN(1) - ZN(2)
    ZDNIMG= 2. * ZN(JP) - ZN(JR)
    DO 20 J= 1,JP
        IF (J .EQ. 1) THEN
            QSUP= CUP * QE(1)
            QSDN= CS(2) * QE(2)
            TERM= 0.5 * ALP * (ZUPIMG + ZN(2)) + (1. - ALP) * ZN(1)
        ELSE IF (J .EQ. JP) THEN
            QSUP= CS(JR) * QE(JR)
            QSDN= CS(JP) * QE(JP)
            TERM= 0.5 * ALP * (ZN(JR) + ZDNIMG) + (1. - ALP) * ZN(JP)
        ELSE
            QSUP= CS(J-1) * QE(J-1)
            QSDN= CS(J+1) * QE(J+1)
            TERM= 0.5 * ALP * (ZN(J-1) + ZN(J+1)) + (1. - ALP) * ZN(J)
        END IF
    END DO

C**** Para resolver propiamente la ecuación diferencial, hay que dividir
C     por la anchura. DAB(J) representa el rea de suelo como tal (es
C     decir, considerando su porosidad) que puede ser erosionada.

        ZJ= (0.5 / ((1. - POR)*BWDM(J))) * (DT/DX) * (QSUP - QSDN) + TERM
        DAB(J)= (ZJ - ZN(J)) * BWDM(J)
        ZN(J)=ZJ
20    CONTINUE
30    CONTINUE
    RETURN
    END

SUBROUTINE PRIN(N)

COMMON / CBA / IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,

```

```

1      INE
COMMON / CBB / JR      ,JP      ,NT      ,DT      ,DX      ,
1      GR      ,XBEG
COMMON / CBE / AF(101) ,QE(101) ,VM(101) ,PE(101) ,
1      RA(101) ,HD(101) ,FR(101) ,SF(101) ,
2      CS(101) ,HV(101) ,H(101)
COMMON / CBF / X(101) ,Y(101) ,Z(101) ,YREF ,ZREF ,
1      EBOUND ,DREF(101) ,TCRT ,CFER ,KOUNT ,
2      KOUNTS ,CFT
COMMON / CBG / D50 ,SPGR(11) ,POR ,CBC
COMMON / CBK / NTP(6) ,NYI
COMMON / CBJ / BWD(101) ,QSL ,BWDM(101)
COMMON / CBL / DAB(101) ,WS(10) ,DN(10) ,PCT(11) ,
1      NSF ,SPWT
COMMON / CBM / YP(101,99) ,ZP(101,99)
COMMON / DUMMY/ DAR(101) ,DAL(101) ,DHR(101) ,DHL(101) ,DBR(101) ,
1      DBL(101) ,TR(101) ,TL(101) , ER(101) , ET(101) , ETT ,
2      TAU(101)
COMMON / CBX / CR2 ,ALP

```

C**** PRIX sólo actfa en los instantes indicados por la
C variable NTP. Se encarga de escribir los datos requeridos en
C los archivos de salida. Estos archivos son:

C**** TEST.OUT (unidad 2). Se escriben en ,1 los
C principales datos hidr ulicos. Por este orden: secciñ,
C distancia (m), rea mojada (m2), nivel (m), velocidad media (m/s),
C radio hidr ulico (m), pendiente de la linea de energ;a,
C calado (m), y nfmero de Froude.

C**** PLOT.OUT (unidad 3). Escribe los datos necesarios para dibujar
C en todo momento las secciones transversales: X(m), distancia
C desde el extremo aguas arriba; YP(m), posiciñ en la secciñ
C transversal; ZP(m) elevaciñ de cada punto de cada secciñ
C respecto al nivel de referencia.

C**** BED.OUT (unidad 5). Escribe, en este orden, n§ de
C secciñ, distancia (m), elevaciñ del lecho (m), nivel (m) y
C concentraciñ de sedimentos en ppm (volumen).

C**** EROS.OUT (unidad 9). Con formato. Escribe la erosiñ total
C acontecida a cada paso de tiempo (acumulada), en m^3, detallando
C para cada subtramo (m^3) (erosiñ parcial en cada paso de tiempo).
C Escribe adem s la celeridad de las perturbaciones del lecho
C (m^3/s), el nfmero de Courant al cuadrado y el valor de
C alfa. Escribe adem s el esfuerzo cortante cr;tico en cada
C subtramo.

C**** GEOM.OUT (unidad 10). Completa los datos para un an lisis
C exhaustivo. Imprime para cada secciñ la anchura del lecho
C (m), la profundidad erosionada en el lecho (m), el nivel (m),
C la longitud de la pared vertical en los taludes y la capacidad
C de transporte disponible (m^3/m).

C**** En algunos casos se aprecian pequenos desajustes temporales, es
C decir: en un mismo bloque de datos de salida se aportan valores
C que actfan en el paso de tiempo correspondiente a dicho bloque de
C impresiñ, mientras que otros valores, dentro del mismo bloque,
C se han calculado para ser utilizados en el paso de tiempo

C posterior. Esto ocurre, por ejemplo, con las variables DHL(J) y
C DAB(J) con respecto al resto en el archivo GEOM.OUT

```
WRITE(2,200) N
WRITE(3,300) N
WRITE(5,500) N
WRITE(9,900) N
WRITE(10,1000) N
WRITE(9,901) ETT, CBC, CR2, ALP
WRITE(9,902)
DO 10 J=1,JP
CONC= 1.E6*CS(J)
WRITE(2,201) J,X(J),AF(J),Y(J),VM(J),RA(J),SF(J),HD(J),
$ FR(J)
WRITE(3,301) (X(J),YP(J,JJ), ZP(J,JJ), JJ=1,NYI)
WRITE(5,501) J, X(J), (Y(J)-HD(J)), Y(J), CONC
WRITE(10,1001) X(J), BWDM(J), DHL(J), (Y(J)-HD(J)), Y(J),
$ TL(J),DAB(J)
```

10 CONTINUE

```
DO 20 I=1,JR
WRITE (9,903) X(I),ET(I),TAU(I)
```

20 CONTINUE

```
WRITE(2,202)
```

C**** Sentencias de formato para el archivo TEST.OUT

```
200 FORMAT(/1X,15HPaso de tiempo ,I3/1X,78(1H-)/' J Distancia',
1' Area Nivel Veloc. RA Sf' ,
2' Calado N$ FR ' /
31X,78(1H-), /)
201 FORMAT(I4,F9.2,1X,2F9.4,F9.4,F9.4,F10.7,F8.4,F8.4)
202 FORMAT(/1X,78(1H-), ///)
```

C**** Sentencias de formato para el archivo PLOT.OUT

```
300 FORMAT(/1X,'Paso de tiempo',I3//3X,' X ',3X,' YP ', 3X,
1' ZP '/')
301 FORMAT(1X,F9.2, 3X,F9.4,3X,F9.4)
```

C**** Sentencias de formato para el archivo BED.OUT

```
500 FORMAT (/1X,'Paso de tiempo',I3//1X,' J ',' X ',' Z
1',' Nivel ', ' CONC '/')
501 FORMAT (1X,I3,F9.2,F9.4,F9.4,1X,F14.4)
```

C***** Sentencias de formato para el archivo EROS.OUT

```
900 FORMAT(/1X, 'Paso de tiempo', I3// ' E.Total CBC CR2
1ALPH'/)
901 FORMAT (F8.3,1X,F8.3,1X,F8.3,1X,F8.4)
902 FORMAT (/15X,'Distancia E.subtramo TAU')
903 FORMAT (15X,F5.2,5X,F8.6,5X,F8.3)
```

C**** Sentencias de formato para el archivo GEOM.OUT

```
1000 FORMAT(/1X, 'Paso de tiempo', I3//' Distancia A. Lecho Prof.Er
1. El.Lecho Nivel Ca;da V C.T.Disp//)
```

1001 FORMAT(F9.2,2X,F8.4,2X,F8.4,2X,F9.4,2X,F9.4,2X,F9.4,2X,F9.6)

RETURN
END

SUBROUTINE BELV(N)

```
COMMON / CBA / IND      ,INL      ,INR      ,INS      ,INP      ,
1      INE
COMMON / CBB / JR       ,JP       ,NT       ,DT       ,DX       ,
1      GR       ,XBEG
COMMON / CBE / AF(101)  ,QE(101)  ,VM(101)  ,PE(101)  ,
1      RA(101)  ,HD(101)  ,FR(101)  ,SF(101)  ,
2      CS(101)  ,HV(101)  ,H(101)
COMMON / CBF / X(101)   ,Y(101)   ,Z(101)   ,YREF    ,ZREF    ,
1      EBOUND  ,DREF(101) ,TCRT    ,CFER    ,KOUNT   ,
2      KOUNTS  ,CFT
COMMON / CBG / D50      ,SPGR(11) ,POR      ,CBC
COMMON / CBH / BWDRF(101),QLREF    ,QUREF    ,XN      ,PAP      ,
1      SLPEQ    ,CC      ,CE      ,BSLP(101,6)
COMMON / CBJ / BWD(101) ,QSL      ,BWDM(101)
COMMON / CBL / DAB(101) ,WS(10)  ,DN(10)  ,PCT(11) ,
1      NSF      ,SPWT
COMMON /DUMMY/ DAR(101),DAL(101),DHR(101),DHL(101),DBR(101),
1      DBL(101),TR(101) ,TL(101) , ER(101), ET(101), ETT,
2      TAU(101)
```

C**** BELV reparte la erosión estimada para cada subtramo en
C erosión del lecho y erosión de los taludes. Además, calcula las
C modificaciones en la forma del cauce debidas a la erosión,
C mediante la determinación, para cada paso de tiempo y
C acumuladamente, de los descensos del lecho (variables ZTEM, DHL y
C DHR) y de los ensanchamientos laterales (variables DAT, DBL
C y DBR). También contabiliza la erosión total acontecida en cada
C subtramo y en todo el tramo.

```
DO 1 J= 1,JP
  IF(N.EQ.1)THEN
    DAR(J)=0.0
    DAL(J)=0.0
    DHR(J)=0.0
    DHL(J)=0.0
    DBL(J)=0.
    DBR(J)=0.
    ETT=0.
  ENDIF
```

C**** Si no hay capacidad de transporte disponible, no hay erosión.
C el esfuerzo cortante medio se calcula en Pa (N/m²)
C**** DT está en segundos y CFER en N/(N.min). Por tanto, hay que
C dividir DT, en segundos, por 60. DATB queda en m³/m. El
C coeficiente CFT permite considerar el cálculo del esfuerzo
C cortante en el lecho modificando el esfuerzo cortante medio.
C Si la erosión contabilizada para el lecho es mayor que la
C capacidad de transporte disponible, o si el calado es menor
C que la caída vertical en el talud, o si INP=0., se hace cero
C la erosión lateral y sólo se considera erosión en el lecho. El caso
C de INP=0. posibilita el estudio de procesos de degradación
C únicamente en el lecho. Es necesario hacer 0 TCRT si se desea
C estudiar la degradación de materiales no cohesivos.

```

C**** Las variables TR(J) y TL(J) calculan la longitud del corte
C      vertical en los bancos.
C      DHL(J) y DHR(J) acumulan el descenso que va produci,ndose en el
C      lecho, sumando en cada paso el descenso ZTEM.
C      Para cada secci3n y paso de tiempo, calcula el aumento en la
C      anchura que va teniendo lugar, mediante
C      las variables XL y XR, valores que se van acumulando en DBL(J) y
C      DBR(J). Fijada la magnitud de la erosi3n lateral mediante la
C      variable DAT, XL y XR se calculan considerando que el rea a
C      erosionar es trapecial, y que la profundidad a alcanzar es DHL(J).

```

```

C**** El m,todo no es exactamente v lido para el caso en el que no se
C      considere erosi3n del lecho y s3lo se tenga en cuenta la erosi3n
C      lateral: habr;a que eliminar la condici3n IF HD(J).LE. TR(J)... ,
C      etc.; una vez alcanzada esa condici3n, el m,todo trapecial de
C      avance es cuanto menos discutible.

```

```

TAU(J) = CFT*SPWT*RA(J)*SF(J)*GR*1.0E-3
C      write(*,*) tau(j)
      IF(DAB(J).LT.0.0)THEN

```

```

          IF(TAU(J).GT.TCRT)THEN

```

```

              DATB= (CFER/PAP)*(TAU(J)-TCRT)*BWDM(J)*(DT/60.)
              ZTEM=DATB/BWDM(J)
              DAT= -(DAB(J)+DATB)
              TR(J)=DHR(J)+DBR(J)/BSLP(J,2)
              TL(J)=DHL(J)+DBL(J)/BSLP(J,1)
              ADAB=-DAB(J)

```

```

              IF (DATB.GE.ADAB) THEN
                  ZTEM=-DAB(J)/BWDM(J)
                  DAT=0.

```

```

              END IF

```

```

              IF (HD(J).LE.TR(J)) THEN
                  ZTEM=-DAB(J)/BWDM(J)
                  DAT=0.

```

```

              END IF

```

```

              IF (INP .EQ. 0) THEN
                  ZTEM=-DAB(J)/BWDM(J)
                  DAT=0.

```

```

              END IF

```

```

              DHL(J)=DHL(J)+ZTEM
              BB=2.0*DHL(J)*BSLP(J,1)+DBL(J)
              CC=2.0*0.5*DAT*BSLP(J,1)
              XL=0.5*(SQRT(BB*BB+4.0*CC)-BB)
              DBL(J)=DBL(J)+XL

```

```

              DHR(J)=DHR(J)+ZTEM
              BB=2.0*DHL(J)*BSLP(J,2)+DBR(J)
              CC=2.0*0.5*DAT*BSLP(J,2)
              XR=0.5*(SQRT(BB*BB+4.0*CC)-BB)
              DBR(J)=DBR(J)+XR

```

```

          Z(J)=Z(J)-ZTEM

```

```

      ENDIF

```

```

ENDIF

```

```
C**** Contabilizaci3n de la erosi3n total acontecida en el tramo de
C estudio:
C ER(J) Es la erosi3n acontecida en la secci3n durante un paso de
C tiempo.
C ET(I) es la erosi3n en el subtramo (m3) tras un paso de tiempo.
C ETT es la erosi3n en todo el tramo acumulada tras cada paso de
C tiempo.
```

```
ER(J)=DAT+ZTEM*BWDM(J)
D ER(J)=-DAB(J)
1 CONTINUE
DO 2 I=1,JR
ET(I)=((ER(I)+ER(I+1))/2)*DX
ETT=ETT+ET(I)
2 CONTINUE
```

```
C**** Se imprime en pantalla la erosi3n total acontecida.
```

```
WRITE(*,*) ETT
RETURN
END
```

ANEJO III

INPUTS Y OUTPUTS DEL PROGRAMA *OCE*

5.1. III.1.- INPUTS

Se describen a continuación los aspectos más relevantes de los distintos inputs necesarios para utilizar adecuadamente el programa. Se procede siguiendo el orden dispuesto en el archivo de entrada TEST.INP. Todos los datos han de ser introducidos como *reales*.

INPUT A.- Permite nombrar y numerar cada ejecución del programa, e indicar los archivos de lectura y escritura.

INPUT B.- Permite introducir la fecha de ejecución, así como cualquier dato de interés.

INPUT C: INDICADORES DE OPCIONES SELECCIONADAS

IND: Define el tipo de aporte de agua por el extremo aguas arriba. Contempla tres posibles opciones, y de acuerdo con ellas, es necesario elaborar el archivo de entrada. Si $IND=0.$, el aporte es constante e igual a *QUREF*. Si $IND=1.$, el aporte se realiza con arreglo a un hidrograma introducido manualmente, y que se lee en un input específico (INPUT N). Si $IND=2.$, el aporte sigue la ley del coseno, con parámetros leídos en un bloque INPUT O. Los inputs N y O sólo aparecen en TEST.INP si IND vale 1 ó 2. Detalles sobre dichos inputs pueden verse en la subrutina QSUP

INL: Define el tipo de aporte lateral de agua. Contempla tres posibles opciones, y de acuerdo con ellas, es necesario elaborar el archivo de entrada. Si $INL=0.$, el aporte lateral es constante e igual a *QLREF*. Si $INL=1.$, el aporte lateral se realiza con arreglo a un hidrograma introducido manualmente, y que se lee en el bloque INPUT L. Si $INL=2.$, el aporte sigue la ley del coseno, con parámetros leídos en otro bloque INPUT M. Los inputs L y M sólo aparecen en TEST.INP si INL vale 1 ó 2. Detalles sobre dichos inputs pueden verse en la subrutina QSLT.

INR: Si es mayor que 0, se produce la escritura de los resultados de acuerdo con la subrutina *PRIX*. Si es igual a 0, sólo se escriben resultados por pantalla.

INS: Si es mayor que cero, el programa procederá con cálculos erosivos. Si es igual a 0, el programa calcula únicamente variables hidráulicas, sin considerar ningún tipo de erosión.

INP: Controlador de erosión lateral. Si $INP=0.$, no hay erosión lateral, estudiándose únicamente la degradación del lecho. Si es mayor que cero se considera erosión lateral. Cuando se utiliza esta opción, *TCRT* debe de ser 0 si se desea simular casos de erosión de materiales no cohesivos.

INE: Permite introducir el modelo propuesto por Bell y Sutherland (1983) para el caso de transporte de sedimentos no equilibrado. Si INE es igual a 1, se activa este modelo (ver INPUT P). Cualquier otro valor hace que no actúe.

INPUT D: PARÁMETROS DE DISCRETIZACIÓN

JR: Es el número de subtramos en los que se subdivide cada tramo a estudiar. El número máximo es de 100.

NT: Número de pasos de tiempo en los que se subdivide el periodo total de simulación. El número máximo es de 1000.

DT: Duración en minutos del paso de tiempo (min).

DX: Longitud de cada subtramo (m). *DX* y *DT* deben de variarse hasta conseguir condiciones de estabilidad. Si no se está bajo condiciones de estabilidad, de acuerdo con el valor de celeridad de las perturbaciones del lecho considerado, aparecerá en pantalla el consiguiente mensaje de aviso.

XBEG: Distancia hasta la primera sección en la que se desean comenzar los cálculos (m).

INPUT E: INSTANTES DE IMPRESIÓN DE OUTPUTS.

NTP: Cada uno de los instantes (hasta 6) en los que se desea que se escriban los archivos de salida.

INPUT G: CONTROLES AGUAS ABAJO, PENDIENTE INICIAL Y ERODIBILIDAD.

YREF: Nivel (suma de calado más elevación del lecho con respecto al nivel de referencia) en la sección del extremo aguas abajo del tramo (m). Si *YREF* es >0 , se asume ese valor como el existente en el extremo aguas abajo. Si *YREF*=0, se considera que el calado aguas abajo es el calado normal.

ZREF: Elevación del lecho con respecto al plano de referencia en la sección del extremo aguas abajo (m).

SLPEQ: Pendiente inicial del lecho (tanto por uno).

EBOUND: Tolerancia para la función de evaluación. Al obtener las raíces de ciertas ecuaciones, se procede a comprobar si la supuesta raíz es solución o no. Si el valor de la función para un determinado valor de la variable independiente es menor o igual que *EBOUND*, ése valor de la variable es la solución. *EBOUND* es la tolerancia para funciones diversas (ecuación del método del paso estándar, cálculo del calado normal) por lo que hay que elegirlo de modo que sea adecuado para las condiciones más desfavorables. Un valor de 0.001 arroja resultados poco satisfactorios, en algunos casos, en los cálculos hidráulicos referidos a los extremos aguas abajo, por lo que se recomienda un valor máximo de 0.00001. Una variación del valor de *EBOUND* por debajo del umbral adecuado, no produce variaciones relevantes en el resultado. Como consecuencia de la utilización de valores bajos de tolerancia puede ser necesario utilizar mayores valores de *KOUNTS* y *KOUNT*.

DREF: Altura inicial de los taludes (m) (ver figura III.1). Este valor debe de ser lo suficientemente elevado como para garantizar que el calado no lo supera.

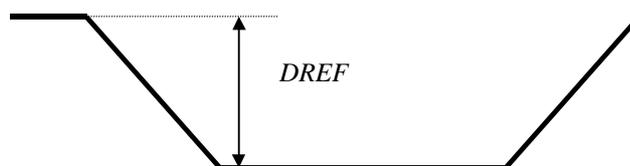


Figura III.1.- Definición de DREF

TCRT: Esfuerzo cortante crítico del suelo (Pa).

CFER: Coeficiente de erodibilidad del suelo en la fórmula para el cálculo de la erosión del lecho (N/N.min).

KOUNT: Limitador del número pasos en la solución numérica de ecuaciones dentro del bloque ROOTA. Es el máximo número de iteraciones permitidas en la subrutina WORK tras haber encontrado el cambio de signo de la función. Ver detalles en comentarios de las subrutinas ROOTA y BACK.

KOUNTS: Limitador del número pasos en la solución numérica de ecuaciones dentro del bloque ROOTA. Es el máximo número de pasos permitidos para encontrar el intervalo de cambio de signo. Un valor bajo de *KOUNT* y *KOUNTS* puede dar lugar a que las soluciones no se hallen correctamente, apareciendo mensajes de error o interrumpiéndose la ejecución del programa. En tal caso, hay que aumentar sus valores, lo que conlleva un aumento en el tiempo de ejecución a veces muy considerable.

CFT: Coeficiente que multiplica al esfuerzo cortante medio para obtener un valor más realista del esfuerzo cortante en el lecho, que es el valor a calcular en el programa.

INPUT H: VALORES DE REFERENCIA INICIALES

BWDREF: anchura inicial del lecho (m)

BSLP L: Pendiente inversa del talud izquierdo (tangente del ángulo β_l , ver figura III.2).

BSLP R: Pendiente inversa del talud derecho (tangente del ángulo β_D , ver figura III.2).



Figura III.2.- Ángulos de los taludes

QLREF: Caudal lateral de referencia ($m^3/m.s$).

QUREF: Caudal de referencia por el extremo aguas arriba (m^3/s).

XN: Coeficiente de Manning representativo de todo el cauce.

PAP: Peso específico aparente del suelo (N/m^3)

CC: Coeficiente para la estimación de las pérdidas por remolino en la ecuación del método del paso estándar, en el caso de que el flujo sufra una contracción.

CE: Coeficiente para la estimación de las pérdidas por remolino en la ecuación del método del paso estándar, en el caso de que el flujo sufra una expansión.

NYI: Número localizaciones estudiadas en cada sección transversal. *NYI* debe de ser >5 (se produce si no división por 0). Este valor se utiliza en *XSDS* para la determinación de las coordenadas de los puntos singulares de cada sección transversal, y en *VACE* para calcular las variables hidráulicas correspondientes también a cada sección transversal.

INPUT J: PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS.

POR: Porosidad del suelo.

CBC: Celeridad estimada de las perturbaciones del lecho.

D50: Mediana de la distribución del tamaño de partículas. No interviene en los cálculos, sino que se utiliza a título informativo.

TEMP: Temperatura del agua ($^{\circ}C$).

XNSF: Número de fracciones en las que se divide el sedimento transportado, de acuerdo con su granulometría. El número máximo es de 11.

ROUND: Parámetro de redondez en la ecuación de caída de Dietrich.

SHAPE: Parámetro de forma en la ecuación de caída de Dietrich.

DL(L): Tamaño de cada una de las fracciones de sedimento transportado (mm).

PCT(L): Factor de ponderación para las fracciones de sedimento (tanto por uno). Indica la proporción de la carga total de sedimentos que corresponde a cada fracción.

SPGR(L): Peso específico relativo de las partículas de cada una de las fracciones.

INPUT K: TRAMOS CON APORTE LATERAL

IXSL: Número de sección en la que comienza el aporte lateral.

LXSL: Número de sección en la que finaliza el aporte lateral.

INPUT P: CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS DEL APORTE AGUAS ARRIBA Y COEFICIENTE PARA EL MODELO DE TRANSPORTE NO EQUILIBRADO.

CUP: Concentración de sedimentos en el flujo que se incorpora por el extremo aguas arriba (en partes por parte en volumen).

ALF: Coeficiente que define el valor de $C(t)$ en el modelo de transporte no equilibrado de Bell y Sutherland (1983).

5.2. III.2.- OUTPUTS

Se procede a la descripción archivo por archivo.

TEST.OUT

J: Número de sección transversal, comenzando desde el extremo aguas arriba.

Distancia: distancia a lo largo del eje del canal desde el extremo aguas arriba (m).

Área: área mojada (m^2).

Nivel: Elevación de la lámina de agua desde el nivel horizontal de referencia (m).

Veloc.: Velocidad media del flujo (m/s).

RA.: Radio hidráulico (m).

Sf: Pendiente de la línea de energía.

Calado: calado en m

Nº Fr: Número de Froude.

PLOT.OUT

X: Coordenada X de cada sección transversal. Es decir: distancia desde el origen del eje X hasta la sección en cuestión a lo largo del eje del canal.

YP: Coordenada Y de cada uno de los puntos singulares definidos en toda sección transversal (ver subrutina XSDS y apartado 3.1.4).

ZP: Coordenada Z de cada uno de los puntos singulares definidos en toda sección transversal (ver subrutina XSDS y apartado 3.1.4).

BED.OUT

J, X, elevación lecho, nivel, ídem. caso TEST.OUT

CONC: Concentración de sedimentos en el flujo en partes por millón (volumen). Es la capacidad de transporte en cada instante y sección.

EROS.OUT

E. Total: Erosión en todo el tramo (m^3) al final de los diferentes pasos de tiempo.

CBC: Celeridad de las perturbaciones del lecho (m/s)

CR2: Número local de red de Courant al cuadrado.

ALPH: coeficiente en el esquema de diferencias finitas para solucionar la ecuación de continuidad del sedimento.

E. subtramo: erosión acontecida en cada subtramo durante cada uno de los pasos de tiempo (m^3).

TAU: Esfuerzo cortante en el lecho.

GEOM.OUT

A. Lecho: anchura del lecho (m).

Prof. Er.: descenso acontecido en el lecho (m)

El. Lecho: elevación del lecho con respecto al nivel horizontal de referencia (m).

Caída V. (m): Longitud de la caída vertical en el talud (ver figura III.3)

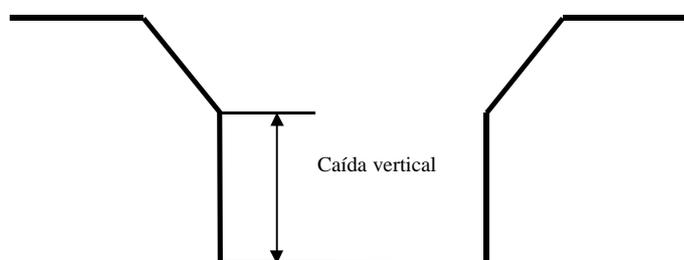


Figura III.3.- Caída vertical en los taludes

C. T. Disp.: Capacidad de transporte disponible (m^3/m). Para cada sección, es una medida de la diferencia entre la capacidad de transporte y la carga de sedimentos que alcanza a cada sección. Expresa

los m^3 de suelo por unidad de longitud que van a ser erosionados en el paso de tiempo de que se trate. Valores mayores que 0 indican que la capacidad de transporte disponible es nula, y que se produciría deposición.