

CAPÍTULO 2

LOS RIESGOS GEOLÓGICOS EN EL SISTEMA DE CUENCA: PROCESOS FLUVIALES Y GRAVITACIONALES

JOSEP MAS-PLA
JOAN BACH PLAZA

2.0 Introducción

En el contexto del planeta Tierra, existen diversos ciclos dinámicos que configuran la morfología de la superficie terrestre. Por un lado, los ciclos dinámicos internos son responsables de la creación del relieve a través de la tectónica de placas, cuya manifestación más evidente la constituyen los volcanes y los terremotos. Por otro, los procesos dinámicos externos causan la degradación de los relieves a través de la erosión y el transporte de las rocas que los forman. Se trata de procesos fluviales, gravitacionales, eólicos, marinos, etc. Estos últimos dependen a su vez de las condiciones climáticas que definen la magnitud de la temperatura y de la precipitación, siendo la presencia de agua uno de los principales agentes que los gobiernan.

Sin embargo, estos procesos no actúan en un mundo deshabitado. La ocupación humana del territorio, especialmente durante el siglo XX, con un desarrollo demográfico muy intenso, se ha instalado en zonas donde estos procesos son especialmente activos. Este hecho ha creado un conflicto entre el desarrollo socio-económico y la presencia de actividad geológica, la cual se manifiesta periódicamente (erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos de ladera) y repercute en contra de los intereses de la población, causando daños de distinta índole. En esta situación aparece el concepto de **riesgo**, que se define en función de las pérdidas que pueden ser ocasionadas por un proceso natural que se produce con una determinada periodicidad.

En un marco geográfico concreto, estos procesos que interactúan con las actividades humanas se circunscriben al perímetro de una cuenca hidrográfica. En sí misma, una cuenca hidrográfica es la superficie terrestre que se halla drenada por un mismo sistema fluvial (Figura 2.1). Así, hablamos de cuencas de grandes dimensiones, como la cuenca del río Amazonas, si bien podemos reducir su escala hasta considerar la del afluente menor de la red de drenaje.



Figura 2. 1.- Concepto de cuenca hidrográfica. Fuente: Elaboración propia.

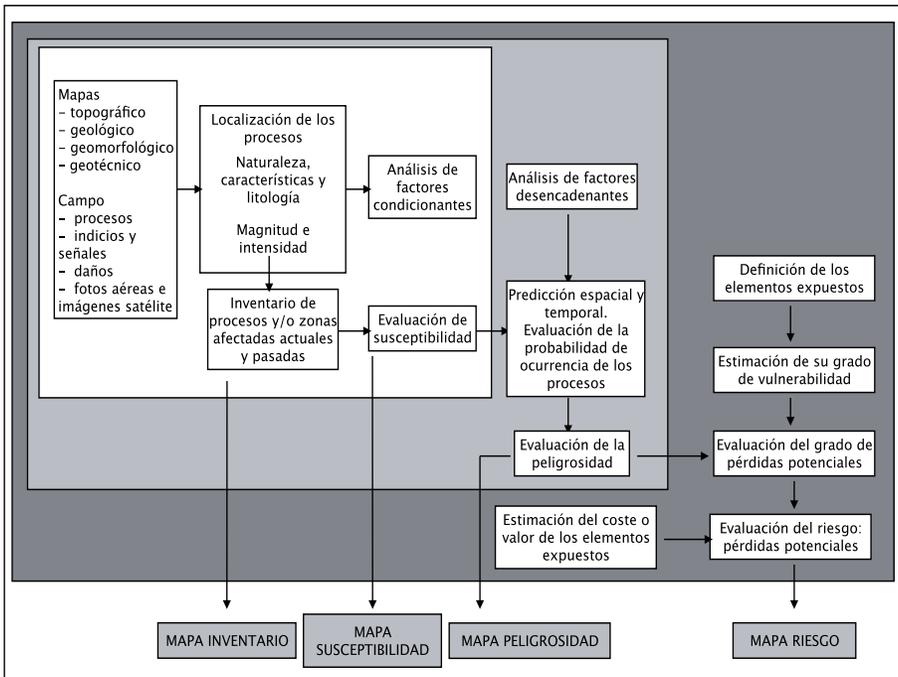


Figura 2.2.- Esquema metodológico para la realización de mapas de vulnerabilidad, o susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, según Ferrer (1991). Fuente: González de Vallejo et al., 2002.

No obstante, el sistema fluvial no es el único elemento de interés en una cuenca. El relieve del interior de su perímetro, las pendientes de las vertientes y de los ríos, la naturaleza geológica de sus montañas y, como hemos mencionado, el clima bajo el cual se hallan, determinarán un conjunto de procesos geodinámicos externos que actúan constantemente con intensidades variables. Por ejemplo, el caudal de los ríos es continuo, aunque puede variar desde muy escaso, en periodos de sequía, hasta extremadamente abundante en momentos de muy intensa precipitación. La evolución misma de las vertientes suele ocasionar movimientos de pequeñas masas de terreno en cada aguacero; no obstante, determinadas circunstancias pueden provocar el deslizamiento de grandes masas de terreno, modificando el relieve local y aportando sedimentos a zonas topográficamente inferiores. En ambos tipos de procesos, cuando su magnitud es máxima, existe la probabilidad de que afecten negativamente a la ocupación humana del territorio. Es por esta razón por la que el estudio del riesgo geológico, relacionado con los procesos externos, debe basarse en el conocimiento de su dinámica y en una correcta cartografía de las zonas en que estos pueden ocurrir, distinguiendo en estos mapas los diferentes grados de intensidad posibles.

En este capítulo se considera el riesgo derivado de los procesos geológicos externos que actúan en el sistema cuenca, especialmente los relacionados con inundaciones y deslizamientos gravitacionales, sin considerar los procesos eólicos, costeros o glaciares. En particular, se describen las particularidades de su dinámica y la tipología de riesgos asociados, así como una breve introducción a las formas de valoración del riesgo.

Los riesgos anteriormente mencionados son especialmente relevantes en la zona centroamericana. La existencia de periodos de intensa precipitación, relacionados con situaciones meteorológicas extremas, como los huracanes procedentes del Caribe y del Golfo de México, tienen un fuerte impacto en el territorio, causando fuertes crecidas de los ríos y movimientos de tierras en las vertientes. La naturaleza volcánica del relieve, a menudo compuesto por rocas volcánicas no consolidadas, así como aspectos antrópicos relacionados con una ocupación urbana dispersa y una deforestación de los montes aumentan la probabilidad de que estos fenómenos interactúen con el hombre. En otras palabras, aumentan su exposición al riesgo. El tratamiento extenso del riesgo geológico en el entorno americano se halla extensamente descrito por la OEA (1993).

2.1 El concepto de riesgo geológico

Como se ha comentado en la introducción a este capítulo, el riesgo geológico deriva de la acción habitual de los procesos naturales, los cuales pueden ocurrir con distintas magnitudes. En su ocupación del territorio, el hombre ha creado estructuras y estrategias para evitar (o al menos minimizar) el impacto de estos procesos, de manera que solamente haya pérdidas cuando estos se manifiesten

con magnitudes extraordinarias. En el cálculo del riesgo deben determinarse las magnitudes que darán lugar a pérdidas y la periodicidad con que suelen ocurrir.

La terminología asociada al riesgo es fundamental para presentar las metodologías usadas para su estimación. Cabe distinguir conceptos como “peligrosidad” (*hazard*, en inglés), vulnerabilidad o susceptibilidad (*vulnerability*) y, finalmente, riesgo (*risk*) (Smith, 2001).

La **peligrosidad** se refiere a la frecuencia o periodicidad de un proceso. Se define como la probabilidad de que suceda el fenómeno, con una intensidad determinada, en un periodo de tiempo específico. Se trata pues de un concepto estadístico: el **intervalo de recurrencia** o **periodo de retorno** (T) se halla asociado a la probabilidad de excedencia (P), en una relación inversa, $T=1/P$.

Estadísticamente, la probabilidad de ocurrencia $P(p>X)$ de un proceso de magnitud X, correspondiente a un intervalo de recurrencia T, en un periodo de n años, viene dado por:

$$P(p > X) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Por ejemplo, la posibilidad de que un río presente un caudal Q_{max} , asociado a un intervalo de recurrencia de 100 años, en los próximos 15 años, es del 14%. Para conocer la relación Q_{max}/T es necesario disponer de un registro histórico de la ocurrencia de estos procesos y de la magnitud que alcanzaron.

Otro término relevante en el estudio del riesgo es la **vulnerabilidad**, la cual define el grado de daños o pérdidas potenciales en una localidad o región, como consecuencia del evento de un proceso natural de una magnitud determinada. Se trata pues de un conocimiento del territorio, de cómo le afectará el proceso evaluado en cada una de las intensidades que puede presentar. Como tal, este conocimiento puede ser cartografiado, creando un mapa de vulnerabilidad. Las cartografías de zonas inundables son ejemplos de mapas de vulnerabilidad.

Los mapas de vulnerabilidad tienen diversas finalidades que, en todos los casos, están dirigidas a la prevención del riesgo. Se usan como base de programas de gestión, de toma de decisiones sobre el uso del territorio y de políticas de desarrollo y, también, para fines didácticos y de educación de la ciudadanía.

El concepto de **riesgo** se refiere a la cantidad de pérdidas potenciales debidas a estos procesos naturales. Cuantitativamente, el riesgo (R) viene dado por el producto entre la peligrosidad (P), la vulnerabilidad (V) de los elementos (bienes) expuestos y el coste de los mismos (C),

$$R = P \times V \times C$$

donde P y V son adimensionales y, por consiguiente, R tiene las unidades de C. El producto parcial $P \times V$ suele denominarse **riesgo específico** (Varnes, 1984).

La figura 2.2 señala el proceso de elaboración de mapas de riesgo geológico (Ferrer, 1991, citado en González de Vallejo et al., 2002). En este esquema se muestran los distintos elementos que configuran la elaboración de estos mapas: el reconocimiento del territorio en sus aspectos litológicos y estructurales y el de la naturaleza y tipología del proceso, que dan lugar al mapa de vulnerabilidad o susceptibilidad; el análisis de los factores que inician los procesos y su frecuencia, diferenciados cartográficamente para construir el mapa de peligrosidad y, finalmente, la evaluación de los bienes expuestos, la estimación de las pérdidas potenciales y la estimación de su coste en la zona estudiada. El tratamiento cartográfico con sistemas de información geográfica (SIG) permite obtener el mapa de riesgo concluyente.

A partir de la metodología descrita es posible, pues, dejar de considerar los riesgos geológicos como sucesos aleatorios ante los cuales no es posible adoptar estrategias de protección. El riesgo geológico puede reconocerse a partir del estudio de los sistemas dinámicos de la superficie de la Tierra y, lo que es más importante, se puede calcular su probabilidad de suceso y expresar esta de forma cartográfica. Ello permite anticiparse al riesgo.

La idea de anticipación se resume en tres posibles actuaciones frente a los riesgos geológicos, según la **regla de las tres "P"** (Brusi y Roqué, 1998):

- **Previsión.** Ante la certeza de que el riesgo es inherente a determinados entornos geológicos (llanuras aluviales, laderas, etc.), es preciso determinar, con antelación, la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con sus distintos grados de intensidad y representarlo cartográficamente. También deben aproximarse las consecuencias e implicaciones sociales de este riesgo y las pérdidas de bienes ante cada posible intensidad.
- **Predicción.** Desde la perspectiva científica, se trata de conocer las respuestas del proceso dinámico a los factores que lo desencadenan. Habitualmente, el inicio de un proceso extraordinario viene determinado por numerosos factores, y se ha de disponer de un sistema de control que permita valorar la tendencia del factor y predecir sus posibles consecuencias. Las alertas meteorológicas basadas en imágenes de satélite y los registros de precipitación en tiempo real son datos básicos en el origen de inundaciones o deslizamientos.
- **Prevención.** Contempla el conjunto de medidas de previsión y la predicción que se adoptan en el territorio con la finalidad de minimizar las pérdidas económicas y sociales. Estas medidas están basadas en una estructuración del uso del espacio acorde con la posibilidad del riesgo,

o en una actuación de ingeniería sobre el proceso en cuestión (por ejemplo, modificación de la sección y características de un cauce para permitir un mayor drenaje o estabilización de laderas mediante muros, anclajes, etc.).

Puede añadirse un cuarta “P” referente a la **percepción del riesgo** por parte de la población. La percepción ha de desarrollarse tanto a nivel institucional como social y personal. El grado de percepción es dependiente del estado socioeconómico de la población; los sectores más necesitados pueden desestimar el riesgo de las inundaciones y ocupar zonas inundables de la llanura aluvial ante la necesidad de encontrar alojamiento, demostrando las profundas razones sociales que se hallan en la base de la percepción y la actitud frente al riesgo geológico. El acceso a la información objetiva (lamentablemente no siempre equilibrada en los medios de comunicación cuando tratan desastres naturales) es una herramienta básica en la prevención. Un mayor conocimiento y divulgación sobre la peligrosidad de distintos entornos, una fuerte implicación de la administración, así como unas tareas didácticas, especialmente necesarias en las zonas más vulnerables y entre los sectores más indefensos, son elementos básicos en la minimización del riesgo.

2.2 Riesgos asociados a procesos fluviales

Las inundaciones se caracterizan, entre todos los riesgos geológicos, por ser aquellos que ocurren con mayor frecuencia (en función del clima, se sobrentiende) y por afectar intensamente a las actividades humanas, sencillamente por el hecho de que el crecimiento urbano, industrial y agrícola suele desarrollarse a lo largo de las zonas aluviales originadas por la sedimentación fluvial.

2.2.1 La generación de escorrentía. El hidrograma

Los procesos fluviales son el resultado complejo del comportamiento de toda la cuenca hidrográfica ante un periodo de precipitaciones. La escorrentía superficial se genera por lluvias intensas que sobrepasan la capacidad de infiltración de agua en el suelo. Una lluvia de elevada intensidad y larga duración tiene como consecuencia el crecimiento del caudal de los ríos; es decir, aumenta del volumen de agua que pasa en cada unidad de tiempo por la sección transversal del cauce.

La representación gráfica del caudal en función del tiempo se denomina **hidrograma** (Figura 2.3). En periodos sin precipitación, el caudal de los ríos tiende a disminuir progresivamente, siendo estos alimentados por las aportaciones de los afluentes y, en aquellos casos en que los materiales del subsuelo del lecho del río constituyan acuíferos, por las aportaciones de agua subterránea que alimentan el drenaje superficial (Winter et al., 1998). Con la

lluvia, el caudal tiende a aumentar alcanzando un valor máximo, habitualmente con posterioridad al episodio lluvioso. El valor máximo del caudal se denomina **pico del hidrograma** y al tiempo transcurrido desde el inicio de la lluvia hasta el pico se llama **tiempo de respuesta**. Con posterioridad al pico, el caudal decrece progresivamente hasta la aparición de otro episodio lluvioso.

Desde la perspectiva de prevención del riesgo, el caudal del pico del hidrograma y el tiempo de respuesta son de gran interés. Concretamente, ambos parámetros determinan el máximo caudal y el tiempo en que este se ha alcanzado tras una precipitación en una cuenca determinada y, con ello, la magnitud de la inundación y el tiempo disponible para la prevención de la población expuesta al riesgo.

Hidrológicamente, cada precipitación, definida por una intensidad, una duración definida y una distribución espacial dentro de la cuenca, dará lugar a un hidrograma distinto. Así mismo, cada cuenca originará un hidrograma propio, en función de su geología, la tipología de la red de drenaje, la distribución y tipo de cobertura vegetal, y la extensión y la ubicación de las zonas urbanizadas. Es bien conocido que la impermeabilización del suelo reduce el almacenamiento de agua en superficie y su infiltración, aumentando el porcentaje de agua de lluvia que se transforma en escorrentía superficial. En estos casos, los hidrogramas de zonas urbanizadas tienden a mostrar picos más elevados y tiempos de respuesta menores (Dune y Leopold, 1978).

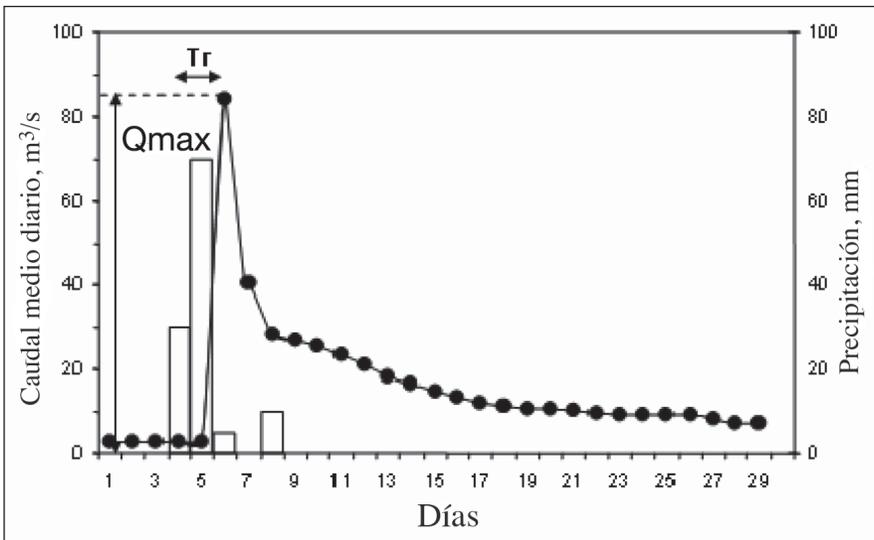


Figura 2.3.- Ejemplo de un hidrograma generado por una precipitación, con los correspondientes parámetros: tiempo de respuesta (T_r) y pico del hidrograma (Q_{max}). Fuente: Elaboración propia.

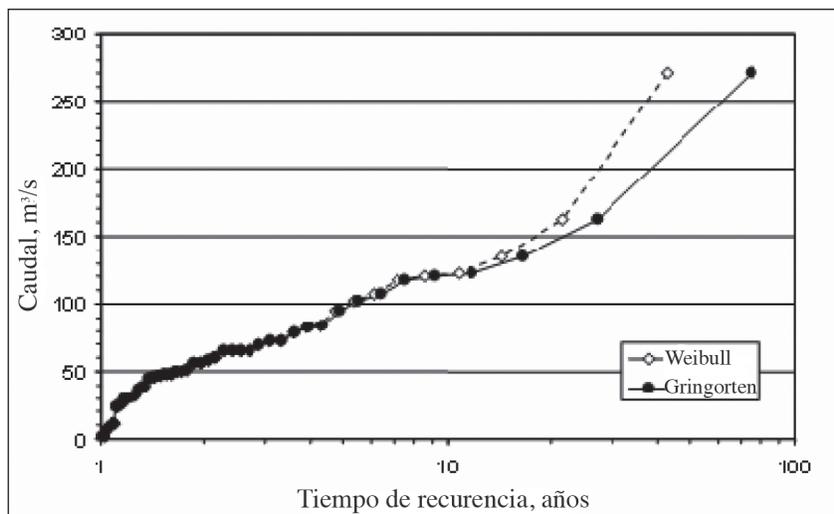


Figura 2. 4.- Estimación del intervalo de recurrencia y caudal máximo para el río Fluvià, según los métodos de Weibull y Gringorten. Fuente: Elaboración propia sobre datos cedidos por la “Agència Catalana de l’Aigua”.

2.2.2 La medida del caudal: aforos

Uno de los aspectos básicos en la obtención de hidrogramas es la medida del caudal, conocida como un **aforo**. Las administraciones hidráulicas suelen disponer de estaciones de aforo situadas en los puntos más representativos de los diversos ríos que gestionan. Estas estaciones son ejemplos de obra civil, en los que se ha regularizado la sección del cauce de manera que el caudal que pasa es proporcional a la altura de la lámina de agua. De este modo, la lectura de la elevación del nivel de agua en el río mediante registros manuales o informatizados permite la recopilación de los datos de caudal. Habitualmente, las bases de datos de caudal ofrecen el caudal medio diario, expresado en unidades de metros cúbicos por segundo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Sin embargo, no siempre se dispone de una estación de aforo en el tramo del río que se debe monitorizar. En estos casos, la toma de datos de caudal *in situ* es una tarea propia del trabajo de campo. Para realizarla, existen varios métodos, entre los que destacan el uso de **molinetes** o el uso de **trazadores químicos**.

Los molinetes consisten en aparatos que disponen de una hélice unida a un cuerpo pesado o lastre que se sumerge en el río. Las revoluciones de la hélice permiten registrar la velocidad de la corriente en el punto donde se sitúa. Obviamente, el tipo de molinete debe escogerse en función de las dimensiones del cauce y del caudal a medir.

El cálculo del caudal se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Q = A v$$

donde, Q es el caudal, A es el área de la sección transversal del cauce y v es la velocidad registrada con el molinete. En cauces con fondo irregular, es conveniente fragmentar la sección en subsecciones menores y medir la velocidad y el área en cada una de ellas, de manera que la variabilidad morfológica del lecho quede integrada en la medida del caudal. En caso de no disponer de un molinete, se puede usar un objeto flotante para medir su velocidad de desplazamiento en tramos continuos y regulares y, con ella, estimar la velocidad del flujo superficial. Es evidente que esta medida solo es aproximada y apta para cauces de bajo caudal, y debe usarse siempre con una saludable dosis de cautela.

El uso de trazadores químicos consiste en verter una sustancia fácilmente identificable en el río y tomar muestras de agua a una cierta distancia del punto de vertido. La evolución de la concentración del trazador con el tiempo permitirá calcular la velocidad de la escorrentía (Custodio y Llamas, 1976).

Cada una de estas medidas es solamente representativa del punto y del momento de muestreo. Habida cuenta de la variabilidad del caudal representada en el hidrograma, es evidente que una única medida es insuficiente para caracterizar el régimen fluvial de un tramo de río.

En el estudio del riesgo por inundaciones, el interés radica en conocer la capacidad de drenaje de una sección determinada. En otras palabras, cuál es el caudal que puede evacuar esta sección sin desbordar y causar la inundación de las zonas limítrofes. Este cálculo se basa en la expresión de la **ecuación de Manning**, enunciada en 1889. Esta ecuación relaciona los parámetros geométricos de la sección con su estado natural: tipo de lecho (pedregoso, suave, con rápidos y charcas, etc.), disposición y tipo de la vegetación, etc. La ecuación de Manning viene definida por la relación:

$$v = \frac{R^{2/3} s^{1/2}}{n}$$

donde, v es la velocidad de la corriente (en ms^{-1}), R es el radio hidráulico o cociente entre el área de la sección y el perímetro húmedo del lecho (en m), s representa la pendiente del tramo de río, y n es un coeficiente de rugosidad que viene tabulado en libros de texto (por ejemplo, Barnes, 1967; Arcement y Schneider, 1989 entre muchos otros) o en referencias de Internet.

En este sentido, la previsión de inundaciones en un tramo determinado de un río puede obtenerse a partir de los datos de capacidad de drenaje de la sección, calculados por ejemplo mediante la ecuación de Manning, y la periodicidad con que este caudal máximo se da en este tramo. El cálculo de la periodicidad

debe estimarse en base a registros de estaciones de aforo, como se describe en el apartado siguiente. No obstante, en zonas donde no existan estos registros (y no puedan ser extrapolados de cuencas vecinas) la periodicidad de avenidas puede calcularse usando datos geomorfológicos correspondientes a avenidas históricamente documentadas (Benito et al., 1998; Thorndyrcraft et al., 2002).

2.2.3 Estimación de los caudales máximos

La estimación de los caudales máximos, basada en registros continuos de caudales, se realiza mediante la aplicación de métodos estadísticos simples que permiten determinar el **intervalo de recurrencia** (T), también denominado **periodo de retorno** de un determinado caudal. Estrictamente, el intervalo de recurrencia se define como “el tiempo que transcurre entre dos eventos (avenidas) de la misma magnitud (caudal)”. Estadísticamente, corresponde al inverso de la probabilidad de ocurrencia de un determinado caudal cada n años ($T=1/P$).

El cálculo del intervalo de recurrencia suele basarse en los caudales diarios máximos anuales. El método estadístico utiliza el valor máximo de caudal (instantáneo o medio diario) anual medido en la estación de aforo, disponiéndose de tantos datos como años de registro. Los métodos de cálculo más sencillos son las expresiones de Weibull y Gringorten (Shaw, 1994):

$$\text{Weibull : } T = \frac{n+1}{m},$$

$$\text{Gringorten : } T = \frac{n+0.12}{m-0.44}$$

donde T es el intervalo de recurrencia (en años), n es el número de años de registro (por tanto, el número de datos disponibles de caudal máximo) y m corresponde al rango del caudal una vez ordenados los valores de caudales máximos de mayor ($m=1$) a menor ($m=n$). Un ejemplo de la aplicación de ambas fórmulas aparece en la figura 2.4, para la estación de aforo del río Fluviá en Olot (Girona).

Ambos métodos tienen la limitación de que no es posible extrapolar la relación entre el caudal y el intervalo de recurrencia para valores de T superiores al número de años de registro. El uso de distribuciones estadísticas diseñadas para eventos extraordinarios permite superar esta dificultad, siempre y cuando los datos concuerden con la distribución propuesta. La **distribución de Gumbel** puede usarse para la descripción estadística de valores máximos para poblaciones de datos que se comportan según las distribuciones estadísticas más habituales (exponencial, normal, log-normal, etc.), siendo esta la razón por la cual la distribución de Gumbel suele usarse para el estudio de valores máximos de distintas variables en hidrología (precipitación, caudales, etc.).

La expresión matemática de la distribución de Gumbel para el cálculo del caudal máximo (Q_{\max}) para un determinado intervalo de recurrencia (T) es la siguiente (Shaw, 1994):

$$Q_{\max} = \mu - \sigma \left\{ \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[n_e + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\}$$

donde μ y σ son, respectivamente, la media y la desviación estándar de los valores de caudal máximos anuales y donde n_e es el número de Euler ($n_e \approx 0,5772$). Nótese como la fórmula de Gumbel permite calcular los Q_{\max} para cualquier intervalo de recurrencia. La fiabilidad del método dependerá del número de datos disponibles (es decir, años de muestreo) para que los dos valores estadísticos μ y σ sean representativos.

La figura 2.5 muestra las relaciones Q_{\max}/T para dos estaciones de aforo aplicando la distribución de Gumbel. Para el caso del río Fluvià se observa que la relación Q_{\max}/T estimada coincide con los valores del intervalo de recurrencia de los datos reales para los n años disponibles, estimados mediante el método de Weibull. En este caso, puede afirmarse que la distribución de Gumbel representa la probabilidad de ocurrencia de estos caudales y que, por consiguiente, esta puede ser usada para extrapolar el cálculo de Q_{\max} para tiempos de recurrencia superiores a los n años de registro. Por ejemplo, se puede estimar el caudal para un $T=500$ años requerido en determinadas legislaciones como límite de seguridad en la construcción de infraestructuras próximas a cauces. Por el contrario, esta coincidencia entre la distribución de los datos reales y la función de probabilidad de Gumbel no se cumple para el río Foix (Barcelona). La causa de esta divergencia puede hallarse en el singular comportamiento de esta cuenca, de carácter cárstico en algunas zonas y con la variabilidad climática propia de las zonas mediterráneas. En el caso del Foix, la distribución de Gumbel no puede ser usada para la estimación de Q_{\max} en intervalos de recurrencia superiores a los n años de registro, siendo preciso usar otras distribuciones estadísticas o datos geomorfológicos para estimar la probabilidad de ocurrencia de un Q_{\max} determinado.

En síntesis, la disponibilidad de un registro de caudales lo suficientemente largo que permita el análisis estadístico descrito, posibilita el cálculo de la relación Q_{\max}/T , incluso para valores de T superiores al registro. En aquellas secciones del cauce próximas a la estación de aforo y donde esta relación sea representativa, la aplicación de la ecuación de Manning permite estimar el caudal máximo que el cauce puede drenar. Comparando este caudal máximo con los Q_{\max} estimados se puede prever la periodicidad de este caudal y, en consecuencia, el riesgo asociado a los procesos fluviales en este punto.

La metodología expuesta es un ejemplo simple de cómo combinar el tratamiento estadístico de bases de datos hidrológicos con medidas de campo para asesorar

sobre el riesgo de inundaciones. Existen, obviamente, otros métodos más complejos basados en cálculos hidráulicos (*flood routing*) y en la modelización matemática de cuencas hidrográficas (Maidment, 1998). La finalidad de todos estos métodos es cartografiar las zonas expuestas a riesgo para determinados intervalos de recurrencia, a la vez que sugerir acciones de modificación del mismo cauce o de las actividades sobre el territorio afectado que minimicen las pérdidas ocasionadas por las posibles inundaciones.

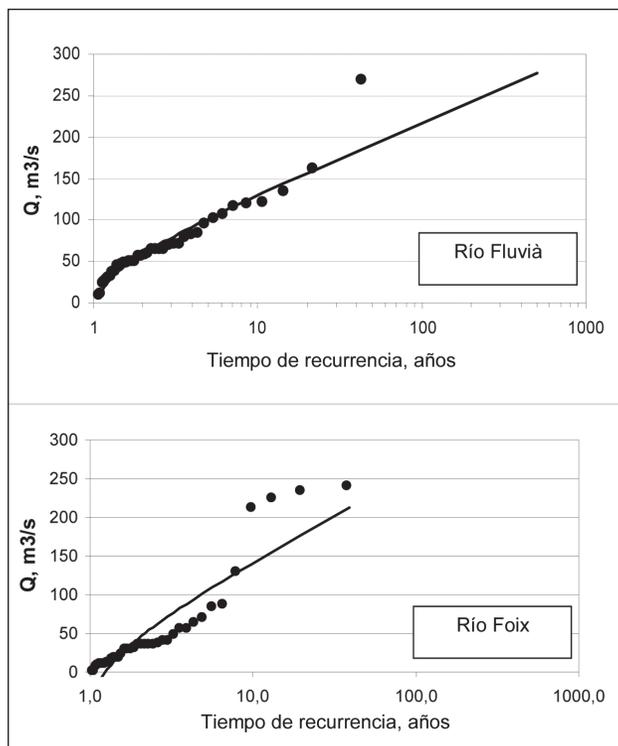


Figura 2.5.- Estimación del intervalo de recurrencia y caudal máximo para los ríos Fluvià y Foix. Los círculos corresponden a los datos reales y la línea continua a la distribución estadística obtenida según el método de Gumbel. Fuente: Elaboración propia sobre datos cedidos por la "Agència Catalana de l'Aigua".

2.2.4 Dinámica y morfología fluviales

El riesgo asociado a la dinámica fluvial descrito en el apartado anterior considera la incapacidad de drenaje de un tramo del río ante una crecida del caudal, así como el consiguiente desbordamiento del agua y la inundación de los terrenos colindantes con el cauce, con una determinada periodicidad (Figura 2.6). Además, se ha de considerar el potencial erosivo y de arrastre del agua desbordada, así

como el depósito posterior de sedimentos en las zonas afectadas como procesos adicionales que incrementan los efectos negativos de las crecidas fluviales.

Frecuentemente, nos referimos a estos sucesos como casos extraordinarios, olvidando que las llanuras aluviales donde se ubican las actividades humanas son creaciones de la propia dinámica fluvial en respuesta a un contexto geológico-climático. Es necesario reconocer que, desde esta perspectiva, la llanura aluvial pertenece al río y que este la ocupa durante sus mayores crecidas, de manera que, sin sorpresa alguna, las pérdidas ocasionadas pueden ser previsibles y, para ello, la gestión del territorio debe estar dirigida a minimizar las pérdidas potenciales.

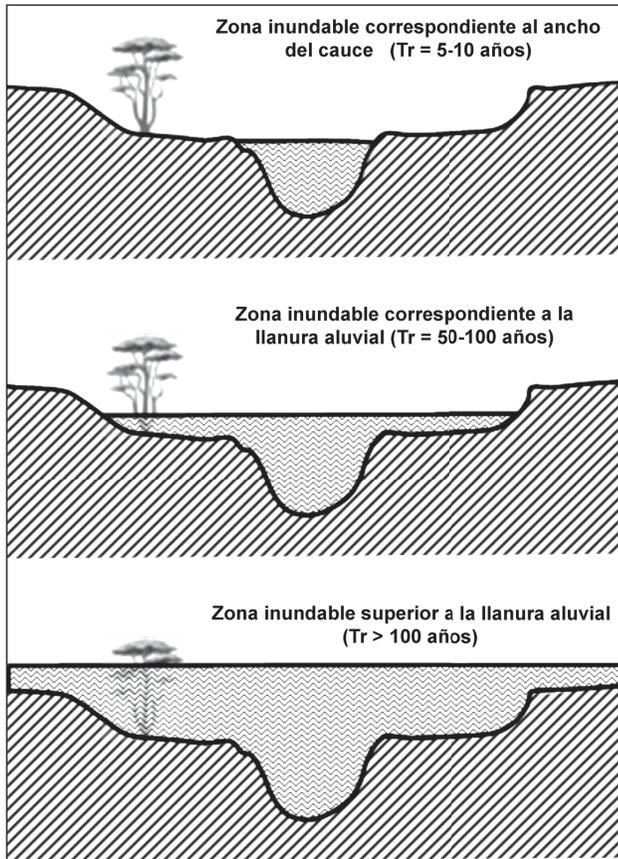


Figura 2. 6.- Relación entre intervalo de recurrencia (Tr) y alcance de la zona inundable.). Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, la ocupación del territorio ha conllevado la alteración de la dinámica y de la morfología fluviales, sin reconocer que ello implica frecuentemente la disminución de la capacidad de drenaje y, por consiguiente, un aumento del

riesgo. En este sentido, las actuaciones sobre el medio fluvial deben considerar, a priori, la reacción del río frente a los cambios producidos, y si esta implica una mayor exposición a una inundación.

A semejanza de otros procesos geológicos, los procesos fluviales también poseen una dinámica compleja, determinada por muchas variables interrelacionadas, que definen la morfología del cauce y de la llanura aluvial. Dada la diversidad de estas variables, que se exponen más adelante, no es posible pensar en un río como en un proceso uniforme, en equilibrio estático, sino en que este presenta una dinámica compleja derivada de la interrelación de múltiples factores ambientales (Schumm, 1977). En particular, Mackin (1948) definió que los ríos presentan un **equilibrio dinámico**, entendiendo que, con los años, tienden a ajustar su pendiente para proveer, con el caudal disponible y las características del cauce, la velocidad necesaria para transportar la carga de sedimento que origina la cuenca.

Esta definición nos advierte sobre una serie de relaciones trascendentes en la dinámica fluvial y sobre cuáles son las variables que la gobiernan: 1) el caudal, como respuesta a la climatología y al comportamiento hidrológico de la cuenca, 2) la pendiente del río, fijada por la geomorfología de la cuenca y que determina la velocidad del movimiento de agua por gravedad, 3) el tamaño del sedimento, según las litologías dominantes en la cuenca, y 4) la carga de sedimento, en función de la litología y de los procesos de denudación de las vertientes. Cualquier cambio en una de estas variables implica modificaciones en la dinámica fluvial en la dirección apropiada que absorba el efecto del cambio producido. Ello generará diversas consecuencias, por ejemplo, la erosión de los propios depósitos aluviales o del substrato en que se encaja el cauce, o el depósito del sedimento que transporta. El resultado final es que cualquier cambio da lugar a una modificación de la morfología en planta, con variación del trazado del canal y de su área de influencia y con el consiguiente impacto sobre las actividades humanas cercanas al río.

Como ya se ha comentado, el riesgo deriva de la exposición de los bienes a fenómenos destructivos que actúan con una determinada periodicidad. En el desarrollo urbanístico y económico, planeado o aleatorio, la ocupación de los márgenes fluviales es una constante en cualquier lugar del planeta. El sobrecrecimiento de muchos núcleos urbanos ha forzado a los nuevos ciudadanos a ocupar espacios naturales que, en un inicio, no fueron edificados para evitar una innecesaria exposición a riesgos ambientales (por ejemplo, zonas próximas a cauces o laderas). Con la llegada de nueva población o con la creación de nuevos espacios industriales, se tiende a ocupar estos espacios sin asumir (ya sea por ignorancia o por negligencia) el riesgo que comportan. En el caso de los espacios fluviales, cualquier variación en su morfología en planta afectará consecuentemente a esta ocupación del territorio.

La morfología en planta de los ríos suele presentar dos aspectos extremos: **cursos meandriiformes** y **cursos trenzados** (Knighton, 1984; Watson et al., 2005). No se trata en ningún caso de formas estáticas, sino que cualquier alteración de las variables anteriormente mencionadas puede ocasionar modificaciones en su morfología, conllevando la variación del ancho del cauce, la erosión intensa en la cara externa de un meandro o la sedimentación en zonas limítrofes. Schumm (1981) representó gráficamente las variaciones de la morfología en planta de los ríos en función de cada una de estas variables (Figura 2.7). En ellas introduce el concepto de **estabilidad relativa** y lo representa junto con la variación de las variables dinámicas. Este nuevo término adquiere una gran importancia, pues nos indica el nivel de riesgo relacionado con la modificación de la morfología en planta de un río en función de su trazado actual y de los cambios naturales o antrópicos introducidos en la cuenca.

Con respecto a los cambios en el sistema fluvial, es lícito preguntarse cuál es la periodicidad con que ocurren, como primera aproximación a la evaluación del riesgo. El cálculo de los intervalos de recurrencia de caudales máximos basado, por ejemplo, en la distribución de Gumbel, nos permite una aproximación a la ocurrencia de desbordamientos en función de la capacidad de drenaje del cauce. En algunos casos, en cauces naturales o, especialmente, en cauces modificados artificialmente para aumentar esta capacidad, la periodicidad puede ser del orden de décadas o siglos. Esta baja probabilidad de ocurrencia implica, a su vez, un riesgo menor.

En el contexto de la dinámica fluvial, no solo deben considerarse aquellos procesos que requieren caudales máximos, sino también aquellos otros con caudales suficientes para modificar el talud de un cauce o trasladar una barra fluvial. Estos caudales suelen producirse a escala anual y comportan pequeñas modificaciones continuas que, con el paso del tiempo, pueden dar lugar a modificaciones relevantes del sistema fluvial y a una afectación al territorio y a los bienes que soporta. El caso más evidente es la migración uniforme y continua de los meandros en muchos ríos (Figura 2.8).

Adicionalmente, las presiones humanas sobre el medio fluvial también comportan una modificación, frecuentemente drástica, de alguna de las variables, con lo que se genera una respuesta por parte del río. Por ejemplo, a gran escala, la retención de sedimentos y la disminución de caudal que suponen los embalses, dan lugar a una severa modificación de las variables. A una escala menor, la construcción de muros en los márgenes del cauce para protegerlos de la erosión traslada la dinámica erosiva a otros tramos del río no protegidos. Otros aspectos, como cambios en el uso del territorio, minería o explotación de recursos forestales, agricultura, urbanización y, finalmente, los efectos del cambio climático, son factores que han influenciado o influenciarán la dinámica y la morfología reciente de los ríos (Mount, 1995).

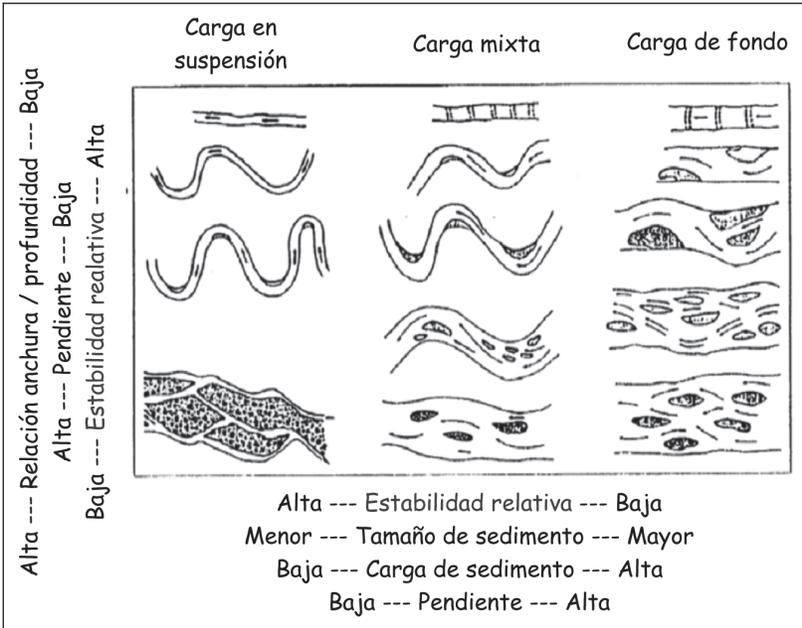


Figura 2.7.- Estructuración de la morfología en planta de los cauces en función de las variables hidrogeomorfológicas. Modificado de Schumm, 1981.

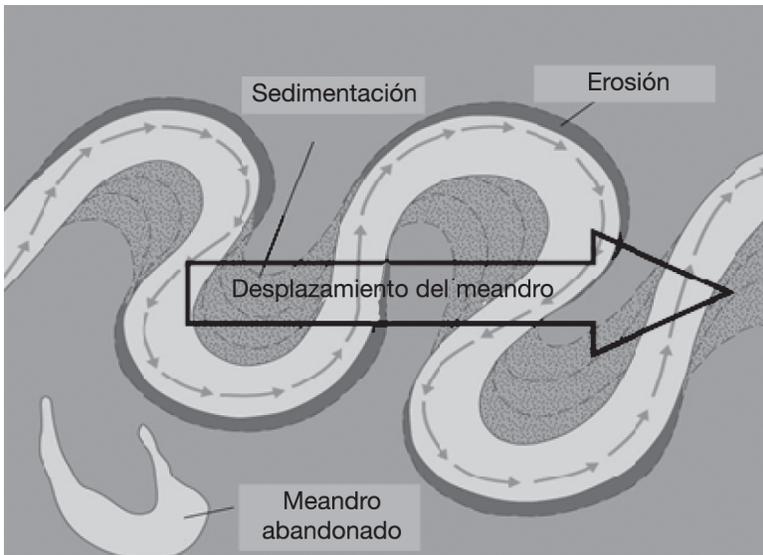


Figura 2.8.- Morfología en planta, dinámica interna y desplazamiento de un meandro. Modificado de Christopherson (1994).

2.3 Riesgos asociados a procesos gravitacionales

Los fenómenos gravitacionales constituyen, junto con las inundaciones, el riesgo geológico más relevante relacionado con los procesos geodinámicos externos en el entorno centroamericano. Ambos se hallan relacionados con el factor precipitación, dado que la presencia masiva de agua durante periodos de elevada e intensa precipitación facilita la inestabilidad de las laderas. Sin embargo, el enfoque de la previsión del riesgo asociado a procesos gravitacionales es notablemente distinto al de las inundaciones. En estas, las zonas de riesgo están limitadas al trazado lineal del lecho del río y a los terrenos circundantes. En aquellos, los movimientos de masa pueden darse en cualquier vertiente de la cuenca que posea las características geológicas y los factores apropiados para que se inicien la inestabilidad y el transporte en masa de material rocoso. Concretamente, se entiende por **proceso gravitacional** el desplazamiento de materiales en una vertiente, impulsados por su propio peso bajo la acción directa de la gravedad, así como por otros factores que favorecen el inicio del movimiento.

Es por ello que la cartografía del riesgo gravitacional es más compleja, a priori, que la de las inundaciones, dado que requiere examinar la superficie completa de la cuenca (excepto los terrenos llanos¹ o con muy escasa pendiente, obviamente) y que no existe un registro periódico de esta dinámica (como en el caso de los caudales), dado que acontece cuando los factores son propicios. Por este motivo, en este apartado se describen, en primer lugar, los factores de carácter geológico, geotécnico y climático y posteriormente la tipología de los movimientos gravitacionales. Finalmente, se describen las aproximaciones metodológicas al estudio del riesgo asociado a estos procesos.

La bibliografía relacionada con la estabilidad de laderas y el riesgo asociado a procesos gravitacionales es muy extensa y, frecuentemente, está estrechamente relacionada con el campo de la geotecnia. Algunos textos fundamentales son Varnes (1984), Smith (2001), González de Vallejo et al. (2002) y Cornforth (2005), entre muchos otros de geología física o ambiental e ingeniería geológica.

1 Los procesos gravitacionales pueden desarrollarse también en terrenos llanos en forma de colapso de los niveles subyacentes. Son procesos propios de terrenos con litologías carbonatadas o evaporíticas, de carácter soluble.

2.3.1 Tipos de vertientes: laderas y taludes

La tipología de los movimientos gravitacionales depende de la litología y estructura interna de los materiales que constituyen la vertiente natural (ladera) o artificialmente modificada (talud). La primera distinción tiene lugar entre rocas consolidadas y rocas no consolidadas². Entendemos por **consolidación** el proceso geológico por el cual la roca adquiere una consistencia sólida y compacta, resistente a la rotura, con una reducción significativa de su porosidad. En el caso de las rocas ígneas, la consolidación tiene lugar durante el enfriamiento del magma en cualquiera de sus manifestaciones petrológicas. Las rocas sedimentarias adquieren la consolidación a partir de la presión ejercida por los estratos superiores y mediante cementación de los clastos y la matriz acumulada en los distintos ambientes sedimentarios. Los procesos metamórficos suelen tener lugar en estado sólido, sin que varíe por ello la consolidación de la roca, si bien los cambios mineralógicos y la generación de la esquistosidad pueden modificar el grado de consolidación. De este modo, la evolución estructural de cada formación geológica afecta a la consolidación de las rocas a través de las redes de fracturas (fallas y diaclasas) con distintos espaciados y densidades. Cada una de estas discontinuidades disminuye el nivel de consolidación y puede actuar como una línea de corte o rotura. Así mismo, la presencia de diques y filones en rocas ígneas o metamórficas y la estratificación en las rocas sedimentarias pueden ser origen de debilidades en la vertiente.

Las rocas no consolidadas son aquellas acumulaciones recientes de materiales rocosos en las vertientes que no han tenido tiempo de cementarse, y también las formaciones edáficas. En terminología geotécnica, ambas suelen denominarse **suelos**. Son pues depósitos formados por agregados naturales resultantes de la denudación de vertientes y depositados mediante procesos de gravedad con mayor o menor participación de una fase fluida. Por ejemplo, nos referimos a depósitos de bloques de roca, coluviales, de piedemonte o formando glaciares de acumulación. En el entorno centroamericano, las vertientes en edificios volcánicos, constituidas por material extrusivo, de carácter piroclástico (bombas, lapilli, cenizas) son también ejemplos de rocas no consolidadas.

Esta breve descripción de las posibles características litológicas y estructurales de las vertientes de la cuenca sugiere que el reconocimiento geológico básico es fundamental en la delimitación de las zonas de riesgo.

2 Desde la perspectiva geotécnica es más apropiado hablar de rocas consolidadas o rocas de baja consolidación, dado que la consolidación es un estado de la roca en función de su historia geológica.

2.3.2 Propiedades geotécnicas de los materiales geológicos

El inicio potencial de un movimiento gravitacional se debe a la creación de una superficie de rotura como resultado de las deformaciones acumuladas. Por lo tanto, nos hallamos ante un balance de fuerzas entre el peso del volumen potencialmente desplazable y la fricción o rozamiento interior que se opone al desplazamiento a lo largo de una posible superficie de corte. La fuerza de rozamiento se halla caracterizada por la cohesión del material y por su ángulo de rozamiento interno. El balance entre ambas determina la estabilidad del talud o ladera.

La **cohesión** del material viene determinada por la fuerza de unión entre las partículas o elementos que constituyen la roca. Obviamente, la cohesión es muy elevada en rocas consolidadas y menor en rocas no consolidadas y suelos, donde depende de la fracción arcillosa y del contenido en agua. El **ángulo de rozamiento interno** es el ángulo de fricción entre dos planos de la misma roca. En el caso de las rocas no consolidadas y de los suelos, es el máximo ángulo de estabilidad (pendiente) que adoptan los elementos que las forman cuando se disponen en una superficie libre.

Ambas propiedades son las que definen, en parte, la morfología de las vertientes estables. Las variaciones de estas propiedades, debidas a distintas causas, son las desencadenantes de los procesos gravitacionales. Por esta razón, el reconocimiento del tipo de roca, de sus propiedades geotécnicas y de los factores descritos a continuación, son básicos en la elaboración de mapas de vulnerabilidad frente a movimientos por gravedad.

2.3.3 Factores influyentes en la estabilidad de vertientes

La estabilidad de una vertiente está determinada por distintos factores (González de Vallejo et al., 2002):

- Factores geométricos, como la altura y la inclinación del talud o ladera,
- Factores geológicos, como la litología o la alternancia litológica y la presencia de planos de debilidad (contactos estratigráficos, fracturas, disoluciones, etc.),
- Factores hidrogeológicos, como la mayor o menor saturación de agua de los poros del suelo o roca, que influyen en su peso y en sus propiedades geotécnicas, y
- Factores geotécnicos, relacionados con el comportamiento mecánico del terreno, a su resistencia a la rotura y a la deformabilidad.

Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran **factores condicionantes** y son intrínsecos a la naturaleza geológica del terreno. Por otro

lado, los **factores desencadenantes** son de carácter externo y actúan modificando las características y las condiciones de equilibrio.

La presencia de agua es muy importante en la estabilidad, dado que cambia en el tiempo a partir de la variabilidad en la precipitación. La relación entre inestabilidades y periodos lluviosos es bien conocida. Un incremento del contenido en agua reduce la resistencia al corte de los planos de rotura, aumenta el peso del material por saturación, puede provocar la meteorización y/o disolución de los materiales del talud y la apertura de grietas por meteorización física (congelación) y puede producir erosión interna por flujo subsuperficial o externo. Por ello, las características hidrogeológicas de las laderas y de los taludes, su porosidad y su permeabilidad, su capacidad de infiltración y la oscilación del nivel freático son parámetros básicos a considerar en la previsión de inestabilidades.

Obsérvese que hay una serie de factores que son modificables por acción humana. Favorecer o evitar la infiltración de agua, modificar el ángulo natural del talud y sobrecargar la vertiente o su zona superior por acumulación de materiales (edificaciones, terraplenes, etc.) son acciones que influyen en los factores y pueden desencadenar el desplazamiento por gravedad.

Evidentemente, algunos fenómenos naturales extremos como la precipitación relacionada con ciclones o huracanes y los movimientos sísmicos pueden ser también responsables de estos procesos.

2.3.4 Tipología y clasificación de los movimientos gravitacionales

Para el estudio de los movimientos gravitacionales, es necesario distinguir sus distintas tipologías y ser precisos en su designación, dado que cada una de ellas corresponde a la acción de factores distintos. En un estudio de riesgo, la correcta designación comporta, asimismo, una valoración intrínseca de la peligrosidad del movimiento.

Se distinguen tres tipologías de movimientos gravitacionales:

- **Desprendimientos.** Se trata de caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas, aprovechando como superficie de rotura planos de discontinuidad preexistentes. Cuando los estratos se orientan en sentido contrario a la ladera, estos movimientos se denominan **vuelcos**. Pueden dar lugar a **avalanchas** rocosas y, en caso de que incluyan una abundante proporción de materiales finos, ocasionan avalanchas de derrubios.
- **Deslizamientos.** Consisten en movimientos de masa, suelo o roca, que deslizan respecto al substrato, sobre una o varias superficies netas de rotura, al superarse la resistencia al corte. En algunos casos, pueden

- derivar en flujos. Los **deslizamientos rotacionales** son frecuentes en suelos cohesivos homogéneos y, en ellos, la rotura tiene lugar en superficies curvas o en “forma de cuchara” (Figura 2.9). Una vez iniciado un deslizamiento rotacional, la masa de suelo empieza a rotar, pudiendo fragmentarse en distintos bloques que le otorgan una morfología escalonada. En la zona inferior, los materiales se acumulan dando lugar a un lóbulo más o menos fluido, en función del contenido en agua.
- **Flujos o coladas.** Son movimientos de masas de suelo (barro o tierra), derrubios o bloques rocosos con abundante presencia de agua, que les otorga un comportamiento “fluido”. En estos procesos, el agua es el principal factor desencadenante, dado que reduce la resistencia al movimiento. Los suelos arcillosos suelen ser los más proclives a este tipo de movimiento. Movimientos lentos, prácticamente imperceptibles a escala anual del suelo, como la **reptación** (*creeping*) o la **solifluxión**, también se clasifican como flujos.

La clasificación de los tipos de movimientos gravitacionales se ha distribuido en un diagrama triangular (Carson y Kirkby, 1972). En él, se los relaciona con dos características fundamentales en el contexto de los estudios de riesgo: la presencia de agua y la velocidad a que ocurren (Figura 2.10). Por esta razón, insistimos en las connotaciones dinámicas de una apropiada nomenclatura de los movimientos identificados en el campo.

2.3.5 Metodología de análisis del riesgo asociado a procesos gravitacionales

Los métodos para el análisis del riesgo se basan en un detallado estudio de campo en el que se observan y cartografían los factores descritos, así como en una recopilación histórica de los procesos gravitacionales sucedidos, prestando especial atención a su tipología y su magnitud. La expresión cartográfica es, pues, básica en estos métodos. El uso de SIG permite realizar interpolaciones estadísticas para el cálculo de la probabilidad de suceso de un proceso gravitacional (Marquín et al., 2000; Menéndez-Duarte et al., 2002).

En la zona centroamericana, el huracán Mitch, en octubre de 1998, fue responsable de numerosos procesos gravitacionales, asociados a otros desastres geológicos y socioeconómicos que acompañaron a esta tragedia. Ello dio lugar a numerosos estudios científico-técnicos en relación al riesgo geológico, algunos de los cuales se exponen en el apartado siguiente.

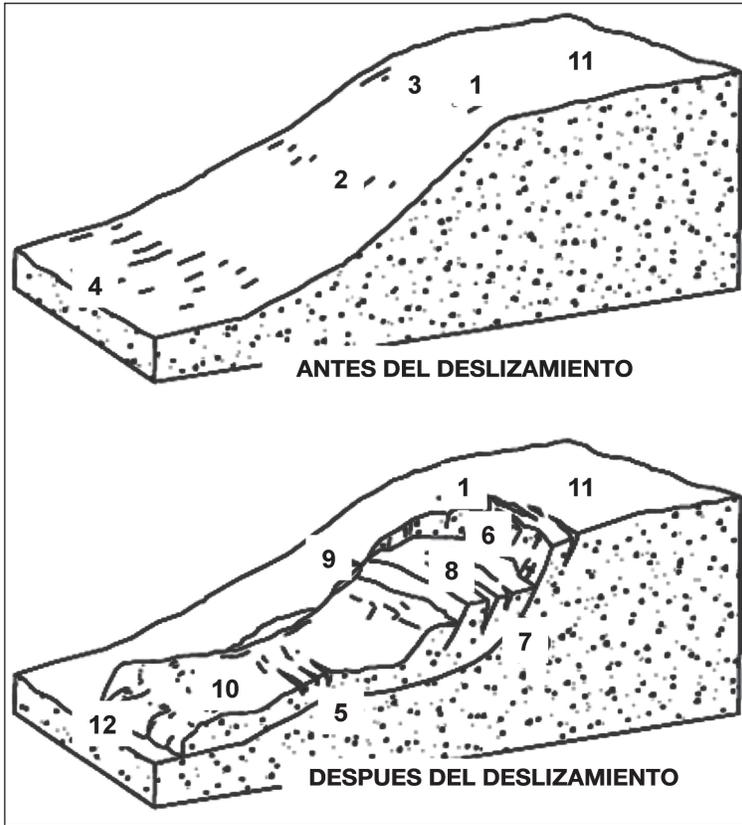


Figura 2.9.- Esquema de un deslizamiento rotacional. 1. Corona: Material que aún permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas del escarpe principal. 2. Superficie original del terreno: Superficie inclinada o talud de una ladera antes de que ocurra el deslizamiento. 3. Hombro: Zona que se encuentra en la transición de la superficie inclinada o talud de una ladera y la corona. 4. Pie de la ladera: Parte más baja de la ladera. 5. Pie de la superficie de corte: Línea de intersección (en ocasiones cubierta) entre la parte inferior de la superficie de falla y la superficie original del terreno. 6. Escarpe principal de corte: Escalón o superficie abrupta localizada en la parte superior de la ladera y contigua a la corona; resulta del movimiento del talud pendiente abajo y forma parte de la superficie de corte. 7. Superficie de corte: Zona o lugar geométrico donde se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por la acción de la gravedad, separándose de la ladera remanente. 8. Cuerpo principal: Aquella parte del material desplazado sobre la superficie de corte; en ocasiones ese material permanece sobre la superficie de deslizamiento, pero otras veces se “vacía” totalmente, dando como resultado los flujos al pie del deslizamiento. 9. Flanco: El costado de un deslizamiento de tierras. 10. Zona de acumulación o base: Área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno; es decir, el área cubierta por el material desplazado, abajo del pie de la superficie de falla. 11. Plataforma: Porción superior del talud más allá de la corona. 12. Punta: Punto de la base del deslizamiento que se encuentra más distante de la corona. Fuente: Mendoza y Domínguez, 2004.

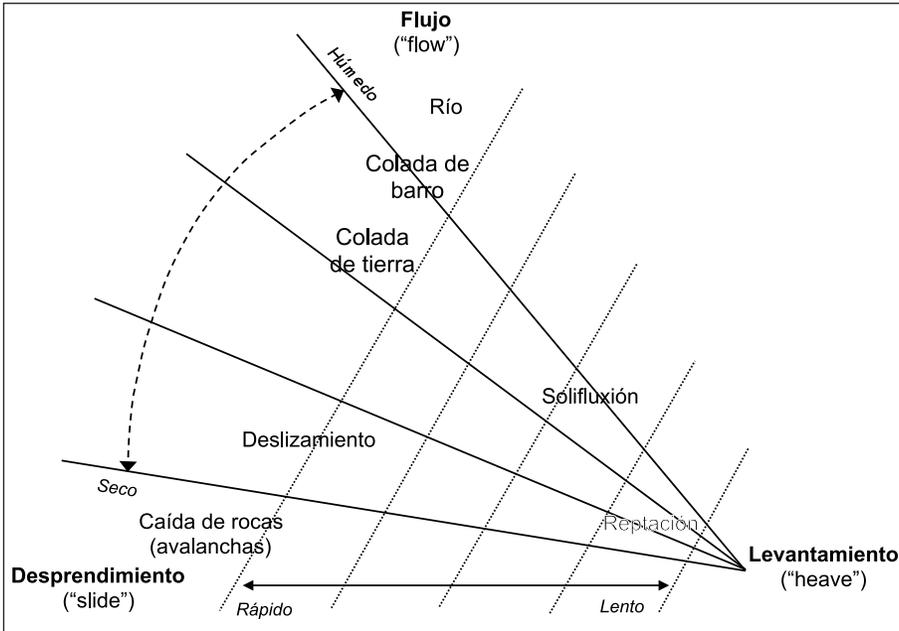


Figura 2.10.- Clasificación ternaria de los procesos gravitacionales en función de la presencia de agua y su velocidad. Fuente: Modificado de Carson & Kirkby, 1972.

Entre las aportaciones al estudio de la peligrosidad asociada a movimientos de ladera, citamos el estudio de Vilaplana et al. (2002), basado en una metodología expuesta en Corominas et al. (2003). Esta contempla: 1) la adquisición de datos litológicos, diferenciando las litologías rocosas y las correspondientes a depósitos superficiales ("suelos", en sentido geotécnico), así como las direcciones de debilidad estructural como estratificaciones, foliaciones, densidad de fracturación de las rocas y pendiente (dirección y magnitud) de las laderas y 2) la realización de un mapa de indicadores de actividad gravitacional, usando como tales grietas, cicatrices y acumulaciones superficiales recientes, árboles inclinados o sepultados en sedimentos, daños en infraestructuras y edificios, afectación de los deslizamientos de mayor entidad a la red de drenaje y acciones erosivas fluviales en las vertientes. Esta información es tratada mediante SIG. Las referencias históricas complementan la base de datos.

El primer paso en la identificación de las zonas de máximo peligro consiste en identificar aquellas áreas potencialmente afectables por procesos gravitacionales, es decir, en realizar un **mapa de vulnerabilidad**. Datos como litología y ángulo de estabilidad, medidos en movimientos recientes de ladera, aportan una primera distinción entre áreas vulnerables y no vulnerables. La magnitud del fenómeno se estudia en base a la litología de la ladera y a la estructura interna de las rocas. Asimismo, se propone incluir en la cartografía de la peligrosidad

no solo las zonas susceptibles a movimientos gravitacionales (según las distintas tipologías propias de la zona), sino también las zonas de acumulación de los materiales transportados.

Para evaluar el peligro, es preciso determinar la magnitud y frecuencia de los movimientos. Se entiende por **magnitud** la capacidad para producir daños y puede estimarse por el volumen de material removido y por su velocidad de desplazamiento. El volumen afectable puede estimarse mediante la observación de campo y su velocidad, en función de cálculos numéricos. Así mismo, en este tipo de análisis se ha de considerar la capacidad para retener el material desplazable e impedir su avance usando obras de ingeniería civil. En caso de que el volumen calculado sea superior a esta capacidad, los movimientos de ladera se consideran peligrosos, dado que las obras de prevención y remediación son ineficientes o demasiado costosas.

La **frecuencia** viene expresada por el intervalo de recurrencia, anteriormente definido. Dado que estos procesos no son continuos en el tiempo, sino que ocurren esporádicamente, es útil definir unos rangos temporales de frecuencia en función de las observaciones de campo y de los registros históricos. En el caso del Pirineo, estudiado por Corominas et al. (2003), se denominan de frecuencia alta aquellos procesos observados en ciclos de 40 años, de frecuencia moderada entre 40 y 500 años y de baja frecuencia por encima de 500 años. Esta frecuencia se define para cada tipo de proceso gravitacional.

Finalmente, la zonación de la peligrosidad se realiza mediante SIG, interpolando las variables anteriores en cada una de las celdas en que se ha discretizado la zona de estudio. Como sugieren estos autores, la complejidad de estos procesos implica una simplificación de los mismos, lo cual añade incertidumbre a la evaluación del riesgo.

Los movimientos de ladera en Nicaragua, a raíz del huracán Mitch, fueron estudiados por Vilaplana et al. (2002). En este trabajo, los autores aplican el método expuesto y consideran la dificultad intrínseca para definir los rangos de peligrosidad en función de la magnitud y de la frecuencia, dados los daños esperables en el territorio concreto de estudio. La ocurrencia de movimientos pre-Mitch y/o su activación durante el Mitch o su acontecimiento con posterioridad al Mitch, fue usada como referencia para establecer los rangos de peligrosidad.

2.4 Riesgo geológico en Centroamérica

Los procesos geodinámicos externos son responsables de numerosos ejemplos de riesgo geológico en el área centroamericana. La presencia habitual de huracanes, que conllevan condiciones meteorológicas extremas, es responsable de una frecuencia elevada de procesos muy activos. Estos, junto con la estructuración

social del territorio, han sido responsables de graves situaciones de riesgo, ya sea de tipo fluvial o gravitacional. Volviendo a la definición de riesgo, estos procesos reiterados bajo las condiciones climáticas mencionadas, han estado presentes a lo largo de toda la historia reciente de la zona, si bien no han constituido una amenaza hasta la expansión demográfica y la ocupación intensa del territorio propia de los últimos decenios.

Como se ha comentado, la presencia excesiva de agua es un factor desencadenante de los procesos gravitacionales, especialmente de los deslizamientos y flujos en materiales de baja consolidación. Las lluvias de alta intensidad son responsables directas de estos fenómenos, habiéndose definido un umbral de 70 mm h^{-1} como inicio de algunos de estos procesos en México. Al mismo tiempo, la severidad de sus consecuencias aumenta dramáticamente conforme crece la intensidad horaria con respecto a este valor (Mendoza y Domínguez, 2004). Los impedimentos artificiales al drenaje de la precipitación incidente, habitualmente relacionados con la urbanización, son un elemento adicional que favorece la inestabilidad de las laderas.

La presencia de sismos, también habituales en esta región, constituye en sí misma otro riesgo geológico, a la vez que es otro factor desencadenante de procesos gravitacionales. Sin embargo, la suma de riesgos fluviales y gravitacionales asociados a periodos de elevada precipitación hace que estos factores reciban mayor consideración en la previsión del riesgo. La capacidad de prevenirlos, a través del seguimiento meteorológico en tiempo real, es mayor que en el caso de los temblores sísmicos.

El huracán Mitch fue responsable de diversos procesos gravitacionales de distinta intensidad, muchos de los cuales tuvieron consecuencias trágicas. Ello llevó a una detallada investigación de estos fenómenos por parte de los institutos científicos centroamericanos en colaboración con otros centros extranjeros, para delimitar las zonas de mayor riesgo y establecer protocolos de protección civil ante posibles situaciones extremas. Esta actuación científica ha dado lugar a una extensa bibliografía, imposible de sintetizar en un breve espacio. Diversos estudios, como los de Buckman et al. (2001), Cannon et al. (2001), Harp et al. (2002), CENAPRED (2001, 2004), UNESCO et al. (2003) y SNET (2003), entre otros muchos, son ejemplos relacionados con la descripción, previsión y gestión del riesgo geológico dentro del sistema cuenca. Asimismo, las páginas Web correspondientes a los institutos nacionales de investigación contienen información interesante y conexiones a estudios y centros científicos complementarios.

2.5 Referencias

- Arcement G J. and Schneider V.R. (1989). "Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains" U.S.G.S. Water Supply Paper 2339.
- Barnes H.H. (1967). "Roughness Characteristics of Natural Channels". USGS Water Supply Paper 1849. <http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp_1849/pdf/wsp_1849_e.pdf>.
- Benito G., Baker V.R. and Gregory K.J. (eds.) (1998). "Palaeohydrology and Environmental Changes". John Wiley and Sons.
- Brusi D. y Roqué R. (1998). "Los riesgos geológicos. Algunas consideraciones didácticas". *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 6(2): 127-137.
- Buckman R.C. et al. (2001). "Deslizamientos de tierra inducidos por el huracán Mitch en Guatemala". USGS Open-File Report 01-443.
- Cannon S.H. et al. (2001). "Respuesta a los desprendimientos de tierra ocasionados por las lluvias torrenciales del huracán Mitch en siete áreas de estudio en Nicaragua". USGS Open-File Report 01-412-B.
- Carson M.A. and Kirkby M. (1972). "Hillslope Form and Process". Cambridge University Press.
- CENAPRED (2001). "Cartilla de diagnóstico preliminar de estabilidad de laderas". México.
- CENAPRED (2004). "Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos". Doc. 16159. México.
- Christopherson R.W. (1994). "Geosystems. An Introduction to Physical Geography". McMillan College Pub. Co. 2nd ed.
- Cornforth D. (2005). "Landslides in Practice". Wiley.
- Corominas J. Copons R., Vilaplana J.M., Altimir J. and Amigó J. (2003). "Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra". *Natural Hazards* 30: 421-435.
- Custodio E. y Llamas M.R. (1976). "Hidrología subterránea". Omega. 2ª edición.
- Dunne T. and Leopold L.B. (1978). "Water in Environmental Planning". Freeman.
- Ferrer M. (1991). "Mapas de peligrosidad de movimientos en ladera". I Bional Española de Ingeniería Geológica y Minera. IGME. Madrid (España).
- González de Vallejo L., Ferrer M., Ortuño L. y Oteo C. (2002). "Ingeniería Geológica". Ed. Pearson Education, Madrid.
- Harp E.L., Castañeda M. and Held M.D. (2002). "Deslizamientos de tierra provocados por el huracán Mitch en Tegucigalpa, Honduras". USGS Open-File Report 02-33.
- Knighton D. (1984). "Fluvial Forms and Processes". Arnold.
- Mackin J.H. (1948). "Concept of the graded river". *Bulletin of the Geological Society of America* 59: 463-512.
- Maidment D.R. (ed.) (1993). "Handbook of Hydrology". McGraw-Hill.
- Marquinez J., Menéndez R. y Ferrer M. (2000). "Peligrosidad por movimientos de ladera en Nicaragua. Cartografía piloto de la zona de la Trinidad (Departamento de Estelí)". En: Ministerio de AA.EE., IGME, AECl y CEDEX: *Mitigación de desastres naturales en Centroamérica*. Madrid. <<http://www.ineter.gob.ni/geofisica/desliza/desliza.html>>.
- Mendoza-López M.J. y Domínguez-Morales L. (2004). "Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas". En: CENAPRED, *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. México.

In: **Andrés, P. y Rodríguez, R. (Eds)**

2008. Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica
ISBN: ISBN: 978-84-96742-37-6. Documenta Universitaria. Girona (España)

- Menéndez-Duarte R., Marquínez J. and Devoli G. (2003). "Slope instability in Nicaragua triggered by Hurricane Mitch: distribution of shallow mass movements". *Environmental Geology* 44: 290-300.
- Mount J.F. (1995). "California Rivers and Streams". University of California Press.
- OEA (1993). "Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado". Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales. Organización de Estados Americanos. <<http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/begin.htm>>.
- Shaw E.M. (1994). "Hydrology in Practice". Chapman & Hall.
- Schumm S.A. (1977). "The Fluvial System". Wiley.
- Schumm S.A. (1981). "Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications". *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, Special Publ. No. 1: 19-29.
- Smith K. (2001). "Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster". Routledge.
- Thorndycraft V.R., Benito G., Barriendos M. and Llasat M.C. (eds.) (2002). "Palaeofloods, Historical Data and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment". Proc. PHEFRA Int. Workshop. Barcelona 16-19 october 2002. <<http://www.ccma.csic.es/dpts/suelos/hidro/phefra/proc.htm>>.
- UNESCO, ITC, CEPREDENAC y COPECO (2003). "Aplicación de sistemas de información geográfica para el análisis de amenazas y riesgos naturales". Doc. 15078. Tegucigalpa, Honduras.
- SNET (2003). "Análisis de riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la microcuenca del Arenal de Montserrat". Honduras.
- Varnes D.J. (1984). "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". *Natural Hazards*, 3. UNESCO.
- Vilaplana J.M., Pallàs R., Guinau M., Falgás E. y Alemany X. (2002). "Propuesta para una cartografía de peligrosidad geológica asociada a los movimientos de ladera en el noroeste de Nicaragua". *Serie Geográfica* 10: 109-199.
- Watson C.C., Biedenharn D.S. y Thorne C.R. (2005). "Stream Rehabilitation", version 1.0. Cottonwood Research, LLD. Fort Collins, CO.
<http://www.engr.colostate.edu/~cwatson/ce_old/CE_613_F06/Class_Notes.htm>
- Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L., and Alley W.M. (1998). "Ground Water and Surface Water. A Single Resource". U.S. Geological Survey Circular: 1139.

EN RED

Riesgo geológico en Centroamérica

INETER <http://www.ineter.gob.ni>

SNET <http://www.snet.gob.sv>