

A landscape photograph showing a winding road and a river in a mountain valley. The terrain is rugged and rocky, with sparse vegetation. The sky is hazy and overcast.

Fernanda J. Gaspari
Gabriela E. Senisterra
María Isabel Delgado
Alfonso M. Rodríguez Vagaría
Sebastián I. Besteiro

MANUAL DE MANEJO
INTEGRAL DE
— CUENCAS —
HIDROGRÁFICAS

MANUAL DE

MANEJO INTEGRAL

DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Fernanda J. Gaspari
Gabriela E. Senisterra
María Isabel Delgado
Alfonso M. Rodríguez Vagaría
Sebastián I. Besteiro

Primera Edición.

2010

Gaspari, Fernanda Julia

Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas / Fernanda Julia Gaspari ; con colaboración de Gabriela E. Senisterra ... [et.al.]. - 2a ed. - La Plata : Grupo de Manejo de Cuencas, 2010.

321 p. ; 21x29 cm.

ISBN 978-987-26211-1-7

1. Cuencas Hidrográficas. I. Senisterra, Gabriela E., colab. II. Título

CDD 551.46

Fecha de catalogación: 01/11/2010

2010, Fernanda Gaspari
Derechos exclusivos del Editor Autor.

Primera Edición, Junio 2009.
Impreso en La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina – Printed in Argentina.

Diseño Gráfico: Silvina Gaspari.
Quilmes, Argentina.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo por escrito de los autores.

PRÓLOGO

El estudio de los procesos hidrológicos y su incidencia en el ambiente permitirán evaluar la posibilidad del desarrollo regional y la adopción de diferentes metodologías para un ordenamiento territorial. Su aplicación en estudios del Manejo de Cuencas Hidrográficas forma parte del hilo conductor de la docencia - investigación y extensión en la materia.

Este manual se basa en el marco conceptual del Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, con el fin de capacitar a estudiantes avanzados para desarrollar, elaborar, implementar y controlar la producción de proyectos originales adecuados a las condiciones reales. A partir de este material, se pretende identificar las necesidades de las instituciones públicas y privadas y los aspectos culturales y sociales de los pobladores con el fin de garantizar la efectividad de los medios elegidos y de las metodologías utilizadas, la factibilidad de las inversiones generadas y los caminos participativos para facilitar la transferencia y la adopción de los mismos.

Debido a que el Manejo de Cuencas Hidrográficas integra conocimientos prácticos y teóricos de varias temáticas, la misma permite interpretar, desarrollar y aplicar métodos de investigación científica y de extensión participativa en forma dinámica para la interpretación de la realidad forestal, agropecuaria, ambiental y social.

El objetivo de este manual es proporcionar elementos y herramientas metodológicas que permitan comprender el marco teórico y práctico del Manejo de Cuencas Hidrográficas, y difundir diferentes instrumentos de carácter biológico, hidrotécnico y tecnológico para la racionalización de la actividad humana en cuencas. Además pretende generar un proceso de autoformación de una conciencia crítica para el manejo de cuencas hidrográficas, permitiendo integrar los conocimientos de edafología, topografía, geomorfología, hidrología, climatología, entre otros; analizar el sistema cuenca hidrográfica, sus características, dinámica y limitaciones y desarrollar criterios de intervención profesional para el manejo de cuencas desde una perspectiva crítica. Por último, el manual permite establecer pautas para la elaboración de proyectos de Manejo de Cuencas Hidrográficas que articula todos los temas abordados y enfrenta al lector a una situación verídica para crear condiciones de libre expresión, intercambio y debate. Se basa en un modelo pedagógico sustentado en datos de observaciones de campaña y gabinete (planos topográficos, fotografía aérea, información hidrometeorológica y de suelos, condiciones socioeconómicas e institucionales).

TEMARIO PRINCIPAL

1. MARCO CONCEPTUAL DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Definición de cuenca hidrográfica

Concepción de manejo de cuencas hidrográficas

Reseña histórica del manejo de cuencas hidrográficas

Antecedentes locales de manejo de cuencas hidrográficas

Visión y perspectivas del manejo de cuencas hidrográficas

2. EL SISTEMA CUENCA HIDROGRÁFICA

El complejo físico de una cuenca hidrográfica

Comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica

Relación geohidrológica en una cuenca hidrográfica

3. ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA.

Conceptos de Hidrología de Superficie

Ciclo hidrológico

Simulación de la respuesta de una cuenca ante una lluvia

Disposición de la precipitación durante una tormenta

Generalidades del Balance hidrológico

Hidrología forestal

4. ESTIMACIÓN DE CAUDAL LÍQUIDO

Escurrecimiento de una cuenca hidrográfica

Factores que afectan el escurrecimiento de una cuenca

Modelos para determinar escurrecimiento

Concepto de Hidrograma

Análisis de hidrogramas

Hidrograma unitario

Método del S.C.S. para las abstracciones

Estimación del caudal de escurrecimiento por el NC

Coefficiente de escurrecimiento

Métodos de cálculo del coeficiente de escurrecimiento

Metodologías básicas para determinar el escurrecimiento superficial

Modelización hidrológica

5. ESTIMACIÓN DE CAUDAL SÓLIDO

Erosión hídrica superficial

Erosión hídrica superficial y en profundidad

Factores físicos determinantes de la erosión hídrica

Modelos de evaluación. Fórmulas empíricas

Modelo U.S.L.E.

Clasificación de pérdida de suelo

Modelo M.U.S.L.E.

Modelo R.U.S.L.E.

Modelos de evaluación de pérdida de suelos en canales de escurrecimiento

Restauración hidrológico forestal

6. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

Cartografía

Sistemas de información geográficas (S.I.G.)

Sistema de posicionamiento global (GPS)

Teledetección

Introducción a los satélites y sensores de uso más frecuente en el manejo de cuencas hidrográficas

Procesamiento de capas temáticas

7. EL FENÓMENO DEL GEODINAMISMO TORRENCIAL.

Dinámica de un sistema hidrográfico

El fenómeno torrencial

Control de la actividad torrencial

Efectos hidrológicos de los diques

8. ORDENACIÓN AGROHIDROLÓGICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

9. GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

MARCO CONCEPTUAL DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA

La naturaleza es una unidad indivisible, en donde los elementos naturales, el suelo, el agua, la vegetación, la fauna, el clima y el hombre, se encuentran íntimamente relacionados. Por ejemplo, el proceso de erosión del suelo, afecta directamente la calidad del agua, la pérdida de la vegetación y el peligro de extinción de la fauna silvestre. Afecta también, directamente a la economía del hombre y el nivel de desarrollo de la sociedad. De la misma manera, todos los elementos formadores del hombre, como por ejemplo, sus valores, su cultura, sus costumbres, su propia historia, y los elementos o características de la sociedad (marginadas, subdesarrolladas, tercer mundista), también están íntimamente correlacionadas y afectan directa o indirectamente el comportamiento de la naturaleza.

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible. Por ello es necesario conocer sus límites y la definición de sus características morfológicas, ambientales y de la sociedad que la integra. Para definir sus límites se debe identificar a las divisorias de agua o topográficas (D.A) que son los puntos altimétricos más altos que definen la dirección de circulación del escurrimiento superficial, conocidos también como interfluvio. Este último genera una línea de convergencia de aguas superficiales y subterráneas definiendo al canal principal o río, siendo este una línea virtual dibujada sobre las cotas más bajas sobre un plano que se inicia sobre las D.A. denominado vertientes. El agua cuando llega hasta esta línea o canal de desagüe está circulando sobre la llanura o valle aluvial, pasando luego por la planicie de inundación hasta llegar al canal propiamente dicho, que forma la vaguada o thalweg. El thalweg se caracteriza por poseer una pendiente casi uniforme que indica la dirección del escurrimiento sobre el canal de drenaje, tendiendo a un perfil aproximadamente parabólico denominado perfil de equilibrio (Figura 1.1 y 1.2).

Se considera valle fluvial a la zona de influencia del sistema de drenaje propiamente dicho, y valle aluvial se encuentra en las zonas de aluvionamiento (deposición de aluviones o sedimentos), haciendo avanzar el punto de nivel de base sobre una llanura.

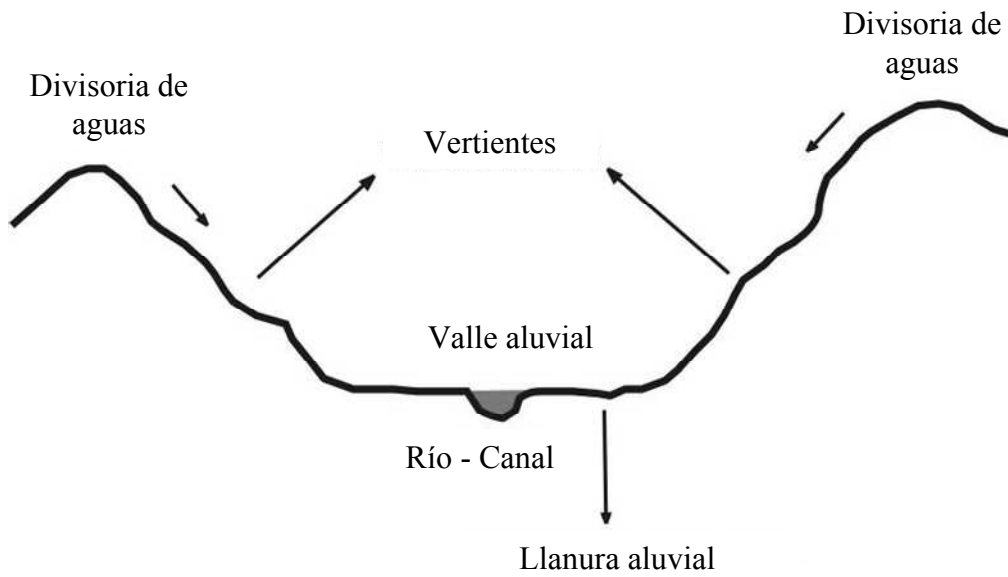


Figura 1.1. Identificación de partes de un corte transversal de una cuenca hidrográfica.

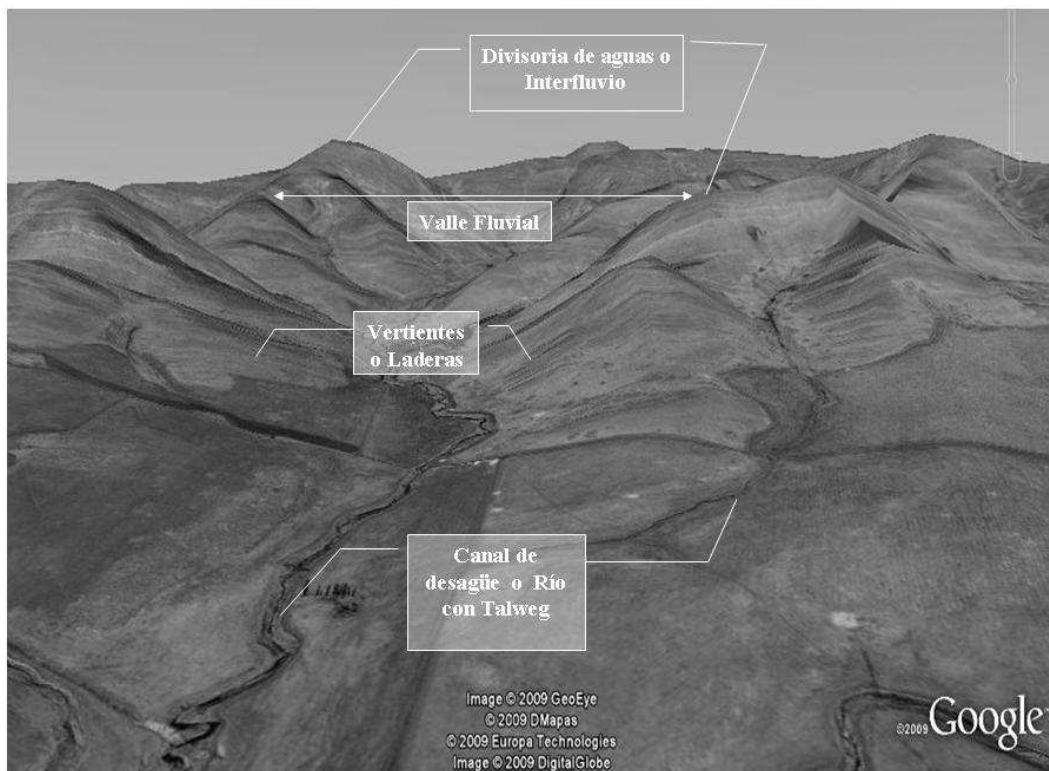


Figura 1.2. Identificación de los componentes de las cuencas hidrográficas.

Para poder definir el espacio que ocupa la cuenca hidrográfica se debe conocer todos los puntos que son D.A., los cuales al unirlos generan el Límite de Cuenca Hidrográfica (L.C.) quedando definido el drenaje sobre las cotas más bajas (Figura 1.3). La línea L.C. es irregular

recorriendo siempre las cotas D.A., éstas van disminuyendo cuando se acercan a la desembocadura de la cuenca o zona más baja, la cual puede estar determinada por arrojar sus aguas a una cuenca aguas debajo de un río de mayor porte.

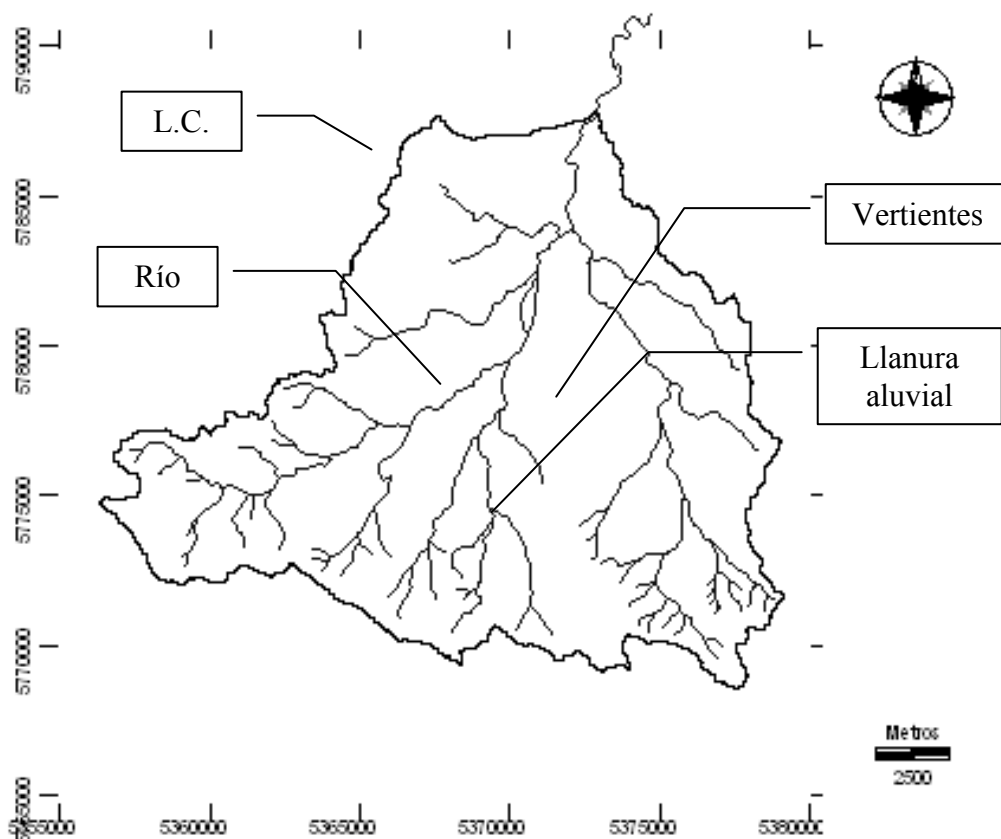


Figura 1.3 Delimitación de una cuenca hidrográfica (L.C.) con su red de drenaje y partes principales.

Dentro de la misma cuenca pueden existir unidades hidrológicas menores, denominadas subcuencas, las cuales forman parte del este sistema de cuenca drenaje, siendo originadas por D.A. y cursos de agua de menor porte.

Un enfoque sistémico del concepto de cuenca hidrográfica supera la idea de reducirla a una superficie de convergencia del escurrimiento hídrico superficial ya que considera a todo el complejo biogeomórfico y humano. Bajo esta concepción la cuenca hidrográfica representa un espacio físico tangible que permite la concurrencia integral y multisectorial (actividades económicas y productivas). La misma constituye un instrumento valioso del Estado y la sociedad para administrar su actividad, conciliar intereses económicos y sociales, conservar la biodiversidad y permitir un uso sostenido de los recursos naturales representando a una unidad de planificación y gestión para el Manejo de los Recursos Naturales (Gaspari *et al.*, 2006).

En el estudio y planificación de una cuenca hidrográfica es indispensable la comprensión y aplicación del concepto de estabilidad para el buen uso y manejo de los recursos naturales. En la actualidad la presión del hombre sobre éstos es tan fuerte que su efecto sobre las características del medio pueden, y de hecho hacen, que un ecosistema cambie por completo y su respuesta varíe en perjuicio del hombre. Como ejemplo, se puede citar la zona de Secano

Costero árido y semiárido en Chile donde existe una clara tendencia a la disminución de la producción; así, en una primera etapa dominaban grandes bosques que se cosecharon para hacer posible el cultivo de cereales; luego se continuó con ganadería bovina, después ovina y en la actualidad sólo es posible criar caprinos, lo que indica una baja consistente de la producción. El sistema cada vez cambia de una órbita superior a una inferior hasta que, al final, puede llegar a un punto de equilibrio donde la producción es igual a cero pues se ha convertido en una zona desertificada o erosionada a grado máximo. Desde el punto de vista antrópico, antes que el sistema llegue a su última órbita, se clasifica como inestable (Gaspari *et al*, 2006).

El enfoque integral y conocimiento sistémico de la cuenca sirve de referencia para proyectar el desarrollo sustentable regional, como así también la determinación del impacto ambiental de toda actividad humana (Bruno, 2000). En general la calidad y cantidad de agua representan importantes indicadores del estado de conservación de la cuenca.

La cuenca hidrográfica está formada por diferentes unidades ecológicas, las cuales definen sus características naturales y por unidades socio-políticas (comunas, provincias o regiones). Las cuencas hidrográficas que están constituidas por dos o más unidades socio-políticas, se denominan cuencas compartidas. En el proceso de planificación a escala de detalle, las cuencas hidrográficas se subdividen en subcuencas y microcuencas, obedeciendo los objetivos propuestos y criterios de superficie, pendiente, altitud media, límites comunitarios e históricos y características sociales de la ocupación del espacio.

Otra definición de cuenca hidrográfica expresa al área delimitada por una divisoria de aguas, con un río y sus afluentes, en la cual la precipitación caída corre por su superficie, se concentra y pasa por un determinado punto del cauce, contemplando simplemente elementos físicos (topográficos) que interesan en el momento de ubicarla espacialmente. Una forma más apropiada es concebirla desde la visión de sistemas. De esta manera, la cuenca hidrográfica, se puede definir “como un sistema de relaciones sociales y económicas cuya base territorial y ambiental es un sistema de aguas que fluyen a un mismo río, lago o mar o como un territorio caracterizado por un sistema de aguas que afluyen a un mismo río, lago o mar y cuyas modificaciones se deben a la acción o interacción de los subsistemas sociales y económicos que abriga” (Rivera, 1984).

Los componentes principales de los subsistemas que determinan el funcionamiento de una cuenca intervenida por el hombre son (FAO, 1998):

- ❖ Elementos naturales: Agua, suelo, vegetación, clima, etc.
- ❖ Elementos humanos: Socio-económicos (infraestructura, tecnología, niveles de calidad de vida) y jurídico-institucionales (normas que regulan el uso de los recursos naturales, leyes, políticas de desarrollo, tenencia de las tierras, instituciones involucradas).

El hombre cumple una función perturbadora en la evolución natural de la cuenca, es decir, al intervenirla mediante la explotación de los recursos que ella posee, provoca cambios en las interrelaciones de los componentes, por lo que el sistema tiende a un equilibrio diferente. Es por ello que surge el concepto de manejo integral de cuencas hidrográficas, basado en el estudio de las interrelaciones de sus componentes y solventado por prácticas correctas e incorrectas que originaron resultados útiles en el presente (Figura 1.4).

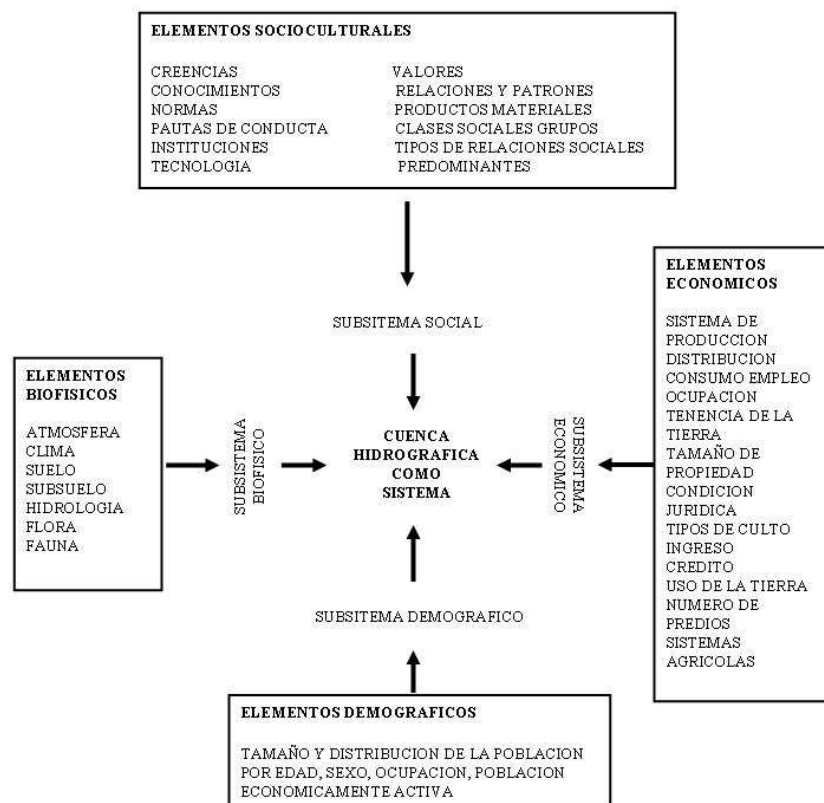


Figura 1.4. Diagrama de una cuenca hidrográfica como sistema, indicando sus componentes naturales e interrelaciones.

En síntesis, las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, donde la disponibilidad de recursos hídrico y edáfico en una cuenca hidrográfica depende de:

- La tendencia dinámica de funcionamiento de este tipo de sistema;
- La influencia de tratamientos integrados de producción y protección regionales, según elementos sociales, económicos;
- El grado de deterioro ambiental.

PARTICULARIDADES DE LAS CUENCAS DE MONTAÑA Y DE LLANURA

El ecosistema ofrece una gran diversidad de recursos socioambientales: agua, energía, variedad de ecosistemas en ladera, diversidad genética, recursos forestales y minerales, productos agropecuarios, ocio y turismo, recursos paisajísticos, históricos y culturales, entre otros. De los diferentes flujos de recursos establecidos entre las áreas de montaña y las llanuras adyacentes, el hídrico es posiblemente uno de los que hace más notable la dependencia socioambiental respecto de los ecosistemas montanos. En efecto, se ha estimado que más de la mitad de la humanidad depende de los recursos hídricos generados en las cuencas de montaña para satisfacer sus necesidades de agua potable, riego, uso industrial, hidroeléctrico y navegación.

En cuanto a las características de las cuencas de llanura, son las que se desarrollan sobre amplias zonas de baja pendiente. Las llanuras que se desarrollan sobre rocas sedimentarias de estructura acinal, presentan una serie de características comunes que se conocen, genéricamente, como relieve tabular. En este tipo de llanuras las rocas sedimentarias se disponen en capas horizontales. Dependiendo de factores climáticos, biológicos y litológicos, las rocas se diferencian unas de otras ya no por su disposición en capas sino por la alternancia de unas capas blandas (arcillas, margas, limos) y otras capas duras (calizas). Esta alternancia litológica es esencial para explicar el relieve tabular, ya que ante los mismos agentes erosivos, las capas blandas se comportan de manera diferente a las duras, lo que le da variedad al paisaje, a pesar de su aspecto de llanura.

La característica más común de las llanuras es que sus superficies no tienen pendiente o ésta es mínima. El terreno se encuentra cubierto de depresiones locales en vez de contener un sistema de drenaje natural adecuadamente desarrollado. La energía del sistema se encuentra determinada por la diferencia de altura entre los puntos más altos de la cuenca y la sección de desagüe, la cual es muy baja. Las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan en las depresiones, formando encharcamientos poco profundos y pantanos.

Las montañas se presentan en grandes cadenas de plegamiento o fractura de los materiales sedimentarios o rocas metamórficas. Presentan una gran variedad geológica y de formas, presentando plegamiento simple y/o compuesto. Las cadenas de plegamiento simples presentan pliegues de poca potencia, dispuestos rítmicamente y con un paralelismo muy acusado y en general, se disponen en torno a las cadenas de plegamiento compuestas. Sobre ellas se desarrollan relieves plegados o serranos y montañosos. Las cadenas de plegamiento compuestas presentan pliegues complejos, con mantos de corrimiento y fracturas, propios del relieve alpino. Tienen un aspecto caótico y muy variado. Los empujes han sido tan fuertes que algunas de las fallas que se crean pueden mostrar restos de vulcanismo. En el eje central de estas cadenas aparece un relieve fracturado con grandes bloques elevados y hundidos. Normalmente se encuentran en la zona más alta de las grandes cadenas montañosas.

Las características de las cuencas de montaña permiten generar una red de drenaje definida, como un río de montaña, que depende de dos criterios principales.

1. En el primero se entendería por río de montaña todo aquel curso de agua natural, permanente o intermitente, que se halle en una región considerada como de montaña. No obstante, dada la complejidad de las áreas de montaña no es posible definirlos de forma precisa y universal. Habitualmente se emplean criterios basados en una combinación de altitud y pendiente del terreno, e incluso de latitud y clima.

2. El segundo criterio toma ciertas características hidrogeomorfológicas de los ríos a fin de establecer clasificaciones de diferente complejidad en función del número de variables consideradas. No obstante, si se considera únicamente la pendiente longitudinal del cauce como factor principal y de acuerdo con Jarrett (1990), un río de montaña sería aquél cuyo curso tiene una pendiente longitudinal superior al 0,2 %.

A partir de los criterios mencionados, se establece que las principales características hidrológicas que diferencian las cuencas de montañas de las de llanuras, se basan en la relevancia de la aportación de las áreas de montaña a los recursos hídricos mundiales. El régimen hidrológico de los ríos de montaña es acusadamente estacional, sobre todo debido a la fusión glacial o nival, lo que conlleva la regulación natural del escurrimiento al diferir la respuesta a las precipitaciones invernales a primavera y verano. Este efecto regulador tiene mayor preponderancia en las regiones de clima árido o semiárido que en las de clima húmedo. En algunas cuencas de clima árido, durante ciertos meses al año la mayor parte del agua que circula por el río de llanura tiene su origen en la montaña. Por ello se desprende la importancia capital que deberían cobrar las regiones de montaña en la gestión de los recursos hídricos.

El flujo de sedimentos que emiten las cuencas a los océanos también refleja la preponderancia del medio montano sobre el llano, como establecieron Milliman y Syvitski (1992) al analizar 280 ríos de varios continentes. Estos, a la vez, hallaron que el 80% de la carga anual de sedimentos se origina en la zona de montaña de tales cuencas, que no supera el 20% de

su superficie total. En ríos de cuencas de montaña, debido especialmente a la fuerte pendiente, la capacidad de transporte de sedimentos con la que cuenta el flujo originado por tormentas torrenciales de alta intensidad es muy elevada. Si existen sedimentos disponibles para la corriente, ésta presentará una importante carga de sólidos, con tamaño que va desde arcilla hasta grava. En cambio el río de llanura además incorpora al transporte de materiales, la función de deposición y almacenamiento de sedimentos.

En relación al contacto del sistema de cuenca con el mar, es donde se genera el relieve de litoral. La dinámica entre el mar y los continentes genera unas formas de relieve características, la costa y el litoral, que, en buena medida, son independientes del clima. Se trata de una combinación de los agentes atmosféricos y la acción de las aguas marinas. El ancho de la franja es variable dependiendo de las características de la costa.

El litoral es la zona que está directamente sometida a la acción de las aguas, entre la marea baja y la alta. Esta zona se denomina estero, siendo la mayor influencia del mar sobre el interior. Esta costa genera cambios con mucha rapidez, incluso en el intervalo de unas pocas décadas. Los litorales tienen formas muy variadas, dependiendo de cómo se haga la erosión marina, las características de la roca y la influencia del clima. Podemos distinguir entre las zonas de ablación y las zonas de acumulación.

- Las zonas de ablación son aquellas en las que están presentes las formas producto de la acción de la erosión marina. Dos son las formas básicas: los acantilados y las plataformas de abrasión. Los litorales que presentan un acantilado forman las costas altas.
- Las zonas de acumulación litoral son fruto de la sedimentación marina. Si no presentan un acantilado se llaman costas bajas. Hay gran variedad de formas, pero los tipos principales son las playas, las dunas litorales y las áreas pantanosas marítimas como las marismas y las albuferas.

Las desembocaduras fluviales tienen sus propias características (dominio fluviomarino), caracterizando dos tipos diferentes: estuarios y deltas. Los estuarios se forman cuando el mar entra en el cauce fluvial, por detrás de la línea de costa primitiva, siendo la fuerza del mar superior a la de la corriente del río; los deltas se forman cuando la corriente del río tiene mayor fuerza que el mar, y deposita sus sedimentos por delante de la línea de costa primitiva.

En conclusión, los procesos hidrológicos en grandes llanuras se diferencian considerablemente de aquellos que caracterizan áreas serranas o de montaña (terrenos inclinados en general). La estructura del ciclo hidrológico y las ecuaciones de balance hídrico para una cuenca dada no se ven afectadas por las condiciones morfológicas, geológicas y del suelo, pero la ponderación de los diversos componentes difiere: los flujos de agua vertical prevalecen sobre los horizontales en cuencas de montaña, siendo de la forma contraria en cuencas de llanura. En terrenos con pendientes pronunciadas el almacenamiento es ínfimo, pero el volumen de agua acumulado en las depresiones de las llanuras sobrepasa a los otros integrantes de la ecuación de balance hídrico. Una parte considerable de este volumen de agua se evapora o se infiltra. El escurrimiento superficial proveniente de áreas serranas aumenta la cantidad de agua sobre la llanura. Los cursos de agua provenientes de tierras altas desaparecen, y el agua que acarrea fluye sobre la superficie (varios ríos de la Provincia de Buenos Aires son ejemplo de ello). El agua que excede la capacidad de almacenamiento de las depresiones se mueve como una lámina, muy lentamente sobre la superficie. La infiltración es generalmente alta debido a la gran duración del estancamiento de estas aguas. Dada la mínima pendiente del terreno, una consecuencia importante se deriva de este hecho: las actividades humanas modifican el equilibrio de energía de las llanuras; por lo tanto, cualquier modelo debe poder incorporar estas acciones (camino, canales, principalmente) (Venere *et al.*, 2004).

PARTICULARIDADES DE LAS CUENCAS RURALES Y URBANAS

Toda la población del mundo vive en alguna cuenca hidrográfica y además la mayor parte de la población vive en un núcleo urbano.

El agua es esencial en todos los aspectos de la vida cotidiana de la población, como bebida básica, producir alimentos, proteger la salud, producir energía, desarrollo industrial, ordenación sostenible de los recursos naturales y conservación del medio ambiente. El agua tiene también valores religiosos y culturales. Este recurso está escaseando en muchas zonas y regiones del planeta por el aumento de población urbana en relación con la rural, y la mala disposición del recurso hídrico. La mayoría de los países europeos tienen más de un 70% de población urbana, y en la llamada «banana europea», una franja que va desde Gales hasta el norte de Italia por Bélgica, sur de Holanda, la frontera franco-alemana y Suiza el porcentaje supera el 90%.

La ciudad forma parte del modelo cultural mundial desde el tiempo de la antigua Grecia y Roma. Las actuales ciudades y debido a la colonización, las modernas ciudades de todo el mundo, son herederas directas de estas urbes grecorromanas. Tanto es así, que incluso el mundo rural, en la actualidad, tiende a organizarse como el mundo urbano, sólo que con una menor población. Esta tendencia a la superurbanización de la sociedad es, ciertamente, moderna. Durante la Edad Media la sociedad tendía a la ruralización, pero el modelo de convivencia urbano resurgió durante el Renacimiento. Si bien durante la Edad Moderna hubo un equilibrio entre el mundo rural y el urbano, es en la Edad Contemporánea, y especialmente a lo largo del siglo XX, cuando el modelo urbano se convierte en casi exclusivo. Para lograr esto, en muchos países se da una emigración masiva del campo a la ciudad. Esto permite la concentración de los trabajadores y del mercado, y facilita el desarrollo económico. Las labores agrícolas se pueden mantener con muy poca población en el sector.

A principios del siglo XX aparecen dos elementos centrales de urbanización: los edificios en altura y los automóviles privados, siendo la ciudad la que se debe adaptar a estos nuevos elementos. Se abren las calles para los autos, se jerarquiza la red viaria, se construyen las infraestructuras para llevar agua y electricidad a las casas, entre otras actividades que hacen a la organización ciudadana. Los edificios de varios pisos permiten el uso de su planta baja para comercios y el resto del edificio para vivienda. Toda la calle se convierte en zona comercial más o menos importante. También aparecen los barrios marginales y sin servicios. A medida que aumenta la población y sus necesidades, crecen en forma coetánea las infraestructuras necesarias para el funcionamiento de la ciudad. Las redes se van complicando y aparecen barrios especializados en determinadas funciones: negocios, residencia, ocio, turismo; además de hospitales, cementerios, vertederos, rondas de circulación, depósitos de agua, transformadores eléctricos, etc., que se sitúan en las afueras. Además se incorpora el pavimento asfaltado, alumbrado, estaciones de transporte y taxi, mobiliario urbano, y muchísimos otros. El campo inicia su emigración hacia la ciudad.

A principios del siglo XXI la ciudad es el centro de todas las redes y todas las personas, pero ha terminado resultando agobiante para mucha gente. Debido a ello han ido apareciendo nuevas zonas de expansión, cuya característica básica es que disponen de un mayor espacio público, generando nuevos centros poblados circundantes a las ciudades y con diversas necesidades. En esta época se inicia una pseudo-emigración hacia el campo.

Debido a todos estos cambios en infraestructura, culturas, manejo del espacio, limitaciones en cubrir las necesidades básicas, es que se inician los conflictos en torno al agua, tanto en cantidad como en calidad. En todo el mundo, 214 cuencas fluviales, que acogen al 40% de la población mundial y abarcan más del 50 % de la superficie terrestre de continentes e islas, son compartidas por dos o más países. La distribución del agua de las zonas montañosas fue causa de 14 conflictos internacionales registrados en 1995. Según estadísticas mundiales, el consumo mundial por persona de agua se ha triplicado en los últimos setenta años, y el aumento de consumo total mundial se ha sextuplicado en el mismo período (Figura 1.5).

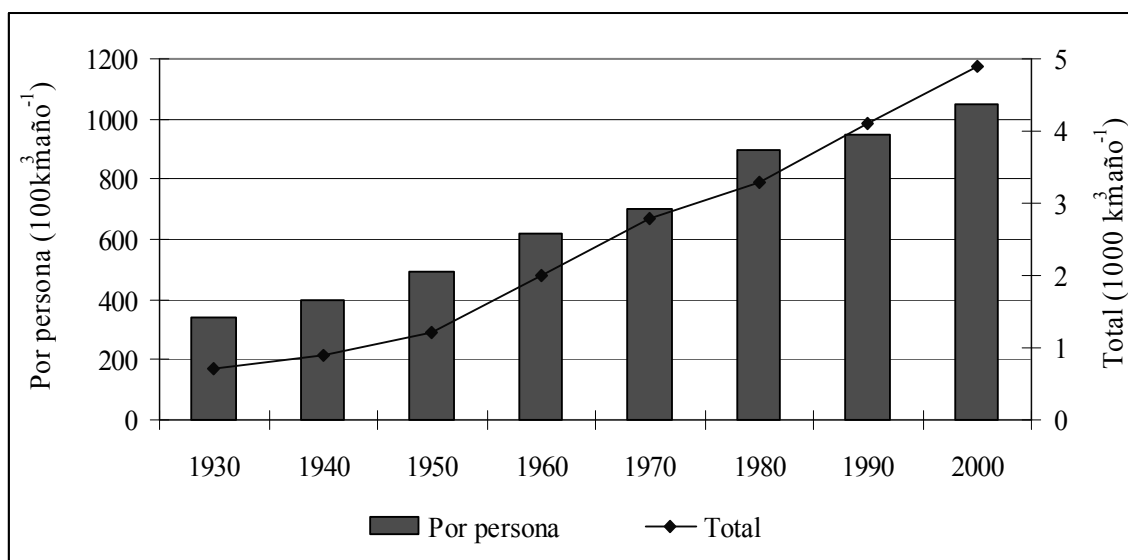


Figura 1.5. Evolución del consumo hídrico mundial.

La necesidad de disponibilidad de agua en las poblaciones de todo el mundo ha visto siempre en las montañas y/u océanos la fuente del agua, la vida, la fertilidad y el bienestar en general. Particularmente las montañas han sido y en algunos lugares siguen siendo veneradas como sede de deidades y como generadoras de las nubes y la lluvia que alimentan los manantiales, ríos y lagos imprescindibles para la existencia misma de las sociedades.

Los acontecimientos como el crecimiento demográfico y la inmigración a la zona urbana elevaron el consumo de agua como bebida, para uso industrial y urbano y, sobre todo, para riego, ha aumentado la cantidad de tomas de agua superficial y/o subterránea. Además, las tomas de agua no se controlan ni administran debidamente. En la actualidad, la cantidad de agua que se toma es varias veces superior a la que debería permitirse con una correcta supervisión.

Además los cambios en el uso de la tierra han repercutido también sobre el caudal fluvial y la calidad del agua. La eliminación de la cubierta vegetal y el uso más intenso del suelo han incrementado el escurrimiento durante las tormentas, produciendo erosión y contaminación de las aguas superficiales. En los últimos años se han registrado inundaciones repentinas, antes desconocidas, que anegan las viejas casas de campo y los albergues de turismo.

Los datos más recientes del Informe sobre el agua sostenible (1996) del World Water Council revelan lo alarmante de la situación: *En 1950, sólo 12 países con 20 millones de habitantes padecieron escasez de agua, en 1990 fueron 26 países con 300 millones de habitantes; hacia 2050 se calcula que el problema afectará a 65 países con 7 000 millones de habitantes, es decir alrededor del 60 por ciento de la población mundial, principalmente en los países en desarrollo.* El informe insta a la acción inmediata para mantener la disponibilidad de agua dulce en el siglo próximo. Como se ha mostrado en el reciente informe sobre gestión del agua dulce, las montañas desempeñan un papel decisivo en el suministro de agua dulce a la humanidad, así en regiones montañosas como llanas (Liniger y Weingartner, 2008).

A lo largo de la historia, Argentina ha sido un país de inmigrantes. Sólo la profunda crisis económica de comienzos de siglo la ha convertido en un país de emigrantes. No obstante, en la actualidad el saldo migratorio es ligeramente positivo (0,4 %), debido al aporte de población de los países vecinos, que aún están en peor situación.

Liniger y Weingartner (2008) mencionan que desde los años setenta los ecosistemas montañosos han recibido una atención creciente en varios programas de investigación. En 1992,

en la Cumbre sobre la Tierra (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo) de Río de Janeiro, se incluyó un Capítulo 13 titulado «Ordenación de los ecosistemas frágiles: desarrollo sostenible de las zonas de montaña» en el Programa 21, principal documento de la reunión. La Comisión de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible designó después a la FAO como coordinador de tareas para este capítulo de las montañas. Una colaboración de amplitud sin precedentes entre organismos de las Naciones Unidas, gobiernos nacionales, organizaciones internacionales, ONG e instituciones de investigación, hizo posible presentar en el período extraordinario de sesiones de la Asamblea General de las Naciones Unidas, Cumbre sobre la Tierra + 5, en 1997, un extenso informe titulado *Mountains of the world: a global priority* (Montañas del mundo: una prioridad mundial), y un documento complementario sobre políticas, *Mountains of the world: challenges for the twenty-first century* (Montañas del mundo: desafíos para el siglo XXI).

Según Liniger y Weingartner (2008) la vigilancia de los recursos naturales y de su uso y la evaluación de los efectos causados por los cambios en el uso de las tierras altas sobre la disponibilidad y la calidad del agua en los valles son las primeras medidas que se precisan para una buena ordenación. Mientras que los efectos de las alteraciones en el uso de la tierra sobre el escurrimiento y la erosión pueden cuantificarse claramente en parcelas experimentales y pequeñas captaciones, los efectos sobre la hidrología necesitan una investigación más detenida. Se podrán así comprender y determinar mejor los límites o umbrales esenciales para el uso de la tierra y su intensificación.

Se necesita a nivel local, nacional e internacional una gestión integrada de los recursos que abarque tanto las montañas como las tierras bajas, así como una mejor cooperación entre investigadores, planificadores, administradores y usuarios en todos los niveles. Hay que evaluar los efectos de las futuras actividades humanas en las cuencas altas sobre la disponibilidad de recursos aguas abajo, para poder introducir políticas mutuamente beneficiosas. Sólo la gestión integrada de las cuencas fluviales puede asegurar el uso eficiente, la distribución equitativa y la administración y regulación efectivas del agua de las montañas en beneficio de toda la humanidad (Liniger y Weingartner, 2008).

CONCEPCIÓN DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El concepto de manejo de cuencas se expresa, en la Comisión Forestal Europea de Manejo de Cuencas, con un enfoque hacia la ordenación agrohidrológica, el control de torrentes y desastres naturales.

El enfoque de los Estados Unidos define el manejo de cuencas como "el arte y la ciencia de manejar los recursos naturales de una cuenca con el fin de controlar la descarga de agua en calidad, cantidad y tiempo de ocurrencia", o bien, como "la aplicación de técnicas modernas de conservación al drenaje de la cuenca".

Ambos enfoques están referidos a realidades específicas, donde surge la necesidad de tener como objetivos específicos la gestión de los recursos hídricos y el control de la erosión hídrica.

La mayoría de los países en desarrollo y en particular los de América Latina, presentan características muy diferentes y particulares que lo diferencian de los enfoques anteriores. Aún cuando algunas cuencas hidrográficas pueden presentar semejanzas en su función, se diferencian cuando se convierten en unidades sociales donde el hombre habita y lucha por su subsistencia con graves limitaciones socioeconómicas, el comportamiento de la cuenca y su manejo varían totalmente. Por ello, en los países de la región se evolucionó desde una visión centrada en la gestión de los recursos hídricos a considerar a los recursos asociados al agua y pensar finalmente que se debía incorporar a los habitantes de la cuenca (Dourojeanni, 1990).

RESEÑA HISTÓRICA DEL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

En la literatura clásica se menciona algo similar al manejo de cuencas cuando el hombre observa la relación que existe entre el área geográfica y la producción de agua.

A principios de siglo X, en China surge el proverbio "*quien domina la montaña domina los ríos*". Con el transcurso del tiempo en Europa, específicamente en la región del Mediterráneo, surgen condiciones e ideas sobre el manejo de cuencas hidrográficas. El principal interés se basó en la falta de agua y una alta demanda del recurso para riego, a partir del cual nace la preocupación por aspectos del uso del agua en lo referente a la legislación y administración. Sin embargo no se tienen en cuenta las cuencas generadoras.

El rey Luis VI, en Francia (1215), emite un decreto que relaciona la influencia del bosque con la producción de agua. En Suiza, en el año 1342, se crea el primer bosque protector. En los siglos XVIII y XIX en la región de los Alpes, especialmente en Francia, Italia y Austria, se producen frecuentes crecidas y daños en las cuencas.

Michelena comenta en sus disertaciones, que a partir de estos acontecimientos se inicia el desarrollo incipiente de la temática de Manejo de Cuencas Hidrográficas, desencadenando además:

- Se aprueban leyes que estimulan la reforestación y el control del uso de los bosques y pastizales naturales en varios países de Europa.
- Se generan las primeras publicaciones científicas sobre el manejo de cuencas.
- En Estados Unidos se inicia la época de difusión y en 1864 Marsh publica el primer libro sobre el tema "El hombre y la naturaleza".
- En Francia en 1868 se producen acciones que incentivaron el manejo de los recursos y en especial del agua, donde se realiza una reforestación de 80.000 has.
- En 1877 se publica un informe para ser presentado en un congreso, sobre la influencia de los bosques en la producción de agua.
- En el año 1880 se inicia la creación de Agencias específicas, como ser el Servicio de Control de Torrentes en Austria en 1884.
- En Japón y otros países de Asia con alta densidad de población y demandas de agua y relieve montañoso, el manejo de cuencas se desarrolló desde fines del siglo XIX.
- En Estados Unidos la etapa de la investigación se inicia a principios del siglo XX, mientras que en Suiza en esta etapa se desarrollan los estudios en la cuenca experimental *Río Enmental*, en la cual se evaluó la relación entre el bosque y el escurrimiento.
- En las últimas décadas del siglo XX, la F.A.O. incentivó los estudios de manejo y ordenación de cuencas en América Latina y en países en vías de desarrollo.

En el grupo de países de vanguardia respecto al manejo de cuencas se incluyen a Suiza, Austria, Italia, Francia, EE.UU., Japón, España, Alemania y Yugoslavia. En un segundo grupo se pueden incluir a Nepal, Irán, Corea, Argelia, India, México, Brasil, Colombia, Perú, Argentina y Venezuela.

ANTECEDENTES LOCALES DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La preocupación por el Manejo de las Cuencas Hidrográficas en la República Argentina data de la década de 1960. El Dr. Julio Castellanos y su equipo de colaboradores, sensibilizados

por las problemáticas de sequías e inundaciones de la Provincia de Buenos Aires, partieron hacia una concepción integral en cuanto al papel del bosque para la regulación de los caudales torrenciales y la protección de los suelos. Este rol también fue enunciado por Florentino Ameghino en su ensayo “*Las Secas y las Inundaciones en la Provincia de Buenos Aires*”,....., “*Obras de Retención sí, Obras de Desagüe no*” publicado en 1886 en forma de folletín en el diario La Prensa.

Como testimonio cabe recordar que el diario La Nación en su editorial del 6 de Mayo de 1964, trata en detalle el tema de la restauración hidrológica forestal e informa sobre la firma reciente de dos importantes convenios entre la Universidad Nacional de La Plata y el gobierno de la provincia de Buenos Aires referidos al tema. Tal acción culminó con la creación de la Escuela Superior de Bosques, en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Plata (U.N.L.P.). Bajo el auspicio de la Organización de las Naciones Unidas a través de su proyecto P.N.U.D. - F.A.O. N° 51 se creó el Centro de Estudios Florentino Ameghino (C.E.F.A.) dependiente del I.O.V.I.F. (Instituto de Ordenación de Vertientes e Ingeniería Forestal), y se instaló una Estación Experimental Hidrológico - Forestal en Sierra de la Ventana, Partido de Tornquist, Provincia de Buenos Aires. La elección de Sierra de la Ventana para llevar a cabo programas de adiestramiento técnico, de investigación y de extensión en cuencas hidrográficas, se debió a su ubicación estratégica para los estudios y experiencias que se llevarían a cabo, así como también por sus características naturales. El C.E.F.A y su equipo técnico, tuvo a cargo la elaboración del Programa general de tratamiento del área de escurrimiento torrencial, y la creación de un dispositivo de evacuación de crecidas y obras de corrección. Detallándose en la obra publicada por Ricardo R. Lores denominada “*Suelos, Control del Escurrimiento y de la Sedimentación en Tornquist. Provincia de Buenos Aires*” (I.N.T.A., 1971). El I.O.V.I.F. fue disuelto en 1976, pero cabe destacar que el proyecto del área representativa de Tornquist tuvo éxito, pues pudo ser aplicado en su totalidad merced al esfuerzo de los responsables de la agencia de extensión del I.N.T.A. local y al aporte del municipio.

El sistema de regulación de crecidas construido de acuerdo al proyecto mencionado, junto a las medidas de carácter biológico implementadas, tanto en la cuenca alta y en áreas de cultivo, ha demostrado una alta capacidad de regulación de los excedentes hídricos. Se observó que los daños que provocaban las súbitas y violentas inundaciones y corrientes de barro, que afectaban a la población de la ciudad de Tornquist y a los productores de la zona, hayan disminuido, debido al avance en el uso racional de los recursos agua y suelo.

A partir de la década de 1980 a la actualidad, se incorporó la visión ecosistémica y los nuevos paradigmas de organización y participación social, en el marco conceptual del desarrollo sustentable, donde la cuenca hidrográfica se presenta como un espacio idóneo donde interactúan los sistemas físico-bióticos y socio-económicos. En este mismo período se inician las cátedras de Manejo de Cuencas en la carrera de grado de Ingeniería Forestal en F.C.A.F – U.N.L.P. y otros postgrados en Argentina. Por otra parte en 1988 se lleva a cabo el primer Curso de Manejo de Cuencas en la provincia de Tucumán y Salta, y posteriormente en Buenos Aires. Actualmente se ejecutan proyectos de ordenamiento y planificación de cuencas hidrográficas en diferentes regiones del país.

Es importante definir los diferentes enfoques conceptuales desarrollados actualmente en Argentina, según Casaza (2003), en relación a las políticas sobre cuencas hidrográficas:

- Desde el ámbito de competencia de las políticas hídricas y obras hidráulicas, las cuencas hídricas representan el área de captación y convergencia del agua, donde prevalece un enfoque sustentado en el conocimiento del sistema hidrológico (con sus estructuras superficiales y subterráneas), el uso múltiple y la administración del agua con criterio de sustentabilidad.
- Se visualiza a la cuenca como la unidad de gestión integrada del recurso hídrico, ya sea dentro de una misma jurisdicción, como así también para administrar recursos hídricos compartidos (interjurisdiccionales). La institucionalización de la cuenca a través de organismos de cuencas, efectiviza la coordinación intersectorial e

interjurisdiccional por el uso del agua y la organización de sus usuarios, así como la vinculación de éstos con la autoridad hídrica provincial o nacional, según la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2002).

- Desde el ámbito de competencia con la conservación y uso sustentable de los recursos naturales, se sostiene la visión del manejo del territorio tomando a la cuenca hidrográfica como unidad natural para la planificación y gestión participativa, construida desde lo micro a lo macro, incorporando las consideraciones ambientales, económico-productivas, de identidad sociocultural y de protagonismo de los actores involucrados en el desarrollo.

La degradación del medio ambiente en una cuenca hidrográfica altera al medio físico e incide sobre las actividades antrópicas, y a la sociedad en general, específicamente en su tendencia positiva de desarrollo. Evidentemente la recuperación física del medio ambiente, deberá pasar obligatoriamente por una recuperación social y económica del hombre y de la sociedad, lo que en última instancia, es una decisión de tipo político y de carácter educativo.

Como consecuencia de las políticas en el manejo de una cuenca hidrográfica se genera una planificación y gestión para el desarrollo sostenible, que forma parte de la base indispensable para la comprensión y aplicación del concepto de estabilidad en el buen uso y manejo de los recursos naturales y establecer una metodología para la elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial (Gaspari, 2002).

LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ARGENTINA

Argentina dispone de una oferta hídrica media anual por habitante sumamente importante. La misma es superior a los 22.500 m³ por habitante, muy por encima del umbral de stress hídrico adoptado por el PNUD equivalente a una disponibilidad de 1000 m³ por habitante. No obstante la distribución de la oferta es muy irregular, por lo que en varias provincias de la región árida la disponibilidad de agua se ubica bien por debajo de ese valor. Así, dos tercios de la superficie del País se encuentran bajo condiciones climáticas áridas o semiáridas (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Resumen de aportes por vertiente y sistema de Argentina.

Sistema	Caudal medio (m ³ .seg ⁻¹)	(%)	Derrame (hm ³)	Área aporte (km ²)	Caudal específico (l.seg ⁻¹ .km ⁻²)
Vertiente Atlántica					
Del Plata	22.031	85,27	694.770	3.092.000	7,1
Pcia. Buenos Aires	147	0,57	4.639	181.203	0,8
Del Colorado	319	1,24	10.060	92.840	3,4
Patagónicos	1.941	7,52	61.211	356.033	5,5
Subtotal	24.438	94,60	770.677	3.722.076	
Promedio					6,5
Vertiente Pacífica					
Varios	1.212	4,69	38.222	33.455	36,2

Tabla 1.1. Resumen de aportes por vertiente y sistema de Argentina. Continuación.

Sistema	Caudal medio (m ³ .seg ⁻¹)	(%)	Derrame (hm ³)	Área aporte (km ²)	Caudal específico (l.seg ⁻¹ .km ⁻²)
Endorreicas					
Independientes	42	0,16	1.325	248.871	0,2
Mar Chiquita	114	0,44	3.595	22.030	5,2
Serrano	24	0,09	757	26.555	0,9
Pampeano	6	0,02	189	600	10,0
Subtotal	186	0,71	5.866	298.056	
Total	25.836	100	814.764	4.053.587	6,4

(a) El caudal medio incluye el 100% del caudal del río Uruguay y la superficie consignada es el total de la cuenca de aporte. En territorio nacional esta última es 918.00 km²

(b) No incluye arroyos de la Puna.

Fuente: Balance Hídrico de la República Argentina. INCYTH-CONAPHI, 1994.

VISIÓN Y PERSPECTIVAS DEL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas se basa en lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana inserta en ella y de la calidad de vida de su población considerando el medio ambiente sustentable.

Se define como un conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como en la integridad de las cuencas hidrográficas.

El manejo apropiado de una cuenca hidrográfica brinda beneficios a la sociedad, que se originan en una amplia gama de bienes y servicios, que pueden ser aprovechados por la comunidad regional y/o local. Este manejo se genera a partir de diferentes tipos de funciones de las cuencas hidrográficas, como ser Ecológicas, Sociales y Económicas. Por diferentes fallas en el manejo y control de dichas funciones se puede generar una problemática que implique:

- Zonas desprovistas de vegetación.
- Altos riesgos de catástrofes naturales (sequías, inundaciones y deslizamientos).
- Alta capacidad erosiva.
- Transporte de sedimentos en flujos hídricos.
- Disminución del potencial productivo de los recursos naturales renovables.
- Intensificación de la competencia de los recursos hídricos.
- Efectos devastadores en la infraestructura y población urbana.
- Instalación de población en zonas críticas donde sus medios de subsistencia conducen a la degradación ambiental y consecuente pobreza socio-ambiental.

Los problemas asociados al mal funcionamiento de una cuenca se establecen en asociación al uso, manejo y gestión de la misma, provocando riesgos definidos en tres categorías básicas, de las cuales se mencionan algunos de sus riesgos:

1. **Riesgos Naturales:** Inundaciones, Aluviones, Deslizamientos.

2. Depredación del Potencial Productivo: Desertificación, Erosión, Incendios forestales, Quemadas descontroladas, Sobrepastoreo, Sobreutilización agrícola.

3. Conflictos en el Uso de los Recursos: Contaminación, Eutrofización, Aumento de demandas para energía hidroeléctrica, Aumento de requerimientos hídricos para riego, Sobreexplotación de los recursos naturales como ser suelo, agua y vegetación

La resolución de estas problemáticas se establece a partir del diseño y diagramación de un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, donde se considera a la cuenca como unidad de planificación y gestión. De esta manera se impulsan estudios, planes y proyectos de manejo integral de cuencas hidrográficas y se gestiona y/o ejecutan proyectos de restauración hidrológica forestal en cuencas críticas y prioritarias con fines de uso múltiple.

Un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas gestiona y/o implementa planes, programas y proyectos rurales de conservación de suelos y aguas a nivel de subcuencas y/o microcuencas con el objeto de evitar su degradación y fomentar su recuperación, protección, rehabilitación y uso sustentable.

La función de este programa debe ser básicamente:

- ✓ Desarrollar programas de investigación aplicada y difusión en el ámbito de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas.
- ✓ Evaluar y monitorear los procesos que inciden en la degradación y funcionamiento de cuencas hidrográficas.
- ✓ Promover la participación de la población y comunidad local a todo nivel mediante campañas de difusión y sensibilización.
- ✓ Fortalecer una cultura del agua y del suelo en el ámbito del manejo integral de recursos naturales asociados a cuencas.

Dentro del programa se establecen diversas líneas programáticas del manejo integral de cuencas hidrográficas, que pueden expresar: Ordenación territorial, Restauración hidrológica forestal, Recuperación y conservación de suelos y aguas, Monitoreo de recursos asociados a cuencas hidrográficas y Tratamientos de regulación de flujos hídricos en cauces, entre otros.

Para ello es necesario generar un monitoreo de cuencas hidrográficas a través de la recolección de datos temporalmente en sitios representativos. La información producida permitirá simular, calibrar y validar diferentes situaciones según las características topográficas, edáficas, de cobertura vegetal y climáticas, entre otras. Estas variables se miden con instrumental en tres estaciones básicas de medición: la Sedimentológica, la Limnimétrica y la Meteorológica.

En base a la generación de un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, se debe establecer una línea que oriente la temática de ejecución del mismo. Esta línea temática está establecida a partir de un objetivo y de una metodología a desarrollar para una cuenca hidrográfica.

Los objetivos generales de los proyectos de manejo de cuencas se generan a partir de una amplia gama de problemáticas particulares, como ser la retención del suelo mediante el control de la erosión y aprovechamiento de los suelos, la regulación de las avenidas y su incidencia en la provisión hídrica y la planificación dinámica de las cuencas hidrográficas. Estos objetivos se cumplen mediante diversas actividades técnicas que se pueden agrupar genéricamente por la ordenación de cultivos y el papel de las cubiertas permanentes, el control del agua vertiente y su incidencia en la atenuación de los procesos erosivos y el desarrollo de hidrotecnias para la corrección de cauces torrenciales (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

A partir de ello se definen varias posiciones de estudio, cuando solo se comparte el objeto de estudio (es decir la cuenca hidrográfica), se establece que es un trabajo de características intradisciplinarias. Por otro lado, cuando se presenta un proyecto donde coincide el objeto cuenca y su objetivo de estudio, se generará un proyecto de tipo interdisciplinario. Según experiencias propias y de diversos organismos se recomienda que también se integre la

metodología al objetivo y objeto de estudio, generando un programa de índole transdisciplinario. Un programa transdisciplinario deberá definir y sugerir alternativas de compatibilización de la sustentabilidad ambiental y de crecimiento económico. Douroujani (1990) expresa que la condición interrogantes de alternativas, se establece sobre estas dos instancias, donde presenta las siguientes cuestiones: la sustentabilidad ambiental dependiente del crecimiento económico, que brindará orientaciones sobre utilización de los recursos disponibles. Para ello es recomendable determinar qué características se desea que tenga el crecimiento económico y, sobre la base de éstas, recomendar cómo se puede “manejar” el medio ambiente para evitar su deterioro. El crecimiento económico es dependiente de la sustentabilidad ambiental para establecer diversas orientaciones respondiendo a las demandas de recursos. Por ello se deben definir las condiciones ambientales “adecuadas” y, sobre la base de éstas, recomendar un crecimiento económico que no las afecte.

En síntesis un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas se comprometerá a:

- √ Considerar la cuenca hidrográfica como unidad de planificación y gestión, impulsando estudios, planes y proyectos de manejo integral de cuencas hidrográficas.
- √ Proporcionar y/o implementar planes, programas y proyectos rurales de conservación de suelos y aguas, a nivel de microcuencas, con el objeto de evitar su degradación y fomentar su recuperación.
- √ Desarrollar programas de investigación aplicada y difusión en el ámbito de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas.
- √ Gestionar y/o ejecutar proyectos de restauración hidrológica forestal en cuencas de montaña y/o llanura críticas y prioritarias con fines de uso múltiple.
- √ Evaluar y monitorear los procesos que inciden en la degradación y funcionamiento de cuencas hidrográficas.
- √ Promover la participación de la población y comunidad local a todo nivel mediante campañas de difusión y sensibilización.
- √ Propender a fortalecer una cultura del agua y del suelo en el ámbito del manejo integral de recursos naturales asociados a cuencas hidrográficas de zonas de montaña.

A partir del análisis de toda esta temática expuesta, se concluye que la gestión debe ser integral desde el ambiente hacia un foco en particular, como se expresa en la Figura 1.6.

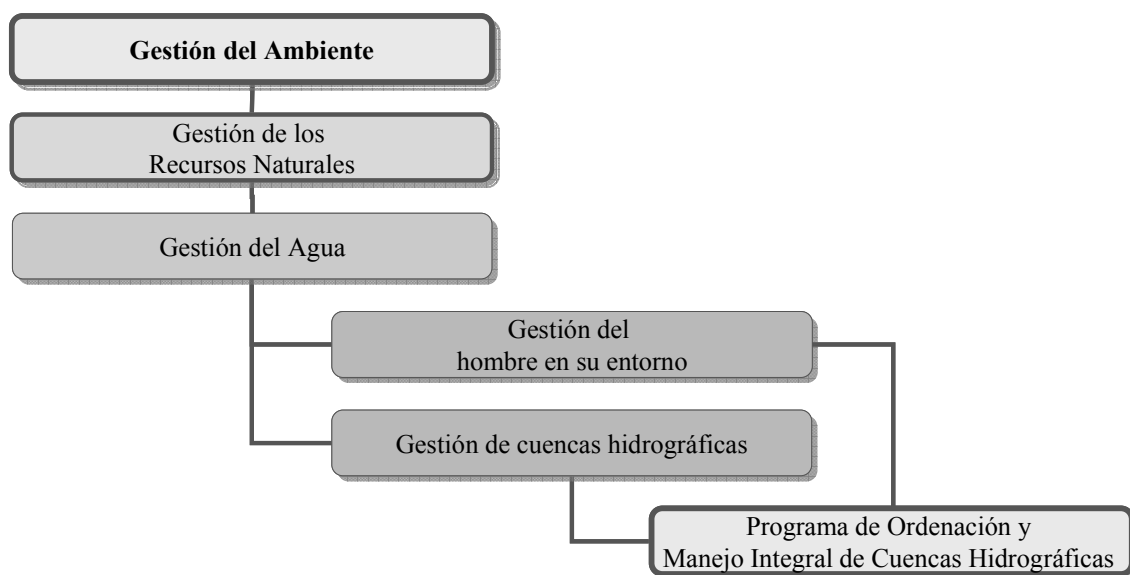


Figura 1.6. Secuencia metodológica para el desarrollo de un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.

PROCEDIMIENTOS DE GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

El documento que se presenta a continuación, denominado “Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable”, ha sido elaborado por el señor Axel Dourojeanni, Director de la División de Recursos Naturales e Infraestructura, como una contribución para mejorar la toma de decisiones conducentes al desarrollo sostenible en la región. (Serie, Manual 10, de la División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile, 2000).

Este manual constituye una versión revisada y actualizada del trabajo publicado bajo el nombre “Guía para orientar procesos de gestión para el desarrollo en cuencas y microrregiones de alta montaña” por el Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES) como Documento 89/05/Rev.1, Serie Ensayos, 1993.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de los autores.

LOS PROCESOS DE DECISIÓN

El presente método fue elaborado por el autor originalmente en 1976 sobre la base de una interpretación y adaptación del método de optimización denominado Goal Programming. El método fue aplicado desde 1977 a programas de Manejo de Cuencas y de Desarrollo Rural Altoandino.

A. De los conceptos a la práctica

El principal desafío que enfrentan los gobiernos desde los niveles municipales o microrregionales hasta los niveles nacionales, es el de saber cómo diseñar y aplicar sistemas de gestión capaces de fomentar y conciliar tres grandes objetivos que en teoría llevarían al

desarrollo sustentable: el crecimiento económico, la equidad (social, económica y ambiental) y la sustentabilidad ambiental. Los obstáculos para diseñar este sistema se presentan en por lo menos tres aspectos: conceptual; teórico y práctico:

1. Aspectos conceptuales

Los mayores obstáculos se encuentran en falta de consenso y, por lo tanto, en las múltiples interpretaciones que existen de los conceptos de “desarrollo sustentable”, “equidad” y “sustentabilidad ambiental”. Ello implica la necesidad de que en cada país, o región se precise qué significa, para los actores participantes en el proceso de gestión, cada término.

El mismo término “sustentabilidad” es ambiguo. Este vocablo se aplica a la producción, la ecología, la economía, el medio ambiente, la sociedad o el desarrollo. Tiene esencialmente una connotación de renovación continua en el tiempo o posibilidad de reutilización de los recursos por parte de las generaciones futuras. El logro de la sustentabilidad estaría asociado a la búsqueda de satisfacción de las necesidades del ser humano en el presente, sin comprometer sus necesidades futuras. El desarrollo sustentable debe ser mantenido en el tiempo para ser sostenible.

2. Aspectos teóricos

Los mayores obstáculos se encuentran en la falta de indicadores para medir el desarrollo sustentable. En principio, ninguno de los tres objetivos del desarrollo sustentable (económico, ambiental y social) se mide actualmente con parámetros compatibles. Los indicadores empleados para cuantificar cada objetivo no tienen un denominador común ni hay Fórmulas de conversión universales. El crecimiento económico se mide con indicadores económicos, la equidad se determina sobre la base de parámetros sociales y la sustentabilidad ambiental se establece en términos físicos y biológicos. En consecuencia, cada uno de los tres objetivos se encuentra en diferentes planos de evaluación.

Por su parte, el desarrollo sustentable depende, teóricamente, de los tres objetivos mencionados y, por lo tanto, es imposible cuantificarlo mientras no se disponga de parámetros compatibles. Esta situación se puede ilustrar con un triángulo (Figura 1.7) como lo hace Peter Nijkamp con el triángulo de Möbius, en el que cada lado del triángulo representa un objetivo, las flechas ubicadas en los lados representan el sentido del logro de cada uno de los objetivos y el área central del triángulo representa la zona de posible conciliación entre éstos. Dicha zona equivale a la zona de equilibrio para el desarrollo sustentable. Al triángulo original de Nijkamp se le ha agregado en la base el ámbito o espacio dentro del cual se pretende alcanzar el desarrollo sustentable. Este material ha sido obtenido del Informe *Regional Sustainable Development and Natural Resources Use, World Bank Annual Conference on Development Economics*, Washington D.C., 1990

Los conceptos ilustrados en el triángulo se podrían expresar en la siguiente ecuación: En el triángulo original de Nijkamp (triángulo de Möbius) se hace abstracción de las limitaciones que existen hoy en día para expresar los tres objetivos de acuerdo con un común denominador de medición y evaluación. Se los presenta en un solo plano aunque, tal como se mencionó anteriormente, esto aún no es factible. Aún no hay equivalencias ni sistemas de corrección que permitan integrar los diferentes indicadores en un mismo plano. En teoría, el único plano que a la larga podría servir de plano articulador es el económico y éste sólo se podrá establecer cuando sea posible cuantificar el valor de una serie de elementos sociales y ambientales que aún no se toman en consideración.

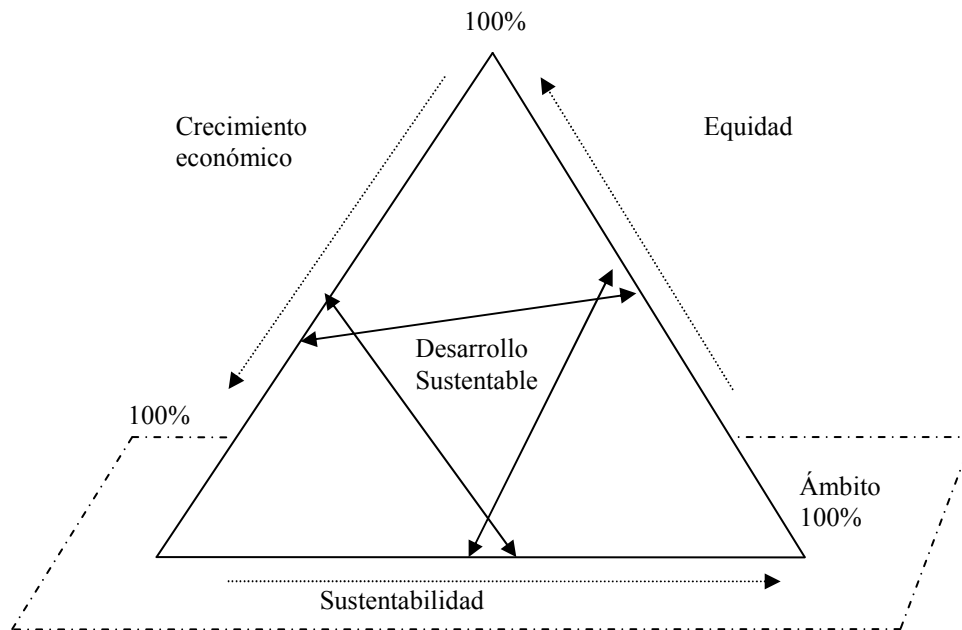


Figura 1.7. Interrelación entre crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental.

Hasta la fecha, las ciencias económicas no han tomado en cuenta gran parte de los valores de la naturaleza. En un artículo publicado en el Washington Post (Constanza y Wainger, 1990), "No Accounting for Nature", se ilustra esta situación con el caso de una zona de pantanos en la costa de Louisiana. En el ejemplo se indica que un acre de esos pantanos tiene un valor comercial de 500 dólares de Estados Unidos.

Una investigación de la voluntad de pago de posibles usuarios reveló, sin embargo, que, dependiendo de cómo se calculen los valores a futuro, un acre de pantanos rinde entre 317 y 846 dólares por concepto de pesca comercial, entre 151 y 401 dólares por captura de animales silvestres, entre 46 y 181 si se lo dedica a recreación y entre 1 915 y 7 549 dólares si se lo considera como protector contra las tormentas y mitigador de sus efectos. Incluso se añade que si se cuantifica la capacidad del pantano para captar energía solar el valor total de un acre fluctuaría entre 2 500 y 17 000 dólares, cifra que, por cierto, es mucho mayor que su valor comercial de 500 dólares.

La expresión más impactante de la no consideración de los factores ambientales en la economía es la falta de cuentas del patrimonio natural en los países. Dichas cuentas no se incorporan en las cuentas nacionales, lo que crea graves distorsiones en la medición de indicadores como el producto bruto interno. En el artículo mencionado se indica que el producto bruto nacional sería diferente si se le restara el valor del patrimonio natural perdido o utilizado. En tal caso, los indicadores económicos que reflejan un crecimiento del producto bruto interno reflejarían pérdidas o estancamiento.

En resumen, si bien queda claro que las ciencias económicas aún no están en condiciones de determinar el valor de todos los aspectos sociales y ambientales del proceso de selección del óptimo desarrollo sustentable, siguen ofreciendo una opción para hacerlo. Mientras tanto se debe seguir tomando decisiones con respecto a la orientación del desarrollo recurriendo a otras técnicas. En vista de la imposibilidad de articular los tres objetivos en un

solo plano mientras no se disponga de los indicadores adecuados, se considera más adecuado dibujar los lados de los triángulos en planos distintos (Figura 1.8).

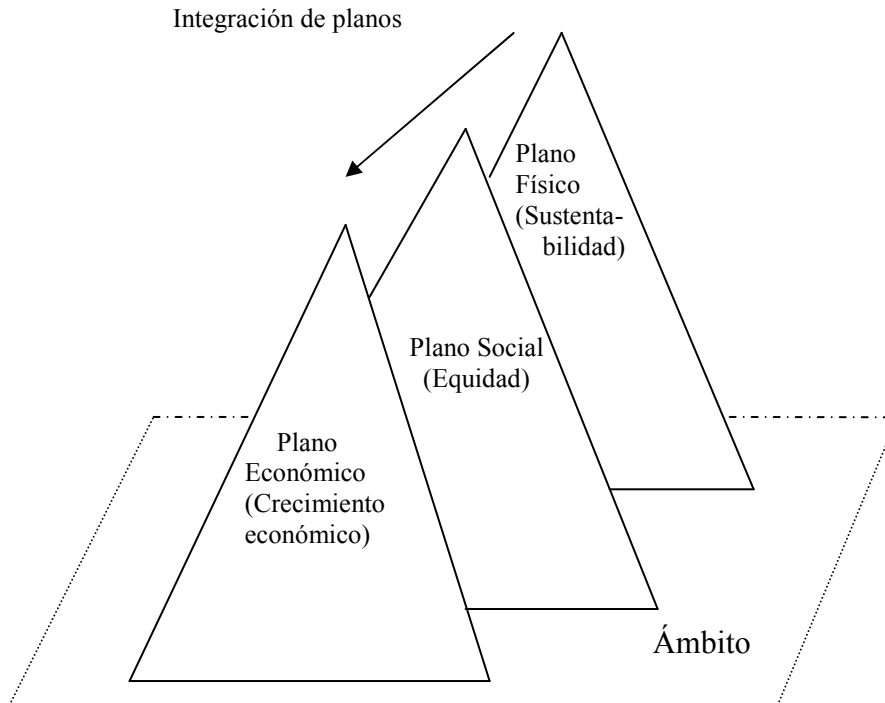


Figura 1.8. Representación gráfica de los diferentes planos del análisis del crecimiento económico, la equidad y la sustentabilidad ambiental.

De esta forma se representan el área económica, la social y la ambiental. Además, es necesario recordar que los intercambios entre crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental no se producen sólo dentro del área del triángulo, sino también entre distintas áreas; por ejemplo, entre países o regiones dentro de un mismo país. Estos intercambios entre distintos ámbitos, por ejemplo, entre tecnología (crecimiento económico) y recursos naturales (sustentabilidad ambiental), permiten compensar las deficiencias internas de algunos de los ámbitos para lograr los objetivos deseados en forma equilibrada.

$$\text{Desarrollo sustentable} = f(\text{crecimiento, equidad y sustentabilidad ambiental})$$

Los intercambios entre ámbitos pueden provocar notables distorsiones en el equilibrio entre crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental. Esto ocurre cuando las transacciones entre ámbitos son injustas y se produce un intercambio de una enorme cantidad de recursos naturales por tecnología moderna.

Las situaciones ilustradas en las Figuras 1.7 y 1.8., con las modificaciones generadas por Peter Nijkamp, demuestran con razonable claridad cuáles son los factores y situaciones que entran en juego para articular el crecimiento económico, la equidad y la sustentabilidad

ambiental con el fin de lograr el equilibrio necesario para el desarrollo sustentable. Sin embargo, en ningún caso se indica cómo lograr tal articulación en una determinada región o territorio.

3. Aspectos prácticos

Para resolver el problema práctico de la articulación hay que concebir un proceso de gestión que permita que el ser humano —el actor principal— pueda tomar decisiones, a pesar de la falta de claridad conceptual y bases teóricas, con los siguientes fines:

- i) lograr el crecimiento económico, la equidad y la sustentabilidad ambiental en los ámbitos de gestión, como una forma de alcanzar el desarrollo sustentable;
- ii) determinar qué intercambios debe haber entre estos tres objetivos en una determinada región y entre regiones
- iii) facilitar el conocimiento, por parte de los actores involucrados, del tipo de intercambios viables y de su valor;
- iv) determinar en qué momento se alcanza el equilibrio correspondiente al desarrollo sustentable que satisface a los actores de la región en desarrollo.

Como se indicó con anterioridad, el desarrollo sustentable es función de los tres objetivos y no se logra privilegiando sólo uno de ellos en desmedro de los demás. Por lo tanto, los actores deben contribuir simultáneamente al crecimiento económico, la equidad y la sustentabilidad ambiental mediante, por ejemplo, la transformación productiva, la prestación de servicios sociales y la conservación de los recursos naturales.

Los tres objetivos pueden entrar en conflicto e influirse mutuamente, sobre todo a corto plazo. Por lo tanto, para lograr un óptimo general hay que sacrificar los óptimos parciales. Por ejemplo, si el logro de cada objetivo se mide en una escala de 0 a 100, el “óptimo” de logro de los tres objetivos en forma simultánea (para lograr el ansiado desarrollo sustentable) podría tener un “valor” de 60 en el caso del crecimiento económico, de 45 en el de la equidad y de 70 en el de la sustentabilidad ambiental.

El intercambio entre regiones con diferentes puntos de equilibrio correspondiente al logro de los tres objetivos debe ser tal que, por ejemplo, no sea necesario el intercambio de una hectárea de bosques nativos convertidas en millones de chips de madera por un chip de computadora entre una región rica en recursos naturales y una región con alto crecimiento económico, industrial o tecnológico.

La determinación de los porcentajes anteriores, que definen el área de equilibrio del desarrollo sustentable depende esencialmente de los acuerdos entre actores y, no se da automáticamente sino sobre la base de transacciones. Estas transacciones serán más equitativas en la medida en que se conozca el valor de los elementos, recursos y productos de un área, de las ventajas comparativas de distintas regiones y de los elementos y recursos naturales que se ven afectados. Este equilibrio, es además transitorio, ya que los modelos ideales de desarrollo sustentable varían constantemente debido a los adelantos tecnológicos, el descubrimiento de nuevos recursos y las cambiantes aspiraciones de los actores, por citar sólo algunas de las variables involucradas.

Como se deduce de lo expuesto, los procesos de gestión orientados al desarrollo sustentable son esencialmente una mezcla entre el arte y las ciencias, puesto que aún no existen indicadores que permitan cuantificar lo social, lo ambiental y lo económico de acuerdo con un sistema de valores intercambiables y dichos valores no son idénticos para todos los actores involucrados en el proceso. Para pasar de la simple enumeración de los conflictos, como en el triángulo de Nijkamp, a una secuencia de actividades para resolver los conflictos, se ha procedido a cambiar el triángulo por un cubo (Figura 1.9).

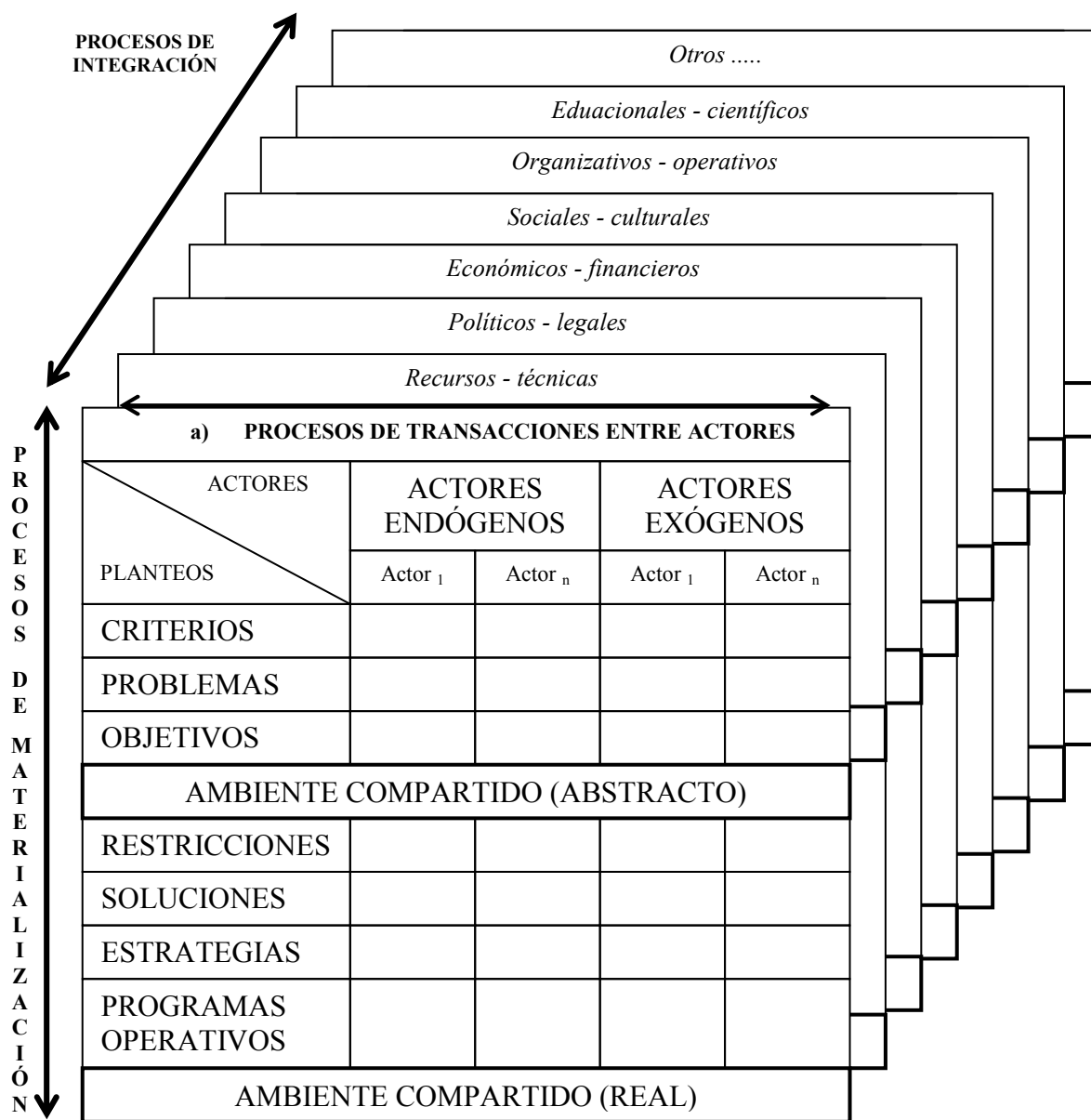


Figura 1.9. Marco conceptual y operacional de aportes al desarrollo sustentable con equidad. Fuente Dourojeanni, CEPAL, 1989.

En el cubo el logro de los objetivos de crecimiento económico se define como un proceso de materialización de acciones (un proceso de transformación productiva), que pasa a ser el eje conductor de los demás procesos (Figura 1.9), lo que confiere al análisis tres dimensiones y múltiples planos (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Analogía entre objetivos y procedimientos de gestión ilustrados en el triángulo y en el cubo. Fuente Dourojeanni, CEPAL, 1992.

Triángulos (Objetivos)	Cubo (Procedimientos)
Crecimiento económico	Materialización de acciones
Equidad social, ambiental y económica	Transacciones entre actores
Sustentabilidad ambiental	Incorporación de la dimensión ambiental
Planos de análisis	Integración de temas

La equidad se basa en un proceso de transacciones entre actores (procesos democráticos, pluralistas y participativos), proceso que se alimenta de la información obtenida en cada paso del proceso de materialización de acciones e incorpora, además, los diversos planos de análisis.

El logro de la sustentabilidad ambiental es un proceso continuo de incorporación de la dimensión ambiental en las decisiones, que se lleva a cabo en todas las etapas pero en especial a partir de la quinta (evaluación y diagnóstico del ámbito). La incorporación de la dimensión ambiental introduce el factor tiempo en la adopción de decisiones. Por último, se considera que los diversos planos de decisión deben articularse en uno solo, sobre la base de parámetros económicos cuando sea posible. Esto se conoce como proceso de integración de disciplinas o áreas temáticas.

Lo que se ha hecho al analizar el cubo en lugar del triángulo es convertir las definiciones de los objetivos ubicados en tres planos distintos (crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental) en procesos de gestión destinados al logro de esos objetivos. Estos procesos son: i) el de materialización de acciones; ii) el de transacciones, y iii) el de incorporación de consideraciones ambientales. Además, se plantea la necesidad de llevar a cabo un proceso de integración de disciplinas o áreas temáticas. Para “armar” el cubo (el “cubo mágico” como se lo ha denominado en algunos casos) se deben realizar los cuatro procesos en forma simultánea. La secuencia inicial está dada por los actores y depende de sus aspiraciones de crecimiento económico que conducen a la materialización de acciones, representada por la secuencia vertical en la Figura 1.9. Dicha secuencia se inicia con la identificación de los actores; continúa con la determinación de sus criterios, problemas y objetivos y el diagnóstico del ámbito, y concluye en la identificación de restricciones, la definición de posibles soluciones, la formulación de estrategias y la implementación y ejecución de programas. El proceso de materialización es el eje central y conductor del proceso de gestión para la articulación de los tres objetivos.

En la etapa de diagnóstico del ámbito, así como en la ejecución de los programas, se debe incorporar el análisis de la sustentabilidad ambiental. Es importante observar que en la Figura 1.9 el ámbito abarca las disciplinas o áreas temáticas que deben integrarse para tomar las decisiones relacionadas con el desarrollo sustentable. Este ámbito se denomina “abstracto” por ser sólo una representación del ámbito real, que se esquematiza al final de la secuencia.

El proceso de transacciones entre actores está representado en el figura 1.9 por líneas horizontales. Dicho proceso, en teoría y siempre que se dé un mínimo de requisitos, permitiría alcanzar la equidad. En todas las etapas de la secuencia se realizan transacciones, las más concretas en el ámbito de las restricciones y las soluciones. Para que las transacciones conduzcan a la equidad deben darse en un marco de concertación democrática y con un claro

conocimiento de los efectos que tiene cada decisión en relación con los diferentes objetivos de los actores participantes.

Esto significa que los actores deben ser informados y deben informarse sobre los efectos de sus decisiones para que las transacciones sean adecuadas. La ignorancia impide el juego democrático. El proceso de integración de disciplinas o áreas temáticas está representado por una línea diagonal. Por lo general, la integración técnica, que supone el trabajo de equipos interdisciplinarios, se realiza junto con el diagnóstico del ámbito. En análisis de sistemas y la elaboración de modelos es esencial para la integración de disciplinas o áreas temáticas, proceso que se debe efectuar para poder tomar decisiones en un solo plano y que equivale a dar un común denominador a variables ambientales, sociales y económicas. En términos ambientales, la integración se consigue a través de la ejecución de actividades interdisciplinarias. En términos económicos, se logra mediante el cálculo del valor de los recursos ambientales y los factores sociales. Las actividades interdisciplinarias facilitan el cálculo económico, porque en la medida que se cuente con valores económicos que integren los elementos de la naturaleza se estará en mejores condiciones para tomar decisiones destinadas a lograr el desarrollo sustentable (cálculo del valor del patrimonio natural e incorporación de dicho valor en las cuentas nacionales).

B. Proceso de materialización de acciones

El proceso de materialización de acciones, como se indicó, es el eje articulador de los otros tres procesos y está integrado por 10 etapas que van desde la identificación de los actores hasta la ejecución de los programas. El proceso de materialización consta de las siguientes etapas:

1) Determinación de los actores involucrados en el proceso de gestión

Esta etapa es una de las más importantes. Se define como actores a todas las personas que intervienen activa o pasivamente en los procesos de gestión o que contribuyen al proceso; es decir, los habitantes, los usuarios (que pueden ser o no ser habitantes del área), los representantes de organismos públicos o privados, los asesores o interventores en el área o ámbito, los representantes de grupos de poder, los empresarios y, en general, todas las personas que ven afectadas sus condiciones de vida y que influyen o reciben los efectos del uso y conservación de los recursos del ámbito en estudio, así como quienes desempeñan una función de apoyo al desarrollo humano en dichos ámbitos.

2) Determinación de los criterios que rigen las acciones de los actores

Esta determinación es fundamental para conocer cuál es la posición de los actores en el proceso de gestión y consiste en averiguar qué hipótesis, teorías, supuestos, creencias, opiniones, ideas, postulados, conceptos, premisas, conclusiones, enfoques, interpretaciones, principios o paradigmas tienen los participantes. Estos criterios pueden relacionarse con el desarrollo, la marginalidad, el ser humano, la sociedad, la conservación y el manejo de los recursos, los habitantes del área, los proyectos, etc. Este ejercicio es fundamental para facilitar el entendimiento mutuo de los actores y las transacciones o los acuerdos entre los interesados.

3) Identificación de los problemas

Problemas vinculados a las condiciones de vida y a la conservación de los recursos en el ámbito en estudio, tal como los expresan y perciben cada uno de los actores o grupos de actores participantes de los procesos de gestión. Hay que analizar las causas y los efectos de cada problema, clasificarlos y categorizarlos desde diferentes perspectivas, determinar cuáles son los problemas actuales, y analizar los procesos históricos que llevaron a la situación actual y proyectarlos a futuro. La detección de problemas constituye la clave para definir los objetivos de desarrollo.

4) Transformación de las demandas y los problemas detectados en objetivos

Ésta es una tarea fundamental para convertir el conjunto de problemas identificados por los habitantes, usuarios y técnicos en diferentes formas y con diversos grados de precisión en objetivos jerarquizados lo más concretos que sea posible. Estos objetivos deben ser escritos en forma precisa y en lo posible con un complemento cuantitativo. Es necesario identificar a los beneficiarios de los objetivos y el área o ámbito en el que se debe actuar y determinar en qué plazo se deben lograr las metas (corto, mediano o largo) y su prioridad relativa en relación con los otros objetivos enunciados, además de definir los criterios que se utilizarán para el establecimiento de prioridades.

Los objetivos no son sólo la traducción de un problema en un enunciado sino que, en conjunto, representan la definición de la situación deseable a futuro por todos los habitantes y usuarios. Los objetivos son las aspiraciones de diferentes personas involucradas en el desarrollo, por lo que deben formar un todo equilibrado y compatibilizarse de tal modo que la expresión final de los objetivos represente la opinión del conjunto de actores involucrados en el desarrollo y no sólo de algunos.

5) Delimitación y clasificación de los ámbitos o territorios dentro de los cuales se pretende alcanzar los objetivos

En el caso del medio ambiente son las áreas geográficas y funcionales en las que se enmarca el proceso de gestión. Dentro de estos ámbitos hay áreas menores que también deben delimitarse. Las más importantes son el ámbito geográfico o natural (por ejemplo, cuenca, subcuenca, río, ladera o piso ecológico); el ámbito social (por ejemplo el espacio habitado por grupos o comunidades campesinas); el ámbito económico, que puede estar definido por el área donde se efectúan transacciones mercantiles; el ámbito político-administrativo, que se define por los límites de una comuna, distrito o región; el ámbito institucional o funcional, que puede estar definido por el área de acción de una empresa, comunidad, cooperativa, corporación o un instituto nacional, y el ámbito productivo (fincas, parcelas, fundos u otros). Estos ámbitos pueden agruparse en regiones o microrregiones o ser considerados como unidades operativas de gestión, unidades geográficas o cualquier otro tipo de unidad básica de desarrollo.

6) Determinación de las restricciones que deben superarse para alcanzar los objetivos dentro de los ámbitos previamente delimitados

Las restricciones son los obstáculos que se deben superar para solucionar los problemas identificados (expresados en términos de objetivos) y no los problemas en sí. Por ejemplo, si el problema es la reducción de la producción debido a la erosión de suelos en una ladera cultivada de máxima pendiente, el objetivo será controlar la erosión; las restricciones para alcanzar ese objetivo pueden ser el desconocimiento de técnicas para evitar la erosión por parte de los usuarios, la falta de legislación que prohíba el uso de esas tierras de esa forma, la falta de encargados de extensión del gobierno que puedan prestar asistencia, la falta de alternativas de subsistencia para los agricultores en otras zonas o la falta de recursos económicos.

Las restricciones se pueden clasificar en técnicas y físicas; políticas y legales; económicas y financieras; institucionales y administrativas; sociales y culturales, y educacionales y científicas. Las restricciones deben identificarse en forma sistemática, para abordarlas por orden de importancia y de ejecución. Esto permite que, sobre la base del estudio, se plantee un programa concreto de acción con identificación de metas jerarquizadas, asignación de recursos, indicación de responsables y plazos necesarios para llevarlo a la práctica.

7) Proposición de soluciones para superar las restricciones detectadas, con el fin de lograr los objetivos propuestos dentro de los ámbitos delimitados

Las soluciones se seleccionan a partir de un conjunto de opciones posibles o se conciben específicamente de acuerdo con las restricciones, los ámbitos, los objetivos y las estrategias globales de acción. Las propuestas de solución deben ser realistas y, por lo tanto, hay que determinar como mínimo la restricción o el conjunto de restricciones que se superará(n) mediante la solución propuesta y en qué orden; los recursos y materiales necesarios; dónde se tomarán las medidas pertinentes; cuándo se adoptarán y en qué período (continuo o discontinuo); quién y de qué nivel serán los responsables de su adopción; quiénes se verán afectados por la solución propuesta y cuáles serán sus efectos no deseados; cómo se relaciona la solución propuesta con otras soluciones posibles; qué otras alternativas de solución existen que puedan producir resultados similares; qué instituciones o personas estarán involucradas en la adopción de las medidas, y qué insumos supone cada alternativa.

Las soluciones, además, pueden clasificarse, según su finalidad, en soluciones de carácter técnico o directas que dan resultados tangibles en términos productivos, como el estudio del potencial de recursos, la formulación de proyectos, la construcción de obras, el uso de los sistemas construidos o el manejo de los recursos; y en soluciones de carácter operativo o indirectas que posibilitan las soluciones técnicas, entre otras la planificación, la legislación, la concesión de créditos, la capacitación, la investigación, la administración y la promoción.

Es fundamental hacer esta distinción en las propuestas, ya que promulgar una ley, formular un plan o crear una institución son soluciones indirectas que sólo serán eficaces en la medida que permitan la ejecución de las acciones directas. La efectividad de una legislación, por ejemplo, sólo se puede medir o evaluar de acuerdo con su contribución a la factibilidad de ejecutar acciones directas.

8) Determinación de estrategias

Esta etapa consiste en: i) determinar las estrategias que se aplicarán; ii) calcular cuidadosamente el beneficio y la contribución a la equidad de cada acción posible, con el fin de lograr soluciones políticas, sociales, económicas y técnicas viables; iii) superar las restricciones más urgentes y de menor complejidad y costo, sin ignorar las restricciones más importantes y de largo plazo; iv) armonizar los aportes de las diversas instituciones que tengan responsabilidades e intereses en el ámbito; v) determinar la efectividad en función de los costos de la superación de cada restricción con los recursos y el tiempo disponibles; vi) conciliar los efectos deseados y no deseados de las acciones en términos políticos, sociales, ambientales, económicos y otros; vii) establecer el orden de prioridades de las acciones de superación de restricciones en el territorio de acuerdo con los beneficiarios potenciales; viii) concebir programas, proyectos, actividades y tareas, y agruparlos de acuerdo con las soluciones para facilitar su ejecución, y organizar el sistema institucional que adoptará las medidas pertinentes.

Las estrategias determinan cómo deben realizarse las actividades continuas (por ejemplo, servicios) y las discontinuas (por ejemplo, proyectos) y cómo debe funcionar el sistema de organizaciones públicas y privadas encargadas de llevarlas a cabo. Algunos de estos programas o proyectos pueden ser de carácter horizontal, si su objetivo es ofrecer soluciones que sean comunes a varios ámbitos (subcuencas, municipios, comunidades, etc.) o de carácter vertical si el programa o proyecto proporciona soluciones que se limitan a un solo ámbito.

Lo importante es que los programas o proyectos que se propongan para cada ámbito estén articulados, para evitar la duplicación de esfuerzos, obtener economías de escala y responder ordenadamente a las demandas de los beneficiarios. Los programas o proyectos formulados independientemente y desvinculados pueden ser ineficaces y parcelar el desarrollo.

9) Formulación de programas, proyectos, actividades y tareas que permitan aplicar las estrategias seleccionadas y evaluarlas

En esta penúltima etapa del proceso se conciben las actividades necesarias para aplicar las estrategias y se evalúan desde un punto de vista económico, social y ambiental. Hay que

programar tanto las actividades técnicas (obras, sistemas de producción, etc.) como las administrativas (provisión de fondos, organización institucional, capacitación, etc.), para garantizar la aplicación de las estrategias.

10) Procedimiento

La última etapa consiste en la ejecución de las actividades y su posterior monitoreo.

La secuencia del proceso de materialización de acciones según Dourojeanni se ilustra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Procesos de materialización de acciones. Cartilla metodológica.

Etapas	Descripción
1 Actores	Identificación de los participantes activos o pasivos en el proceso de gestión para el desarrollo sustentable y equitativo (actores). Tipología.
2 Criterios	Determinación de los criterios, implícitos o explícitos que sustentan las posiciones de los actores involucrados en el proceso. Vigilancia.
3 Problemas	Determinación de los problemas de cada uno de los actores, en función de sus necesidades y aspiraciones. Establecimiento de prioridades.
4 Objetivos	Determinación directa o por inferencia de los problemas, las metas y los objetivos de cada uno de los actores. Jerarquización.
5 Ámbito compartido (abstracto)	Inventario, evaluación y diagnóstico físico y socioeconómico de los ámbitos territoriales y funcionales donde se pretende lograr los objetivos (pasado, presente y futuro). Análisis de la sustentabilidad ambiental.
6 Restricciones	Identificación de restricciones técnicas, políticas, legales, económicas, financieras, de organización, funcionales, culturales, educacionales, comerciales y otras que obstaculizan o impiden el logro de los objetivos. Jerarquización.
7 Soluciones	Generación de opciones de solución para superar las restricciones previamente identificadas y jerarquización de soluciones. Selección.
8 Estrategias	Diseño de estrategias para poner en práctica las soluciones vía acciones de carácter discontinuo (proyectos de inversión) y continuo (servicios, sistemas de producción y otros).

Tabla 1.3. Procesos de materialización de acciones. Cartilla metodológica. Continuación.

Etapas	Descripción
9 Programas	Programación de las acciones (programas, proyectos, actividades y tareas) sobre la base de las soluciones y las estrategias seleccionadas, ejecución de las actividades de control y seguimiento de los resultados.
10 Ámbito comparativo (real)	Materialización de las acciones programadas en el ámbito. Control sistemático de los objetivos y de la sustentabilidad ambiental.
(1) Reinicio del ciclo	Reiniciar el ciclo en niveles progresivamente más detallados y precisos.

C. Proceso de transacciones entre actores

El proceso de transacciones entre actores destinadas a lograr la equidad se lleva a cabo en cada una de las etapas de la secuencia de materialización de acciones. La secuencia se realiza normalmente en ciclos iterativos que se han denominado ciclos de transacciones o ciclos de concertación. Estas iteraciones permiten pasar de un nivel de percepción, con transacciones o acuerdos de carácter general, a un nivel de ejecución, con acuerdos y tratos claros y específicos entre los actores. En cada aproximación se debe buscar el consenso de los actores para seguir avanzando: i) en la primera iteración (percepción), se recopila información sobre todo lo que los actores saben o conocen por experiencia, intuición u observación directa; ii) en la segunda iteración (consolidación) se verifican las opiniones en la práctica, mediante diagnósticos a nivel de reconocimiento o semidetallados y propuestas a nivel de prefactibilidad, y iii) en la tercera iteración (formulación) se hacen estudios y se formulan propuestas de nivel detalladas y definitivas. Este método tiene la particularidad de tomar en cuenta, en una forma muy sencilla, algunos aspectos que son claves en un proceso de gestión relacionado con el desarrollo humano, pues:

- 1) reconoce de partida, por igual, a todos los actores que participan en los procesos de gestión para el desarrollo sustentable de un determinado ámbito;
- 2) recoge, antes de que se inviertan grandes sumas en estudios, las opiniones de los actores y las compara, con lo que se evita perder tiempo y recursos en estudios detallados;
- 3) permite confrontar las ideas de distintos usuarios y habitantes del área con las ideas de los técnicos que teóricamente deben asesorarlos y evita que se ignoren mutuamente en las fases iniciales;
- 4) al disponer de una “cartera de soluciones” permite que todos los actores participen en la formulación de las estrategias, lo que los compromete también a aplicarlas;
- 5) permite también que los técnicos se aboquen a plantear estrategias de integración de soluciones sobre bases reales, lo que significa que no planifican sin saber si alguien aplicará sus planes, sino para llevar a la práctica las ideas propuestas y aceptadas por la mayoría, y
- 6) la secuencia, además, es por sí sola un método de trabajo que sirve para formular estrategias, y obliga a la articulación y la armonización de las etapas propuestas por los mismos gestores.

Cabe señalar que, a medida que se avanza en la secuencia, va aumentando el nivel de detalle de la información y, por lo tanto, el nivel de precisión de las transacciones. Las etapas claves son las de concertación de acuerdos claros entre los actores en relación con las

restricciones y soluciones. Esto se debe a que muchas veces lo que para algunos son soluciones para otros son restricciones, lo que produce conflictos entre los actores si no se buscan soluciones equitativas o se pactan compensaciones.

El ciclo de transacciones se inicia con la decisión de un grupo o de todos los grupos (externos o internos, públicos o privados, pero con intereses en un mismo ámbito) de llevar a cabo un proceso de transacciones con el fin de obtener beneficios mutuos y equitativos. Para tomar esa decisión tienen que estar de acuerdo, al menos, con respecto a lo siguiente:

- generar un proceso de definición y gestión de un ámbito espacial deben participar los grupos o personas con intereses en dicho ámbito;
- delimitar los márgenes dentro de los cuales es posible dicha participación y las transacciones entre actores;
- existir al menos de un interés colectivo, y
- tener un mínimo conocimiento preliminar de los medios disponibles o necesarios para lograr los objetivos colectivos.

Ahora bien, si los actores no tienen la preparación necesaria para participar en este proceso es casi imposible llegar a acuerdos viables. Para hacer algo en grupo no basta la voluntad de hacerlo. Se requiere respeto mutuo, rigurosidad, conocimiento y, en general, capacidad para trabajar en equipo. La organización de los actores y su capacitación son las tareas iniciales que deben ejecutarse para facilitar el proceso de transacciones.

El o los temas de interés colectivo no sólo pueden ser sugeridos por los habitantes del área y los usuarios, sino también por cualquier interesado o conocedor del lugar. A partir de estos aportes, el equipo técnico encargado de prestar asistencia y los participantes que integrarán la mesa de transacciones podrá colaborar para negociar, transar y concertar acuerdos sobre temas que trasciendan la primera motivación que los impulsó a negociar.

En la primera iteración del ciclo de transacciones, cuyo objetivo es la rápida obtención de resultados preliminares, consiste en la observación y el reconocimiento de la situación actual y la posible situación futura del área sobre la base de la percepción que cada uno de los grupos o personas participantes tenga de la situación, y del aporte que el equipo técnico haga, sobre la base de su percepción de la situación.

La confrontación y la compatibilización de estos aportes de conocimientos, informaciones y experiencias permiten elaborar un diagnóstico preliminar que representa el punto de vista de los diferentes actores participantes en el proceso y del equipo técnico.

El diagnóstico preliminar debe estar orientado a la acción y su alcance dependerá de los conocimientos de los usuarios y los técnicos; de los deseos de participación de los habitantes del área y los usuarios, y de la capacidad de los técnicos para fomentar la participación de los actores.

El nivel de profundidad, extensión, complejidad y duración del ciclo dependerá de los recursos disponibles; de la capacidad del equipo técnico, y del horizonte de planificación considerado en el análisis.

Estos aspectos tienen estrecha relación con el nivel y profundidad de los problemas que se desee solucionar y de la capacidad de gestión de los actores que participen en la mesa de transacciones para llegar a acuerdos. El equipo técnico puede y debe elevar el nivel y la capacidad de gestión de los actores mediante cursos.

El ciclo de transacciones se repite en cada una de las etapas del proceso de materialización de acciones y que consta, por lo tanto, de las mismas etapas:

- 1) organización de la mesa de transacciones;
- 2) identificación y confrontación de criterios;
- 3) identificación y confrontación de problemas;

- 4) inferencia y planteamiento de objetivos;
- 5) diagnóstico y evaluación del ámbito;
- 6) identificación y clasificación de restricciones por orden de prioridades;
- 7) selección y confrontación de alternativas de solución;
- 8) formulación de estrategias y programas;
- 9) formulación de programas y proyectos, determinación de actividades o tareas, y
- 10) evaluación, financiamiento y ejecución de los programas o proyectos.

EL SISTEMA CUENCA HIDROGRÁFICA

CAPÍTULO 2

EL COMPLEJO FÍSICO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

Toda cuenca hidrográfica, como sistema, constituye un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad. La estabilidad y su permanencia son propiedades y formas de comportamiento del sistema. Ahora bien, la capacidad de un sistema para absorber y/o contrarrestar un cambio en una o más de sus variables de manera de mantener su estado, o que éste varíe en un nivel que permita una reversibilidad hacia el estado anterior, representa su rango de estabilidad. Esta definición se abstrae del equilibrio dinámico, por lo tanto nada vuelve al mismo estado anterior, el cual dependerá de las características propias del sistema y del nivel y frecuencia del cambio que sufren los sistemas incidentes o variables exteriores (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Es importante definir **cuenca hidrográfica** como un territorio donde las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces que convergen hacia un cauce principal o unidad natural definida por la existencia de la divisoria de las aguas en un territorio dado, diferenciando de **cuenca hidrológica**, que son unidades morfológicas integrales; además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo.

COMPORTAMIENTO DEL AGUA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca es un "continuo" de clima, suelos, cobertura vegetal, hábitats, red de drenaje, sistemas de producción y presencia humana a lo largo de su pendiente, que interactúa en el espacio y tiempo. La conjunción de estos factores permite identificar al colchón hídrico o sistema hidro-edáfico, que cumple un rol básico para el continuo funcionamiento del sistema.

El suelo es una de las riquezas naturales más importantes. Su capacidad de retención hídrica depende de los tipos de suelo, de la cobertura vegetal, de la orografía y de las estaciones climáticas. Martínez Fernández *et al.* (2001) expresan algunos ejemplos como:

- Los suelos desarrollados sobre areniscas suelen caracterizarse por unas condiciones de almacenamiento y disponibilidad de agua mejores que el resto.
- Los suelos desarrollados sobre terrazas fluviales o depósitos arenosos presentan normalmente valores bajos de humedad, incluso en épocas de abundante precipitación, debido a su menor capacidad de retención. Sin embargo, en la mayor parte de los casos conservan valores de humedad dentro del umbral de agua disponible, aún en los períodos más críticos. Esto se debe a que, si bien tienen una capacidad de retención baja, la poca humedad que queda almacenada es retenida con poca energía y, por tanto, es agua disponible.
- Los suelos que aparecen en los fondos de valles ligados a la acción de la red de drenaje, son los que experimentan las oscilaciones de humedad más extremas.

- Los suelos desarrollados sobre calizas se caracterizan por poseer buenas propiedades para la retención de humedad, sobre todo por su elevado contenido de materia orgánica y arcilla.
- Cuando se trata de suelos con menor profundidad, su capacidad de almacenamiento y de disponibilidad de agua se vea mermada y el contenido de humedad presenta grandes oscilaciones en función de la estacionalidad climática.

A partir de conocer las características de una cuenca hidrográfica se pueden establecer sus **funciones**, como ser la Función Hidrológica, para captación de agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar el escurrimiento de manantiales, ríos y arroyos, almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración y al mismo tiempo genera descarga del agua como escurrimiento. La Función Ecológica principal es la de proveer de hábitat para la flora y fauna constituyendo los elementos biológicos del ecosistema y manteniendo interacciones entre las características físicas y biológicas del agua. La Función Ambiental es regular la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos, conservar la biodiversidad, constituir sumideros de CO², albergar bancos de germoplasma, mantener la integridad y la diversidad de los suelos. Por último se reconoce también una Función Socioeconómica al suministrar recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población y proveer de un espacio para el desarrollo social y cultural de la sociedad (Bernex, 2006).

El agua es uno de los factores importantes en una cuenca hidrográfica, ya que su disponibilidad genera un gran impacto sobre la producción agrícola - forestal, como lo prueba la relación directa que hay entre la producción y la cantidad de agua utilizada. El crecimiento normal de la cobertura vegetal depende en gran medida de una distribución de agua abundante y oportuna.

La influencia de la vegetación en el proceso precipitación - escurrimiento, se ha venido estudiado desde hace más de 100 años, pero ha sido en la segunda mitad del siglo XX, cuando se ha avanzado de manera más significativa en el conocimiento de esta relación.

La disminución temporal de masas de agua generada en las últimas décadas incide directamente sobre esta disponibilidad, por ejemplo el Mar Aral en Asia Central fue el mayor mar interno del planeta. En la actualidad, en conjunto con su entorno representa una de las áreas menos fértiles del globo (Figura 2.1).

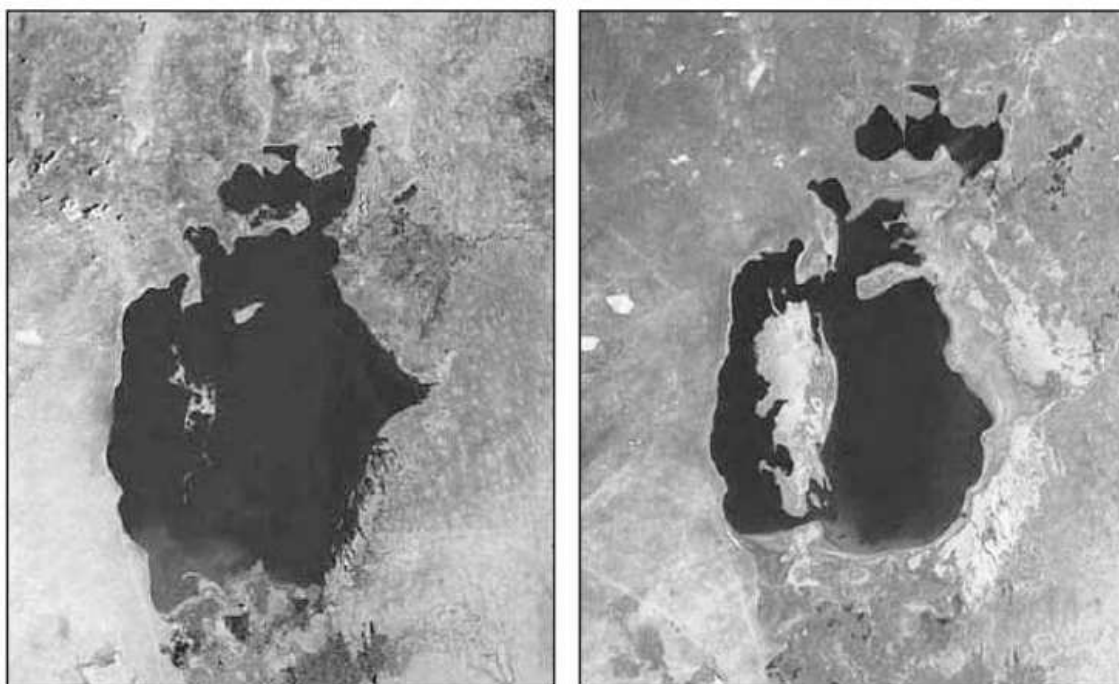


Figura 2.1. Imagen satelital del Mar Aral, en diferentes años: 1975 (izquierda) y 1999 (derecha).

Para una planificación hidrológica es fundamental conocer el momento y el lugar donde se desarrollará, por ello se debe caracterizar el suelo, la geomorfología, la topografía, el clima, como así también las especies vegetales presentes. El estado de desarrollo de la cobertura vegetal y su manejo, ejercen una influencia fuerte sobre las características hidrológicas.

Los cambios más grandes sobre el rendimiento hídrico de la cuenca, la respuesta al escurrimiento y la producción de sedimentos asociados con las plantaciones usualmente ocurren cuando el bosque natural es convertido a plantación. Comparativamente poco se conoce sobre el consumo del agua por las especies forestales que se plantan con más frecuencia.

Según Sampurno Bruijnzeel (1997), los efectos sobre la disponibilidad de agua y sedimentos transportados normalmente se estabilizan a los dos años de establecimiento a niveles ligeramente por encima de los originales. Como resultado de esto, son posibles en esta etapa predicciones poco confiables sobre los eventuales efectos de las plantaciones en la magnitud y el rendimiento hídrico anual y estacional. Esta disponibilidad de agua debe ser cuantificada y con ello se inicia el concepto de ciclo hidrológico generado por el estudio de la hidrología.

La hidrología es la ciencia que estudia el recurso agua, en cuanto a existencia, distribución, propiedades físicas y químicas, influencia sobre el medio ambiente y relación con los seres vivos. El entendimiento de la hidrología es importante debido a que se sitúa en cuencas hidrográficas que abastecen agua para diferentes usos del suelo o consumo urbano, y por tanto la calidad y la cantidad del rendimiento hídrico se vuelve crítico.

López Cadenas del Llano (1994), en estudios específicos de hidrología forestal, destaca que el bosque genera un ecoclima particular en comparación con el de un sitio descubierto, dado que al interior de éste se produce una reducción de la luminosidad de hasta un 90%, disminuyendo la temperatura media anual en unos 4° C. Además, se reduce la velocidad del viento a la cuarta parte y se presentan condiciones de mayor humedad con un aumento medio del orden del 10% diario.

La vegetación afecta a las precipitaciones orográficas de dos formas. Por un lado los bosques acrecientan la altura efectiva que deben remontar los vientos, lo cual puede definir un aumento de las precipitaciones que va entre un 0,8% y un 1%, según experiencias centroeuropeas. Por otra parte, se da el efecto de fricción que realizan los bosques con lo cual tienden a frenar la velocidad de avance, favoreciendo el movimiento ascensional de los vientos; según datos experimentales, se produciría un aumento de un 2 a un 3% de las precipitaciones.

Además señala que la influencia de la vegetación sobre la infiltración del agua en el suelo es decisiva en masas boscosas, ya que el continuo aporte de materia orgánica origina una estructura más granular del suelo, favoreciendo la infiltración. Finalmente plantea que el mayor impacto de los bosques sobre el escurrimiento, es la modificación de la forma en que estos volúmenes acceden a los cauces, disminuyendo drásticamente las aportaciones superficiales y aumentando las aportaciones subterráneas.

Existen estudios que demuestran que la plantación de árboles de rápido crecimiento en áreas de potreros disminuirá el flujo superficial después de que el dosel de copas se cierre, particularmente en la estación seca.

En muchas partes de los trópicos húmedos se ha talado indiscriminadamente el bosque natural que ha llevado a una degradación de los suelos muy seria y a una alteración de los regímenes del escurrimiento superficial, donde la implantación y reforestación no siempre ha logrado recuperar las condiciones hidrológicas originales (Hamilton y King, 1983). Hardjono (1980) demostró científicamente que los flujos se mejoran después de la reforestación; pero en otros casos la plantación de especies de rápido crecimiento en áreas con pastos y rastrojos ha traído un decrecimiento considerable en el rendimiento hídrico en la estación seca (Mathur y Sajwan, 1978; Smith y Scott, 1992).

Calder (1992) analizó 94 cuencas en todo el mundo, afirmando que en términos generales, un incremento de un 10% de la cobertura forestal en bosques de pinos y eucaliptos,

determina una baja de 40 mm en el caudal anual. Además, señala que una forestación de un 10% de una zona cubierta por pastos, determina que el escurrimiento anual disminuya entre 10 y 25 mm.

Se ha establecido muy bien una interacción estrecha entre el ciclo hidrológico del bosque y el ciclo de entrada y salida de nutrientes y esto se puede evaluar mejor seleccionando cuencas como la unidad fundamental (Bormann and Likens, 1967), siendo éstas una herramienta adecuada para el estudio de pérdida de solutos asociados con la destrucción del bosque y su tala (Likens, *et al.* 1977).

López Cadenas del Llano *et al.* (1994) señalaron que una influencia directa del bosque sobre el escurrimiento superficial sería la posibilidad de reducir los caudales producidos a partir de los aguaceros, con lo cual se esperaba una disminución en los valores de los coeficientes de escurrimiento, los caudales punta y de las reservas medias. Sin embargo, los resultados proporcionados por las pruebas estadísticas y gráficas indican que para el caso de los coeficientes de escurrimiento no se producen variaciones en los valores medios anuales comparados entre los períodos 1960-1978 (de mayor influencia de bosque nativo) y 1979-2000 (con mayor influencia de plantaciones forestales). Similares resultados presentan los caudales punta y las reservas medias, en donde se observa la mantención de sus valores en el tiempo e incluso se produce un incremento en sus valores en el período 1979-2000. En grandes términos se podría decir que según los resultados, las variables analizadas presentan comportamientos hidrológicos similares.

El análisis anterior ha llevado a plantear que los valores de caudales punta y de reservas medias no estarían solamente en función de las plantaciones sino que se encontrarían fuertemente relacionados con las precipitaciones, las intensidades caídas y a nivel de cuenca hidrográfica con su morfometría.

A partir de la observación de las características y funcionamiento de la cuenca hidrográfica se puede definir que existe una dinámica general característica, como se presenta en la Figura 2.2. Los factores de control se diferencian según la distribución en la misma, por ejemplo:

CABECERA (Frente montañoso)

- CLIMA: precipitación, temperatura, viento
- SUELOS: textura, profundidad
- LITOLOGIA: carácter de las rocas subyacentes
- TOPOGRAFIA: relación ladera pendiente
- RELIEVE: desnivel, relación divisoria - lechos
- COBERTURA: fisonomía y densidad vegetal
- USO DEL SUELO: carácter e intensidad

AREA MEDIA (Garganta)

- SUELOS: carácter y constitución
- RELIEVE: relación divisoria - lechos
- TOPOGRAFIA: relación ladera pendiente

DESEMBOCADURA (Tierras bajas)

- Relación divisorias - valles
- Relación estacional crecidas – estiaje

Continuando con esta observación, se define que la actividad hidrológica también presenta actividad diferencial según la posición en la cuenca. Por ejemplo, en la cabecera predomina la producción de sedimentos, en la garganta el transporte en conjunción con la emisión y deposición (aunque estos dos en menor medida) y en la salida de la cuenca se expresa principalmente la deposición de materiales sólidos. En relación a la estabilidad de la unidad

hidrológica es baja en donde se genera el mayor movimiento (en la cabecera) y aumentando cuando se estabiliza el movimiento hacia la desembocadura.

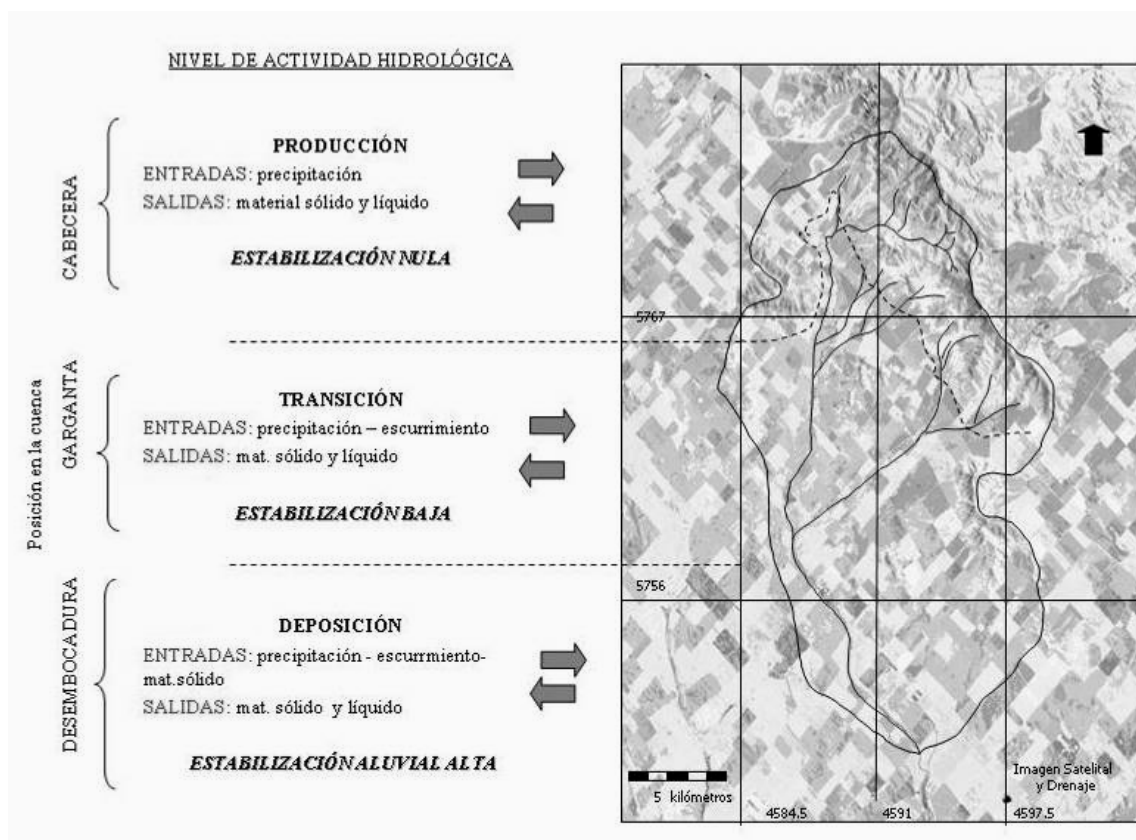


Figura 2.2. Agentes determinantes de la dinámica de un sistema hidrográfico.

MORFOMETRÍA DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

El funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento. Esta transformación depende de las condiciones climáticas y las características físicas de la cuenca. Desde el punto de vista hidrológico, interesa el volumen de escurrimiento y también su reparto en el tiempo, función también de esas condiciones y características. Desde el punto de vista de su funcionamiento, la cuenca hidrográfica puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo y por la cobertura vegetal y uso del suelo (Henaos, 1988; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Gaspari, 2002).

La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escurrimiento es fácilmente intuible cualitativamente, estribando la dificultad en expresar estas influencias mediante parámetros sencillos. Sin embargo, es posible definir cierto número de índices, susceptibles de servir, al menos de referencia, en la clasificación de cuencas y de facilitar los estudios de semejanza (López Cadenas del Llano *et al.* 1998).

Los parámetros de una cuenca, desempeñan un papel fundamental en el estudio y comportamiento en los componentes del ciclo hidrológico, asimismo, algunos parámetros son requeridos como datos de entrada en la mayoría de los modelos hidrológicos para el análisis de las características morfológicas y funcionales.

Las características fisiográficas de la cuenca pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía de la zona de estudio. La cuenca como unidad dinámica natural es un sistema hidrológico en el que se reflejan acciones recíprocas entre parámetros y variables. Las variables pueden clasificarse en variables o acciones externas, conocidas como entradas y salidas al sistema, tales como: precipitación, escurrimiento directo, evaporación, infiltración, transpiración; y variables de estado, tales como: contenido de humedad del suelo, salinidad, cobertura vegetal, entre otros. Los parámetros, en cambio, permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características fisiomorfológicas de la cuenca (Ortiz Vera, 2004).

En general, las variables del sistema hidrológico cambian de tormenta a tormenta, en contraste con los parámetros que permanecen invariables.

En hidrología superficial existe una relación muy estrecha entre parámetros y variables, relaciones que son muy bien aprovechadas por el ingeniero para solucionar problemas cuando se carece de información hidrológica en la zona de estudio.

El análisis de las características morfológicas y funcionales de una cuenca hidrográfica se realiza a través de la determinación de parámetros de forma, de relieve y relativos a la red hidrográfica. Estos parámetros son indicadores destinados a determinar la influencia de la forma de la cuenca en el movimiento y captación del agua de lluvia.

PARÁMETROS DE FORMA

Los parámetros de forma se definen según:

Perímetro (P).

Es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas. Su unidad de medida es kilómetro.

Longitud Axial (La).

Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca. Su unidad de medida es kilómetro.

Área (A).

Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. Su unidad de medida es kilómetro cuadrado. A partir de este parámetro se puede definir el **tamaño** de la cuenca y establecer un nombre para su caracterización.

Ancho promedio (Ap).

Es la relación entre la superficie de la cuenca con su longitud axial. Su unidad de medida es kilómetro.

$$Ap = A \cdot La^{-1}$$

Fórmula 2.1: Ancho promedio de una cuenca (Ap).

Siendo:

Ap: Ancho promedio de una cuenca (km);

A: Área (km²);

La: Longitud axial (km).

Factor de forma (IF).

Este factor regula la concentración del escurrimiento superficial. Resulta importante en lo referente a las crecientes de los cursos de agua. Una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, estará sujeta a crecientes de menor magnitud. Una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas. Es un factor adimensional, que además expresa la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Así, las cuencas con factor de forma bajos, son menos propensas a tener lluvias intensas y simultáneas sobre su superficie, que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor.

Cuando IF es similar a 1, se está ante una cuenca de forma redondeada, y en los casos en que IF es menor a 1, se caracteriza por ser una cuenca alargada.

$$IF = Ap \cdot La^{-1}$$

Fórmula 2.2: Factor de forma (IF).

Siendo Ap el ancho promedio de la cuenca (km) y La: la longitud axial o longitud del río hasta su punto más alto (km).

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc).

El contorno define la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente. Es evidente que la forma tendrá influencia sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación dada. El tiempo de concentración también depende de la forma (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987).

El coeficiente de compacidad de Gravelius, es un índice adimensional que permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari, 2002).

Para tratar de explicar cuantitativamente la forma de la cuenca se ha propuesto su comparación con una cuenca ideal de forma circular, con sus tributarios dispuestos radialmente y que desembocan en el punto central, está expresado por el coeficiente de compacidad.

Si A es la superficie de la cuenca y P el perímetro, Kc su coeficiente de compacidad se establece por medio de la Fórmula 23.

$$K_c = \frac{P}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A})}$$

$$K_c = \frac{0,28 \cdot P}{\sqrt{A}}$$

Fórmula 2.3: Coeficiente de Gravelius (Kc).

Siendo:

P: Perímetro de la cuenca (km);

A: Área de la cuenca (km²);

π : 3,1416.

El coeficiente de compacidad está relacionado estrechamente con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando las gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca.

Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma:

$K_c = 1,00 \rightarrow$ cuenca redonda;

$K_c = 1,25 \rightarrow$ cuenca oval redonda;

$K_c = 1,50 \rightarrow$ cuenca oblonga;

$K_c = 1,75 \rightarrow$ cuenca rectangular oblonga.

Su valor será mayor que la unidad y crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca. A medida que su K_c tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas.

Índice de alargamiento (Ial).

Es el cociente entre la longitud máxima axial perpendicular y el ancho máximo de la cuenca. Cuanto mayor es Ial, entonces aumenta la semejanza a un rectángulo de igual dimensiones que la cuenca, siendo esta alargada, presentando además una red de afluentes cuya dirección de escurrimiento forma un ángulo pequeño con la del río principal. Se puede tomar como valores de referencia que un $Ial < 1,5$ indica que la cuenca es poco alargada, cuando alcanza valores entre 1,5 a 3 es moderadamente alargada y valores > 3 es muy alargada. Este índice es adimensional.

Índice de homogeneidad (Ih).

Es el cociente entre el área de la cuenca y su relación de semejanza con un rectángulo de igual superficie. Este índice complementa el resultado del análisis que se deduce del índice de alargamiento. Es adimensional.

PARÁMETROS DE RELIEVE

Los parámetros de relieve se definen según:

Curva hipsométrica.

Es la distribución del área de acuerdo a su elevación. La curva hipsométrica permite obtener la relación hipsométrica (Rh), la cual es obtenida a partir del análisis altitudinal correspondiente al límite de la cuenca, el cual es reclasificado de acuerdo con el tamaño del intervalo asignado previamente (de preferencia el valor debe de ser igual a la equidistancia). Para cada clase se obtiene su área, lo cual permite llevar a cabo los cálculos de la curva hipsométrica, es decir generar la curva de frecuencia que representa distribución areal según cota altimétrica. Se expresa a través de una curva de un doble eje de coordenadas donde la ordenada es la cota de altura (m.s.n.m.) y la abscisa es el área por encima de una cota dada (% - km²).

La generación de la curva hipsométrica en un área fue sugerida por Langbein *et al.* (1947), para proporcionar información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. A partir del análisis de la curva hipsométrica se puede establecer la relación hipsométrica (Rh) (Fórmula 2.4).

$$Rh = S_s \cdot S_i^{-1}$$

Fórmula 2.4: Relación hipsométrica (Rh).

Donde S_s y S_i es el área sobre y bajo la curva hipsométrica, respectivamente.

Según Strahler (Llamas, 1993), la importancia de esta relación reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así, cuando Rh = 1, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico.

La Figura 2.3 muestra tres curvas hipsométricas correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos. La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Las fases de la vida de los ríos quedarían representadas por: curva A que representa la fase de juventud, la curva B que indica la fase de madurez y la curva C que expresa la fase de vejez.

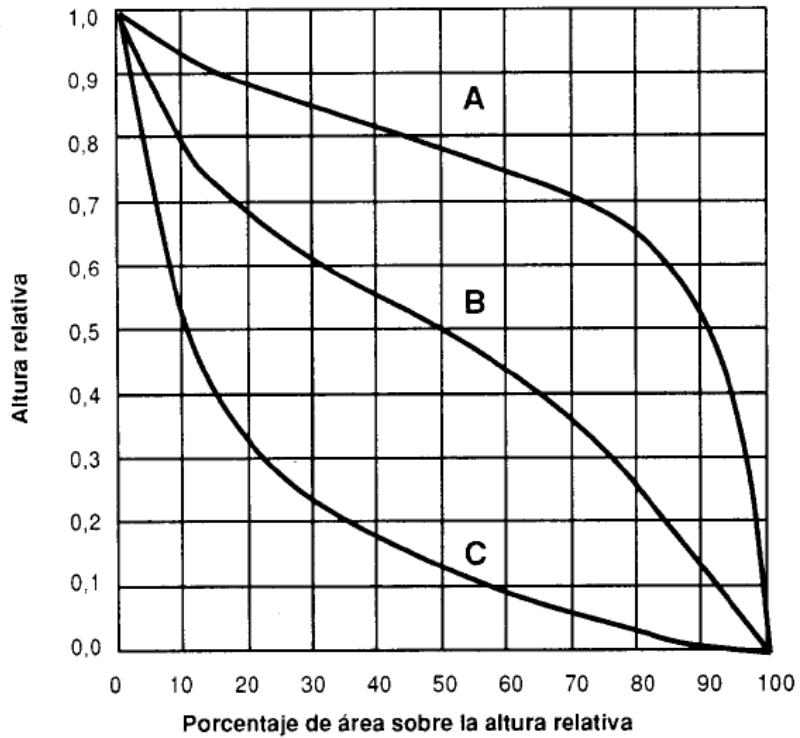


Figura 2.3. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión (según Strahler)

Curva Hipsométrica adimensional.

Se utiliza para la comparación de cuencas con distinto desnivel, cuyo gráfico se expresa en dos ejes donde la ordenada es la Altura relativa (h/H) y la abscisa es Área relativa (a/A), donde h : Intervalo entre curvas de nivel (m), H : Desnivel total de la cuenca (m), A : Superficie total de la cuenca (ha) y a : Área entre curvas de nivel (ha). En las Figura 2.4 y 2.5 se presenta un ejemplo de una curva hipsométrica.

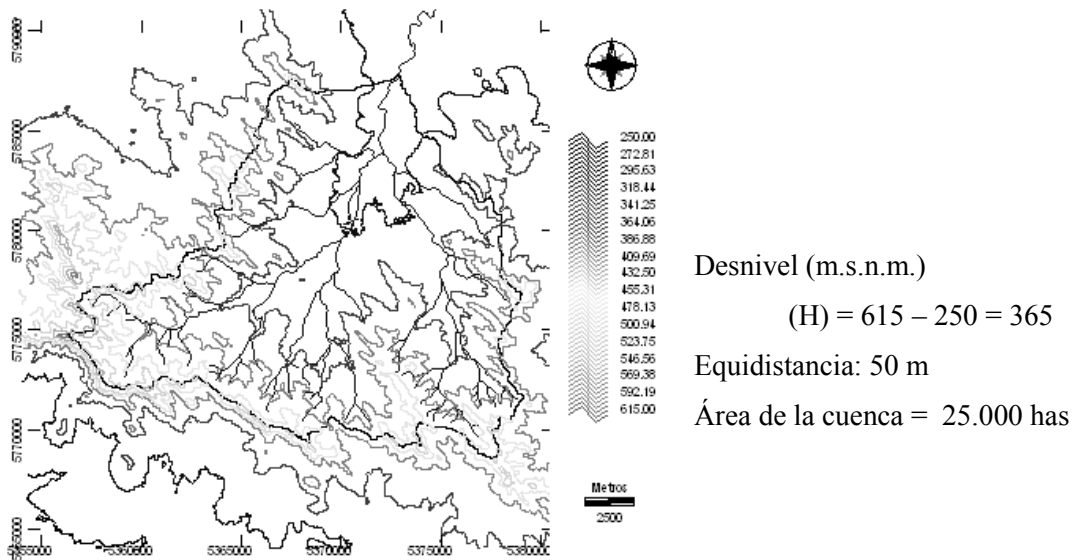


Figura 2.4. Mapa topográfico con el límite de una cuenca hidrográfica (en negro).

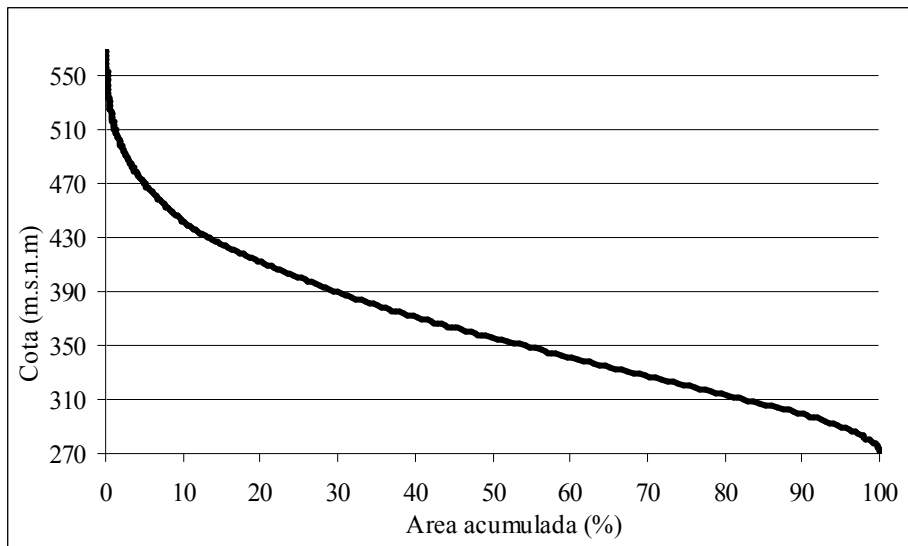


Figura 2.5. Curva hipsométrica.

La lectura de la curva hipsométrica de una cuenca permite establecer las áreas comprendidas entre diferentes cotas, por ejemplo la Figura 2.5 indica:

- 100% cuenca está por encima de los 270 msnm
- 50 % cuenca está por encima de los 350 msnm
- 30 % cuenca está por encima de los 390 msnm
- 10 % cuenca está por encima de los 440 msnm

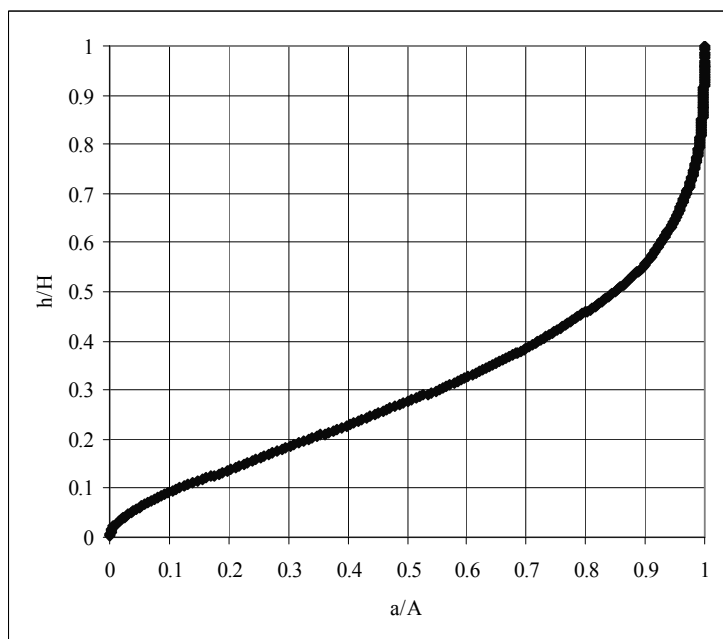


Figura 2.6. Curva Hipsométrica adimensional.

Además se puede generar una curva de relación hipsométrica (relativa) y un Histograma de frecuencias altimétricas, como se representa en la figura 2.7 y 2.8.

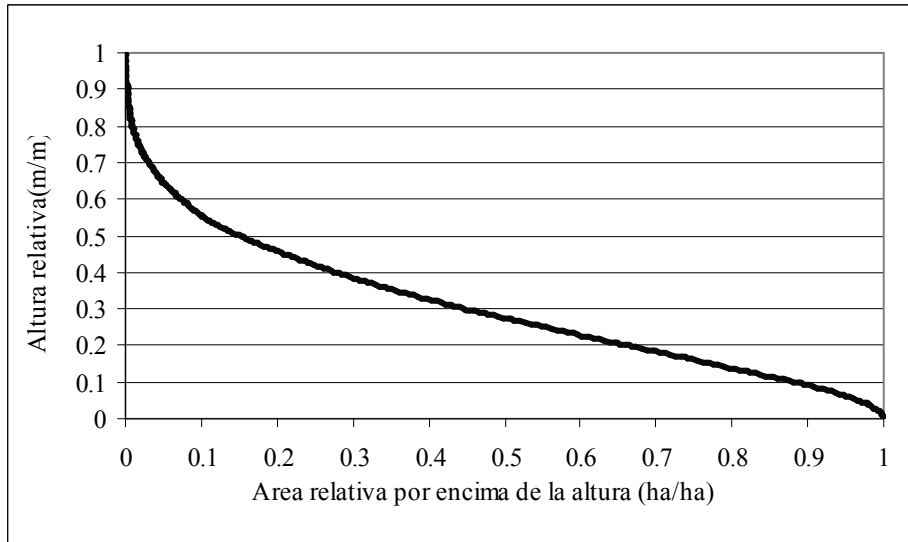


Figura 2.7. Curva Hipsométrica relativa.

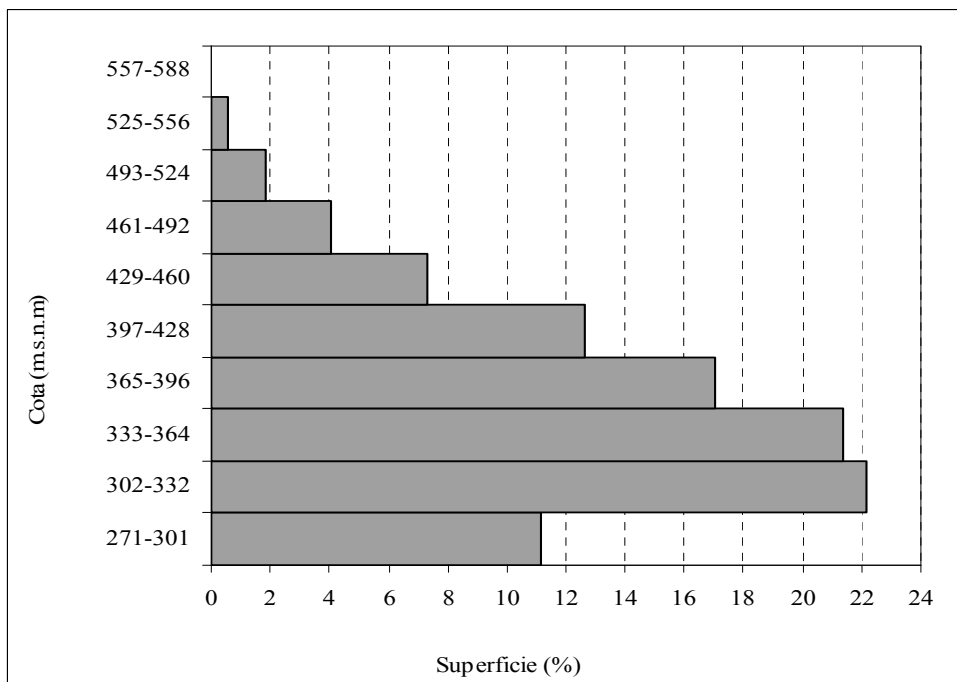


Figura 2.8. Histograma de frecuencias altimétricas.

Altura Media.

Este factor expresa la altura definida por el volumen de la cuenca en relación a la superficie de la misma (Fórmula 2.5).

$$h = V \cdot A^{-1}$$

Fórmula 2.5. Altura media de la cuenca (h).

Siendo h: Altura media (m), V: Volumen (m³) y A: Superficie de la cuenca (m²).

Pendiente media de la cuenca (PM).

El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, está muy influenciados por la configuración topográfica, ya que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente. Se expresa en porcentaje. Para determinar la pendiente media de la cuenca se utiliza un mapa topográfico y el procedimiento se expresa en la Fórmula 2.6.

$$PM = \left[\frac{(H \cdot L)}{A} \right] \cdot 100$$

Fórmula 2.6. Pendiente media de la cuenca (PM).

Siendo:

- PM: Pendiente media (%).
- H: Equidistancia entre curvas medidas (km).
- L: Longitud de las curvas de nivel (km).
- A: Superficie (km²).

Según la clasificación de López Cadenas de Llano (1998), las pendientes medias corresponden a diferentes tipos de relieve, según se expresa en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Rangos y tipos de pendiente media.

Pendientes medias (%)	Tipo de relieve
0 – 0,5	Muy Plano
0,5 – 1	Plano
1 – 3	Suave
3 – 12	Lomadas
12 – 20	Accidentado

Tabla 2.1. Rangos y tipos de pendiente media. Continuación.

Pendientes medias (%)	Tipo de relieve
35 – 50	Muy fuerte
50 – 75	Escarpado
Mayor a 75	Muy escarpado

Sin embargo, la pendiente media puede resultar un índice poco significativo, pues se pueden tener cuencas con igual valor de pendiente media pero con perfiles hipsométricos distintos.

Es más descriptivo, y útil, tener una idea precisa de la distribución de las pendientes de una cuenca, la cual se refleja en el histograma de frecuencias, cuya obtención, antiguamente, consistía en elegir aleatoriamente una serie de puntos de la cuenca, cuyo número depende de las dimensiones de la misma, hacer pasar por cada uno de ellos el segmento más corto que intercepte a las dos curvas de nivel que enmarcan dicho punto, y determinar la pendiente de esa recta, utilizando los valores así obtenidos para construir el histograma de frecuencias.

Actualmente se puede determinar la pendiente media de una cuenca, mediante la confección de modelos digitales de terreno con softwares adecuados.

Coefficiente de rugosidad (Ra).

Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca y su densidad de drenaje (Fórmula 2.7). Es adimensional.

$$Ra = H \cdot Dd$$

Fórmula 2.7. Coeficiente de rugosidad (Ra).

Ra: Coeficiente de rugosidad;

H: Diferencia de altura entre el punto más alto y el más bajo (km);

Dd: Densidad de drenaje (km.km⁻²).

Coefficiente Orográfico (Co)

También denominado Coeficiente de Masividad de De Martonne, es la relación entre la altitud media del relieve y la superficie proyectada sobre un plano horizontal. Este coeficiente da el valor de la tangente de α ($\text{tg } \alpha$).

Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, que crece mientras que la altura media del relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Por esta razón toma valores bastante grandes para microcuencas pequeñas y montañosas, disminuyendo en cuencas extensas y de baja pendiente (Fórmula 2.8). Este coeficiente es adimensional y

combina dos variables esenciales del relieve, su altura, que influye en la energía potencial del agua y el área proyectada, cuya inclinación ejerce acción sobre el escurrimiento directo por efecto de las precipitaciones.

$$\text{Masividad De Martonne (tg } \alpha) = \frac{h}{A}$$

$$Co = h \cdot \text{tg}\alpha$$

Fórmula 2.8. Coeficiente Orográfico (Co).

Siendo h la altitud media de la cuenca y A, el área de la cuenca.

El Co permite caracterizar el relieve de cuencas hidrográficas, combinando dos variables: la altura media de la cuenca y la pendiente. Además se utiliza para obtener la degradación potencial del suelo bajo los efectos de la acción del clima, expresando la degradación cuantitativa mediante la expresión de la Fórmula 2.9.

$$qs = 2,65 \cdot \left(\frac{\log P}{P^*} \right) + 0,46 \cdot \log (Co - 1,56)$$

Fórmula 2.9. Potencial de degradación específica (qs, en tn.año⁻¹)

Donde:

P: Módulo de precipitación anual o módulo pluviométrico.

P*: Precipitación del mes de máxima pluviosidad.

Co: Coeficiente orográfico, en porcentaje.

Orientación de la cuenca

Por orientación de la cuenca, según Llamas (1993), hay que entender su dirección geográfica según la resultante de la pendiente general de las laderas.

Este concepto es importante porque distintos elementos pueden relacionarse con la orientación de la superficie y entre ellos se tienen:

- √ El número de horas que está soleada la cuenca. Este es un elemento bastante importante en la medida que aumenta la latitud de la cuenca. Puede ser el factor principal en el cálculo de la evaporación y la evapotranspiración.
- √ Las horas en las que incide el sol sobre la ladera de la cuenca.
- √ La dirección de los vientos dominantes

- √ La dirección del movimiento de los frentes de lluvia
- √ Los flujos de humedad

PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA

Existen otros parámetros asociados con la red natural de drenaje, conocidos como parámetros de drenaje, cuyas características se describen brevemente a continuación.

El estudio de la fisonomía de la red natural de drenaje es importante porque permite estudiar los escurrimientos sobre todo cuando no se dispone de información cuantitativa de los factores hidrometeorológicos.

La forma y la densidad de la red de drenaje corresponden a la distribución o arreglo geométrico de los tributarios que lo conforman. Este arreglo o distribución geométrica de la red de drenaje se ha venido formando a través de muchos años sobre la corteza terrestre y se expresa mediante índices o parámetros que describen de alguna manera la geometría de la red.

Densidad de drenaje (Dd):

La densidad de drenaje está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998). Cabe recordar que se denomina red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales.

Se considera que la densidad de drenaje caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca. Además define el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante, los cuales permiten el escurrimiento (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2002).

La densidad de drenaje fue establecida por Horton según la Fórmula 2.10.

$$Dd = \frac{L_n}{A}$$

Fórmula 2.10. Densidad de drenaje (Dd, en km.km⁻²);

Ln: Sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca (km);

A: Área total de la cuenca (km²).

En un principio, y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. Es decir: al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor; por lo tanto los hidrogramas en principio tendrán un tiempo de concentración corto.

Pendiente media del cauce (J):

La pendiente media del cauce se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2002). Se expresa en porcentaje, según la Fórmula 2.11.

$$J = \left[\left(\frac{H \text{ máx} - H \text{ mín}}{L} \right) \right] \cdot 100$$

Fórmula 2.11. Pendiente media del cauce (J, en %).

Hmax: Cota máxima sobre el curso de agua (m);

Hmin: Cota mínima sobre el curso de agua (m);

L: Longitud del río más largo (m).

Tiempo de concentración (Tc)

Este parámetro, llamado también tiempo de equilibrio, es el tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana, en viajar hasta el punto emisor. Para ello se supone que el tiempo de duración de la lluvia es por lo menos igual al tiempo de concentración y que se distribuye uniformemente en toda la cuenca. Este parámetro tiene estrecha relación con el gasto pico y con el tiempo de recesión de la cuenca, tiempos de concentración muy cortos tienen gastos picos intensos y recesiones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan gastos pico más atenuados y recesiones mucho más sostenidas en el tiempo.

Existen muchas fórmulas empíricas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca, siendo una de las más completas la Fórmula 2.12.

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{J^{\frac{1}{4}}} \right)^{0,76}$$

Fórmula 2.12. Tiempo de concentración (Tc en horas)

L: Longitud de cauce (km)

J: Pendiente media del cauce (%)

También se utiliza la Fórmula 2.13.

$$T_c = C \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{0,38}$$

Fórmula 2.13. Tiempo de concentración (Tc en horas).

C: Coeficiente escurrimiento

L: Longitud de máximo recorrido de cauce (km)

Lc: Longitud al centroide (km)

S: Pendiente media del máximo recorrido (%)

El coeficiente de escurrimiento varía entre 0,25 y 0,45, correspondiendo los valores más altos para pendientes más altas y viceversa.

La *Longitud de Máximo Recorrido (L)* es la medida de la mayor trayectoria de las partículas del flujo comprendida entre el punto más bajo del colector común, conocido como punto emisor, y el punto más alto o inicio del recorrido sobre la línea de divortio aquarum (divisoria de aguas). Este parámetro tiene relación directa con el tiempo de concentración de la cuenca, el mismo que depende de la geometría de la cuenca, de la pendiente del recorrido y de la cobertura vegetal.

La *Longitud al Centroide (Lc)* es una característica muy especial de la longitud del máximo recorrido y es la longitud medida sobre el curso principal entre el punto emisor hasta el pie de la perpendicular trazada sobre el cauce y que pasa por el centroide del área de la cuenca.

La relación entre forma de la cuenca y la duración del tc, depende de la forma de la cuenca, es decir una forma mas alargada tendrá un tiempo de concentración mayor que en una de la misma superficie pero de forma redondeada.

Número de Orden de los cursos de agua.

Es un número que tiene relación estrecha con el número de ramificaciones de la red de drenaje. A mayor número de orden, es mayor el potencial erosivo, mayor el transporte de sedimentos y por tanto mayor también la componente de escurrimiento directo que en otra cuenca de similar área. El número de orden de una cuenca es muy vulnerable a sufrir el efecto de escala, la cual siempre debe especificarse.

Existen dos metodologías para determinar el orden de una cuenca, el criterio de Schumm y el criterio de Horton.

El primero se determina asignando el primer orden 1 a todos los cauces que no tienen tributarios y, en general la unión de dos cauces de igual orden determinan o dan origen a otro de orden inmediatamente superior y dos de diferente orden dan origen a otro de igual orden que el de orden mayor y así sucesivamente hasta llegar al orden de la cuenca. El cauce principal tiene el orden más elevado, que es el orden de la cuenca.

Se ordenan y numeran los afluentes desde las nacientes de una cuenca hacia su cierre ó desembocadura Por ejemplo:

- ✓ Los pequeños cursos (nacientes) que no tienen afluentes son de orden 1.
- ✓ Cuando se unen dos 1, nace el orden 2.

- ✓ Cuando se unen dos 2, nace el orden 3.
- ✓ Así sucesivamente.
- ✓ El curso de mayor número de orden es el de mayor importancia y mayor ramificación.

El criterio de Horton sólo permite asignar el orden 1 a uno de los tributarios simples confluyentes, siendo el otro de orden inmediatamente superior que hace un menor ángulo con la dirección del flujo en el punto de confluencia. Siguiendo la misma ley anterior se llega al número de orden de la cuenca.

Similitud Hidrológica

Dos sistemas hidrológicos son similares si cumplen las condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica. Los parámetros adimensionales juegan aquí un papel importante. Todos los índices presentados son fundamentales para la confección en gabinete de la base de datos digital morfológica de la cuenca y para iniciar el procesamiento geoespacial para la elaboración de los mapas para el manejo integral de cuencas hidrográficas. Para transferir información desde una cuenca vecina similar hacia una cuenca que no dispone de datos, existe la necesidad de que ambos sistemas hidrológicos cumplan condiciones de similitud.

La recopilación de información cartográfica está constituida por mapas topográficos o cartas nacionales a diferentes escalas, dependiendo del detalle de los estudios. Mientras mayor sea el detalle topográfico que se desea conocer, se requieren escalas mayores, cuyo costo de la información también se incrementa.

El estudio hidrológico de cuencas, dependiendo de su tamaño, no es muy exigente en este sentido, pudiéndose trabajar con escalas estándares básicamente de 1: 100.000. Se debe tener presente que ciertos parámetros, son muy sensibles a los efectos de escala, tales como el Número de Orden de la cuenca; pues existe un mayor error mientras más pequeña sea la misma. A partir de la información cartográfica se delimita el área de estudio y se determinan todos los parámetros geomorfológicos, los mismos que explican los efectos dinámicos de su comportamiento.

RELACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

La separación del escurrimiento total entre escurrimientos superficiales debe basarse en la identificación de los acuíferos y su relación hidráulica con el sistema de cauces.

La estructura geológica de la cuenca y las propiedades de los mantos acuíferos controlan la extensión relativa y el régimen de escurrimiento subsuperficial y de percolación. Este control también dependerá de la ubicación de la cuenca sobre el sistema de drenaje principal global. Si los acuíferos están hidráulicamente conectados con sistemas de cauces de descarga puede producirse entre ambos un significativo movimiento de agua cuya dirección e intensidad pueden variar considerablemente en el tiempo y a lo largo de los cauces.

En el caso de valles anchos y de lecho permeable el almacenamiento temporal de la descarga de los ríos puede también contribuir a la regulación del régimen de escurrimiento.

ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE

CAPÍTULO 3

CICLO HIDROLÓGICO

El conocimiento particular del movimiento del agua en una cuenca permite organizar, ordenar y planificar la misma, por ello la caracterización del ciclo hidrológico generará un diagnóstico básico para todo estudio en esta unidad hidrológica. En Argentina es incipiente el estudio sobre las exigencias hídricas de especies nativas o introducidas y sobre la evolución del agua del suelo en el tiempo. La disponibilidad de esta información contribuye principalmente a elegir criterios de planificación hidrológica o productiva que optimicen el uso sustentable del agua.

El ciclo hidrológico se puede visualizar en la Figura 3.1, en la que se observa la complejidad del movimiento del agua, debido a que en la naturaleza las lluvias varían su intensidad, dirección y sentido, ocupando una parte o la totalidad de la cuenca y además se pueden mover a través de ella. Esta figura representa un esquema general del ciclo hidrológico, indicando la proporción media global entre los diferentes procesos, tomando como referencia la precipitación de la tierra igual a 100, según Chow *et al.* (1994).

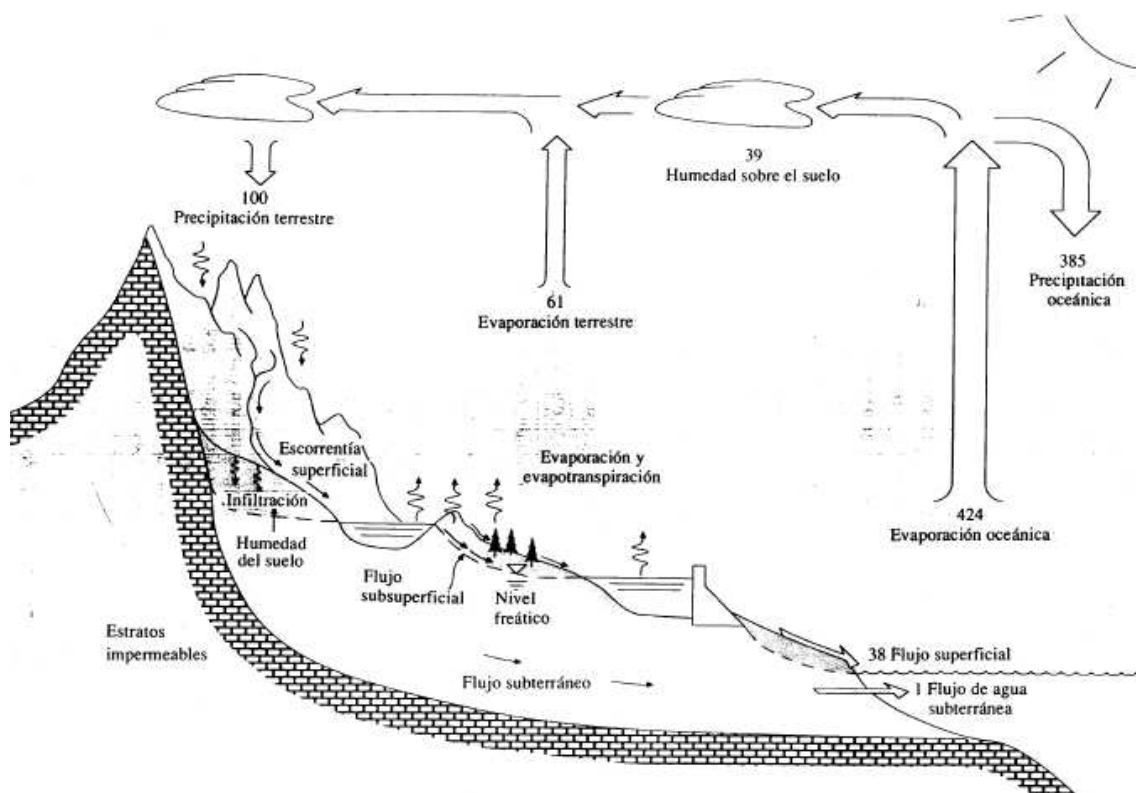


Figura 3.1. Esquema general del ciclo hidrológico según Chow *et al.* (1994)

El ciclo hidrológico no es homogéneo en todas las partes de la cuenca hidrográfica. Hay áreas que al inicio de la precipitación no aportan flujo de agua y viceversa. Además el agua puede cambiar el modo de circulación de horizontal a vertical, recíprocamente, antes de alcanzar el cauce ó la salida de la cuenca. El ciclo se basa en entradas y salidas de agua en movimiento casi continuo. La entrada es la P (Precipitación) y las salidas son ET (Evapotranspiración) y E (Esguerrimiento).

El agua total generada por el esguerrimiento es la formadora de la red hidrográfica, es decir del drenaje natural, permanente o temporal que fluye por un canal hacia la desembocadura de la cuenca hidrográfica.

A continuación se presenta una breve descripción de cada elemento constitutivo del ciclo hidrológico.

1. **Precipitación sobre el cauce.**

Es la primera en llegar a la salida y formar el esguerrimiento de la cuenca. La cantidad de agua de aporte es pequeña al inicio y va aumentando a través del tiempo (aumenta la superficie de captación del cauce). La lluvia es la principal entrada a los bosques.

Llamas (1993), destaca que una parte de las precipitaciones que caen sobre una determinada región, es retenida por la cubierta vegetal para incorporarse más tarde al esguerrimiento o evaporarse. La porción evaporada se denomina pérdida por intercepción, y aunque por lo general el volumen es pequeño, con relación a los demás componentes del ciclo hidrológico, en algunas regiones forestales dicho volumen puede alcanzar hasta el 25% de las precipitaciones anuales.

2. **Intercepción por la vegetación.**

Una pequeña parte de la lluvia llega hasta el suelo del bosque como precipitación interna y esguerrimiento por los tallos. Una porción sustancial es interceptada por el dosel del bosque, la cual se evapora posteriormente hacia la atmósfera durante e inmediatamente después de la precipitación; el resto alcanza la superficie del suelo como goteo de la copa.

Debido a que la precipitación interna y el goteo de la copa no se pueden determinar directamente en el campo, las dos se toman usualmente como una sola variable y se denominan precipitación interna.

La **intercepción por la vegetación** es alta al inicio de la lluvia (vegetación seca) y va disminuyendo con el tiempo hasta un valor constante mínimo, equivalente a la pérdida de agua por evaporación desde el follaje. La intercepción de la cobertura vegetal también quedó demostrada en un estudio realizado por Tomas *et al.* (1997) cuando realizaron un ensayo de simulación de lluvias y determinaron la cantidad de esguerrimiento emitido para diferentes tipos de labranza agrícola: convencional, aplicación de cincel y siembra directa (Figura 3.2) (Fuente: Michelena, 2007).

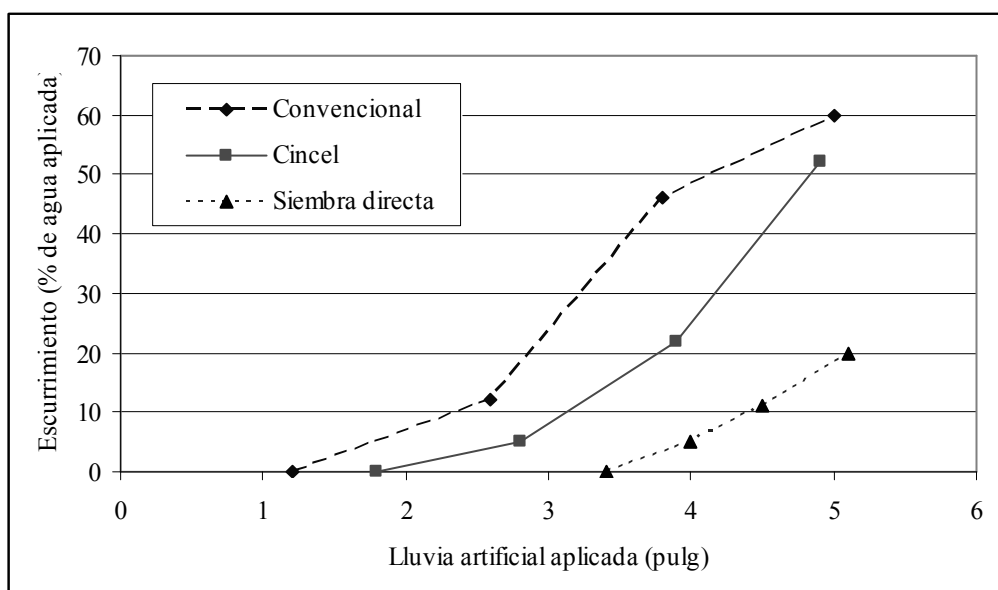


Figura 3.2. Intercepción de la cobertura vegetal. Relación entre los tipos de labranza agrícola y el escurrimiento.

La influencia de la vegetación y uso del suelo es un factor importante a considerar debido a que la misma actúa como “filtro” en el ciclo hidrológico.

3. Humedad del suelo.

Una parte del agua de la lluvia se infiltra y es almacenada en el suelo y/o percola como agua gravitacional a capas más profundas. La mayor parte de las deficiencias de humedad del suelo son satisfechas antes que tenga un escurrimiento apreciable, excepto con lluvias de alta intensidad. Es decir, si la intensidad del total de la precipitación interna y el escurrimiento por el tallo, llegan al piso del bosque y exceden la capacidad de infiltración del mismo, el exceso de agua que no es absorbida por el suelo es escurrimiento directo. En el caso en que el agua sea almacenada en las capas superficiales del suelo, ésta es máxima al inicio de la lluvia (suelo seco) y disminuye con el tiempo.

Según Sampurno Bruijnzeel (1997) debido a que generalmente la capa de suelo orgánica tiene gran capacidad de absorción, en la mayoría de los bosques tropicales naturales, el volumen de la lluvia interna y el escurrimiento por los tallos frecuentemente se infiltra en el suelo.

La influencia concreta de los restos vegetales del mantillo sobre el escurrimiento superficial se expresa en la Figura 3.3.

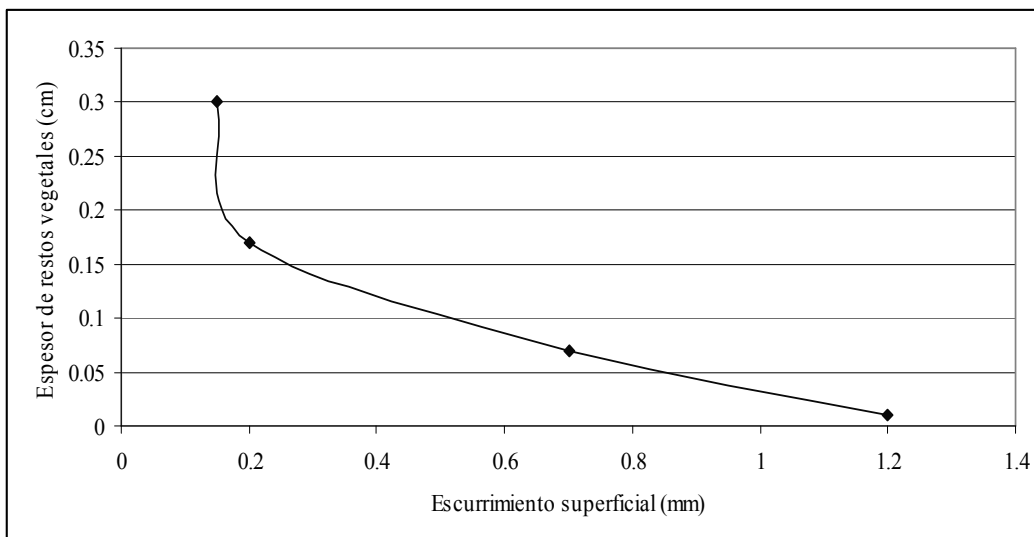


Figura 3.3. Relación entre escurrimiento generado según el espesor del mantillo.

4. Almacenamiento en depresiones.

Es máxima al inicio de la lluvia (depresiones vacías) y disminuye con el tiempo hasta un valor mínimo y constante (infiltración y evaporación).

5. Evapotranspiración.

La mayoría del agua infiltrada es absorbida por la vegetación y retorna a la atmósfera por procesos de transpiración (Et). El término evapotranspiración (ET) se usa para denominar la suma de la transpiración (evaporación de un dosel seco) y pérdida por interceptación (Ei, evaporación de la superficie expuesta de un dosel húmedo). La evaporación de la hojarasca y la superficie del suelo (Es) en bosques húmedos tropicales son usualmente despreciables.

Es importante hacer la distinción entre transpiración (Et) y evaporación del dosel húmedo (Ei), porque el primero es gobernado en gran parte por el control estomático y el último principalmente por las propiedades aerodinámicas de la vegetación (Jarvis y Stewart, 1979).

Huber y López (1993) determinaron la variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo y el consumo de agua por evapotranspiración de un rodal adulto de *Pinus radiata* D. Don, antes y después de su tala, comparándose los valores con los de una pradera natural. El agua por evapotranspiración e interceptación del bosque superó en un 80% a la consumida por la pradera; a su vez, la pradera sobrepasó en un 13% el consumo de la superficie talada. La evapotranspiración, para este mismo período, fue equivalente al 96,6% y 57,7% de la precipitación total para el bosque y la pradera respectivamente.

6. Escurrecimiento.

El flujo de agua causado por una lluvia que cae sobre un suelo ya saturado, o agua subterránea que circula en forma descendente por las laderas de una cuenca hidrográfica se denomina escurrecimiento. La Figura 3.4 presenta un esquema particular de la formación de escurrecimiento, indicando los tipos y el movimiento vertical y/u horizontal que generan en el ciclo hidrológico.

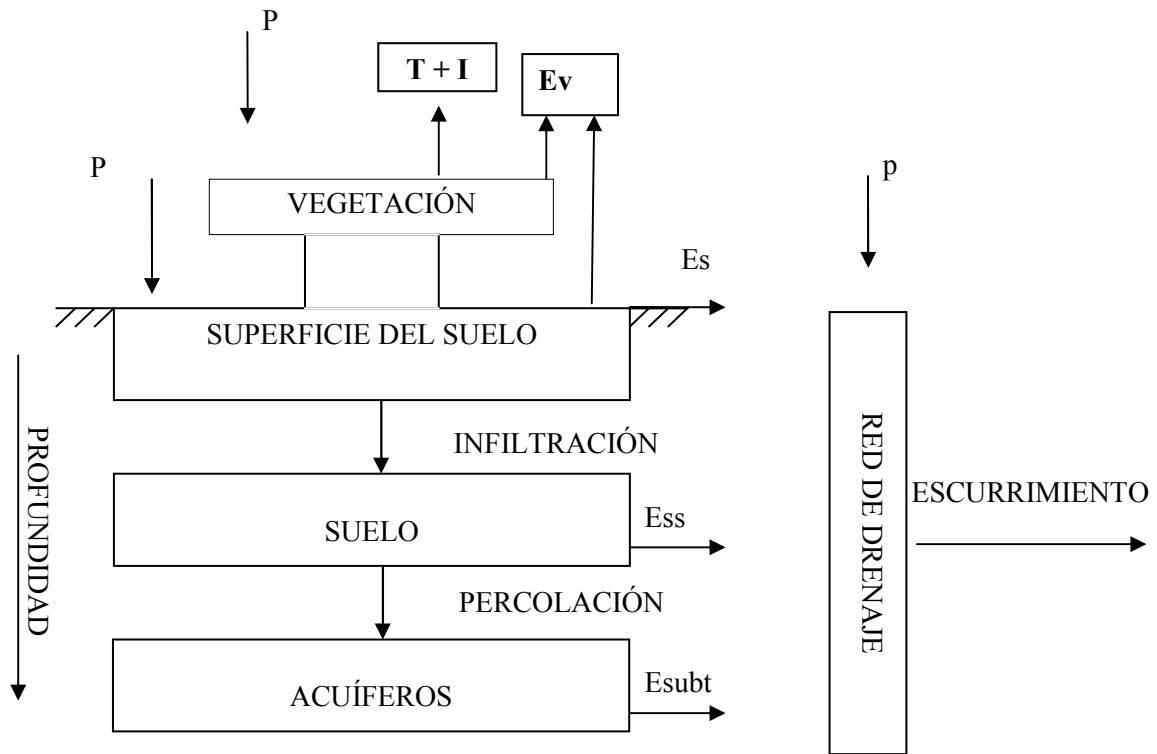


Figura 3.4. Esquema general de la formación de escurrimiento.

Siendo:

- P: Precipitación
- T: Transpiración
- I: Interceptación
- Ev: Evaporación - Evapotranspiración
- Es: Escurrimiento superficial
- Ess: Escurrimiento sub-superficial
- Esbt: Escurrimiento subterráneo

El escurrimiento total es el definido por la Fórmula 3.1.

$$E = PD + Es + Ess + Esbt$$

Fórmula 3.1. Escurrimiento total (E).

Donde PD es el agua interceptada en el curso, es decir la precipitación directa.

Teniendo en cuenta que el E total se forma a partir de la sumatoria de diferentes movimientos cuasi horizontales del agua, se detallan a continuación cada uno de ellos:

Escurrecimiento superficial

El flujo superficial de saturación (E_s) o escurrecimiento superficial es causado por una lluvia que cae sobre un suelo ya saturado. Esto ocurre típicamente sobre las pendientes de colinas o cerca a una banca de la corriente, en las cuales el suelo se satura desde abajo por el flujo subsuperficial y así mantiene condiciones cercanas a la saturación. Adicionalmente, el flujo superficial, puede ser observado durante y después de un aguacero intenso hasta encontrarse una capa impermeable cercana a la superficie (Bonell y Gilmour, 1978).

Es nulo al inicio de la lluvia, que va en aumento hasta alcanzar un porcentaje en relación a la intensidad de la lluvia que es constante. Tanto el porcentaje como la intensidad del escurrecimiento derivan de la intensidad de la lluvia. El escurrecimiento se inicia cuando el suelo está saturado o cuando la intensidad de la lluvia es muy superior a la intensidad o capacidad de la infiltración y además la generación de escurrecimiento depende de que antes se complete el agua de almacenamiento superficial.

En la Figura 3.5 se presenta la dirección del escurrecimiento superficial por laderas en una cuenca de montaña, determinada por la dirección de pendiente del terreno.

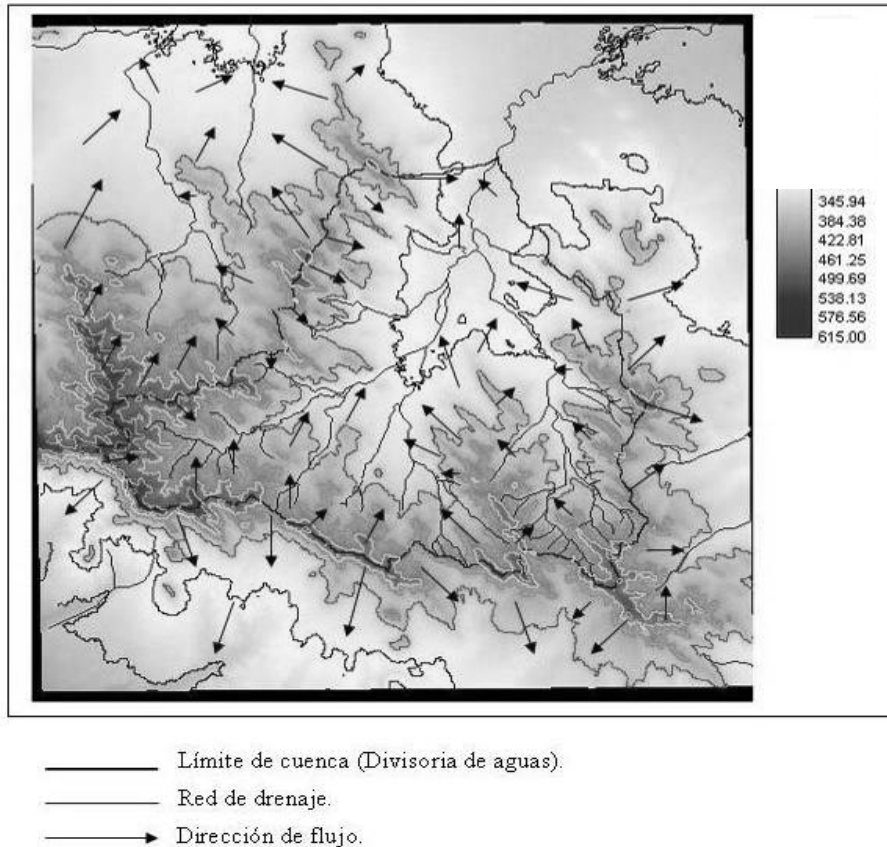


Figura 3.5. Dirección del flujo escurrecimiento superficial.

Escurrecimiento subsuperficial

Sampurno Bruijnzeel (1997) expresa que durante un aguacero el agua que se infiltra puede tomar diferentes rutas hacia el canal de drenaje, dependiendo de la conductividad hidráulica del suelo, de la pendiente y de la distribución espacial de la humedad del mismo (Dunne, 1978).

El flujo subsuperficial de saturación (Ess) frecuentemente representa una mezcla de aguas antiguas (el agua que existe antes de empezar la lluvia) y agua nueva que viaja rápidamente a través de “macroporos y conductos de flujos preferenciales” (Bonell y Balek, 1993).

Esguerrimiento subterráneo

La humedad que permanece en el suelo drena hacia la red hídrica por flujo subsuperficial y de la misma manera lo realiza el agua que percola dentro del suelo hasta una capa impermeable del material parental drenando como flujo lateral. Tal cantidad de agua drena lenta y continuamente, siendo contabilizada para el flujo base de las corrientes (Ward y Robinson 1990). Este tipo de esguerrimiento que es nulo al inicio del ciclo y llega mucho mas tarde al curso de agua, dependiendo de que el acuífero corte al curso en algún punto de su recorrido, se denomina esguerrimiento subterráneo (Esubt).

En la Figura 3.6 se presenta la adaptación de una sección esquemática del movimiento del agua subterránea, donde se visualiza el contacto de un acuífero con la superficie del suelo, generando una corriente de agua permanente denominada efluente. En el caso de que el nivel hidrostático no alcance el nivel del suelo se trata de una corriente afluyente, es decir un curso de aguas transitorio, siendo su carga principal el agua de esguerrimiento superficial – subsuperficial.

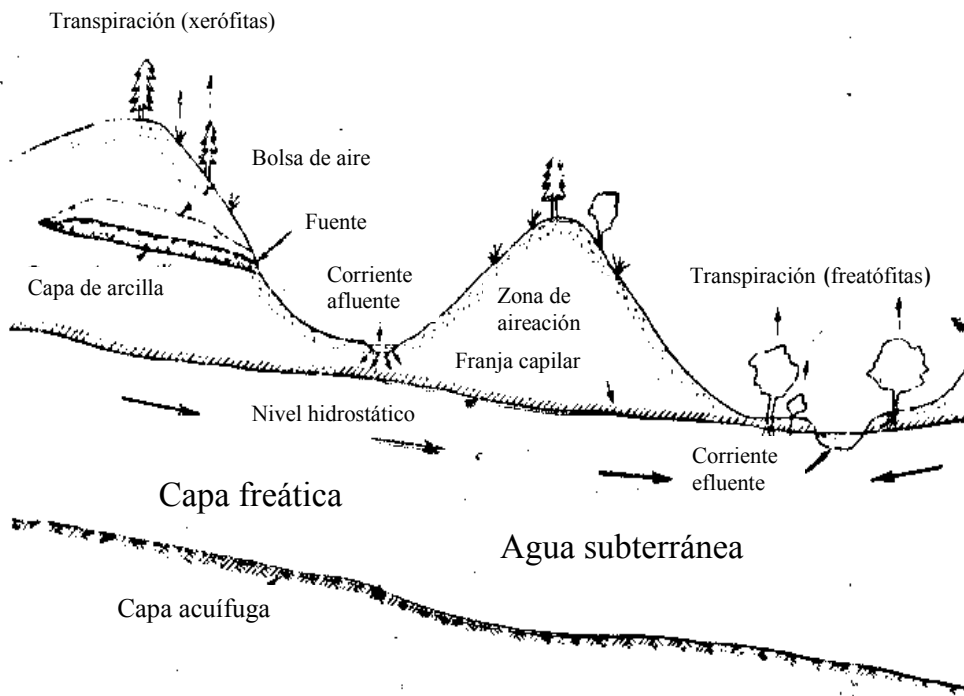


Figura 3.6. Sección esquemática del fenómeno del agua subterránea.

SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE UNA CUENCA ANTE UNA LLUVIA

Hewlet (1982) ha generado un diseño sobre la respuesta de una cuenca ante una lluvia. La Figura 3.7 presenta el diagrama básico correspondiente al ciclo hidrológico.

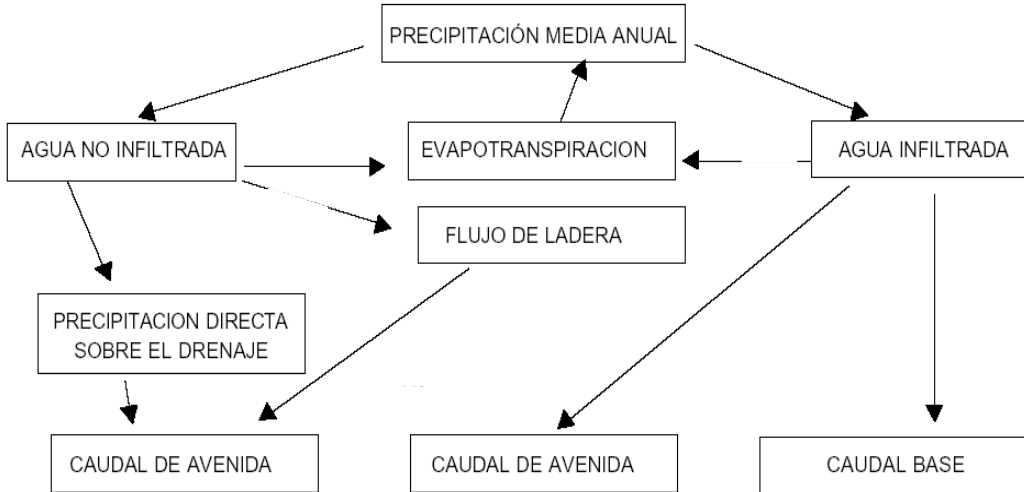


Figura 3.7. Diagrama de simulación del ciclo hidrológico según Hewlet (1982).

A partir del diagrama anterior, Hewlett (1982) expresa el posible porcentaje de distribución de la precipitación media anual para un sitio ideal (Figura 3.8) en el tiempo y su permanencia dentro del ciclo hidrológico.

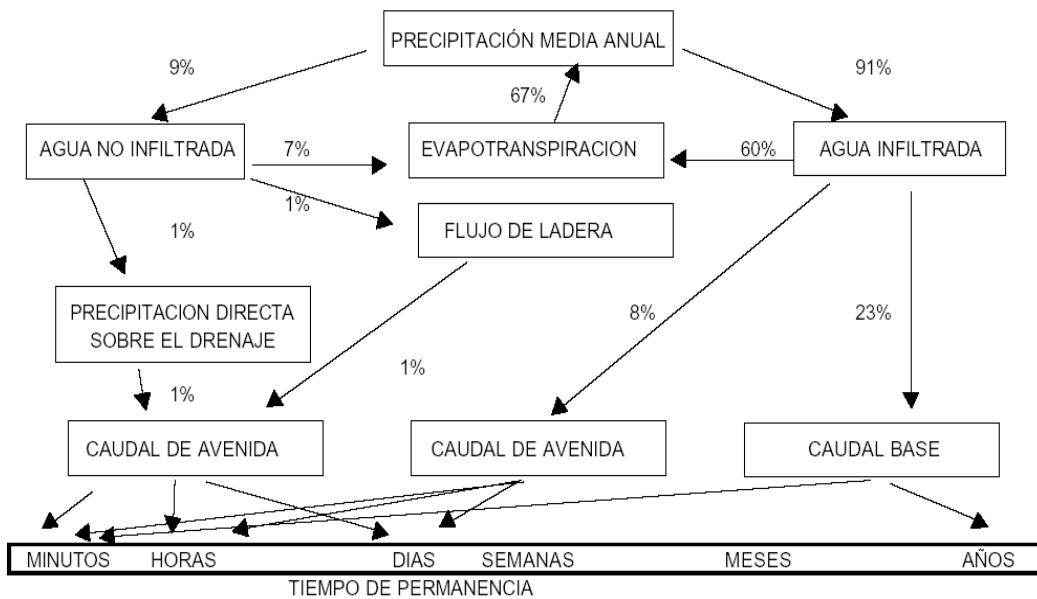


Figura 3.8. Diagrama de Hewlet para un sitio ideal (1982).

DISPOSICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DURANTE UNA TORMENTA

Si se analizan las formas y recorridos del agua de lluvia al caer una tormenta en una cuenca, se verá que los caminos son muy variados y que la distribución, velocidad y tiempo de llegada del agua a la salida de la cuenca son muy distintos. De este sistema tan complejo depende la respuesta hidrológica de la cuenca frente a una tormenta.

La disposición de la precipitación durante una tormenta o Diagrama de Hoyt establece supuestos, que permiten analizar una sección idealizada de una cuenca relativamente seca frente a una lluvia de intensidad constante y larga duración, que abarca toda la cuenca (Figura 3.9). Según Linsley *et al.* (1988) si cambian estos supuestos cambia la respuesta.

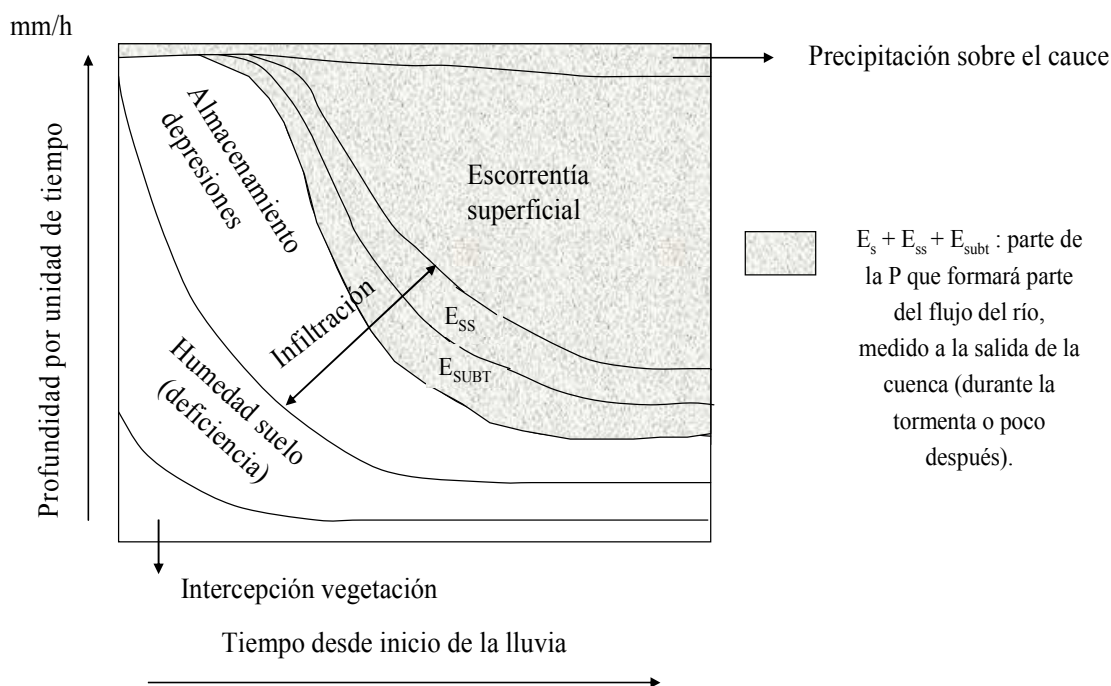


Figura 3.9. Diagrama de Hoyt., según Linsley *et al.* (1988).

El diagrama tiene por ordenada la profundidad de lámina por unidad de tiempo (mm.hora^{-1}) y en abscisas el tiempo desde el inicio de la tormenta (horas, minutos). Está realizado en base a una sección idealizada de una cuenca relativamente seca y una lluvia de intensidad constante y larga duración.

GENERALIDADES DEL BALANCE HIDROLÓGICO

Como un resultado de contribuciones de los diferentes tipos de escurrimientos, el caudal se incrementa rápidamente durante un aguacero. Este incremento hídrico se denomina frecuentemente creciente o flujo de avenidas, y es el generado por una lluvia en el caso por encima de los niveles de flujo base, que es cuando circula agua por la cuenca sin llover.

La descarga máxima se denomina comúnmente “flujo o caudal al pico” y se puede alcanzar durante el mismo aguacero o pocos días después dependiendo de las características de la cuenca y de la humedad, como también de la duración, intensidad y cantidad de la lluvia (Dunne, 1978).

El volumen total de agua producida como caudal o gasto de la cuenca, en un período de tiempo dado (usualmente una tormenta, un mes, estación o año) se denomina “rendimiento hídrico” y se expresa en $\text{m}^3 \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ – litro $(\text{seg} \cdot \text{ha})^{-1}$ – $\text{mm} \cdot \text{hora}^{-1}$.

Los componentes principales del ciclo en una cuenca hidrológica son ilustrados por la ecuación del balance hídrico (Ward y Robinson, 1990) (Fórmula 3.2).

$$P = ET + Q + \Delta S + \Delta G$$

Fórmula 3.3. Balance hídrico según Ward y Robinson.

Donde:

P: Precipitación

ET: Evapotranspiración

Q: Caudal

ΔS : Cambio en el almacenamiento de agua en el suelo

ΔG : Cambio en almacenamiento de aguas subterránea (freática)

Con todos los valores expresados en mm de agua por unidad de tiempo (día, semana, mes o año).

Además:

$$ET = E_i + E_t + E_{su}$$

Fórmula 3.4. Evapotranspiración (ET).

Donde:

E_t : Transpiración

E_i : Evaporación del agua interceptada por el dosel

E_{su} : Evaporación del suelo

$$E_i = P - (T_f + S_f)$$

Fórmula 3.5. Evaporación del agua interceptada por el dosel (E_i).

Donde:

Tf: Precipitación interna

Sf: Escurrimiento por el tallo

Un simple balance de agua habilita la estimación de las necesidades de agua de un árbol a partir del monitoreo de las variables relevantes del sistema. Las mediciones permiten comprobar si el método de estimación es confiable. En la actualidad se dispone de gran número de métodos de balance hidrológico, pero hay que recordar que la técnica es útil a nivel local. Cuando el uso forestal se integra a otros usos de la tierra a escala de cuenca hidrográfica, la medición es complicada.

El movimiento del agua para originar el caudal queda expresado por el flujo superficial (escurrimiento directo) generado por el afloramiento de agua desde el flujo subsuperficial y la acción del nivel freático. Este escurrimiento puede ser atenuado en cantidad por acción antrópica, por ejemplo la implantación de pozos de extracción de agua, y modificado en calidad por contaminación. La integración del agua de escurrimiento a la salida de la cuenca determina el caudal Q, cuya representación gráfica que expresa la variación temporal del caudal de una precipitación, constituye el Hidrograma. A partir de cuantificar el Q se puede determinar el caudal específico, que expresa la relación de caudal por unidad de área de la cuenca.

El caudal específico ó rendimiento (Q_e) de una cuenca se determina por la Fórmula 3.6.

$$Q_e = Q \cdot A^{-1}$$

Fórmula 3.6. Caudal específico ó rendimiento (Q_e ($m^3 \cdot (s)^{-1} \cdot (km)^{-2}$))

Siendo:

Q: Caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

A: Superficie de la cuenca (km^2)

La determinación de caudales líquidos permite cuantificar el volumen de agua disponible para almacenamiento; por ejemplo aprovechable para riego, agua potable, agua industrial, turismo y actividades recreativas. Además, se estima el caudal mínimo en época de estiaje, necesario para abastecimientos de agua potable o la navegación y calcular las crecidas de un río, las alturas máximas a las que puede llegar y definir la radicación de poblaciones urbanas, construir defensas, zonificar áreas de riesgo hídrico con distintos usos del suelo asociados a esos riesgos, entre otros.

En síntesis, el rendimiento hídrico de una cuenca frente a una lluvia, está dado por el escurrimiento (cantidad y régimen) y su variación a través del tiempo, que se expresa en el hidrograma.

HIDROLOGÍA FORESTAL

En vista de las similitudes entre bosques naturales y plantaciones maduras, Sampurno Bruijnzeel (1997) argumenta que los grandes cambios de la hidrología asociados con la conversión de una a otra se pueden esperar durante los primeros 1 a 3 años después de aclarar

el bosque y replantar, esto es en la fase de establecimiento. Los primeros 6 a 12 meses de esta fase son particularmente críticos, pues la mayor parte de la superficie del suelo va a estar expuesta.

Según Molchanov (1966) la influencia de la superficie boscosa en una cuenca se relaciona directamente con el coeficiente de escurrimiento superficial (Figura 3.10).

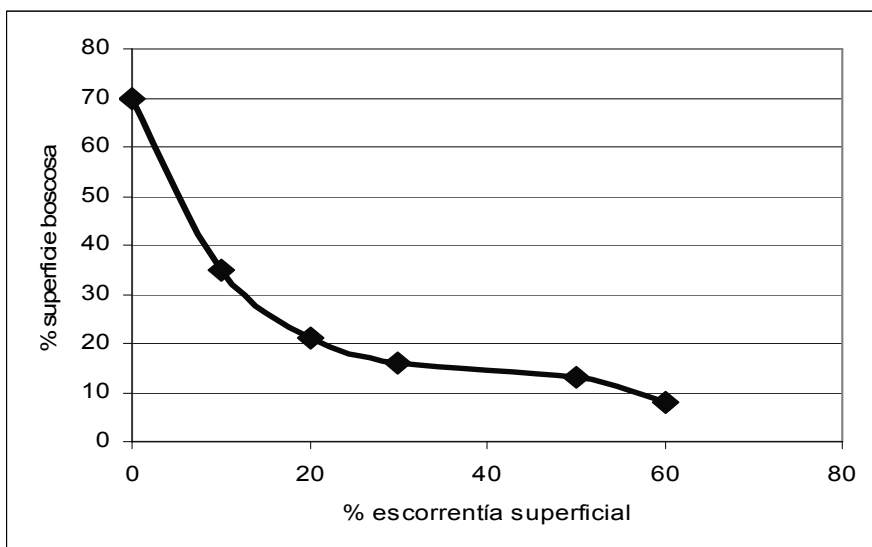


Figura 3.10. Relación porcentual entre escurrimiento superficial según superficie de ocupación de bosque.

Está demostrado que la remoción de la cobertura vegetal para establecer una nueva plantación reducirá temporalmente la evapotranspiración y por tanto se incrementará el rendimiento hídrico de la cuenca.

En la actualidad, existen numerosas publicaciones sobre interceptación de lluvias en plantaciones de bosques tropicales; sin embargo, la comparación de datos para diferentes especies y localidades es complicada, no sólo por los contrastes potenciales en condiciones climáticas, crecimiento de los árboles, edad del rodal e historia de manejo (aclareo, podas), sino también por las diferencias en la metodología aplicada.

En la Figura 3.11 se presenta un diagrama de flujo hídrico generalizado para especies de gran porte forestal, especificando el proceso de interceptación.

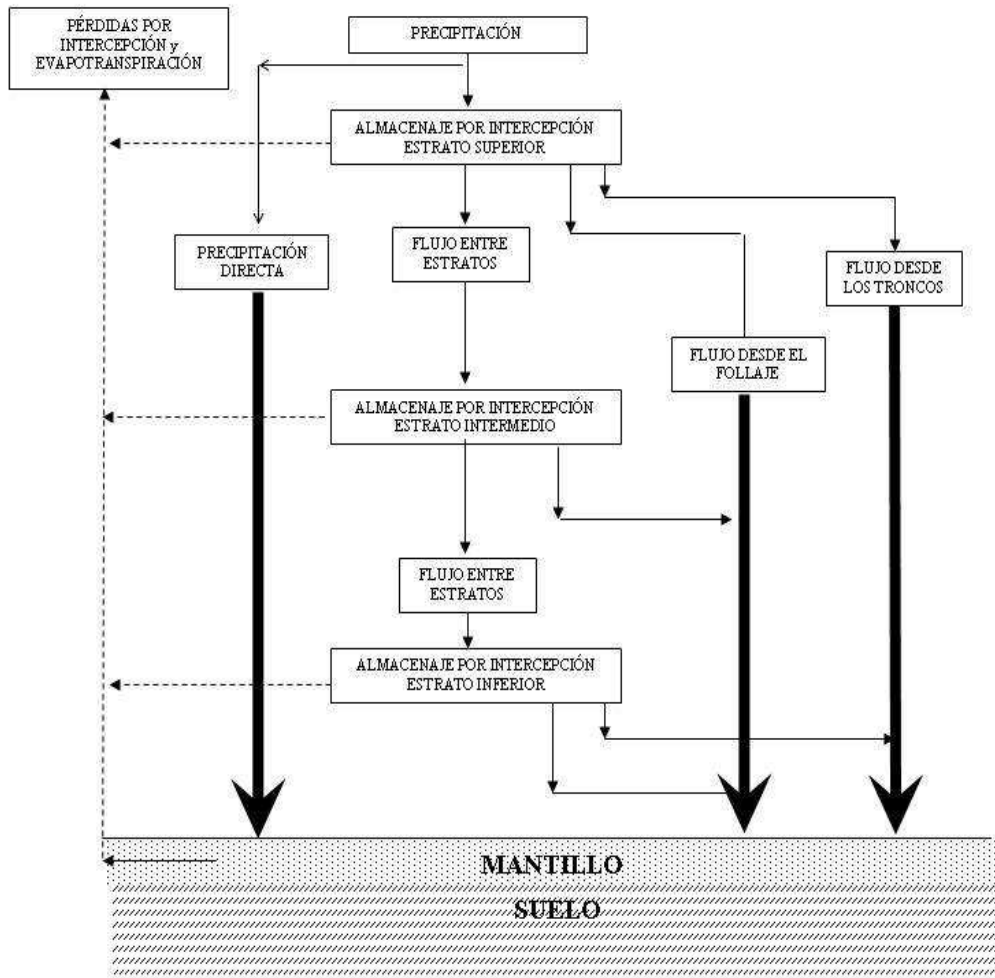


Figura 3.11. Diagrama de flujo del proceso de intercepción forestal.

En la figura 3.12 se presenta las diferencias porcentuales de la intercepción en relación a la lluvia caída para diferentes especies forestales.

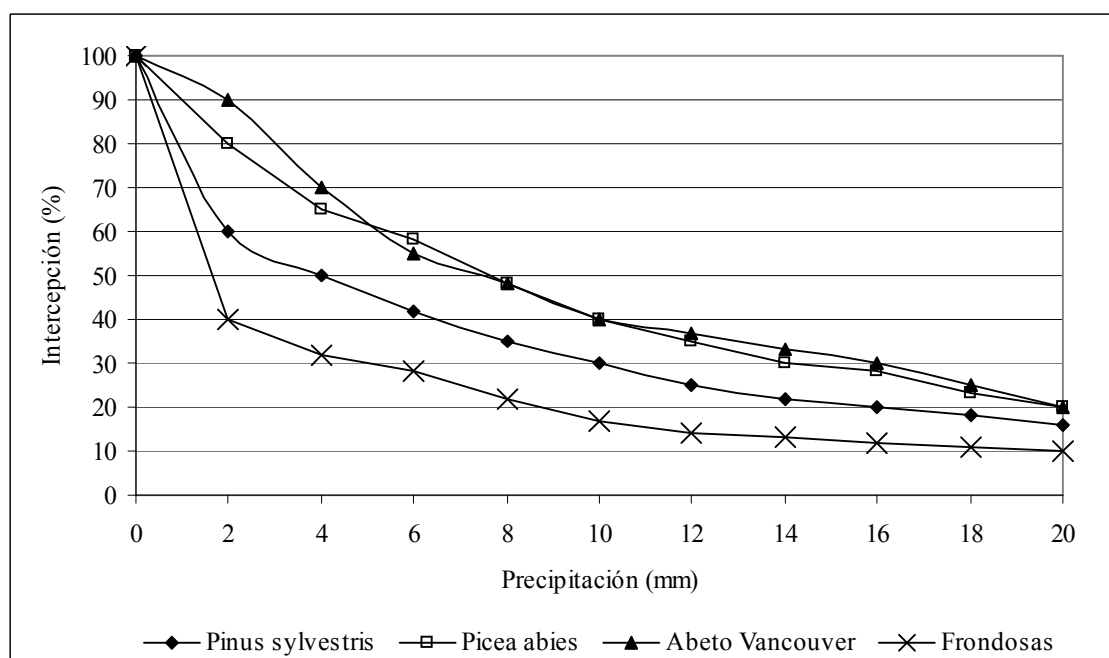


Figura 3.12. Relación porcentual entre precipitación – intercepción en especies forestales.

En las Tablas 3.1 y 3.2 (CSIRO, 1997), se expone un listado de diferentes especies forestales y su reacción según una precipitación, definiendo también la ubicación, edad, densidad y cota altimétrica. Se destaca que la generación de escurrimiento e intercepción está definida por la arquitectura del árbol.

Tabla 3.1. Precipitación interna (TF) escurrimiento por los tallos (SF) e intercepción (I) de la precipitación incidente (P) en plantaciones seleccionadas de maderas duras y bosques naturales en el subtropico.

Especies	Ubicación	Edad	Densidad de árboles/ha	TF/P	SF/P	I/P	MAP ¹ (mm/año)	Elevación (m)	Métodos de medición de la lluvia
Maderas duras de rápido crecimiento									
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	India	6	1680	0.81	0.08	0.12	1670	c. 700	4 mediciones permanentes diarias
<i>Eucalyptus saligna</i>	Brasil ^b	6	1685?	0.84	0.04	0.12	1280	540	12 mediciones diarias
<i>Acacia auriculiformis</i>	Indonesia ^c	5	1010	0.81	0.08	0.11	3075	115	12 canales permanentes diarios
<i>Acacia mangium</i>	Sabah, Malaysia ^d	4	1010 ^k	0.88	?	≤0.14	3350	700	10 mediciones diarias
	Crecimiento pobre	4	1360 ^k	0.80	?	≤0.20			
	Crecimiento razonable	4	1090 ^k	0.72	?	≤0.28			
<i>A. mangium</i>	Malaysia del este ^e	4 2/3	1110	0.62	0.04	0.35	2100	75	8 canales permanentes, semanalmente
		5 1/6	1705	0.57	0.04	0.39			Idem
Otras maderas duras									
<i>Swietenia macrophylla</i>	Filipinas ^f	15		0.79	0.01	0.20	2220	<1000?	4 mediciones diariamente
<i>Tectona grandis</i>	Filipinas ^f	8		0.79	0.02	0.20	Idem	Idem	4 mediciones diariamente
<i>T. grandis</i>	Nigeria ^g	25		0.80	0.02	0.19	1200	210	5 mediciones permanentes diarias
<i>T. grandis</i>	India ^h	25		0.73	0.06	0.21	1670	700	8 canales, diariamente
Bosque natural									
Bosque lluvioso de tierras bajas	Malaysia ⁱ	-	-	0.81	0.02	0.17	2625	220	40 mediciones, diariamente
Bosque lluvioso de tierras bajas	Brasil ^j	-	-	0.91	0.02	0.17	2475	100	36 mediciones, semanalmente

^aGeorge (1978); ^bLima (1978); ^cBruijnzeel y Wiersum (1987); ^dA. Malmer, comunicación personal; ^eLai y Salleh (1989); ^fCastillo (1984); ^gOkali (1980); ^hDabral y Subba Rao (1968); ⁱSinun et al. (1992); ^jLloyd y Marques (1988); ^kDensidad a los 22 meses de edad, Sim y Nykvist (1991); y ¹precipitación media anual

Tabla 3.2. Precipitación interna (TF) escurrimiento por los tallos (SF) e intercepción (I) de la precipitación incidente (P) en plantaciones seleccionadas de maderas suaves y bosques naturales en el subtrópico.

Especies	Ubicación	edad	Densidad de árboles/ha	TF/P	SF/P	I/P	MAP ^d (mm/año)	Elevación (m)	Método de medición de la lluvia
<i>Pinus spp.</i> (tierras bajas <750 m)									
<i>P. caribaea</i>	Brazil ^a	8	?	0.90	0.03	0.07	1280	640	12 mediciones, diariamente
<i>P. caribaea</i> ^b		13	700	0.88	-	≤0.12	1300	<500	10 mediciones, semanalmente
<i>P. caribaea</i>	Fiji ^c	8	825	0.79	0.01	0.20	1800	115	20 mediciones, diarias a semanales
		11	820	0.77	0.01	0.22		45	
		16	820	0.82 ^e	0.01	0.17		80	
<i>P. merkusii</i>	Indonesia ^d	9	710	0.73	0.04	0.23	2100	80	10 mediciones, diarias por 4 meses
<i>Pinus spp.</i> (tierras altas >750 m)									
<i>P. merkusii</i>		31	560	0.72	<0.01	0.28	2120	1375	20 mediciones, diariamente
<i>P. kesiya</i>		10-15	704	0.84	0.06	0.11	3525	<1500	4 mediciones, diariamente
<i>P. kesiya</i> ^f		30	? ^m	0.85	0.02	0.13	3600	1365	3 canales, diariamente
Otras coníferas de madera suave									
<i>Araucaria cunninghamii</i>	Nordeste de Australia ^h	42	664	0.75	-	≤0.25	1560	780	20 mediciones permanentes, semanalmente
<i>Cupressus monocarpa</i>	Kenya ⁱ	20-25	?	0.75	-	≤0.25	2235	2850	41 mediciones permanentes diarias
Otras maderas suaves									
<i>Albizia falcataria</i>		5-8	600	0.82	-	≤0.18	3075	100	10 canales permanentes, diarios
<i>A. falcataria</i>		8	?	0.77	0.03	0.20	2220	<1000	4 mediciones, diarias
Bosque natural									
Bosque lluvioso submontano	Queensland ^h	-	848	0.78	-	≤0.22	2100	780	20 mediciones permanentes, semanalmente
Bosque lluvioso montano	Kenya ⁱ	-	-	-	-	0.20	2235	2850	41 mediciones permanentes diarias

^aLima (1976); ^bLima y Nicolielo (1983); ^cWaterloo (1994); ^dRuslan (1983); ^eC.A. Bons, comunicación personal; ^fFlorida y Saplaco (1981); ^gVeracion y Lopez (1976); ^hBrassell y Sinclair (1983); ⁱPereira (1952); ^jAsociación de Vegetación y Erosión (1979); ^kCastillo (1984); ^ldensidad de plantación original 2 x 3m; ^márea basal de árboles 28m²/ha; ⁿen parte modelada; ^oprecipitación anual media.

Unas pocas generalizaciones son posibles, a pesar de que existen puntos de comparación de las tasas de transpiración instantánea para diferentes especies y clases de edad, especialmente si éstas han sido medidas bajo condiciones contrastantes de clima y de agua del suelo. Por ejemplo, en la mayoría de los rodales jóvenes y semimaduros en áreas de tierras bajas, los totales de transpiración diaria reportada son del orden de 3 a 5 mm cuando no existe limitación de agua en el suelo, sin excepción de especies (Sampurno Bruijnzeel, 1997).

En relación a la evapotranspiración y transpiración se presenta la Tabla 3.4 que expresa estos datos para diferentes especies (CSIRO, 1997).

Tabla 3.4. Evapotranspiración anual (Eo) y transpiración (Et) de plantaciones de árboles maduros y bosques naturales seleccionados en los trópicos húmedos.

Especie	Ubicación	Elevación	Et (Mm)	Et/Eo	Et (Mm)	Et/Eo
<i>Agathis dammara</i> ^a	Java	600	1070	0.79	405	0.30 ^j
<i>Pinus merkusii</i> ^b	Java	1300	900	0.84	445	0.42
<i>Pinus patula</i> ^c	Kenya	2400	1160	0.77	600 ^h	0.41
<i>Pinus caribaea</i> 6 años ^d	Fiji	80	1770 ^j	1.05	1250	0.74
<i>P. caribaea</i> 15 años ^e	Fiji	230	1510	0.90	1175	0.73
<i>Bh de tierras bajas</i> ^g	Java	<100	1480	0.90	885	0.54
<i>Bh montano</i> ^c	Kenya	2400	1155	0.78	690	0.46 ^h

^aBruijnzeel (1988); ^bC.A. Bons, comunicación personal; ^cBlackle (1979); ^dWaterloo (1994); ^eCalder et al. (1988); ^fEstudio de balance hídrico en cuenca hidrográfica, valores de Et se derivaron sustrayendo pérdidas por intercepción y de algunas aproximaciones; ^gMétodos micrometeorológicos y/o modelo de evaporación de Penman - Monteith; ^hUsando estimados de intercepción por Pereira (1952); ⁱvalor bajo debido a las altas pérdidas de intercepción (La precipitación anual es de 4770 mm); ^jIncluye 160mm que se evaporaron de la hojarasca.

Sampurno Bruijnzeel (1997) menciona que los contrastes de la evaporación total entre bosque y sabana, durante los períodos húmedos reflejan principalmente la diferencia entre la lluvia interceptada entre estos dos tipos de vegetación. Durante la estación seca, a menudo, el contraste en la profundidad de las raíces entre éstos también entra en juego. A medida que los bosques envejecen, las raíces de los árboles alcanzan progresivamente grandes profundidades, mientras que en las praderas las raíces mueren en las estaciones secas y rebrotan en la estación lluviosa siguiente. Como resultado la discrepancia en el consumo de agua entre bosques y sabana durante la época seca tiende a incrementarse con la edad del bosque. Por lo tanto, dependiendo del vigor de la plantación, se puede esperar reducciones sustanciales en el rendimiento hídrico durante la estación seca después de sembrar en áreas con potrero o enmalezadas.

El incremento en el rendimiento hídrico de la cuenca tiende a ser más alto, usualmente hasta que el dosel de copas de la plantación se cierre, pero la información en este aspecto es escasa. Además no existen evidencias para afirmar que el consumo de agua de las plantaciones excede al de los bosques naturales. Por otra parte, existen testimonios de que la plantación de especies de rápido crecimiento en áreas de potreros llevará a disminuir fuertemente el flujo superficial después de que las copas se cierren, particularmente en la época de la estación seca. Los incrementos en el consumo del agua anual que exceden 500 mm han sido reportados después de la forestación de sabanas sub tropicales.

Finalmente Farmer *et al.* (2003), al realizar balances hidrológicos en 11 cuencas, divididas entre cuencas templadas y semiáridas, concluye que las diferencias observadas se pueden atribuir a la variabilidad de perfiles de suelo (permeabilidad y capacidad de almacenaje de agua en el suelo), vegetación (cobertura y uso eficiente del agua) y clima (precipitación y evaporación potencial). Los resultados afirman que la influencia relativa de las características del clima y del paisaje, sobre la captación de agua, se manifiesta en una transformación de la sensibilidad del proceso, con el aumento de los períodos de tiempo a estudiar (anual, mensual, diario y a la hora), siendo más sensible las cuencas con características semiáridas que las cuencas húmedas.

ESTIMACIÓN DE CAUDAL LÍQUIDO

CAPÍTULO 4

ESCURRIMIENTO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

El caudal líquido de una cuenca hidrográfica, está fundamentalmente constituido por el escurrimiento. Se denomina escurrimiento superficial al agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. El escurrimiento superficial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca.

Supóngase que en una cuenca se inicia un proceso de lluvia. Las primeras gotas son retenidas y almacenadas por las hojas y tallos de la cubierta vegetal, a partir de un cierto límite las gotas comienzan a alcanzar el suelo y después de un breve período de tiempo, casi todas las gotas alcanzan el suelo.

En un segundo proceso, el suelo a través de sus capas de depósitos de restos vegetales y sobre todo en sus depresiones, almacena una cierta cantidad de agua. Es decir, se inicia el proceso de infiltración (ingreso del agua al suelo) y percolación (movimiento del agua dentro del suelo).

Cuando la capacidad de almacenamiento del suelo, ya descontada la infiltración, está en el límite, se inicia el proceso de circulación superficial del agua.

En forma general, se considera escurrimiento (E) al total del agua que circula por los cauces superficiales como se expresa en la Fórmula 4.1.

$$E = E_s + E_{ss} + E_{subt} + PD$$

Fórmula 4.1. Escurrimiento total (E).

Donde:

E_s : Escurrimiento superficial es la fracción de la precipitación que no se infiltra y discurre libremente sobre la superficie del terreno hasta alcanzar los cursos de agua superficiales.

E_{ss} : Escurrimiento hipodérmico o subsuperficial es parte del agua infiltrada que puede quedar a escasa profundidad y volver a la superficie, alcanzando un curso de agua.

E_{subt} : Escurrimiento subterráneo es parte del agua que se infiltra alcanzando la zona saturada y eventualmente, puede llegar a un curso de agua superficial.

PD : Precipitación directa es la precipitación que cae directamente sobre la superficie de agua libre del cauce.

En la Figura 4.1 se presenta esquemáticamente estos tipos de escurrimiento incorporando además la precipitación y la infiltración, para completar el ciclo a nivel de cauce, donde P es la precipitación propiamente dicha e I la infiltración, que es parte de la precipitación que circula verticalmente en las capas superficiales del suelo.

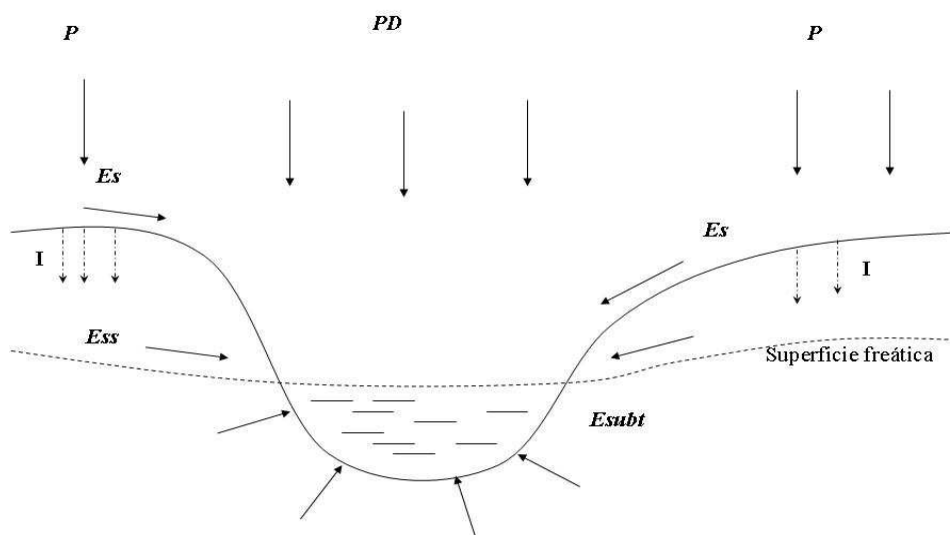


Figura 4.1. Esquema de los componentes del escurrimiento.

El escurrimiento se produce cuando el exceso de precipitación comienza a fluir por el suelo. Ésta está alimentada por el agua disponible en superficie durante una tormenta. Los picos y variaciones bruscas del flujo superficial se conocen como escurrimiento directo, mientras que el flujo con pocas variaciones en los períodos sin lluvia se denomina flujo base.

La forma en que el agua fluye por la superficie puede ser de diferentes maneras:

- Flujo Hortoniano: Horton (1933) consideró que el escurrimiento se producía al moverse el exceso de precipitación en forma de flujo en láminas cuya profundidad podía medirse en milímetros. El exceso de precipitación instantánea es la diferencia entre la intensidad de precipitación y la infiltración. A medida que el agua circula se infiltra.
- Flujo concentrado o en canales: Es la principal forma de flujo de agua superficial y a él contribuyen los demás procesos de flujo superficial.
- Flujo subsuperficial: Se da en superficies con vegetación, cuando la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de lluvia
- Flujo subsuperficial de saturación: Se da cuando el suelo se satura originando flujo superficial. Es común en las partes bajas de las pendientes.

FACTORES QUE AFECTAN EL ESCURRIMIENTO DE UNA CUENCA

El volumen total del escurrimiento y sus valores máximos están influenciados directa o indirectamente por características climatológicas y biofísicas. Podemos considerar los más importante aquellos que están relacionados con las características de la cuenca y con las

precipitaciones:

- a) Factores agroclimáticos: Distribución en el tiempo, volumen e intensidad de las precipitaciones. La intensidad y la duración de las precipitaciones determinan el volumen total de agua escurrida en la cuenca. Las lluvias de baja intensidad y larga duración saturan la capacidad de retención del suelo. Las lluvias de gran intensidad provocan desagregado de las partículas del suelo sellando la superficie, disminuyendo la tasa de infiltración y aumentando el escurrimiento superficial.
- b) Factores fisiográficos: entre ellos se pueden destacar la extensión, la forma y la pendiente media de la cuenca; las condiciones de la superficie del terreno como son la geología, tipo de suelo, permeabilidad, labores de cultivos, densidad de drenaje y capacidad de evacuación de la misma, entre otros.

En las Figuras 4.2 y 4.3 se observa la diferente capacidad de reacción de generación y tiempo de descarga que presenta una cuenca en relación a dos situaciones de precipitación (una normal y una tormenta de alta intensidad) según los tipos de cubrimiento del suelo. En el primer caso se presenta una cuenca con presencia de una mezcla de árboles y hierbas, que representa un área tipo huerta; en el segundo caso la presencia de urbanizaciones es de 38%; en el tercer tipo de uso del suelo existe un distrito urbano desarrollado con complejos industriales, generando una mayor área impermeable y por último se presenta un caso extremo de medición de escurrimiento en un sitio con un cubrimiento impermeable del 98% (Gaspari, 2002 b).

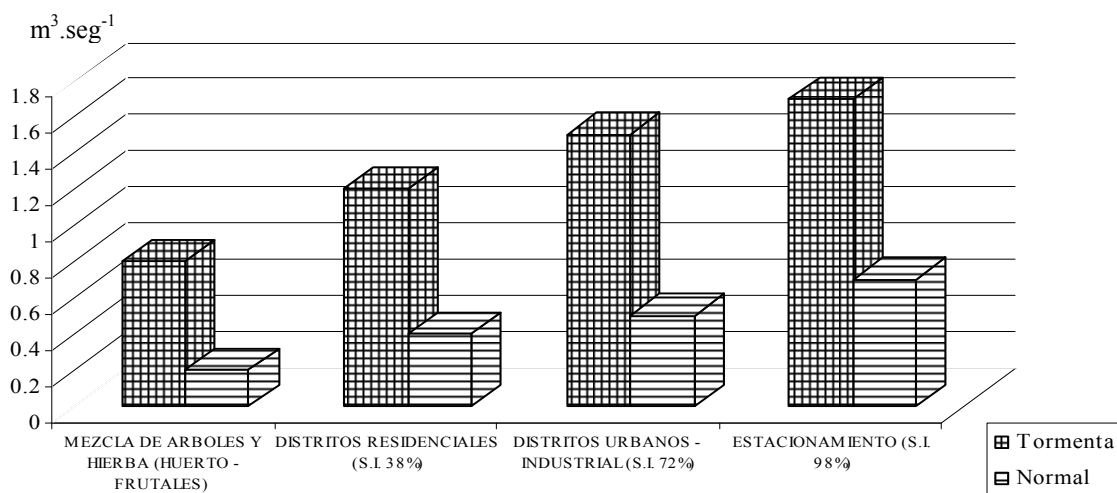


Figura 4.2. Caudal generado en una cuenca con cuatro cubrimientos del suelo diferentes para dos situaciones de precipitación.

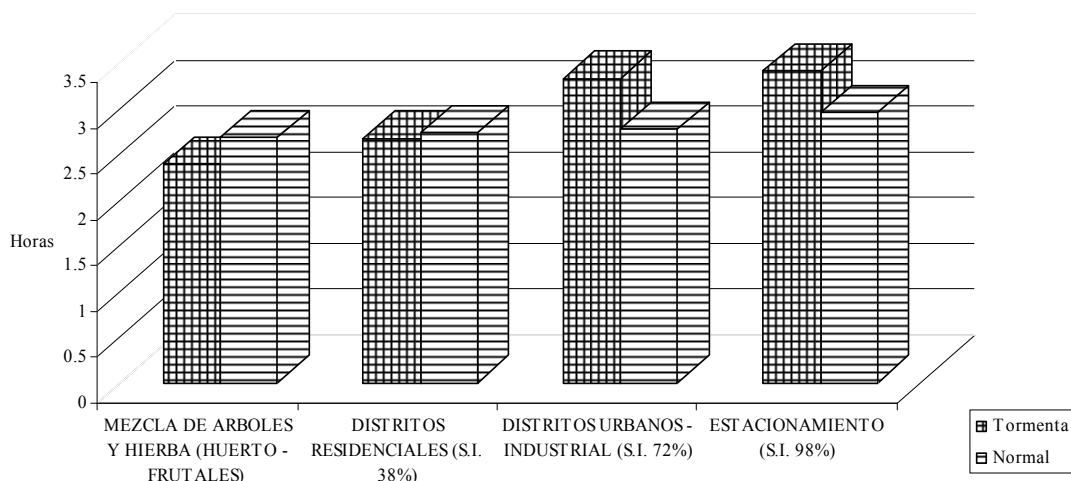


Figura 4.3. Tiempos de descarga generados en una cuenca con cuatro cubrimientos del suelo diferentes para dos situaciones de precipitación.

MODELOS PARA DETERMINAR EL ESCURRIMIENTO

Los métodos paramétricos utilizan Fórmulas empíricas basadas en datos experimentales que permiten determinar el escurrimiento en las cuencas de recepción. La simplicidad con que se trata el fenómeno en estos casos, hace que los resultados tengan un valor orientativo para periodos de tiempo suficientemente amplios, siendo desaconsejable su uso con series meteorológicas cortas o incompletas. Cuanto menos factores o parámetros intervienen, más sencilla resulta la Fórmula de aplicar, pero ofrece menores garantías (López Cadenas del Llano, 1996). A continuación se presenta la base de algunos modelos para determinar escurrimiento.

1. **Fórmula de Becerril:** Considera precipitación media anual (P : mm), la superficie de la cuenca (A : km²) y un coeficiente que define el tipo escurrimiento según el clima de la región (β), proporcionando directamente el aporte anual (Q : hm³) (Fórmula 4.2) y se aplica en grandes cuencas.

$$Q = \beta \cdot \left(\frac{P^{\frac{1}{2}} \cdot A}{1000} \right)$$

Fórmula 4.2. Fórmula de Becerril.

Según López Cadenas del Llano (1996) el valor de β para diferentes regiones de España se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Coeficientes β para diferentes regiones de España.

Región	β
Muy secas	0,007
Secas	0,010
Medianamente húmedas	0,012 – 0,014
Lluviosas	0,013 – 0,016
Muy lluviosas	0,018 – 0,020

2. **Fórmula de Coutagne:** Se basa en la determinación del déficit de escurrimiento anual (evapotranspiración del período considerado: ET (m)). La determinación de ET se basa en datos de precipitación anual (P: m) y temperatura media anual (T °C) (Fórmula 4.3).

$$ET = P - \lambda \cdot P^2$$

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T}$$

Formula 4.3. Fórmula de Coutagne.

Para la aplicación de la Fórmula de Coutagne, se debe dar que: $1/8 \lambda \leq P \leq 1/2 \lambda$.

Si $P = 1/8 \lambda$, entonces no se genera escurrimiento, en cambio si $P = 1/2 \lambda$ la ET es prácticamente independiente de P. En este caso puede utilizarse que $ET = 210 + 30 \cdot T$

3. **Fórmula de Turc:** Estudia la relación entre la precipitación y temperatura, incorporando un coeficiente L. Turc desarrolló esta Fórmula a partir de 254 observaciones realizadas en todos los climas del mundo. Al considerar el tipo de clima de la cuenca (mediante la clasificación de Turc), se complementa la evaluación del factor climático. Se utiliza la Fórmula 4.4 para determinar el Déficit de escurrimiento (D):

$$D = \frac{P}{\left(\frac{0,9 + P^2}{L^2}\right)^{1/2}}$$

Fórmula 4.4. Fórmula de Turc.

Siendo

P: Precipitación anual (mm)

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3$$

T: Temperatura media anual (°C)

Por ello:

Si $P > (0,632 \cdot L)$

→ clima húmedo

Si $(0,316 \cdot L) < P < (0,632 \cdot L)$

→ clima semiárido

Si $P < (0,316 \cdot L)$

→ clima árido

A partir de ello se establece el Coeficiente de escurrimiento (C), según la Fórmula 4.5.

$$C = \frac{(P - I) - D}{P}$$

Fórmula 4.5. Coeficiente de escurrimiento.

Siendo

P: Precipitación media (mm).

I: Infiltración (mm)

D: Déficit de escurrimiento

4. **Diagrama de Langbein:** Langbein realizó un diagrama que permite calcular el escurrimiento conociendo la precipitación y las temperaturas medias anuales como se observa a continuación:

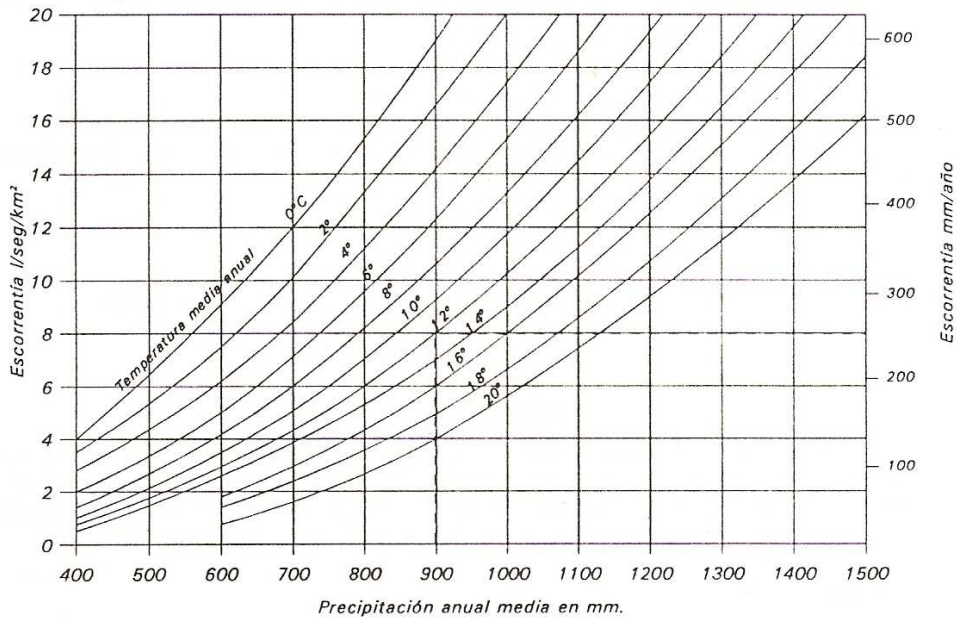


Diagrama de Langbein

CONCEPTO DE HIDROGRAMA

Un hidrograma es la representación gráfica de las descargas instantáneas de un curso de agua en función del tiempo. El agua que escurre en un curso de agua, proviene de una o varias de las siguientes fuentes: escurrimiento superficial; escurrimiento subsuperficial o hipodérmico; escurrimiento subterráneo; precipitación directa en el curso de agua y sus tributarios. (Bustamante, 1984). La expresión gráfica de un hidrograma es del tipo $Q = f(t)$ y puede representarse a escalas muy diversas (Figura 4.5).

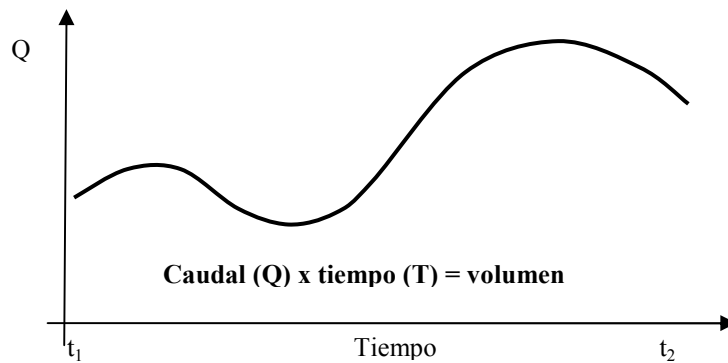


Figura 4.5. Representación gráfica de un hidrograma de tipo $Q = f(t)$

Chow *et al.* (1994) consideran que los hidrogramas, o hidrogramas de caudal como él los denomina, son gráficos o tablas que muestran la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. También resalta que el hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento de una cuenca de drenaje particular. En relación a ello, el área que se encuentra por debajo de un hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo considerado. Existen diferentes maneras de cuantificar esta área:

1. Si se posee un hidrograma, se puede sacar el área por planimetría y de esta manera obtener el volumen (Figura 4.5). Por ejemplo: si suponemos que 1 cm^2 en el gráfico corresponde a 1 día en el eje de abscisas y a $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el eje de ordenadas; entonces cada cm^2 bajo el hidrograma corresponderá a un volumen de agua igual a $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 86400 \text{ s} = 172800 \text{ m}^3$, expresando una unidad de volumen, representada por **Caudal (Q) x Tiempo (T) = Volumen (V)**
2. Si el fragmento de hidrograma corresponde a una ecuación, bastará con calcular la integral definida entre t_1 y t_2 de esa ecuación.
3. Si se dispone de una serie de caudales tomados a incrementos iguales, el volumen se calcula como $Q_1 \cdot \Delta t + Q_2 \cdot \Delta t + \dots + Q_i \cdot \Delta t$

En la Figura 4.6 se presenta una simulación de la generación de caudal generado por una tormenta de 150 mm de precipitación en seis horas de duración en una cuenca de 100 km^2 . Además se presenta el hidrograma generado para tres condiciones de uso de suelo diferentes, visualizando el caudal pico en cada caso. Considerando la cuenca con cultivo agrícola con valor 100% de caudal generado, la cuenca con una cobertura boscosa el caudal pico (Q_p) alcanza solo el 69% del mismo y la cubierta de pastizal tiene un valor medio de 84% con respecto a la agrícola.

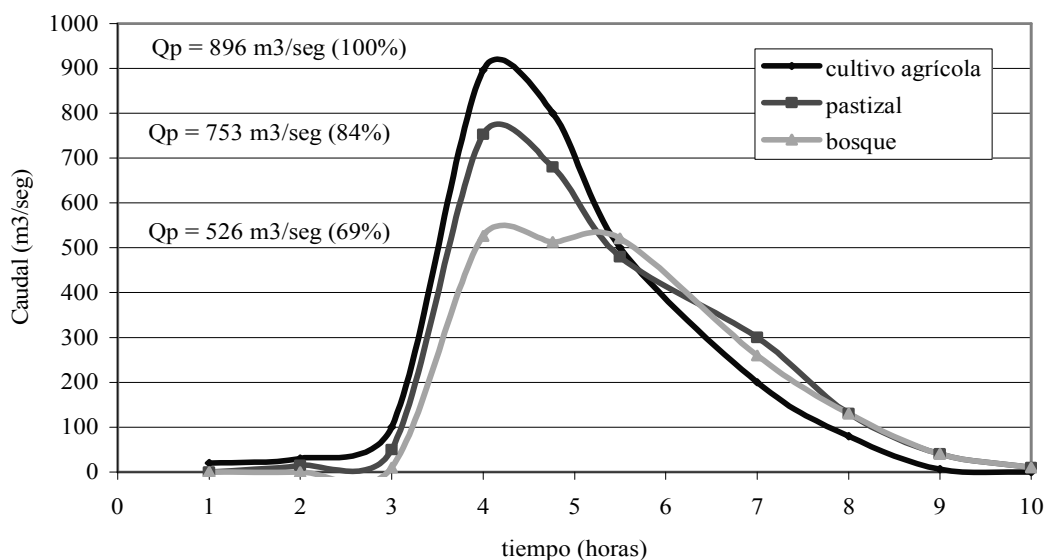


Figura 4.6. Hidrogramas simulados para una precipitación de 150 mm en seis horas.

En la Figura 4.7 se presentan los hidrogramas de simulación de una misma cuenca hidrográfica para tres intensidades de precipitación diferentes y para la misma cuenca en condiciones actuales y con medidas de manejo y conservación de suelos (ordenación agrohidrológica).

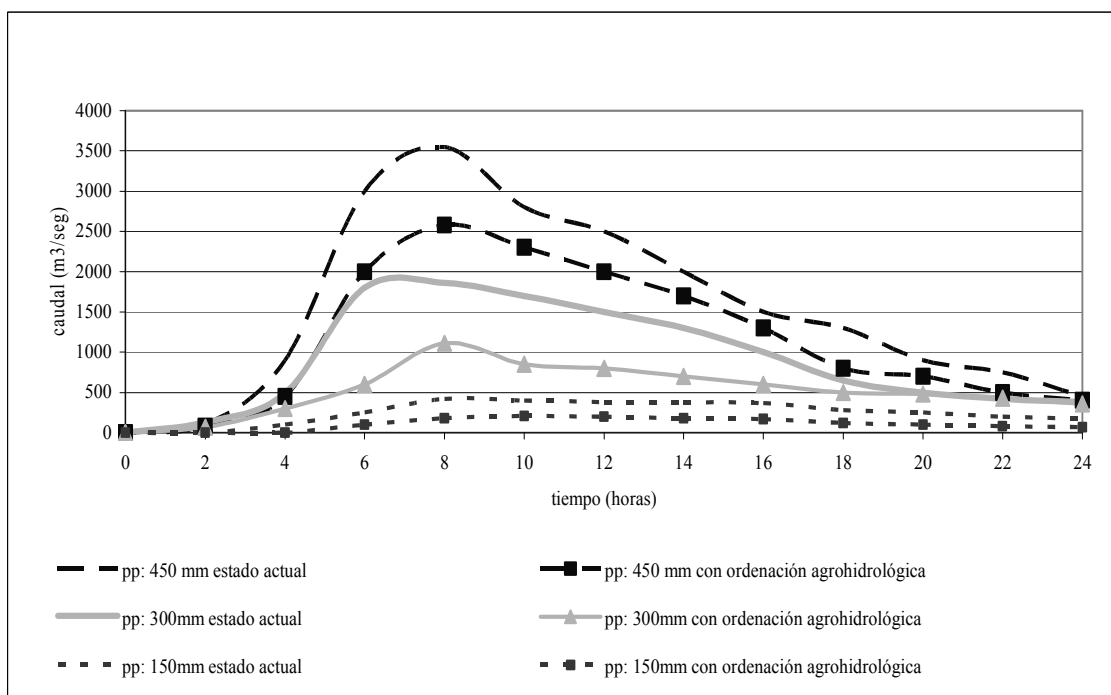


Figura 4.7. Hidrogramas de simulación de la influencia de la ordenación agrohidrológica.

En la Figura 4.7 se interpreta muy claramente que la ordenación agrohidrológica permite disminuir el caudal generado en la cuenca, como se presenta en la Tabla 4.2. Además se visualiza que la intensidad (cantidad de lluvia para la misma duración de la tormenta) aumenta considerablemente la curvatura del hidrograma.

Tabla 4.2. Caudales máximos generados para la situación de los hidrogramas de Figura 4.7

Precipitación (mm)	Caudal al Pico ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	Estado actual	Con ordenación agrohidrológica
450	3.547	2.580
300	1.863	1.141
150	422	208

ELEMENTOS DE UN HIDROGRAMA

Los hidrogramas pueden ser simples o compuestos, según representen a una sola tormenta o a una sucesión de las mismas (Mármol, 2006).

El estudio de los hidrogramas anuales muestra que los picos de crecientes se producen en forma poco frecuente y son el resultado de la lluvia por sí sola o acompañada por el derretimiento de la nieve (Chow *et al.*, 1994). Si tomamos estas lluvias de forma individual y observamos el hidrograma que genera (hidrograma de crecida, hidrograma de tormenta o hidrograma total), podremos distinguir las partes o componentes característicos del mismo (Figura 4.8).

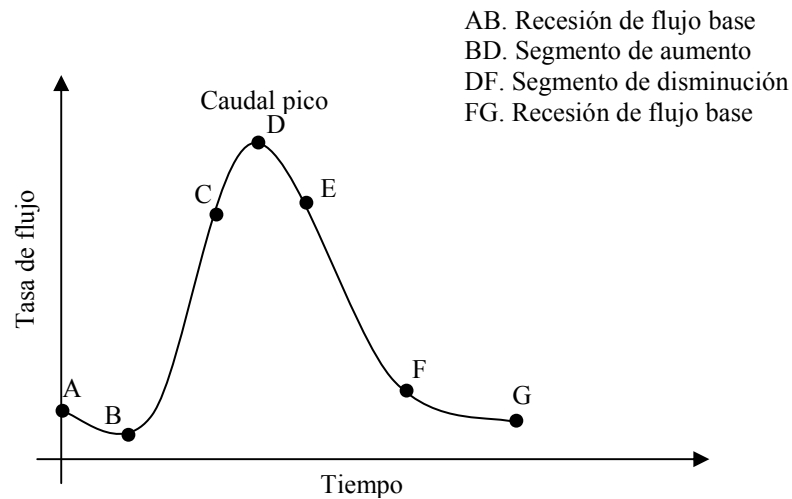


Figura 4.8. Elementos de un hidrograma, modificado de Chow *et al.* (1994).

En la Figura 4.8 se presenta un hidrograma con los elementos que la componen, expresando la relación entre la precipitación caída en un sitio y la generación del escurrimiento. Cada punto representado en la curva del hidrograma expresa lo siguiente:

- Tramo AB es la curva de agotamiento antecedente;
- B, es el comienzo de la creciente; se verifica con un aumento de agua en la sección de aforos;
- C, es el punto de inflexión, pasando la curva de cóncava a convexa;
- D, es la punta o pico del hidrograma, correspondiente al máximo caudal que ha generado el aguacero.
- Tramo BD, es la curva de concentración; siendo el tramo comprendido desde que se inicia el aumento de caudal en el río como consecuencia de la lluvia hasta llegar al máximo;
- Tramo DF, es la curva de descenso, en que disminuye el escurrimiento superficial hasta anularse en F;
- E, es el punto de inflexión;
- Tramo CE, es la cresta del hidrograma.
- Tramo FG, es la curva de agotamiento del hidrograma.

En el punto F comienza la curva de agotamiento y los aportes del caudal Q proceden únicamente del escurrimiento subterráneo. Es la que mantiene el caudal en los períodos que no llueve en la cuenca. Esta agua se alumbra a través de los manantiales o vertientes. Cuando no se extingue la corriente durante el estiaje, la curva de agotamiento se hace asintótica para un valor mínimo que se denomina caudal de base (Mármol, 2006). Es decir la curva de agotamiento se enlaza con la curva de concentración de la lluvia siguiente.

Observando el hidrograma de la Figura 4.9, se puede identificar diferentes momentos particulares, que representan los siguientes tiempos:

- tiempo al pico (t_p) es el momento en que se produce el máximo caudal (caudal pico) durante de la tormenta.
- tiempo de respuesta (lag) es aquel que se expresa desde el centro del hietograma (centroide) hasta la punta del hidrograma. Equivale al retardo entre la máxima intensidad de la lluvia y el máximo caudal.
- tiempo de crecida (t_{rec}) es el transcurrido entre el inicio de la crecida y la punta del hidrograma.
- tiempo de concentración (t_c) es el transcurrido desde el final de la lluvia neta hasta el final del escurrimiento superficial.
- tiempo de base (t_b), equivale a la duración del escurrimiento superficial. Es el tiempo transcurrido entre el inicio de la crecida y el final del escurrimiento superficial.

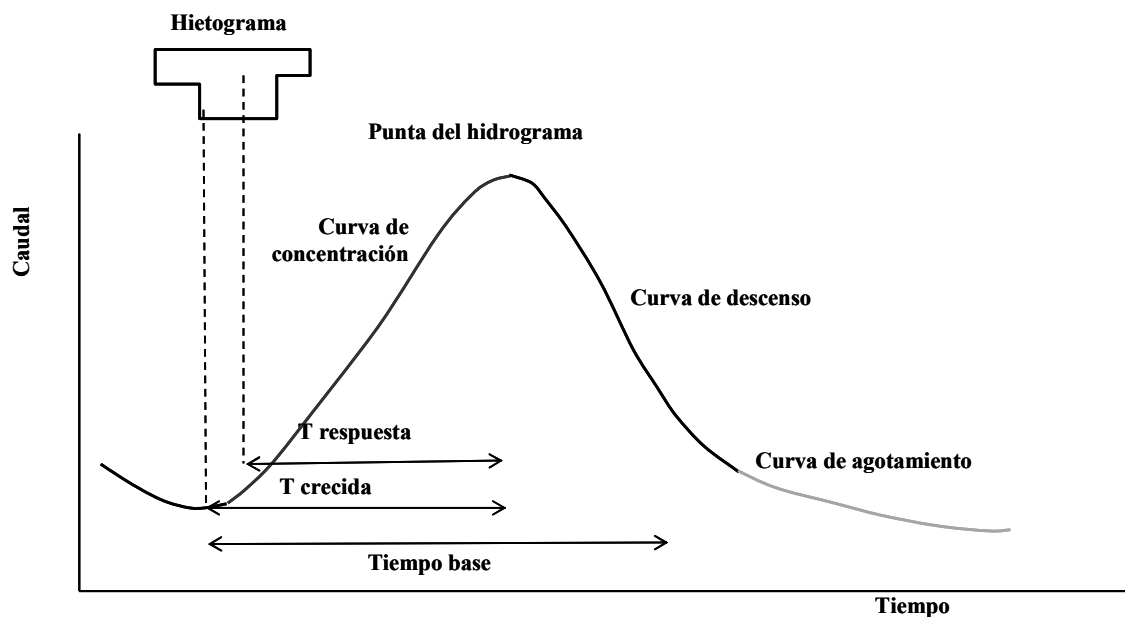


Figura 4.9. Partes de un hidrograma.

En una cuenca real, si se trata de una gran cuenca, cuando se producen precipitaciones, es normal que el caudal previo a las precipitaciones no sea nulo, aunque va agotándose lentamente. Según Sánchez San Román (2004) un hidrograma de crecida puede representarse esquemáticamente con su hietograma, como se expresa en la Figura 4.10.

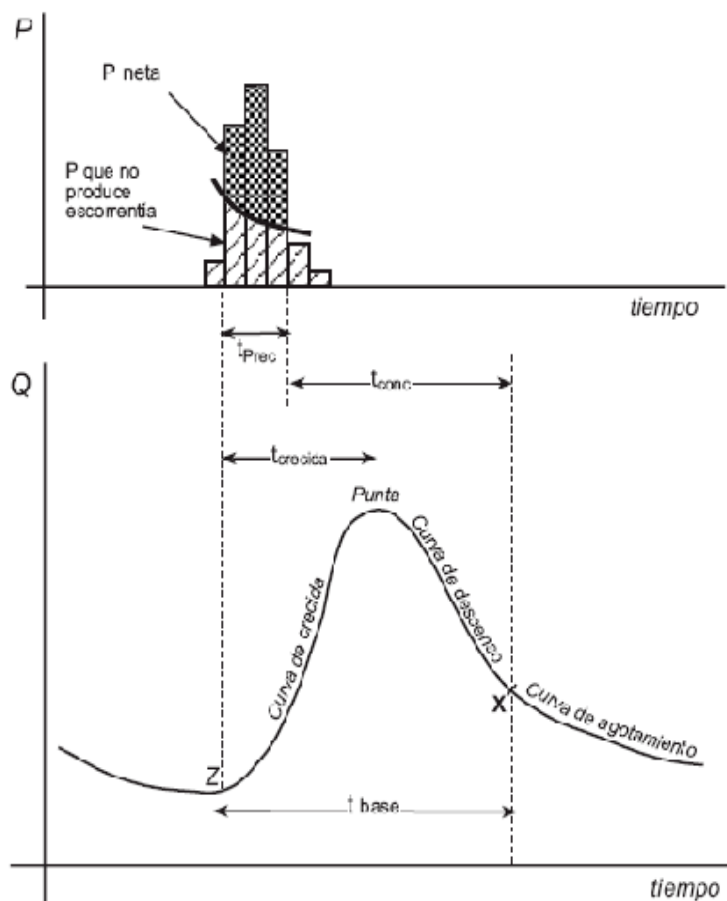


Figura 4.10. Relación entre hietograma e hidrograma de crecida.

Según la Figura 4.10, el hietograma distingue dos sectores, siendo la parte inferior la precipitación que se infiltra y la superior la que produce escurrimiento directo, denominada esta última precipitación neta o efectiva. La separación entre ambas varía con el tiempo.

El punto marcado como X es el momento en que todo el escurrimiento directo provocado por esas precipitaciones ya ha pasado. El agua aforada desde ese momento es el escurrimiento básico, que, si se trata de una cuenca sin almacenamiento superficial, corresponde al escurrimiento subterráneo.

Es importante notar que la nueva curva de agotamiento (X) comienza más alto que el punto Z, en el que se encontraba el agotamiento antes de la crecida, es decir de la precipitación antecedente. Esta situación se debe a que parte de la precipitación que infiltró está ahora alimentando al cauce.

En un hidrograma real las precipitaciones son intermitentes en el tiempo y dispersas e irregulares en el espacio de la cuenca receptora que está siendo aforada, por lo que el hidrograma aparecerá con un trazado irregular.

HIDROGRAMA DE UNA CRECIDA

Para comprender la forma de un hidrograma, se puede suponer una precipitación constante sobre un canal particular con un punto de aforo al final del mismo (Figura 4.11).

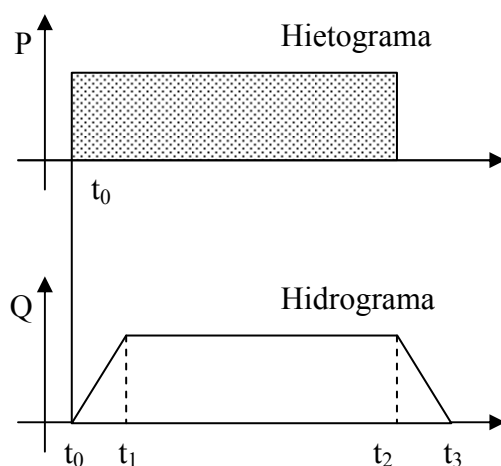


Figura 4.11. Formación del hidrograma según el hietograma.

Interpretando la Figura 4.11 se obtiene que:

1. El hidrograma comenzará a generar la curva de crecida desde el instante t_0 en que comienza la precipitación.
2. El caudal irá aumentando hasta t_1 , momento en que llega al punto de salida la primera gota que cayó en el punto más alejado del canal.
3. A partir de ese momento, el caudal se mantendrá constante y así seguirá mientras dure la precipitación constante, expresado entre t_1 y t_2 , (t_p).
4. Cuando termine la precipitación, t_2 , el caudal irá disminuyendo hasta llegar al punto de aforo.
5. En el instante en que la última gota que cayó en el punto más alejado llega a la salida (t_3) el caudal se hace 0.
6. El intervalo de t_0 a t_1 es igual al intervalo de t_2 a t_3 , representando el tiempo que tarda en llegar a la salida una gota caída en el punto más alejado de ésta, es decir el tiempo de concentración (t_c) (Fórmula 4.6).

$$t_{\text{base}} = t_p + t_c$$

Fórmula 4.6. Determinación del tiempo base.

Donde, t_{base} es el tiempo base del hidrograma, t_p la duración de la precipitación y t_c el tiempo de concentración.

La precipitación en una cuenca hidrográfica se expresa en forma diferencial según el sitio particular donde se genere el evento, representando las zonas de igual tiempo de llegada de una gota de lluvia a la salida. Estas líneas de igual tiempo de llegada se denominan isocronas. Por ejemplo: tras el comienzo de la precipitación, en el primer Δt llegaría el agua caída en la

primera banda, en el segundo Δt llegaría el agua caída en las bandas 1° y 2°, y así sucesivamente hasta culminar la precipitación.

El hidrograma tiene una meseta horizontal debido a que el tiempo de precipitación es superior al tiempo de concentración de la cuenca. Si no fuera así, es decir, que la duración de las precipitaciones fuera menor que el tiempo de concentración, no se llegaría a alcanzar la meseta de caudal constante, comenzando a descender antes de alcanzar ese caudal constante (Figura 4.12).

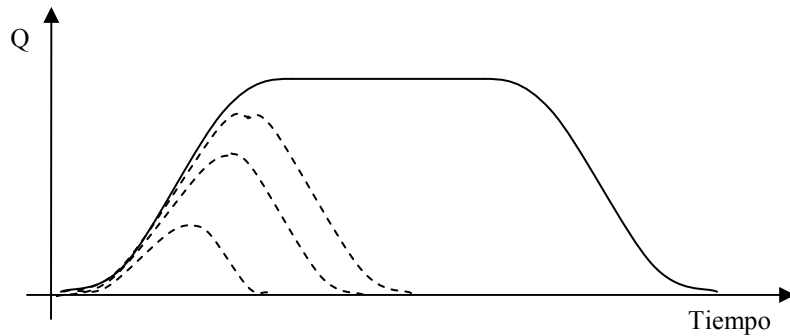


Figura 4.12. Hidrograma con diferente duración de tormentas.

ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS

El análisis de hidrogramas implica separar el caudal directo, del caudal base. Este procedimiento se puede aplicar en lugares donde existan datos de aforo con detalles suficientes para la obtención de hidrogramas de precipitaciones.

Para un análisis de hidrogramas se consideran tormentas cortas e intensas, separando las superficies del mismo correspondientes al volumen de agua que causa el escurrimiento superficial, y por otro lado la correspondiente al caudal base del río originado por escurrimientos lentos provenientes de otras precipitaciones anteriores. En el hidrograma de la Figura 4.13 se puede observar la relación precipitación-escurrimiento (Dufilho, 2004).

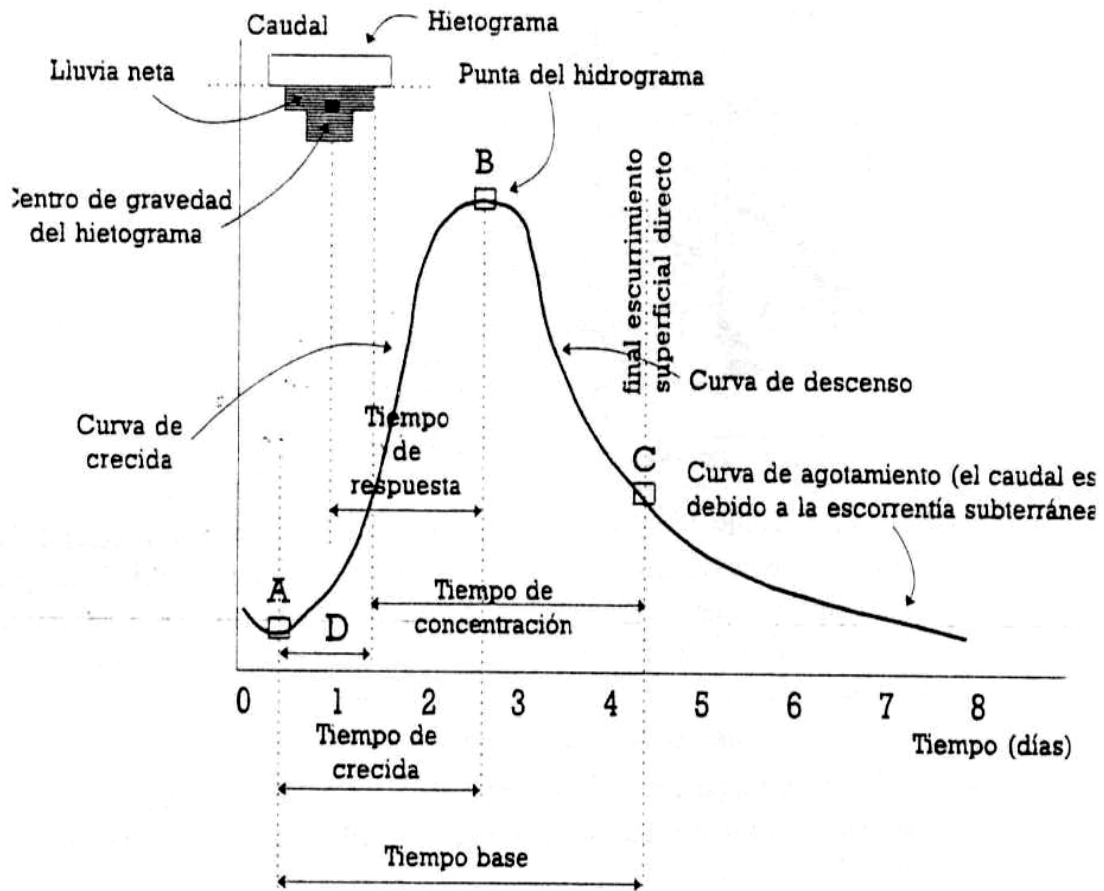


Figura 4.13. Hidrograma y la relación entre precipitación (P) – escurrimiento (Q).

Dado que no existe una base real para una distinción entre el escurrimiento directo y el aporte de agua subterránea en el caudal de una corriente en un instante cualquiera, y puesto que las definiciones de estas componentes son relativamente arbitrarias, el método usual de separación es igualmente arbitrario (Linsley *et al*, 1988).

Existen distintas metodologías basadas en la rapidez o lentitud en que se manifiesta el escurrimiento subterráneo (flujo base) al aparecer el escurrimiento directo producto de una precipitación en la representación de un hidrograma (Figura 4.14).

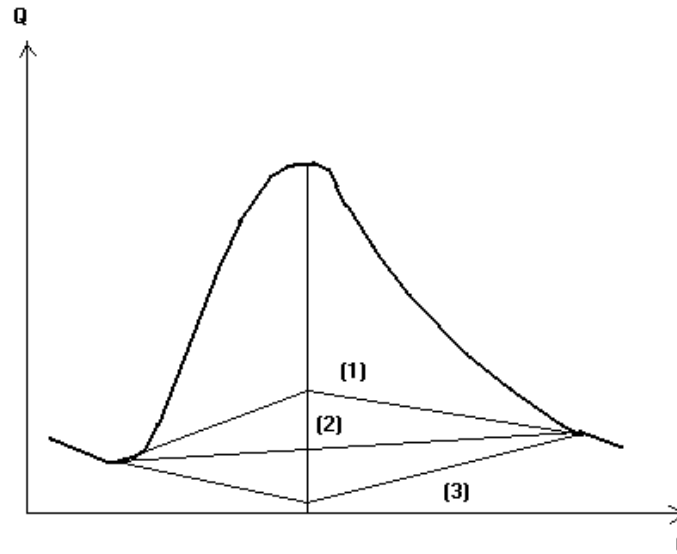


Figura 4.14. Procedimientos simples para la separación de flujos base.

- Siendo: [1] Escurrimiento subterráneo rápido.
 [2] Escurrimiento subterráneo intermedio.
 [3] Escurrimiento subterráneo lento o más común.

A partir de la Figura 4.14, se considera como regla práctica, que desde el tiempo en que aparece el caudal pico existe una cantidad de tiempo en el cual cesa el escurrimiento directo. Este tiempo (N), expresado en días, está relacionado al área de la cuenca y puede aproximarse por la relación de la Fórmula 4.7.

$$N = 0,8 \cdot A^{0,2}$$

Fórmula 4.7. Tiempo de terminación del escurrimiento directo (N).

Siendo A el área de la cuenca en km^2 .

El valor de N probablemente puede determinarse mejor observando un cierto número de hidrogramas, teniendo presente que el tiempo base total no debe ser excesivamente largo y que el incremento en aporte de agua subterránea no debe ser muy grande (Linsley *et al.*, 1988).

El razonamiento que sustenta a este procedimiento es que, a medida que sube el nivel del agua en el canal, se presenta un flujo desde el canal hacia las orillas. De ahí que el flujo base debe disminuir hasta que el nivel en la corriente comience a descender y el agua almacenada en las orillas regrese al canal (Linsley *et al.*, 1988).

Finalmente, se puede decir, que este primer método consiste básicamente en extender la curva de agotamiento del hidrograma anterior desde el punto Z (Figura 4.10) o A (Figura 4.13),

donde empieza el crecimiento de los caudales, hasta el instante en el que se produce el pico del caudal o punta del hidrograma (punto B de la Figura 4.13).

Luego, en función del valor N calculado, se obtendrá la recta ACB (Figura 4.15), separando de esta manera el escurrimiento superficial del subsuperficial.

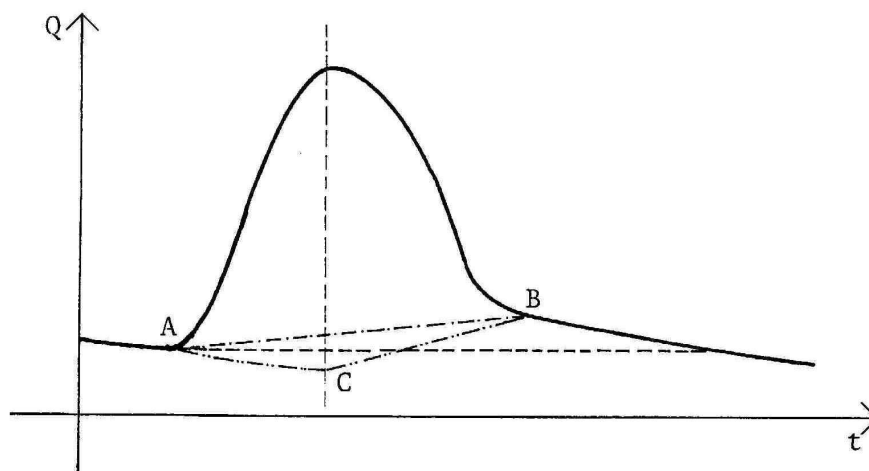


Figura 4.15. Distintas metodologías de separación de escurrimiento directo o superficial y subterráneo.

Puede realizarse de manera sencilla gráficamente (Figura 4.15) prolongando la curva de agotamiento previa a la crecida hasta la vertical que pasa por el caudal punta del hidrograma, generando el tramo AC. Posteriormente, unir este punto C con el punto que indica el comienzo del agotamiento B, generando el tramo CB. De esta forma se puede considerar que la línea ACB expresa dentro del área superior del hidrograma, el caudal que genera escurrimiento superficial, y debajo de esta línea ACB se establece el escurrimiento subterráneo.

Otro método elemental para el análisis de hidrogramas, permite separar el escurrimiento directo del subterráneo, mediante una recta AB (Figura 4.15) que une el punto en el cual comienza el crecimiento de los caudales con el punto que corresponde al fin del escurrimiento directo, es decir, un punto de inflexión de la curva de descenso (Linsley *et al.*, 1988; Orsolini *et al.*, 2000).

MODELO GENERAL DE UN SISTEMA HIDROLÓGICO

El modelo general de un sistema hidrológico se basa en la Ecuación integral de continuidad que expresa la relación lineal (ideal) entre la cantidad de agua almacenada en una cuenca luego de una precipitación. Este almacenaje depende del flujo de entrada (intensidad de lluvia) y del de salida (caudal de aforo a la salida de la cuenca) (Fórmula 4.8.) (Linsley *et al.*, 1988; Orsolini *et al.*, 2000).

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

Fórmula 4.8. Ecuación integral de continuidad.

Siendo:

S: Cantidad de agua almacenada en un sistema hidrológico

I: Tasas de flujo de entrada

Q: Tasas de flujo de salida

Si suponemos la existencia de un embalse cualquiera, la cantidad de almacenamiento aumenta y disminuye con el tiempo en respuesta a las tasas de flujo I - Q, y por lo tanto también se modifican sus tasas de cambio (Fórmula 4.9):

$$\frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \frac{d^3I}{dt^3}, \dots, \frac{d^nI}{dt^n} \quad \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \frac{d^3Q}{dt^3}, \dots, \frac{d^nQ}{dt^n}$$

Fórmula 4.9. Relación entre tasas de cambio.

Estableciendo esta suposición en la ecuación integral de continuidad, se representa la cantidad de almacenamiento en cualquier momento a través de la función de la Fórmula 4.10.

$$S = f \left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \frac{d^3I}{dt^3}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \frac{d^3Q}{dt^3}, \dots \right)$$

Fórmula 4.10. Función de almacenamiento según Ecuación integral de continuidad.

La Ecuación integral de continuidad y la de almacenamiento deben resolverse simultáneamente, de modo de que el cálculo de Q(t) pueda evaluarse a partir de cada I(t), como funciones integradas en el tiempo (Chow *et al.*, 1994).

SISTEMA LINEAL EN TIEMPO CONTÍNUO

Orsolini *et al.* (2000) definen que en un sistema lineal, como se considera al sistema hidrológico, la ecuación de almacenamiento 4.10, en función de la Ecuación integral de continuidad, se puede expresar con la Fórmula 4.11.

$$S = a_1 Q + a_2 \frac{dQ}{dt} + a_3 \frac{d^2 Q}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^{n-1} Q}{dt^{n-1}} + b_1 I + b_2 \frac{dI}{dt} + b_3 \frac{d^2 I}{dt^2} + \dots + b_m \frac{d^{m-1} I}{dt^{m-1}}$$

Fórmula 4.11. Ecuación de almacenamiento.

Siendo: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ y $b_1, b_2, b_3, \dots, b_m$, coeficientes constantes e invariantes en el tiempo.

A partir de aplicar el método de sustitución por diferencial en la Fórmula 4.11 se obtiene el Modelo general del sistema hidrológico (Fórmula 4.12).

$$Q(t) = \frac{M(D)}{N(D)} \cdot I(t)$$

Fórmula 4.12. Modelo general del sistema hidrológico

Donde $M(D) / N(D)$ es una función de transferencia del sistema, que describe la respuesta salida a una secuencia de entrada.

Esta función de transferencia del modelo general establece el espacio temporal desde la entrada de agua al sistema $I(t)$ hasta la generación del caudal $Q(t)$ (Fórmula 4.12).

La función de transferencia de sistemas hidrológicos tiene dos principios básicos en operaciones de sistemas lineales:

1. Principio de **Proporcionalidad** ($cf(Q)$): representado por la relación en $f(Q)$ por una constante c .
2. Principio de aditividad o **Superposición**: Si $f_1(Q)$ y $f_2(Q)$ son funciones de una ecuación, que sumadas también son solución.

FUNCIÓN RESPUESTA DE IMPULSO

La respuesta de un sistema lineal se caracteriza únicamente por su función impulso - respuesta. Si un sistema recibe una entrada unitaria aplicada instantáneamente (un impulso unitario) en el tiempo t_0 (representada por una tormenta), la respuesta del sistema en un tiempo posterior (t) está descrita por la función respuesta de impulso unitario $u(t-t_0)$, siendo $(t-t_0) = (t-\tau)$ tiempo de retardo desde que se aplicó el impulso (Figura 4.16) (Chow *et al.*, 1994; Orsolini *et al.* 2000).

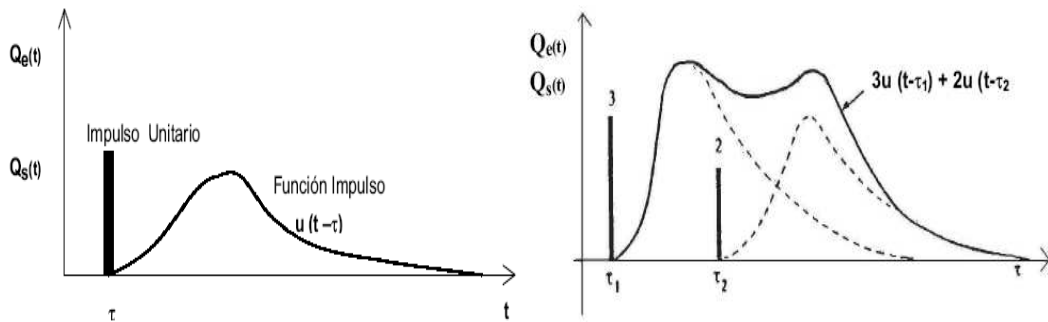


Figura 4.16. Respuestas de sistemas lineales a entradas de impulsos.

Izquierda: Función respuesta impulso unitario; Derecha: Función respuesta de dos impulsos.

La Figura 4.16 izquierda representa un impulso unitario (tormenta) que genera el hidrograma que lo acompaña, representando la función del impulso. La Figura 4.16 derecha expresa la secuencia de dos impulsos de diferente intensidad y sus respectivos hidrogramas (con líneas punteadas) y su hidrograma total (con línea llena) (Chow *et al.*, 1994).

En una tormenta, la intensidad de precipitación $I(t)$, la función que genera el impulso unitario $u(t-t_0)$ y la duración dt , definen la altura de precipitación, expresando el escurrimiento según la Fórmula 4.13, por medio de la integración de dichos factores. Esta metodología para determinar el escurrimiento por medio de la integración de la intensidad y el impulso en el tiempo se denomina método de convolución.

$I(t) \cdot u(t-t_0) \cdot dt$	Integrando:
$Q(t) = \int_0^t I(t_0) \cdot u(t-t_0) \cdot dt_0$	Integral de convolución

Fórmula 4.13. Método de convolución para determinar escurrimiento.

El método de convolución ilustra un proceso de sumas de respuesta, como se representa en la Figura 4.17. (Chow *et al.*, 1994).

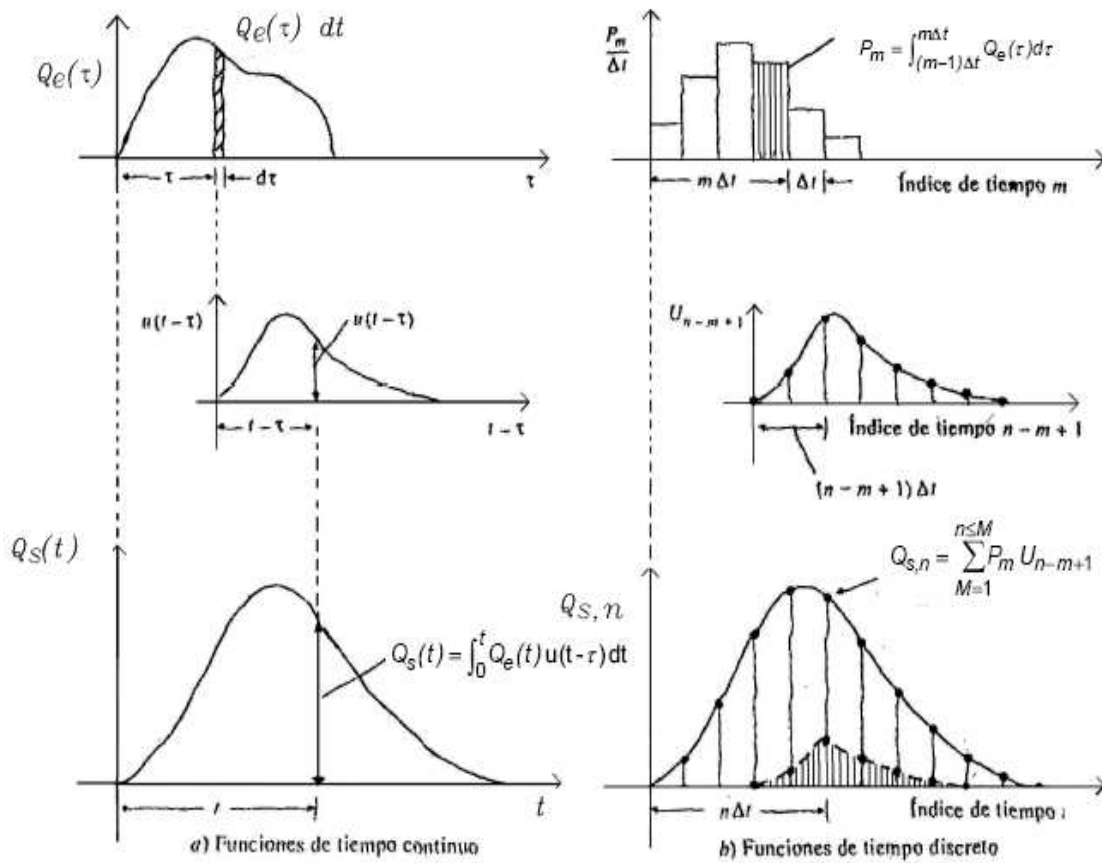


Figura 4.17. Procesos de convolución en dominios de tiempo continuo y discreto.

Al considerar, en hidrología, intervalos discretos, como ser un hietograma de lluvia, se necesita considerar dos funciones adicionales:

1. Función Respuesta de Paso

Según Chow *et al.* (1994), una entrada de paso unitario es una entrada que pasa de la tasa 0 a 1 en el tiempo 0, y continúa indefinidamente a esta tasa (Fórmula 4.14).

La salida del sistema es su **función respuesta de paso unitario** $g(t)$. Con $I(t_0) = 1$ para $t_0 \geq 0$ es:

$$Q(t) = g(t) = \int_0^t u(t - t_0) \cdot dt_0$$

Fórmula 4.14. Función respuesta de paso unitario

2. Función Respuesta de Pulso

Una entrada de pulso unitario es una entrada unitaria de duración Δt . La tasa de entrada es $I(t_0) = 1/\Delta t$, $0 \leq t_0 \leq \Delta t$ y 0 en cualquier otro lugar.

La **función respuesta de pulso unitario** resulta de la aplicación de los principios de proporcionalidad y superposición, descrito anteriormente (Chow *et al.*, 1994).

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot [g(t) - g(t - \Delta t)]$$

Formula 4.15. Función respuesta de pulso unitario.

SISTEMA LINEAL EN TIEMPO DISCRETO

Las funciones respuesta de impulso, paso y pulso, se han definido en un dominio de tiempo continuo. Chow *et al.* (1994) expresan que en intervalos discretos (Δt), la representación de la función continua del tiempo en un dominio de tiempo discreto es como un sistema de información:

- Por pulso en el caso de la precipitación;
- Por muestra para mediciones de caudal, escurrimiento directo.

La función de entrada se expresa en la Fórmula 4.16., donde P_m : Precipitación (cm)

$$P_m = \int_{(m-1)\Delta t}^{m\Delta t} I(t_0) \cdot dt \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

Fórmula 4.16. Valor de la función entrada discreta por pulso (para precipitación)

La función salida se expresa en la Fórmula 4.17.

$$Q_n = Q \cdot (n \cdot \Delta t) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Fórmula 4.17. Valor de la función salida para caudales y escurrimiento directo

Donde Q_n : Valor instantáneo de la tasa de flujo ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Luego las variables de entrada y salida en un sistema de cuencas se registran con dimensiones diferentes y usan representaciones discretas de información diferente, debiendo integrarlas para su interpretación.

FUNCIÓN RESPUESTA DE PULSO DISCRETO

La función respuesta de pulso continuo $h(t)$ puede representarse en un dominio de tiempo discreto como una función de información por muestra U , que se expresa según la Fórmula 4.18.

$$U_{n-m+1} = h [(n - m + 1) \cdot \Delta t]$$

Fórmula 4.18. Función de la información por muestra.

La versión en tiempo discreto de la integral de convolución sería explicada en la Fórmula 4.19.

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m \cdot U_{n-m+1}$$

Fórmula 4.19. Ecuación de convolución discreta.

Según Chow *et al.* (1994) y Orsolini *et al.* (2000), se puede suponer que una precipitación neta o exceso de lluvia aplicada como entrada a un Sistema Hidrológico, genera una respuesta como el hidrograma de caudales, y que se puede representar con la **Ecuación de convolución**. A partir de ello se genera una metodología de aplicación de dicha ecuación, para lo cual se definen:

- Pulsos de entrada: $M = 4 (P_1, P_2, P_3, \text{ y } P_4)$.
- Para el primer intervalo de tiempo ($n = 1$), existe un solo término en la convolución, el correspondiente a $m = 1$ (Fórmula 4.20).

$$Q_1 = P_1 \cdot U_{1-1+1} = P_1 \cdot U_1$$

Fórmula 4.20. Ecuación de convolución para el primer intervalo de tiempo.

- Para el segundo intervalo de tiempo ($n = 2$) existen dos términos en la convolución, los correspondientes a $m = 1$ y 2 (Fórmula 4.22).

$$Q_2 = P_1 \cdot U_{2-1+1} + P_2 \cdot U_{2-2+1} = P_1 \cdot U_2 + P_2 \cdot U_1$$

Fórmula 4.22. Ecuación de convolución para el segundo intervalo de tiempo.

- Para el tercero y cuarto intervalo de tiempo ($n = 3$ y $n = 4$), existen tres y cuatro términos respectivamente a la convolución, los correspondientes a $m = 1, 2$ y 3 ; y a $m = 1, 2, 3$, y 4 (Fórmula 4.23).

$$Q_3 = P_1 U_{3-1+1} + P_2 U_{3-2+1} + P_3 U_{3-3+1} = P_1 U_3 + P_2 U_2 + P_3 U_1$$

$$Q_4 = P_1 U_{4-1+1} + P_2 U_{4-2+1} + P_3 U_{4-3+1} + P_4 U_{4-4+1} = P_1 U_4 + P_2 U_3 + P_3 U_2 + P_4 U_1$$

Fórmula 4.23. Ecuación de convolución para el tercer y cuarto intervalo de tiempo.

- Para ($n = 5$), es decir $n > M$, la sumatoria se limita a $m = 1, 2, 3$ y 4 , por lo tanto existirán no más de cuatro términos (Fórmula 4.24).

$$Q_5 = P_1 U_5 + P_2 U_4 + P_3 U_3 + P_4 U_2$$

$$Q_6 = P_2 U_5 + P_3 U_4 + P_4 U_3$$

$$Q_7 = P_3 U_5 + P_4 U_4$$

$$Q_8 = P_4 U_5$$

Fórmula 4.24. Ecuación de convolución para n intervalo de tiempo.

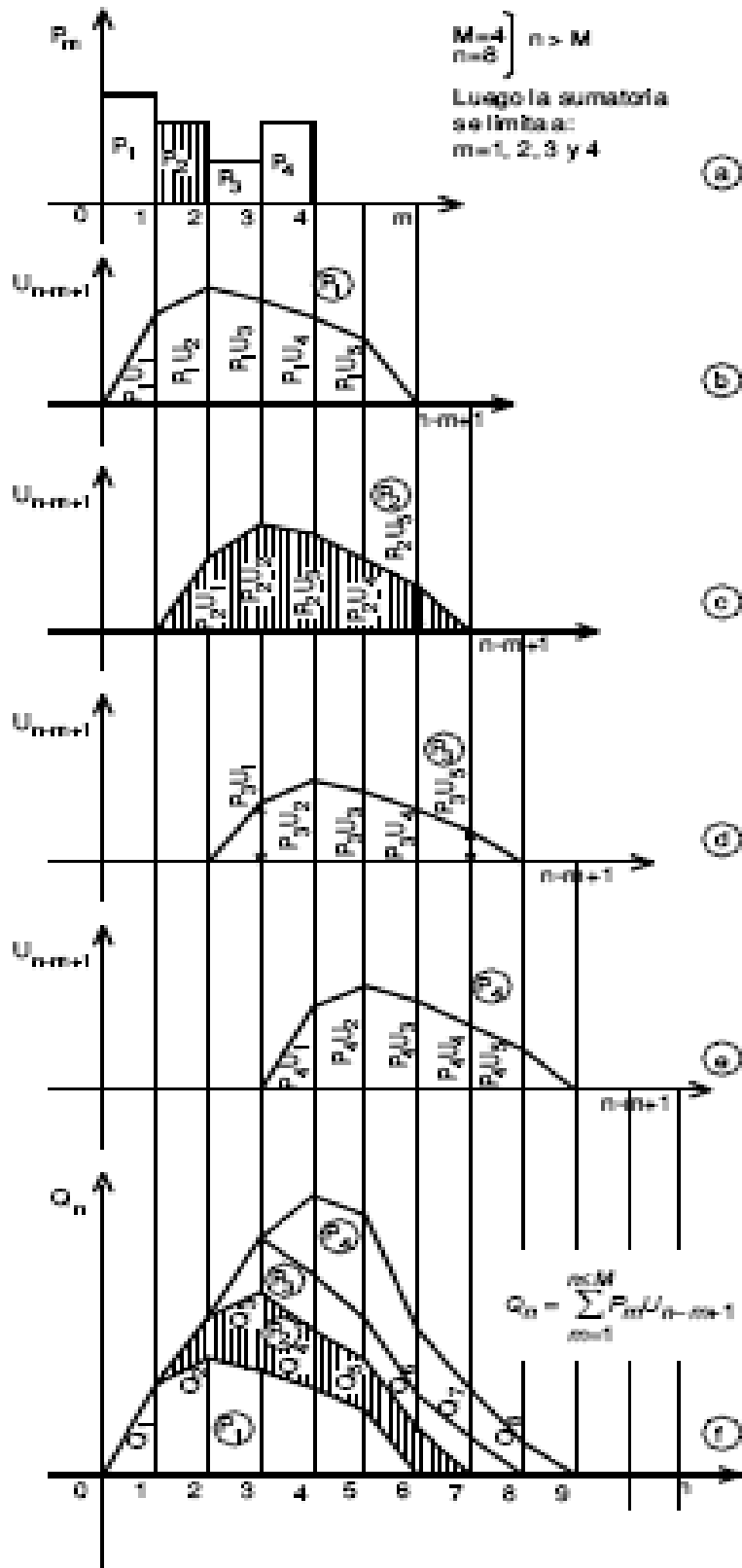


Figura 4.18. Aplicación de la Ecuación de Convolución discreta en un sistema lineal.

En la Figura 4.18 se observa la representación gráfica secuencial de la metodología a seguir para el método de convolución discreta a la salida de un sistema lineal. Está expresada en cuatro pulsos de entrada ($m = 4$) y cinco términos diferentes de cero en la respuesta (función de

pulso U), es decir, existen 8 términos ($4 + 5 - 1$) diferentes de cero en la función de salida Q. Conviene apreciar que siempre la suma de los subíndices en cada término del segundo miembro, es mayor en una unidad que el subíndice del primer miembro (Orsolini *et al.*, 2000).

En la Fórmula 4.25 se observa la metodología integrada de la Ecuación de convolución discreta en un sistema lineal

$$\begin{aligned} Q_1 &= P_1 \cdot U_1 \\ Q_2 &= P_1 \cdot U_2 + P_2 \cdot U_1 \\ Q_3 &= P_1 \cdot U_3 + P_2 \cdot U_2 + P_3 \cdot U_1 \\ Q_4 &= P_1 \cdot U_4 + P_2 \cdot U_3 + P_3 \cdot U_2 + P_4 \cdot U_1 \\ Q_5 &= P_1 \cdot U_5 + P_2 \cdot U_4 + P_3 \cdot U_3 + P_4 \cdot U_2 \\ Q_6 &= P_2 \cdot U_5 + P_3 \cdot U_4 + P_4 \cdot U_3 \\ Q_7 &= P_3 \cdot U_5 + P_4 \cdot U_4 \\ Q_8 &= P_4 \cdot U_5 \end{aligned}$$

Siendo en orden visual, igual a:

$$\begin{aligned} Q_1 &= P_1 U_1 \\ Q_2 &= P_1 U_2 + P_2 U_1 \\ Q_3 &= P_1 U_3 + P_2 U_2 + P_3 U_1 \\ Q_4 &= P_1 U_4 + P_2 U_3 + P_3 U_2 + P_4 U_1 \\ Q_5 &= P_1 U_5 + P_2 U_4 + P_3 U_3 + P_4 U_2 \\ Q_6 &= \quad \quad + P_2 U_5 + P_3 U_4 + P_4 U_3 \\ Q_7 &= \quad \quad \quad + P_3 U_5 + P_4 U_4 \\ Q_8 &= \quad \quad \quad \quad + P_4 U_5 \end{aligned}$$

Fórmula 4.25. Metodología integrada de la Ecuación de convolución discreta lineal.

Cabe recordar que $Q(n)$ y $P(m)$ se expresan en dimensiones diferentes y U tiene dimensiones que compatibiliza ambas, para que las ecuaciones sean adimensionalmente consistentes. Por ejemplo, si $P(m)$ se mide en mm y $Q(n)$ en m^3/s , las dimensiones de U son: $m^3 \cdot (s \cdot mm)^{-1}$.

HIDROGRAMA UNITARIO

Según Chow *et al.* (1994) el hidrograma unitario es la función respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal. Es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia.

Para realizar un análisis particular de los parámetros característicos de una tormenta para generar un hidrograma se establece

1. Duración de la lluvia:

- a) se puede obtener un hidrograma unitario (HU) a partir de una lluvia de duración corta y luego dividir en intervalos iguales a la precipitación en exceso de las tormentas que se van a aplicar.
- b) se puede obtener un HU para cada duración, con lo que habilita a infinito números de HU. En realidad pequeñas diferencias de duración tienen influencia muy leve, aceptándose una tolerancia de +/- 25 % de la duración, por lo que se necesitan pocos HU para la cuenca.

2. Patrón de intensidad – tiempo: En la práctica los HU se deben basar en la suposición única de intensidad uniforme de la lluvia. En la realidad el hidrograma refleja variaciones de forma para grandes variaciones de la intensidad de lluvia. La escala de tiempo para la cual la variación de intensidad es crítica, está en función del área de la cuenca. Una duración básica de aproximadamente un cuarto del tiempo de retardo de la cuenca se acepta como satisfactoria.

3. Distribución espacial de la lluvia: El hidrograma varía si la precipitación se concentra en la salida de la cuenca (Figura 4.19 (1)) o en la parte alta (Figura 4.19 (2)).

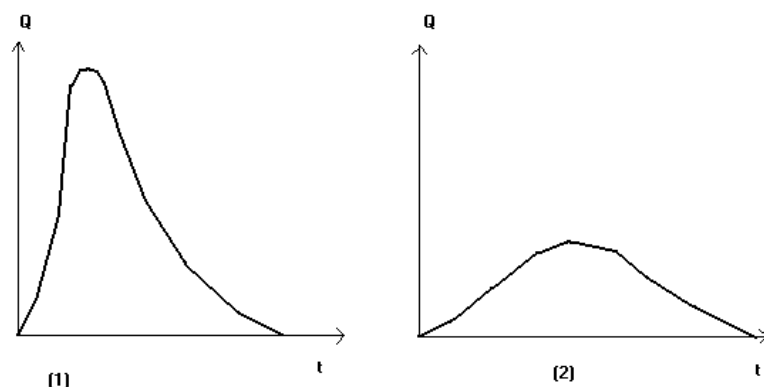


Figura 4.19. Hidrograma generado para una precipitación concentrada en la salida (1) y en la parte alta de una cuenca (2).

4. Cantidad de escurrimiento: La suposición del HU lineal se basa en el principio de proporcionalidad, que establece que las ordenadas del hidrograma (caudales) son proporcionales al volumen de escurrimiento (precipitación efectiva), para todas las tormentas de una duración dada y tiempo base iguales. Es importante mencionar que no es estrictamente cierto, ya que las curvas de recesión están en función del caudal pico. Los eventos menores generan menores picos que los de grandes tormentas, ya que en proporción lluvias pequeñas tienen menor escurrimiento superficial y mayor escurrimiento subsuperficial y de base.

POSTULADOS BÁSICOS DEL HIDROGRAMA UNITARIO

El hidrograma unitario (HU) es el hidrograma resultante de una precipitación efectiva uniforme de un mm (1cm o 1 pulgada), distribuida uniformemente en la cuenca, con intensidad constante y duración unitaria. (Bustamante, 1984). En consecuencia, para la misma duración de lluvia e igual tiempo base, en el HU y en el hidrograma resultante, se generan caudales proporcionales al volumen de precipitación efectiva. La duración unitaria de la lluvia del HU debe ser aquella que genere un escurrimiento significativo.

El HU se debe aplicar para cuencas pequeñas, asegurando que las variaciones espaciales de la lluvia no generen variaciones en el hidrograma. El tamaño límite depende de la exactitud y las características climáticas, aconsejándose el HU para cuencas no mayores a 5.000 km².

Sherman en 1932 presentó al hidrograma unitario (HU) como una herramienta para estimar la forma del hidrograma resultante de una precipitación.

El **hidrograma elemental** es el razonamiento que utilizó Sherman para alcanzar el hidrograma unitario, y establece condiciones de un área pequeña e impermeable, donde cae una lluvia de intensidad constante, mediante un gráfico donde el eje de las abscisas es el tiempo y el eje de las ordenadas es la tasa de flujo (Figura 4.20). El hidrograma elemental, puesto que no puede generarse flujo sin una profundidad finita de agua sobre la superficie, representa una parte de la lluvia que se quedará en almacenamiento temporal o volumen detenido. Manteniendo constante la intensidad de la lluvia, ésta iniciará el escurrimiento (hidrograma) hasta el fin de la misma. En este momento no existe aporte que mantenga el volumen detenido (almacenamiento) ni el escurrido (hidrograma) alcanzando un punto de inflexión. Cuando la lluvia cesa, la descarga continúa disminuyendo el flujo a una tasa decreciente (recesión). Para igualar la descarga y el aporte de la lluvia, se necesita un tiempo infinito. En la realidad esto no ocurre, encontrando las ramas ascendente y descendente sus límites rápidamente, como un hidrograma clásico.

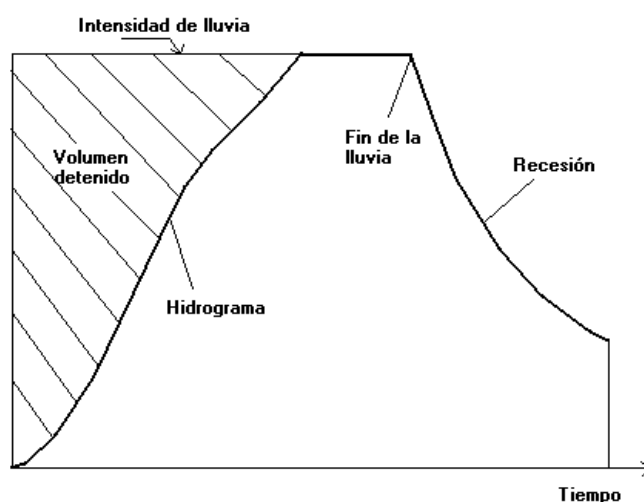


Figura 4.20. Hidrograma de escurrimiento resultante de someter un área pequeña e impermeable a una lluvia de intensidad constante. Modificado de Linsley *et al.* (1988).

El concepto del hidrograma unitario se basa en considerar que el hidrograma de salida de una cuenca pequeña es la suma de los hidrogramas elementales de todas las sub-áreas de la cuenca, modificados por el viaje por la cuenca y el almacenamiento en los cauces.

Como las características físicas de la cuenca (tamaño, forma, pendiente) son constantes, se consideran similares las formas de los hidrogramas resultantes de tormentas con características similares. Esto es lo que se considera la esencia del hidrograma unitario de Sherman. (Linsley *et al.*, 1988).

El hidrograma unitario es un hidrograma típico de la cuenca y es unitario porque el volumen de escurrimiento del hidrograma es 1 mm (1 cm o 1 pulgada). Matemáticamente se lo define a través de la Función Kernel $U(t - T)$ (Fórmula 4.26).

$$q(t) = \int i(t) \cdot U(t - T) \cdot dt$$

Fórmula 4.26. Hidrograma de salida ($q(t)$).

Donde: $i(t)$ es el hidrograma de entrada y $U(t - T)$ es la Función Kernel, operadores diferenciales o función de transferencia del sistema.

Si bien las características físicas de una cuenca son constantes, las características de las tormentas no, por lo que no basta un hidrograma unitario típico para la cuenca, ya que será variable según la variabilidad de las tormentas.

Para obtener el hidrograma unitario se deben cumplir una serie de postulados básicos o condiciones de borde, que se describen a continuación:

1. La precipitación efectiva debe distribuirse uniformemente sobre la cuenca.
2. La intensidad de precipitación debe ser constante.
3. El tiempo base del HU de precipitación efectiva de duración unitaria (t_u) debe ser constante.
4. Se aplica el principio de proporcionalidad.
5. Respetar el principio de invariancia en el tiempo.

A partir de estos postulados se recomienda que:

- La precipitación efectiva deba ser constante en el período considerado.
- Es conveniente utilizar precipitaciones cortas y de alta intensidad, para lograr así resultados óptimos.
- La lluvia debe estar distribuida en forma homogénea en toda la cuenca, lo cual indica que el hidrograma unitario debe hacerse para cuencas pequeñas o en caso contrario subdividir las cuencas de gran tamaño en superficies más pequeñas.
- En el esquema gráfico del hidrograma las ordenadas son equivalentes a los volúmenes respectivos.

- Además el hidrograma unitario para un determinado tiempo es independiente de las precipitaciones anteriores; y debido a su invariancia en el tiempo, no recuerda las precipitaciones previas, o sea que no tiene memoria.
- Se basa en la no modificación de las características físicas de la cuenca.

CONCEPTO DE DURACIÓN UNITARIA (t_u)

Existen distintos conceptos relacionados al tiempo unitario o duración unitaria, presentando los más difundidos a continuación.

a) Whisley – Brates: A medida que disminuye la duración de la tormenta disminuye el tiempo base del hidrograma hasta un cierto momento, en que una nueva disminución de la tormenta no produce modificación del tiempo base. Entonces, esta última duración de la tormenta se adopta como tiempo unitario (Bustamante, 1984), (Figura 4.21).

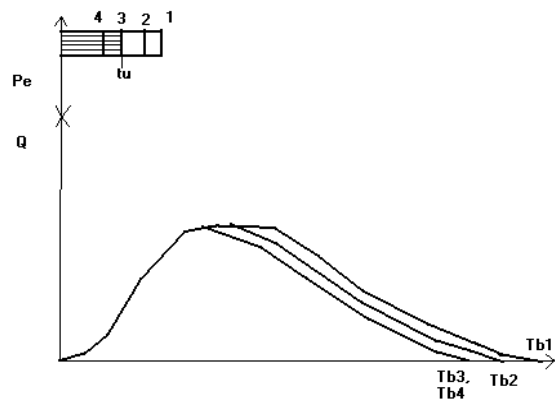


Figura 4.21. Determinación del tiempo unitario según Whisley – Brates.

b) Linsley: Define el tiempo de retardo como el tiempo que hay entre el centro de masas de la precipitación y el centro de masa del hidrograma resultante. Por lo tanto el tiempo unitario se define como el 25% del tiempo de retardo, siendo éste el tiempo que hay entre el centro de masas de la precipitación y el caudal pico del hidrograma (Figura 4.22).

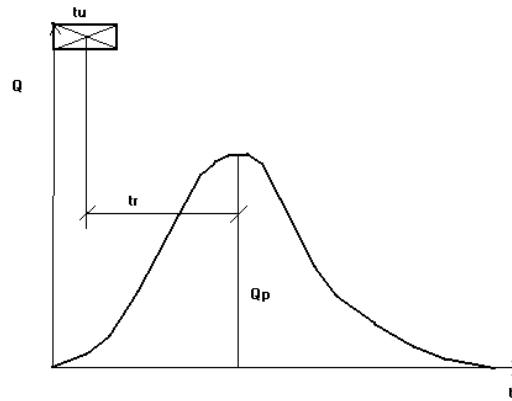


Figura 4.22. Determinación del tiempo unitario según Linsley.

- c) Mitchell: Define al t_u como el veinte por ciento del tiempo existente entre el centro del hidrograma y el caudal pico del hidrograma.

$$t_u = 0,20 \cdot t \text{ retardo}$$

Fórmula 4.27. Tiempo unitario según Mitchell.

- d) Cuerpo de Ingenieros de EEUU: Para cuencas menores a 120 km^2 , el t_u es igual a la mitad del tiempo de retardo.

$$t_u = 0,50 \cdot t \text{ retardo}$$

Fórmula 4.28. Tiempo unitario según Cuerpo de Ingenieros de EEUU.

- e) Sherman: Define el t_u como función del área de la cuenca, con t_c como tiempo de concentración (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Tiempo unitario según Sherman.

Área (km ²)	tu (horas)
< 50	tc / 3
50 – 260	2 – 6
260 – 2600	6 – 12
> 2600	12 – 24

OBTENCIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO

La ecuación de **convolución discreta** permite el cálculo del escurrimiento directo o superficial Q_n , correspondiente a una lluvia neta P_m , y de las ordenadas del hidrograma unitario U_{n-m+1} . (Fórmula 4.25).

La deducción del hidrograma unitario, a partir de Q_n y P_m (ordenadas U) requiere un proceso llamado **deconvolución** (Chow *et. al.*, 1994; Orsolini *et al.*, 2000).

Supongamos que existen M pulsos de lluvia neta y N pulsos de escurrimiento directo, luego pueden escribirse N ecuaciones para Q; con $n = 1, 2, \dots, N$; en términos de $N - M + 1$ ordenadas desconocidas del hidrograma unitario, tal como el conjunto de ecuaciones para la convolución de tiempo discreto (Fórmulas 4.29 y 4.30).

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \dots \dots \dots ; n = 1, 2, \dots, N$$

Fórmula 4.29. Ecuación de convolución discreta.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= P_1 U_1 \\
 Q_2 &= P_2 U_1 + P_1 U_2 \\
 Q_3 &= P_3 U_1 + P_2 U_2 + P_1 U_3 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 Q_M &= P_M U_1 + P_{M-1} U_2 + \dots + P_1 U_M \\
 Q_{M+1} &= 0 + P_M U_2 + \dots + P_2 U_M + P_1 U_{M+1} \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 Q_{N-1} &= 0 + 0 + \dots + 0 + 0 + \dots + P_M U_{N-M} + P_{M-1} U_{N-M+1} \\
 Q_N &= 0 + 0 + \dots + 0 + 0 + \dots + 0 + P_{M-1} U_{N-M+1}
 \end{aligned}$$

Fórmula 4.30. Método de convolución discreta.

Si Q_n y P_m son conocidos y se requiere U_{n-m+1} , ordenadas del hidrograma unitario, entonces el conjunto de ecuaciones está sobredimensionado, debido a que existen más ecuaciones (N) que incógnitas (N-M+1) (Fórmula 4.31).

$$U_{n-m+1} = \sum \left(\frac{Q_n}{P_m} \right) \dots \dots \dots ; n = 1, 2, \dots N$$

Fórmula 4.31. Ecuación de deconvolución.

En general los hidrogramas unitarios obtenidos mediante la solución del conjunto de ecuaciones para diferentes entradas de lluvia, no son idénticos. Para obtener una solución única, se puede aplicar el método de estimaciones sucesivas (Bustamante, 1984).

El hidrograma unitario encontrado según lo expuesto, puede presentar algunas variaciones erráticas e inclusive tener alguna ordenada negativa. En ese caso hay que ajustar una curva suavizada a las ordenadas positivas. Estas variaciones erráticas pueden originarse por la no linealidad en la relación lluvia neta – escurrimiento superficial de la cuenca. La deconvolución puede utilizarse también para deducir el hidrograma unitario con varios picos, pero la posibilidad de errores, o la no linealidad de la información es mayor que para un hidrograma de un solo pico (Chow *et al.*, 1994).

Los principios el análisis de sistemas lineales forman la base del método del hidrograma unitario. En la Figura 4.23 se muestra una comparación entre los conceptos de sistema lineal e hidrograma unitario. En hidrología, la función respuesta de paso es comúnmente denominada como el hidrograma S y la función respuesta de impulso, como hidrograma unitario instantáneo, el cual es la respuesta hipotética a una profundidad unitaria de exceso de precipitación depositada instantáneamente en toda la superficie de la cuenca. (Chow *et al.*, 1994).

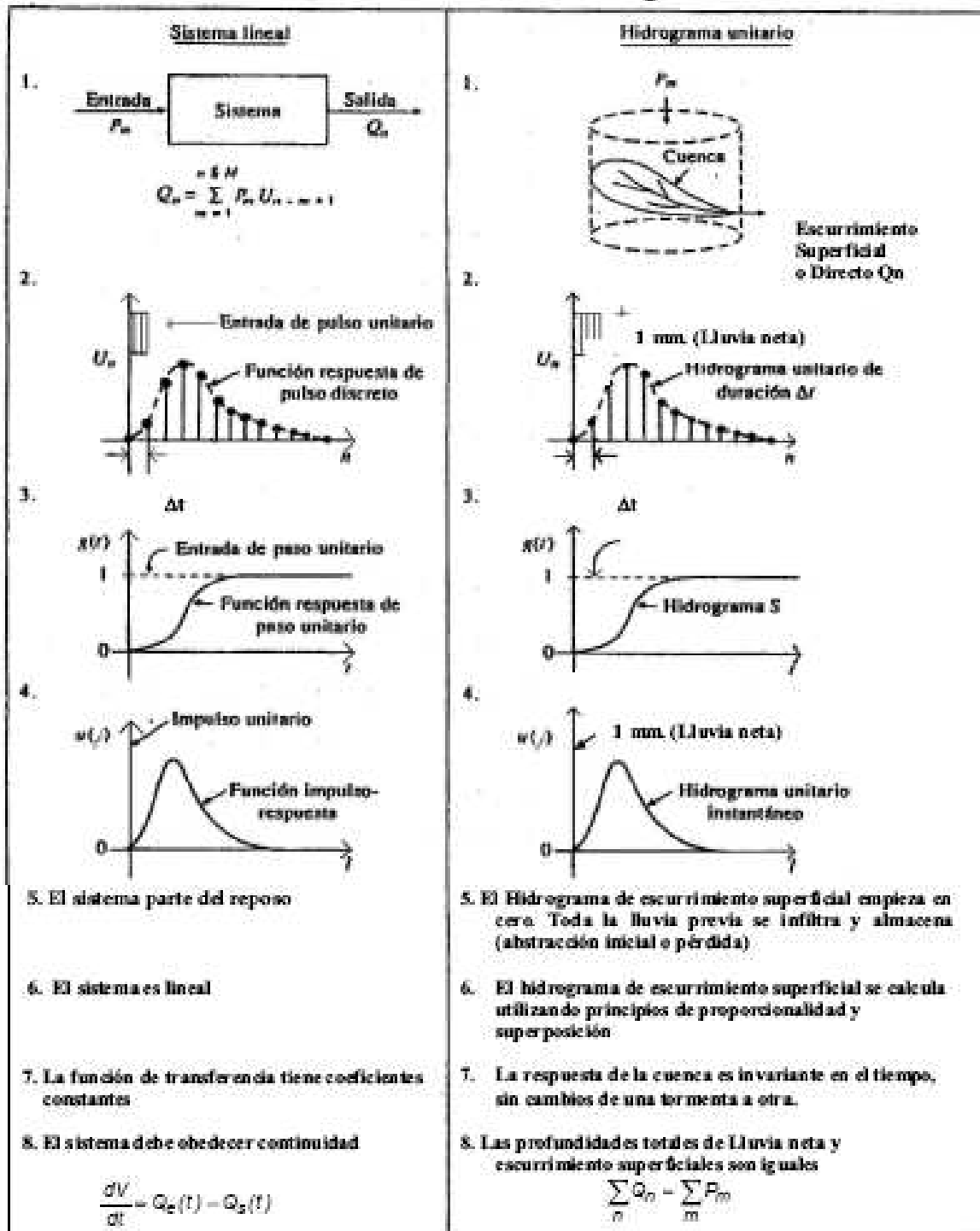


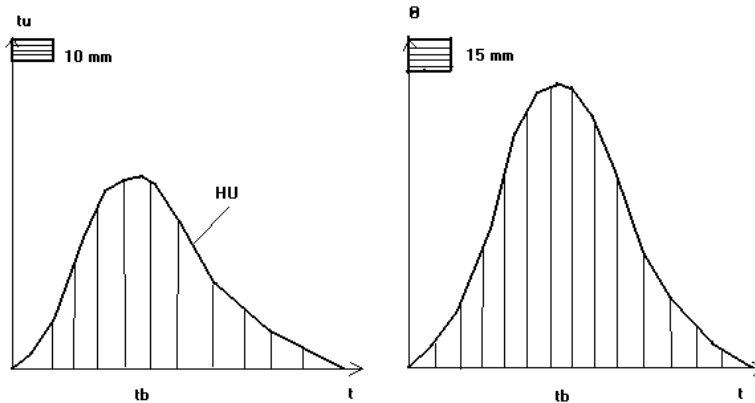
Figura 4.23. Comparación de los conceptos de sistema lineal e hidrograma unitario. Extraído de Chow *et al.*, 1994.

APLICACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO

El material presentado a continuación fue elaborado por recopilación e interpretación propia de Linsley *et al* (1988); Chow *et al* (1994), Orsolini *et al* (2000) y Bustamante (1984), considerando el tiempo unitario (t_u).

a) Para lluvias de duración igual al t_u (Figura 4.24)

Cada ordenada del HU se multiplica por la relación de proporcionalidad (15/10 en el ejemplo), para obtener las ordenadas del hidrograma resultante HR (15 mm, θ) con $\theta = t_u$.



Dato: HU (10 mm, t_u)

H Resultante: H (15 mm, θ)

Figura 4.24. Deducción de hidrograma para lluvias de duración igual al t_u .

Donde θ es la duración de una lluvia cualquiera.

b) Para tormentas de duración múltiplo de t_u . ($\theta = n \cdot t_u$) (Figura 4.25)

Como dato se tiene el HU (10 mm, t_u) e incógnita H (10 mm, θ), siendo $\theta = 2 t_u$.

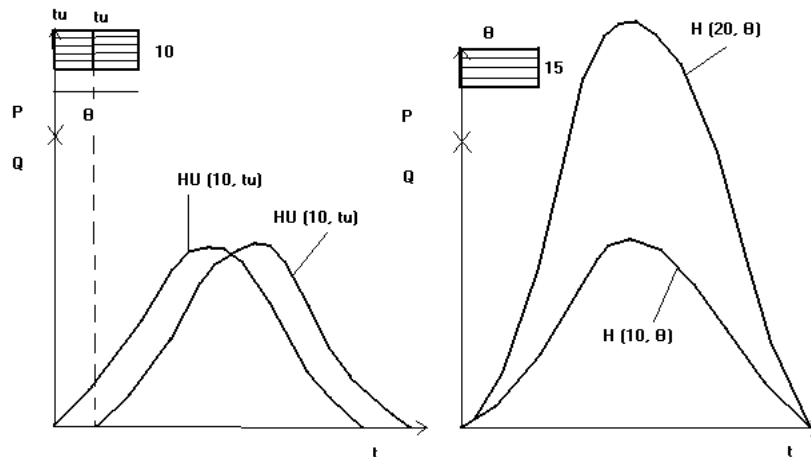


Figura 4.25. Deducción de hidrograma para tormentas de duración múltiplo de t_u .

Donde θ es la duración de una lluvia cualquiera.

Se suman dos HU (10, t_u) separados un diferencial de tiempo igual a t_u , y se obtiene un H (20, θ). Al multiplicarse las ordenadas del hidrograma suma por 10/20 se obtiene el H (10, θ) buscado, que es HU para un tiempo igual a θ .

Como dato HU (10, t_u) e incógnita H (23, θ) con $\theta = 3 \cdot t_u$ (Figura 4.26), se suman 3 HU (10, t_u) separados por t_u ($\theta = 3 \cdot t_u$), obteniéndose un H (30, θ) y al multiplicarse por 23/30, en forma proporcional, se calcula el H (23, θ) solicitado.

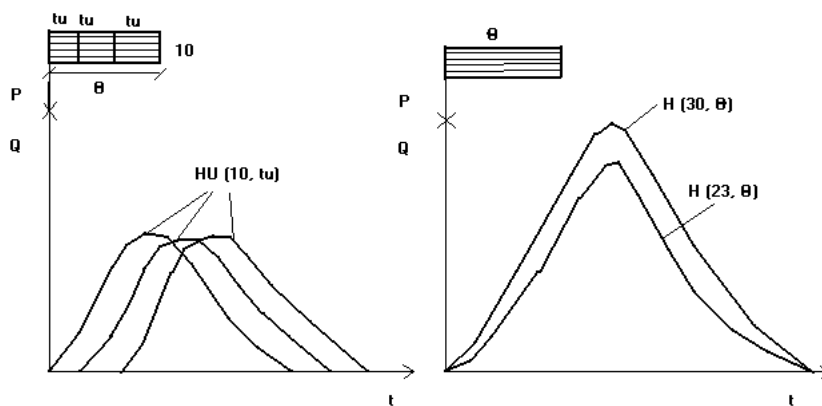


Figura 4.26. Deducción de hidrograma para tormentas de duración múltiplo de t_u .

c) Para tormentas de duración múltiplo de t_u .

Para una cuenca hidrográfica, se presenta un ejemplo práctico de aplicación de la ecuación de deconvolución, considerando un flujo base de aproximadamente de 100mm, un tiempo total de duración de una tormenta de 26 horas, con un tiempo unitario de 2 horas, la cual genera una lluvia efectiva definida por: 10, 20, 30, 10 mm.

El ejemplo permite establecer el hidrograma total para esa tormenta siendo su HU (mm) 0-4-17-36-24-16-7-0, aplicando el método de deconvolución (Tabla 4.4 y Figura 4.27).

La aplicación de la fórmula de convolución (Fórmula 4.29) se desarrolló la tabla 4.4, para determinar el esurrimiento directo parcial y luego por sumatoria en flujo total emitido por esa tormenta a la salida de la cuenca hidrográfica.

Tabla 4.4. Ejemplo práctico de la aplicación del método de deconvolución.

DATOS				ESCURRIMIENTO DIRECTO (mm)					Hidrograma total (mm)
Tiempo (hs)	H.U	Lluvia efectiva (mm)	Flujo base	a	b	c	d	Parcial	
0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
2	4	10	100	40	0	0	0	40	140
4	17	20	100	170	80	0	0	250	350
6	36	30	100	360	340	120	0	820	920
8	24	10	100	240	720	510	40	1510	1610
10	16		100	160	480	1080	170	1890	1990
12	7		100	70	320	720	360	1470	1570
14			100	0	140	480	240	860	960
16			100	0	0	210	160	370	470
18			100	0	0	0	70	70	170
20			100	0	0	0	0	0	100

8380

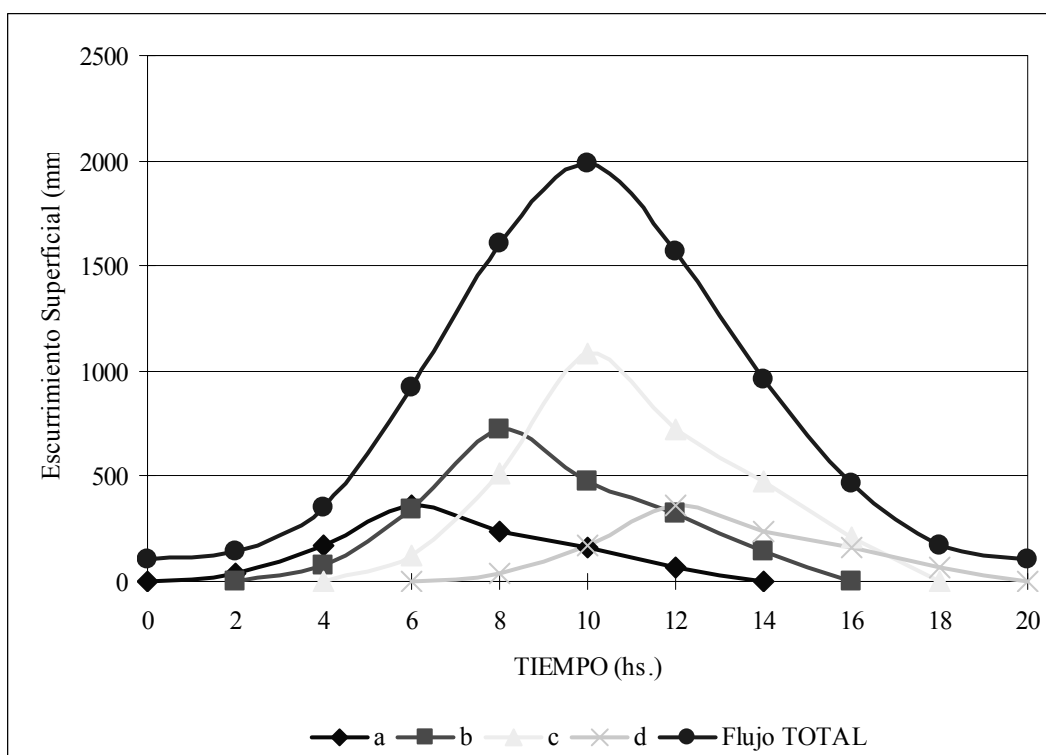


Figura 4.27. Hidrograma de escurrimiento resultante del ejemplo práctico de deconvolución.

HIDROGRAMA EN S

Se define hidrograma en S (H en S), al hidrograma resultante de una lluvia efectiva continua, de intensidad constante y duración indefinida. Permite calcular hidrogramas unitarios de la duración que desee, debido a que se puede utilizar en los casos en que se necesite aplicar el cálculo del hidrograma unitario cuyas duraciones no sean múltiplos o sean menores del

hidrograma unitario original. En este caso, el principio de proporcionalidad se inhabilita si se quiere obtener un hidrograma unitario (HU) a partir de un hidrograma (H), si la duración θ es menor a t_u , o mayor a t_u pero no submúltiplo (Bustamante, 1984).

El H en S es el hidrograma de una lluvia de duración infinita, de precipitación infinita producto de una serie infinita de precipitaciones de 10 mm en θ horas, por lo tanto una intensidad constante de 10 mm / θ hs. Se construye el H en S, sumando una serie de hidrogramas unitarios de (10, θ), cada uno desplazado o retrasado del anterior θ horas. Para ello se considera esta precipitación finita continua dividida en intervalos θ , de 1 mm, En correspondencia a cada período de precipitación se genera un hidrograma unitario desplazado ese período θ , y la sumatoria de ellos establecerá el hidrograma en S (Figura 4.28) (Bustamante, 1984).

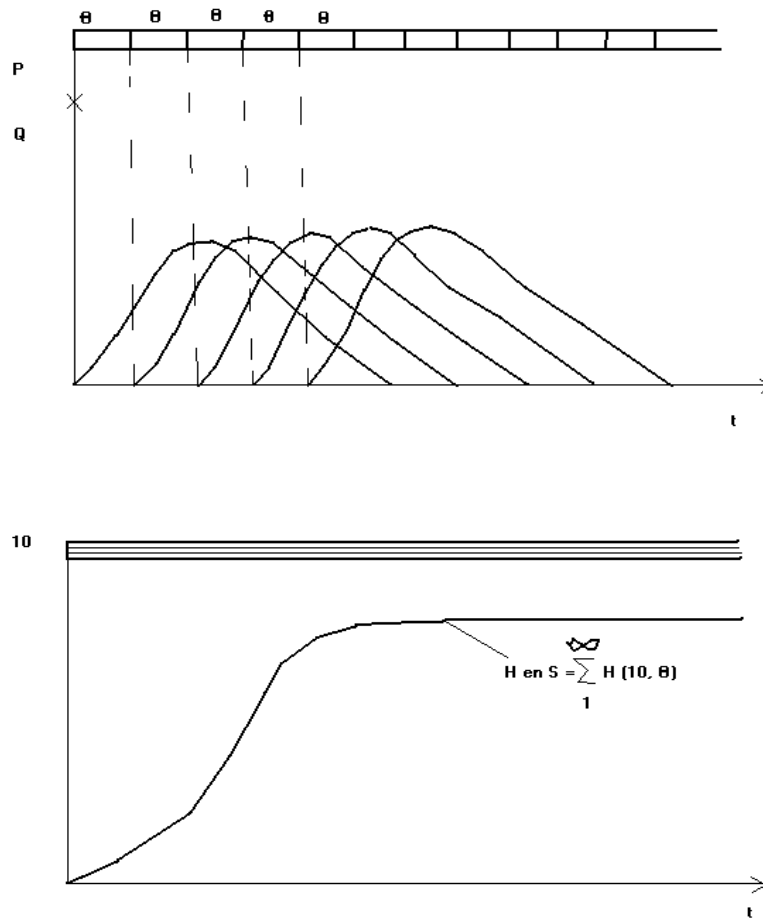


Figura 4.28. Hidrograma en S.

Para obtener el hidrograma unitario HU (10, t_u), siendo $t_u < \theta$, se trabaja con dos H en S desplazados un t_u y se calcula su diferencia (Figura 4.29).

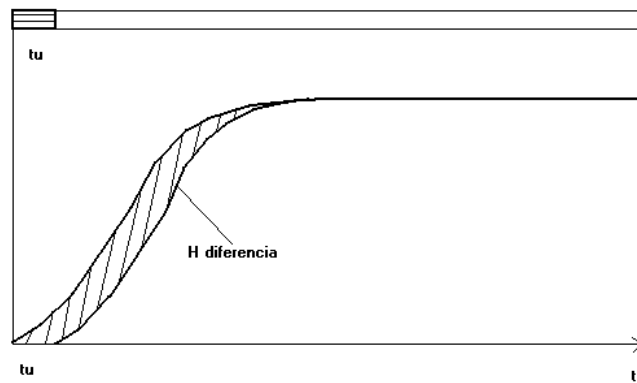


Figura 4.29. Diferencial de desplazamiento de H en S.

Al conocer la intensidad (i_p) del H en S, siendo en este caso $10 \text{ mm}/\theta \text{ hs}$, por la diferencia se obtiene un hidrograma del cuál se conoce su duración, t_u (desplazamiento de los H en S), y cuya altura de precipitación es: $h_p = i_p \cdot t = 10 \text{ mm}/\theta \text{ hs} \cdot t_u$.

En consecuencia el hidrograma diferencia es $(10/\theta \cdot t_u, t_u)$ y para transformarlo en HU debe multiplicarse cada ordenada del hidrograma diferencia por el factor de proporcionalidad θ/t_u y se obtiene el HU $(10, t_u)$ buscado (Figura 4.30).

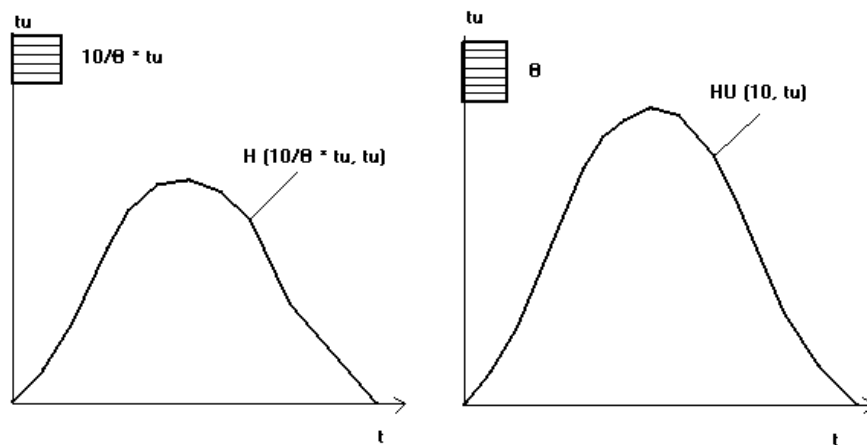


Figura 4.30. Procedimiento para obtener HU según H en S.

El procedimiento se integra al identificar la secuencia de las Figuras 4. 28, 4.29 y 4.30.

HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO

El HU desarrollado a partir de la información de lluvia y caudal en una cuenca se aplica solamente para la cuenca y para el punto donde se midió el caudal. Los hidrogramas unitarios sintéticos (HUS) se utilizan para desarrollar HU para otros puntos de la corriente dentro de la misma cuenca o para cuencas similares.

Existen tres tipos de HUS:

1. Los que relacionan características del hidrograma (qp, tb) con las características físicas de la cuenca (Snyder, 1938; Gray, 1961);
2. Los que están basados en HU adimensionales (SCS, 1972; Commons); y
3. Los basados en modelos de almacenamiento de la cuenca (Clark, 1943; Chow *et. al.*, 1994)

HIDROGRAMA SINTÉTICO DE SNYDER

Según la metodología propuesta por Chow *et al.* (1994) En un estudio de cuencas localizadas en los Montes Apalaches, de Estados Unidos, en áreas de 30 a 30.000 km², Snyder (1938) establece relaciones sintéticas para un HU estándar, como aquel cuya duración de lluvia t_r está relacionado con el retardo de la cuenca t_p (Fórmula 4.32).

$$t_p = 5,5 \cdot t_r$$

Fórmula 4.32. Tiempo de retardo (t_p) en una cuenca hidrográfica.

Donde t_r es la duración de la lluvia.

Para un hidrograma unitario estándar, Snyder estableció la Fórmula 4.33.

$$t_p = C_1 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_{cg})^{0,3}$$

Fórmula 4.33. Tiempo de retardo de una cuenca t_p (hs).

Donde:

L: Longitud del curso hasta el límite de la cuenca (km).

L_{cg} : Longitud del curso hasta el centro de gravedad de la cuenca (km).

C_1 : 0,75.

C_t : Coeficiente de retardo de Snyder, que depende de las características físicas de la cuenca, y varía entre 1,8 para pendientes menores y 2,2 para pendientes mayores.

El caudal pico (q_p) por unidad de drenaje ($m^3 \cdot seg^{-1}$) del hidrograma unitario estándar se establece con la fórmula 4.34.

$$q_p = 2,75 \cdot \frac{C_p}{t_p}$$

Fórmula 4.34. Caudal pico de una cuenca q_p ($m^3 \cdot seg^{-1}$).

Donde:

C_p : Coeficiente de pico que varía entre 0,3 y 0,7.

Para calcular el caudal instantáneo (Q_p) se establece la relación de C_p de una cuenca con instrumental de medición con la superficie de la misma (Fórmula 4.35).

$$Q_p = 2,75 \cdot \frac{C_p \cdot A}{t_p}$$

Fórmula 4.35. Caudal instantáneo máximo Q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Donde A es el área (km^2).

Para una cuenca específica, su HU representa la combinación de los diferentes tiempos, como ser t_p, t_r y t_b , con el q_p , como se muestra en la Figura 4.31.

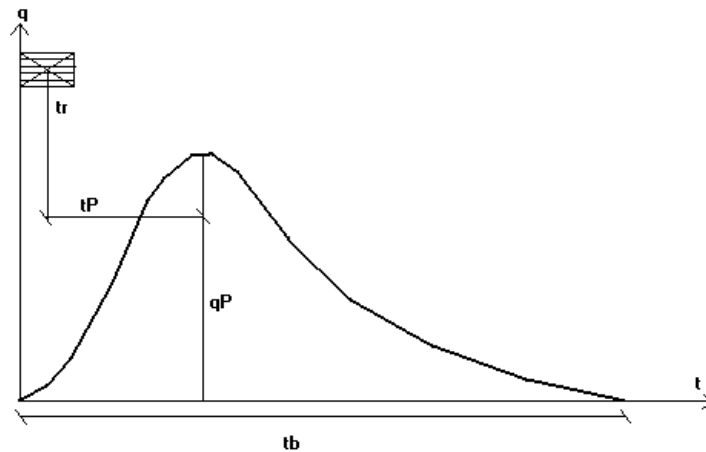


Figura 4.31. HU específico de una cuenca identificando sus tiempos.

Según Chow *et al.* (1994) y a partir de la caracterización del HU, la estimación del t_p se deriva de la duración efectiva (t_R), de su tiempo de retardo (t_{pR}) y su caudal pico por unidad de área de drenaje (q_{pR})

- Si $t_{pR} = 5,5 \cdot t_R$, entonces $t_R = t_{pR}$, y además $t_{pR} = t_p$, y $q_{pR} = q_p$, C_t y C_p se establecen despejando las ecuaciones de las Fórmulas 4.33 y 4.34.
- Si t_{pR} es muy diferente a $5,5 \cdot t_R$, el retardo de la cuenca estándar se calcula con la fórmula 4.36.

$$t_p = t_{pR} + \frac{t_r - t_R}{4}$$

Fórmula 4.36. Retardo de una cuenca estándar (t_p).

Donde:

- t_{pR} : Tiempo de retardo (hs)
- t_r : Duración de la lluvia (hs)
- t_R : Duración efectiva (hs).

Considerando además la resolución simultánea de las Fórmulas 4.32 y 4.33 para determinar t_r y t_p .

Luego se calcula C_1 y C_p , con $q_{pR} = q_p$ y además $t_{pR} = t_p$.

La relación que existe entre q_p y el caudal pico por unidad de área de drenaje q_{pR} del hidrograma unitario requerido se determina con la fórmula 4.37.

$$q_{pR} = \frac{q_p \cdot t_p}{t_{pR}}$$

Fórmula 4.37. Caudal pico por unidad de área de drenaje (q_{pR} : $m^3 \cdot seg^{-1}$).

Donde:

q_p : Caudal pico ($m^3 \cdot seg^{-1}$).

t_p : Tiempo al pico (hs)

t_{pR} : Tiempo de retardo (hs)

El tiempo base (t_b) del hidrograma unitario se puede establecer considerando que el área bajo el hidrograma unitario es equivalente a una escorrentía directa de 1 mm, estableciendo que el t_b se determina por medio del cociente ($5,56 / q_{pR}$).

La forma hidrograma con los anchos para 50 y 75 % del caudal pico se determina a través de la cuantificación del ancho del hidrograma unitario (hs), que está dado por la relación de la fórmula 4.38. Usualmente un tercio de este ancho se distribuye antes del momento en que ocurre el pico del hidrograma unitario y dos tercios después de dicho pico (Chow *et al*, 1994), como se visualiza en la Figura 4.32.

$$W = 1,22 \cdot q_{pR}^{-1,08} \quad \text{para un ancho de 75\%}$$

$$W = 2,14 \cdot q_{pR}^{-1,08} \quad \text{para un ancho de 50\%}$$

Fórmula 4.38. Ancho del hidrograma unitario (W: horas)

Donde:

q_{pR} : Caudal pico por unidad de área de drenaje ($m^3 \cdot seg^{-1}$).

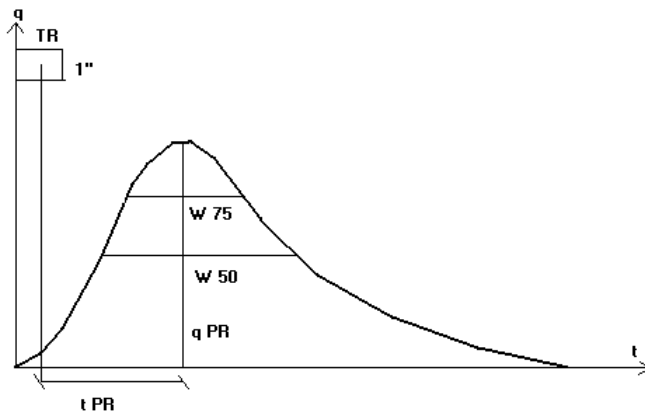


Figura 4.32. Hidrograma unitario sintético calculado por el método de Snyder.

HIDROGRAMA ADIMENSIONAL DEL SERVICIO CONSERVACIÓN SUELOS (S.C.S.)

El hidrograma adimensional del S.C.S., también llamado hidrograma triangular, define el volumen de escurrimiento (caudal) por la relación del caudal (q) con respecto al caudal pico (q_p) y el tiempo por la relación del tiempo (t) con el tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario (t_p). La Figura 4.33 representa la relación de un hidrograma unitario con su hidrograma triangular, generando el hidrograma Unitario Sintético del S.C.S. de Estados Unidos.

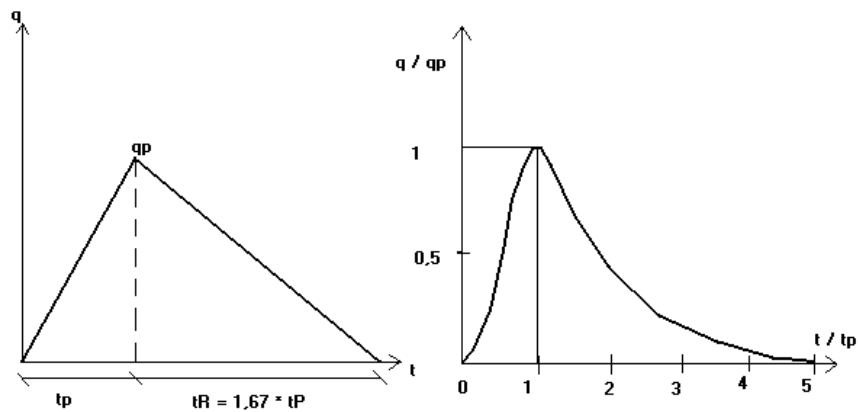


Figura 4.33. Hidrograma unitario sintético calculado por el método del S.C.S..

Se considera que el área que forma el hidrograma adimensional del S.C.S. presenta una forma semejante a un triángulo, de área igual al caudal de escurrimiento (A_e en mm). Según este razonamiento, el área del triángulo se establece con la Fórmula 4.39, siendo el caudal pico

determinado al despejar esa fórmula, como lo ejemplifica la Fórmula 4.40, considerando además que el tiempo base (t_b) es igual a la sumatoria de t_p con t_R .

$$Ae = \frac{((t_p + t_R) \cdot q_p)}{2}$$

Fórmula 4.39. Área del hidrograma unitario del S.C.S. (Ae)

Donde:

t_p : Tiempo al pico (hs)

t_R : Tiempo de retardo (hs)

$$q_p = \frac{2,08 \cdot A}{t_p}$$

Fórmula 4.40. Caudal pico según el área del hidrograma unitario del S.C.S.

Donde: A : área de drenaje (km^2), t_p (hs), $q_p(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$:

Esta forma de determinación del q_p , se generó con base a la revisión de un gran número de hidrogramas unitarios. Además el S.C.S. sugiere que el tiempo de recesión (t_R) se establezca como $1,67 \cdot t_p$, considerando que el área bajo el hidrograma unitario es equivalente a una escorrentía directa de 1 mm, puede demostrarse que el q_p se determina según la Fórmula 4.40.

Adicionalmente, un estudio de hidrogramas unitarios de diversas cuencas, indicaron que el tiempo de retardo (t_p) es aproximadamente igual a $0,6 \cdot t_c$, siendo t_c el tiempo de concentración de la cuenca.

En relación al tiempo de ocurrencia del pico (t_p) puede expresarse que el mismo se establece como lo expresa la Fórmula 4.41.

$$t_p = \frac{t_r}{2} + t$$

Fórmula 4.41. Tiempo de ocurrencia del pico del hidrograma unitario del S.C.S. (t_p : hs)

Donde:

t_r : Tiempo de retardo (hs)

t : Duración de la lluvia efectiva (hs).

MÉTODO DEL S.C.S. PARA LAS ABSTRACCIONES

En aquellos casos en los que no se cuenta con datos de aforos y no se pueden realizar hidrogramas para calcular el escurrimiento, éste se debe estimar a partir de otras metodologías.

Así fue como en el año 1972, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service - S.C.S.) desarrolló un método sencillo para calcular la lluvia efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad. Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento.

Se supone que cada uno de los complejos suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En cada uno de estos complejos, la precipitación generará diferentes caudales de escurrimiento en función del grado de permeabilidad del suelo. La Figura 4.34, expresa la relación entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q) generado para diferentes tipos de suelo según su permeabilidad.

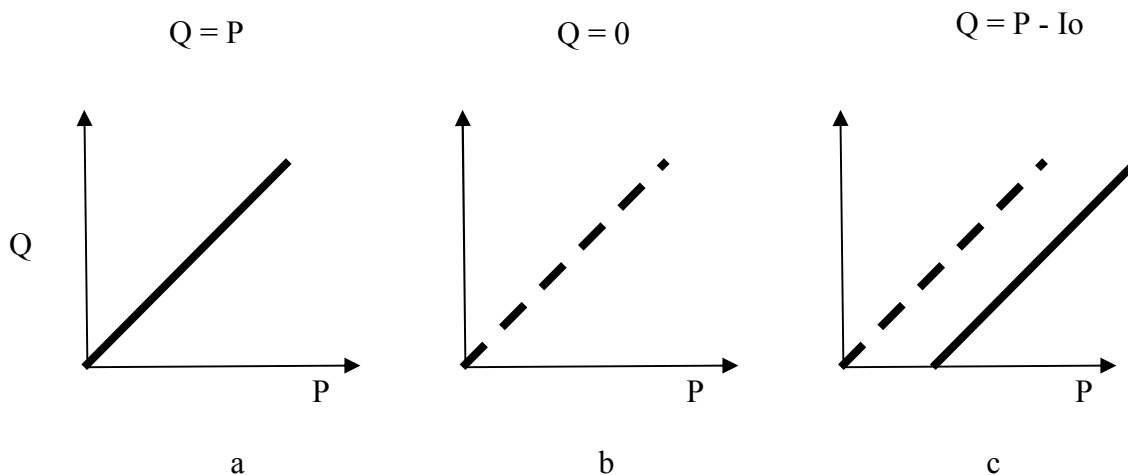


Figura 4.34. Relación precipitación P (línea entera) – escurrimiento Q (línea entrecortada)

Donde se expresan diferentes situaciones como:

- Todo lo que precipita escurre (en el caso de condiciones de suelo impermeable) => $Q = P$.
- Todo lo que precipita infiltra, sin generar escurrimiento (en caso de condiciones de máxima permeabilidad) => $Q = 0$.
- Condiciones de suelo normales se genera infiltración (I_o) y luego se inicia el escurrimiento => $Q = P - I_o$.

Entre estos casos extremos se pueden tener infinitas respuestas de escurrimiento superficial ante una precipitación, dependiendo de la asociación de suelo-vegetación.

En cada una de estas curvas intermedias se pueden diferenciar dos partes: un valor umbral de precipitación denominado I_0 (I_a), por debajo del cual toda la precipitación es interceptada por el complejo suelo-vegetación y por lo tanto el escurrimiento superficial es nulo. Cuando se supera el valor de I_0 , comienza la segunda parte de la curva en la que va aumentando el valor del escurrimiento a medida que aumenta la precipitación. Con valores muy altos de precipitación, el suelo está tan saturado de agua que un aumento en la cantidad de lluvias equivale a un incremento de la misma magnitud en escurrimiento.

El método del Número de curva establece complejos suelo-vegetación a los cuales se les asigna un valor denominado Número de Curva o Número Hidrológico (NC), que define sus condiciones hidrológicas.

La clasificación hídrica de los suelos reconoce cuatro grupos hidrológicos (GH):

- Grupo A: Incluye suelos muy permeables, que presentan escurrimientos mínimos. Son suelos profundos, arenosos, sueltos, con predominio de arena y grava, con muy poca arcilla y limo.
- Grupo B: En este grupo se ubican los suelos arenosos menos profundos y menos permeables que los del grupo A, pero en conjunto con moderada permeabilidad cuando están saturados.
- Grupo C: Se incluyen los suelos poco profundos que presentan poca permeabilidad al estar saturados. Contienen abundante arcilla y coloides.
- Grupo D: Suelos con el máximo escurrimiento superficial, muy impermeables. Son suelos arcillosos profundos con una capa de arcilla muy cerca de la superficie o con un subsuelo muy impermeable muy cercano a la superficie.

Para poder definir estos grupos hidrológicos se utiliza la clase textural del suelo y además se puede utilizar en forma conjunta el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación.

En la Tabla 4.5 se observan las clases texturales que definen los cuatro grupos hidrológicos. Los suelos pertenecientes a los diferentes grupos presentarán una intensidad relativa de infiltración relacionada con la textura de los mismos. Esta característica general de los suelos generará diferentes caudales de escurrimiento (Q) y NC.

La Tabla 4.5 además permite observar la relación existente entre GH, textura del suelo, grado de infiltración, nivel de escurrimiento y NC.

Tabla 4.5. Grupos Hidrológicos y sus características particulares.

GH	Textura	Infiltración	E scorrimiento (Q)	NC	
A	Arenoso Arenoso franco Franco arenoso	arena	Alta	<< Q	<< NC
B	Franco limoso Franco Limoso	+ arena - arcilla	Moderada	< Q	< NC
C	Fr-Arc-arenoso Fr-Arc-limoso Fr-arcilloso	- arena + arcilla	Lenta	> Q	> NC
D	Arcillo arenoso Arcillo limoso Arcilloso	arcilla	Muy lenta	>> Q	>> NC

A partir del GH y del tipo de infiltración que cada uno de ellos presenta se puede determinar diferentes intensidades relativas de infiltración, como se observa en la Figura 4.35.

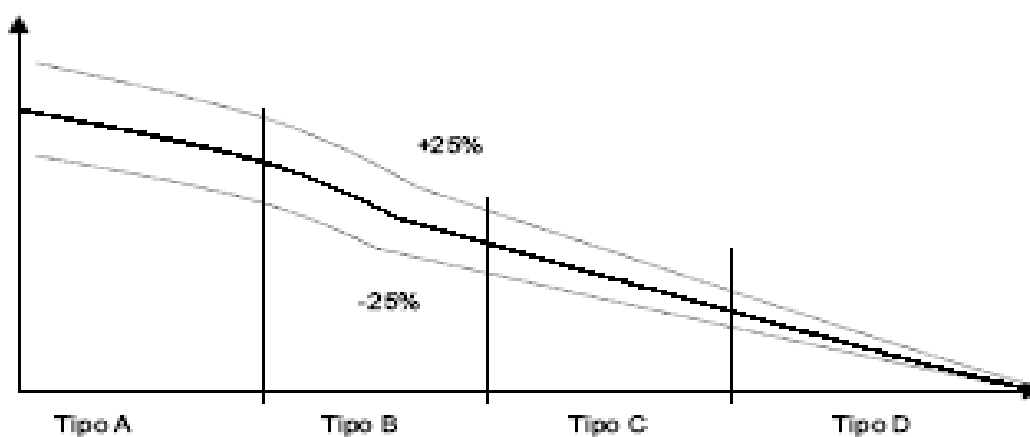


Figura 4.35. Intensidad relativa de infiltración en función del tipo de Grupo Hidrológico.

Además, para definir a partir de las clases texturales el grupo hidrológico, se utiliza el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación (Figura 4.36) indicando las características de infiltración de cada suelo.

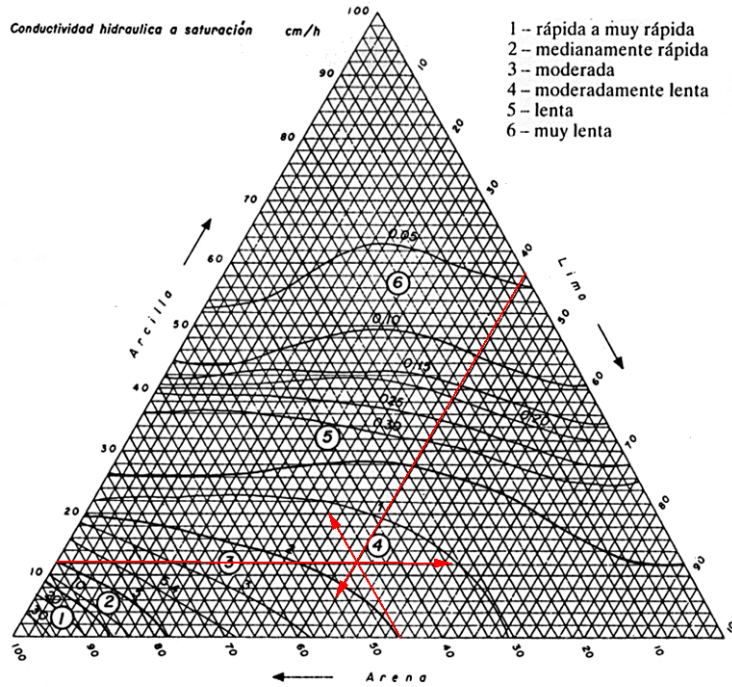


Figura 4.36. Diagrama triangular con curvas de conductividad hidráulica a saturación.

Para estandarizar la relación entre la precipitación y el escurrimiento, o en su defecto las abstracciones, se define un número adimensional denominado número de curva (NC). Este NC, está adaptado para situaciones diferenciales de sitio, considerando el suelo y la cobertura vegetal, estableciendo para superficies impermeables y superficies de agua $NC = 100$; para superficies naturales $NC < 100$.

Así mismo la densidad de la cobertura vegetal determinará distintas clases en cuanto a sus condiciones hidrológicas para la infiltración.

En la Tabla 4.5 se expresa la posible condición hidrológica, escurrimiento y el tipo de número de curva, para diferentes densidades de vegetación.

Tabla 4.5. Condición hidrológica, escurrimiento y Número de Curva en función de la vegetación y su estado.

Densidad de Vegetación	Condición	Cobertura	Escurrimiento (Q)	NC
Baja	Deficiente	< 50%	Alto	Alto
Media	Regular	50 a 75%	Medio	Medio
Alta	Buena	> 75%	Bajo	Bajo

El uso del suelo es otro factor que tiene influencia en el escurrimiento. La utilización de los terrenos ya sea como pastizales, bosques o áreas de cultivo y los sistemas de siembra en hilera, surcos o en contornos determinarán diferentes caudales de escurrimiento. Por esta razón, para los usos de suelo de zonas húmedas y subhúmedas de los Estados Unidos y las prácticas de cultivo y tratamientos a los suelos, se obtuvieron los valores de NC para diferentes condiciones hidrológicas y tipos de suelos (Mintegui Aguirre y López Unzu, 1990; López Cádenas del Llano, 1998).

Además de la definición del GH y de la cobertura vegetal se debe tener en cuenta la condición de humedad antecedente del mismo, es decir el estado de humedad del suelo previo a la precipitación. Esta situación antecedente de humedad permite definir tres condiciones básicas (considerando el contenido de humedad del suelo determinada en base a una lluvia dentro de los 5 a 10 días previos): húmeda, media y seca (López Cádenas del Llano, 1998).

Las condiciones de humedad antecedente del suelo, se valoran modificando el Número de Curva, según la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Condición de humedad antecedente en función de la precipitación.

Condición	Humedad antecedente del suelo	Lluvia antecedente total de 5 días (mm)
I	Suelo seco	0 – 12,7
II	Suelo medio	12,7 – 38,1
III	Suelo húmedo (saturado debido a lluvias antecedentes)	> 38,1

Teniendo en cuenta la definición del Grupo Hidrológico, la cobertura vegetal, el uso del suelo y su condición de humedad antecedente media se elaboraron tablas para la determinación del NC (Tabla 4.7 - 4.8).

Tabla 4.7. Número de curva para suelos con uso agrícola.

Uso Suelo	Tratamiento o Practica	Condición	A	B	C	D
		Hidrológica				
Rastrojo o Barbecho	desnudo	-----	77	86	91	94
	Cubierta residuo de cosecha	Pobre	76	85	90	93
		Bueno	74	83	88	90
Cultivo en hilera	Hileras rectas	Pobre	72	81	88	91
		Bueno	67	78	85	89
	Hileras rectas c/ residuo	Pobre	71	80	87	90
		Bueno	64	75	82	85
	En contorno	Pobre	70	79	84	88
		Bueno	65	75	82	86
	En contorno c/ residuo	Pobre	69	78	83	87
		Bueno	64	74	81	85
	Contorno y terrazas	Pobre	66	74	80	82
		Bueno	62	71	78	81
	Contorno y terrazas, c/ residuo	Pobre	65	73	79	81
		Bueno	61	70	77	80
Cultivos de invierno	Hileras rectas	Pobre	65	76	84	88
		Bueno	63	75	83	87
	Hileras rectas c/ residuo	Pobre	64	75	83	86
		Bueno	60	72	80	84
	En contorno	Pobre	63	74	82	85
		Bueno	61	73	81	84
	En contorno c/ residuo	Pobre	62	73	81	84
		Bueno	60	72	80	83
	Contorno y terrazas	Pobre	61	72	79	82
		Bueno	59	70	78	81
	Contorno y terrazas, c/ residuo	Pobre	60	71	78	81
		Bueno	58	69	77	80
Siembra de verdeos de gramíneas y Leguminosas	Hileras rectas	Pobre	66	77	85	89
		Bueno	58	72	81	85
	En contorno	Pobre	64	75	83	85
		Bueno	55	69	78	83
	Contorno y terrazas	Pobre	63	73	80	83
		Bueno	51	67	76	80

Tabla 4.8. Número de curva para suelos con diferentes usos.

Uso Suelo	Tratamiento o Práctica	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Pastura, Pastizal o rango de forrajes continuo para pastoreo		Pobre	68	79	86	89
		Medio	49	69	79	84
		Bueno	39	61	74	80
Praderas naturales o cultivadas.	Curva nivel	Pobre	47	67	81	88
		Medio	25	59	75	83
		Bueno	6	35	70	79
Pradera, pasto continuo. reservado para pastoreo y gral cortado para heno		--	30	58	71	78
Pastizal, c/ broza, pasto mezclado con pajonal, con la mejor cobertura		Pobre	48	67	77	83
		Medio	35	56	70	77
		Bueno	30	48	65	73
Bosque, c/ mezcla de pastos, monte frutal o forestación		Pobre	57	73	82	86
		Medio	43	65	76	82
		Bueno	32	58	72	79
Bosque		Pobre	45	66	77	83
		Medio	36	60	73	79
		Bueno	30	55	70	77
Granjas, construcciones, caminos, lotes circundantes			59	74	82	86

También se puede vincular gráficamente el NC y la condición de humedad antecedente, como se presenta en la Figura 4.37, según López Cárdenas del Llano (1998).

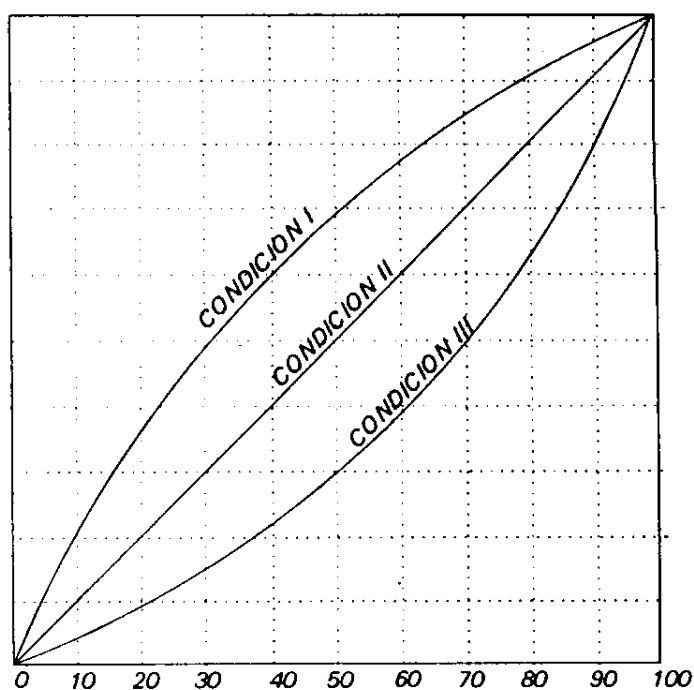


Figura 4.37. Curvas relacionando el Número de Curva con la condición de humedad antecedente.

Se puede realizar una conversión del NC teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente utilizando la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Conversión del Número de Curva de la condición II a las condiciones I y III.

NC Condición II	NC correspondiente a las condiciones:	
	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE ESCURRIMIENTO POR EL NC

Dado un hietograma de lluvia como el de la Figura 4.38, y aplicando el balance de humedad de la superficie del suelo, este método dice que la precipitación total sobre un suelo (P) es igual a la suma de la fracción de agua infiltrada o abstraída antes de producirse el exceso de lluvia, abstracción inicial I_0 (I_a), de la abstracción producida a partir de ese momento, abstracción continuada (F_a) y el exceso de lluvia (P_e) o volumen de escurrimiento. Se denomina S a la abstracción potencial (máxima) de una cuenca después de producirse el exceso de lluvia. De los datos experimentales estudiados se obtuvo que I_0 puede estimarse como $I_0 = 0,2 \cdot S$ (López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005).

A partir de la precipitación se acumula una lámina de agua sobre la superficie del terreno, una parte de esta queda retenida en la vegetación, otra inicia el proceso de infiltración, y el resto genera escurrimiento. A medida que transcurre la precipitación el proceso de infiltración tiende a saturar el suelo, y el escurrimiento tiende a aumentar. De ello se deduce que la precipitación se distribuye contemplando las características particulares y tipo de suelo y cobertura y uso del suelo en cada sitio particular.

En la Figura 4.38, López Cadenas del Llano (1998) expresa la descomposición de la precipitación en el tiempo.

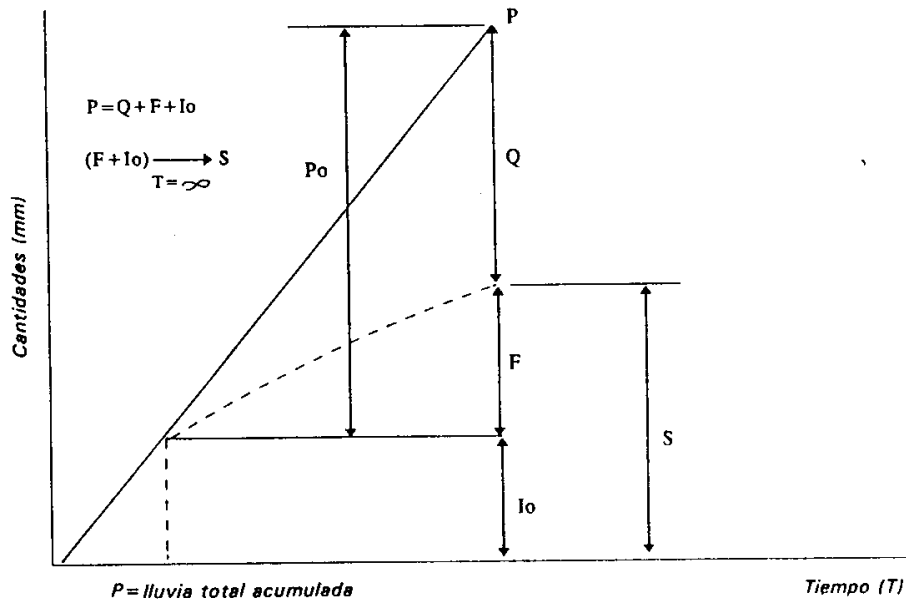


Figura 4.38. Descomposición de la precipitación en el tiempo.

A partir de esta figura se establece la Fórmula 4.42, que define cada componente de dicha descomposición, recordando además que cada uno de estos componentes integran el ciclo hidrológico.

$$P = P_o + I_o \Rightarrow P_o = P - I_o$$

$$F = P - I_o - Q$$

$$P = Q + F + I_o$$

Fórmula 4.42. Secuencia para la determinación de la Precipitación Efectiva.

Donde:

- P: Precipitación total.
- F: Infiltración, establecida como abstracciones.
- I_o: Pérdidas iniciales.
- P_o: Precipitación efectiva.
- Q: Escurrimiento.

El valor de I_o representa las pérdidas por intercepción, almacenamiento en superficie e infiltración, conocida también como abstracciones, antes de que se inicie el escurrimiento (Q),

La retención máxima de P absorbida por la cuenca (retención potencial máxima) se denomina S.

Para una tormenta determinada (P), se puede expresar que la altura de precipitación efectiva o escurrimiento directo ($P_e = Q$) es siempre menor o igual a la precipitación (P). De manera similar, después de que el escurrimiento se inicia; la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F es menor o igual a alguna retención potencial máxima S; como se aprecia en la Figura 4.39.

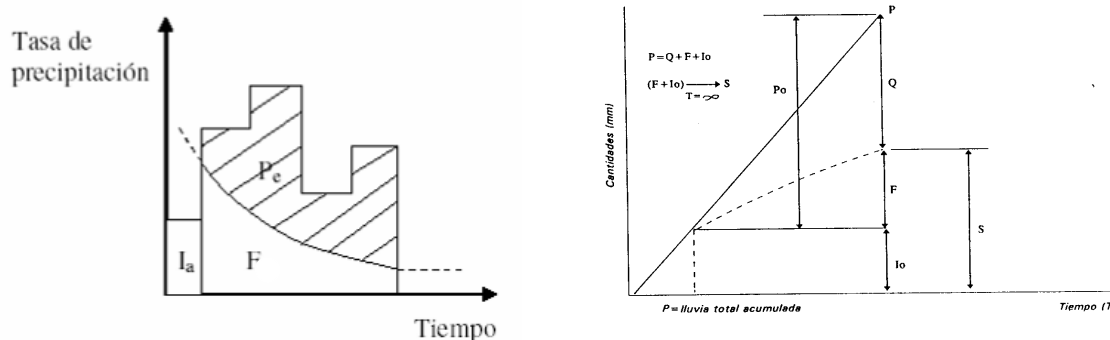


Figura 4.39. Variables en el Método del Número de curva.

Donde:

P: Lluvia total acumulada,

F: Abstracción continuada (Infiltración),

$P_e = Q$ Exceso de precipitación (Escorrimento).

$I_a = I_o$: Pérdidas iniciales (Deducción inicial = lluvia caída antes de que inicie el escurrimiento).

Interpretando la Figura 4.39, se establece que según aumenta la precipitación la diferencia entre ésta y el escurrimiento ($P-Q$) tiende a un valor constante S, que representa la máxima infiltración.

Continuando el análisis, se visualiza que existe una cierta cantidad de precipitación I_o , para la cual no ocurrirá escurrimiento. Luego el escurrimiento potencial es la diferencia entre P e I_o .

La hipótesis del método del S.C.S. consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales (Formula 4.43), representando el Principio de Continuidad.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_o}$$

Fórmula 4.43. Hipótesis del S.C.S.

Donde

F: Infiltración, establecida como abstracciones.

S: Retención potencial máxima.

Po: Precipitación efectiva.

Q: Esgurrimiento.

Como hay varias curvas que unen (Io, Q) con $Q = P - S$, se establece otra condición, como se expresa en la Fórmula 4.44, conjugando las fórmulas 4.42 y 4.43.

$$\frac{(P - I_o - Q)}{S} = \frac{Q}{(P - I_o)}$$

Fórmula 4.44. Relación sobre la hipótesis del S.C.S.

La Fórmula 4.44, de igualdad expresa la relación que existe entre: (Retención real / Retención potencial máxima) = (Esgurrimiento / Esgurrimiento potencial máximo).

Integrando todos estos conceptos y sabiendo que:

$$P = Q + I_o + F$$

Fórmula 4.45. Principio de continuidad.

Donde:

P: Precipitación total.

Q: Esgurrimiento.

Io: Pérdidas iniciales.

F: Infiltración, establecida como abstracciones.

Se establece la combinación de las Fórmulas 4.43 y 4.45, y resolviendo Q (esgurrimiento directo o profundidad de exceso de precipitación) se obtiene la Ecuación básica para cuantificar el esgurrimiento directo, con la Fórmula 4.46.

$$Q = \frac{(P - I_o)^2}{P - I_o + S}$$

Fórmula 4.46. Ecuación básica para determinar la profundidad de exceso de precipitación o escurrimiento directo.

Como se expresó anteriormente, a partir de los resultados en el campo obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, el S.C.S. desarrolló una ecuación empírica para determinar I_o , según la Fórmula 4.47, a partir de la retención potencial máxima (S).

$$I_o = 0,2 \cdot S$$

Fórmula 4.47. Ecuación básica para determinar la abstracción inicial.

Continuando el análisis para establecer el escurrimiento directo, de la Fórmula 4.46, se establece la Fórmula 4.48.

$$Q = \frac{(P - I_o)^2}{P + 4 \cdot I_o} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

Fórmula 4.48. Ecuación de escurrimiento directo.

Para la obtención del valor de S se utiliza el Número de Curva (NC), las Tablas 4.7 y 4.8, y la expresión de la fórmula 4.49.

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{NC} - 1 \right)$$

Fórmula 4.49. Ecuación para establecer la retención potencial máxima (S).

Al representar gráficamente la relación entre la precipitación (P) y el escurrimiento directo (Pe) para muchas cuencas, el S.C.S. generó las curvas características, como se expresa en la Figura 4.40. En esta figura se presenta un nomograma para determinar el escurrimiento en función de la precipitación y el número de curva.

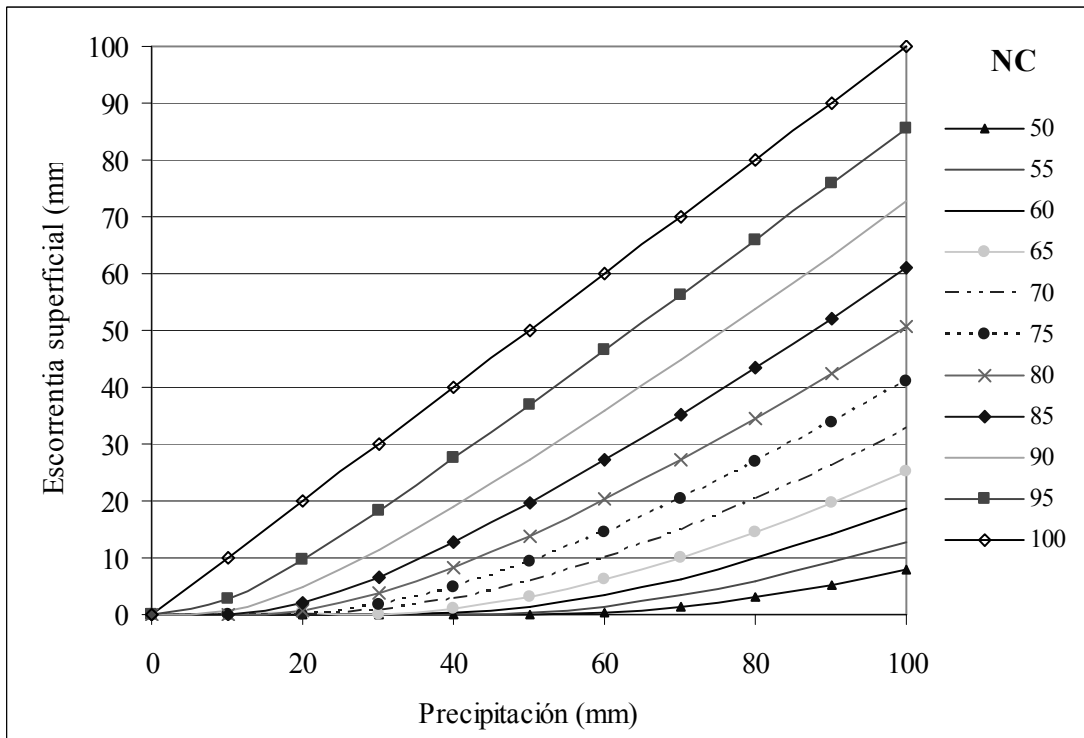


Figura 4.40. Relación precipitación – escorrentimiento según el Número de Curva (NC).

Por ejemplo: si se considera una precipitación de 80 mm y el NC de la cuenca es de 95, entrando por el eje de las abscisas se ingresa esta información. Luego cortando hacia el eje de ordenada se obtiene un caudal de escorrentimiento de 66 mm (Figura 4.41)

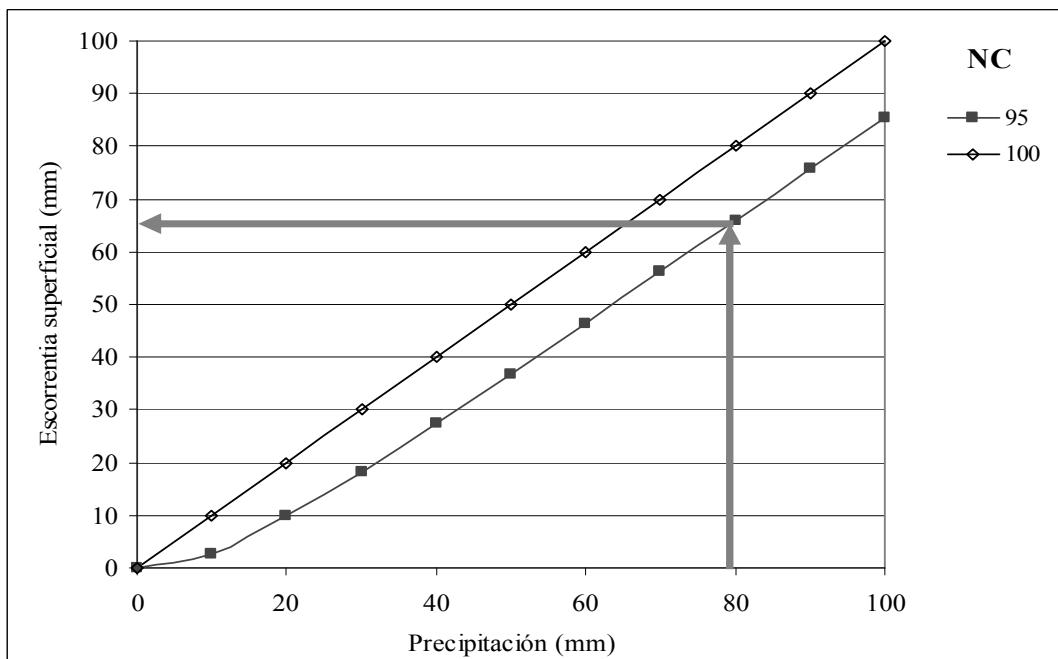


Figura 4.41. Ejemplo de determinación del caudal de escorrentimiento según NC y precipitación.

COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

Del total de agua de lluvia que cae sobre la superficie de un terreno, una parte se evapora, otra discurre por la superficie (escurrimiento) y otra penetra en el terreno (infiltración). Conociendo estos conceptos, se define que el coeficiente de escurrimiento (CE) de una superficie, es el cociente del caudal que discurre por dicha superficie (Q), en relación con el caudal total precipitado (P) (Fórmula 4.50).

$$CE = Q \cdot P^{-1}$$

Fórmula 4.50. Coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento puede variar a lo largo del tiempo y es función de las características del terreno (vegetación, permeabilidad, pendiente, humedad inicial del suelo, entre otros factores) y de la región donde esté situada la cuenca (temperatura, intensidad y duración de la precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, superficie de la cuenca). Estos factores interactúan complicando el análisis aislado de cada uno de ellos. Así, en una precipitación, la evaporación y la infiltración de agua irán disminuyendo conforme vaya aumentando la humedad relativa y el estado de saturación del suelo, aumentando el coeficiente de escurrimiento desde valores iniciales iguales o próximos a cero hasta valores finales iguales o cercanos a la unidad.

Existen tablas que determinan coeficientes de escurrimiento teniendo en cuenta sólo el tipo de terreno y la cobertura vegetal. La mayoría de estas tablas no tienen en cuenta que el proceso de escurrimiento depende fundamentalmente de la precipitación y de la condición de humedad antecedente. Es por esto que a partir de la relación existente entre el coeficiente de escurrimiento y el número de curva pueden obtenerse tablas más confiables que sustituyan a las tradicionales.

La Tabla 4.10 muestra coeficientes de escurrimiento teniendo en cuenta una precipitación de 50 mm, según el tipo de vegetación, la condición hidrológica de los suelos y grupo hidrológico de los mismos (Martínez de Azagra Paredes, 2006).

Tabla 4.10. Determinación del Coeficiente de escurrimiento para una precipitación de 50 mm y condición II de humedad (Martínez de Azagra Paredes, 2006)

TIPO DE VEGETACIÓN	TRATAMIENTO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	Desnudo	-	0,22	0,42	0,58	0,69
	CR	Pobre	0,20	0,39	0,54	0,65
	CR	Pobre	0,17	0,34	0,48	0,54
Cultivos alineados	R	Pobre	0,14	0,30	0,48	0,58
	R	Buena	0,08	0,24	0,39	0,51
	R + CR	Pobre	0,13	0,28	0,42	0,54
	R + CR	Buena	0,06	0,19	0,32	0,39
	C	Pobre	0,12	0,26	0,37	0,48
	C	Buena	0,06	0,19	0,32	0,42
	C + CR	Pobre	0,10	0,24	0,34	0,45
	C + CR	Buena	0,06	0,17	0,30	0,39
	C + T	Pobre	0,07	0,17	0,28	0,32
	C + T	Buena	0,04	0,13	0,24	0,30
	C + T + CR	Pobre	0,06	0,16	0,26	0,30
C + T + CR	Buena	0,03	0,12	0,22	0,28	
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobre	0,06	0,20	0,37	0,48
	R	Buena	0,05	0,19	0,34	0,45
	R + CR	Pobre	0,06	0,19	0,34	0,42
	R + CR	Buena	0,03	0,14	0,28	0,37
	C	Pobre	0,05	0,17	0,32	0,39
	C	Buena	0,03	0,16	0,30	0,37
	C + CR	Pobre	0,04	0,16	0,30	0,37
	C + CR	Buena	0,03	0,14	0,28	0,34
	C + T	Pobre	0,03	0,14	0,26	0,32
	C + T	Buena	0,02	0,12	0,24	0,30
	C + T + CR	Pobre	0,03	0,13	0,24	0,30
C + T + CR	Buena	0,02	0,10	0,22	0,28	
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	R	Pobre	0,07	0,22	0,39	0,51
	R	Buena	0,02	0,14	0,30	0,39
	C	Pobre	0,06	0,19	0,34	0,39
	C	Buena	0,01	0,10	0,24	0,34
	C + T	Pobre	0,05	0,16	0,28	0,34
C + T	Buena	~ 0	0,08	0,20	0,28	
Pastizales o pastos naturales	-	Pobres	0,09	0,26	0,42	0,51
	-	Regulares	0	0,10	0,26	0,37
	-	Buenas	0	0,03	0,17	0,28
Pastizales	C	Pobres	0	0,08	0,30	0,48
	C	Regulares	0	0,02	0,19	0,34
	C	Buenas	0	0	0,12	0,26
Prados permanentes	-	-	0	0,02	0,13	0,24
	-	Pobres	0	0,08	0,22	0,34
	-	Regulares	0	0,01	0,12	0,22
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Buenas	0	0	0,06	0,16
	-	Pobres	0,01	0,16	0,32	0,42
	-	Regulares	0	0,06	0,20	0,32
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	-	Buenas	0	0,02	0,14	0,25
	-	Pobres	0	0,07	0,22	0,34
	-	Regulares	0	0,03	0,16	0,25
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastoriles)	-	Buenas	0	0,01	0,12	0,22
	-	Muy pobre	0,01	0,19	0,42	0,58
	-	Pobre	0	0,09	0,24	0,37
Bosques	-	Regular	0	0,03	0,12	0,20
	-	Buena	0	~ 0	0,05	0,10
	-	Muy buena	0	0	~ 0	0,03
	-	-	0,02	0,17	0,32	0,42
Caseríos	-	-	0,02	0,17	0,32	0,42
Caminos en tierra	-	-	0,14	0,32	0,45	0,51
Caminos en firme	-	-	0,17	0,37	0,54	0,61

CR = Cubierta de residuos; R = Labores en línea recta; C = Labores en curvas de nivel; T = Terrazas

Gaspari *et al.* (2007) estudiaron la relación precipitación – escurrimiento y número de curva en una cuenca del sistema serrano de Ventana, Argentina, estimando valores de coeficientes de escurrimiento a partir del NC y de la precipitación.

Chow *et al.* (1993) establecieron los tipos de usos de la tierra reconocidos y los coeficientes de escurrimiento asociados, según la siguiente referencia:

TIPOS DE USO DE LA TIERRA	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO:
<i>Sectores urbanos consolidados.</i> Corresponden a la zona urbana consolidada y al área de expansión producida en las últimas décadas, con mayores compacidades de urbanización.	0,70 - 0,95 (sector céntrico) 0,30 – 0,50 (predominio de casas aisladas)
<i>Sectores urbano-industriales e industriales.</i> Corresponde principalmente a los sectores de transición entre la ciudad compacta y áreas rurales, con un diseño de construcción que incorpora la mantención de áreas verdes o al menos de áreas sin edificar en cada sitio, lo que regula los coeficientes de escurrimiento.	0,60 – 0,90
<i>Praderas.</i> Resulta en un comportamiento de los suelos con una alta tasa de infiltración y menores montos de escurrimiento, cuando se localizan en área de suelos de buena calidad.	0,25 – 0,40
<i>Estepa.</i> Permiten inferir buenas condiciones para el drenaje interno de los suelos y la regulación del flujo en estas áreas.	0,10 – 0,22
<i>Cultivos.</i> Representan sitios con una buena infiltración y drenaje en los suelos.	0,30 – 0,40
<i>Casas Quintas.</i> Los suelos en esta categoría, se debe destacar su importancia en la regulación del flujo hídrico al interior de la zona urbana.	0,30 – 0,50

MÉTODOS DE CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

A continuación se presentan diferentes modelos y tablas que permiten calcular coeficientes de escurrimiento.

- **Fórmula de Nadal:** Esta Fórmula tiene en cuenta el área de la cuenca (K1), lluvia media anual (K2), pendiente y permeabilidad (K3), según la Fórmula 4.51 y la Tabla 4.11.

$$C = 0,25 \cdot K1 \cdot K2 \cdot K3$$

Fórmula 4.51. Coeficiente de escurrimiento según Nadal.

Tabla 4.11. Determinación de Coeficientes para fórmula de Nadal.

Área		Precipitación media anual	
(km ²)	K1	(mm)	K2
10	2,60	200	0,25
20	2,45	300	0,50
40	2,15	400	0,75
100	1,80	500	1,00
200	1,70	600	1,10
500	1,40	700	1,17
1.000	1,30	800	1,25
5.000	1,00	900	1,32
10.000	0,90	1000	1,40
20.000	0,87	1200	1,50

Característica de la cuenca	K3
Llana y permeable	0,5 - 0,7
Ondulada	0,5 - 1,2
Montañosa e impermeable	1,2 - 1,5

- **Tabla de Molchanov:** Esta tabla está diseñada utilizando parcelas forestales en las cuales se establecieron cinco coeficientes de escurrimiento, a partir de la pendiente del terreno, la densidad y uso de la cobertura vegetal y tipo de suelo (Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Determinación del Coeficiente de Escurrimiento según Molchanov.

Tipo de escurrimiento	Pendiente del terreno (°)	Densidad y uso de la cubierta vegetal (D)	Tipo de suelo	C (%)
I	1 – 35	≥ 0,6 sin pastoreo	Franco arenoso	5
II	5 – 35	0,5 > D > 0,4 con pastoreo ocasional	Franco pedregoso	6 – 25
III	5 – 40	0,4 ≥ D > 0,1 con pastoreo permanente	Franco pedregoso	25 – 50
IV	5 – 40	0,4 ≥ D > 0,1 con pastoreo intensivo	Franco pedregoso	50 – 75
V	5 – 40	0,4 ≥ D > 0,1 con pastoreo intensivo	Arcilloso	> 75

METODOLOGÍAS BÁSICAS PARA DETERMINAR EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

El cálculo del escurrimiento superficial se considera teniendo en cuenta dos objetivos básicos:

- 1) Conocer el escurrimiento medio, para estimar el volumen de agua por almacenar o retener.
- 2) Cuantificar los escurrimientos máximos instantáneos para el diseño de obras de conservación.

- **ESCURRIMIENTO MEDIO**

Para calcular el escurrimiento medio en cuencas pequeñas o áreas de drenaje reducidas, es necesario conocer el valor de la precipitación media, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento. La ecuación general se representa en la Fórmula 4.52, determinando el coeficiente de escurrimiento a partir de la Tabla 4.13.

$$V_m = C \cdot P_m \cdot A$$

Fórmula 4.52. Volumen medio que puede escurrir (V_m : m^3).

Donde:

- A: Área de la cuenca (ha)
- C: Coeficiente de escurrimiento (adimensional)
- P_m : Precipitación media (mm)

Tabla 4.13. Determinación del Coeficiente de Escurrimiento Medio.

Uso del suelo	Pendiente del terreno (%)	Textura del suelo		
		Gruesa	Media	Fina
Bosque	Plano (0 – 5)	0,10	0,30	0,40
	Ondulado (5 – 10)	0,25	0,35	0,50
	Escarpado (> 10)	0,30	0,50	0,60
Pastizal	Plano (0 – 5)	0,10	0,30	0,40
	Ondulado (5 – 10)	0,16	0,36	0,55
	Escarpado (> 10)	0,22	0,42	0,60
Cultivo	Plano (0 – 5)	0,30	0,50	0,60
	Ondulado (5 – 10)	0,40	0,60	0,70
	Escarpado (> 10)	0,52	0,72	0,82

- **ESCURRIMIENTO MÁXIMO INSTANTÁNEO**

El escurrimiento máximo instantáneo (Q_p), utilizado para el diseño de obras de excedencia, se puede estimar para diferentes períodos de retorno por el método racional modificado o por el método de Número de Curva del S.C.S. (USA) explicado anteriormente.

El Método racional modificado para estimar escurrimientos máximos consiste en utilizar los valores de intensidad de la lluvia para diferentes períodos de retorno y el área de drenaje para estimar los escurrimientos máximos instantáneos.

Actualmente, se utiliza la lluvia máxima en 24 horas para diferentes períodos de retorno, en lugar de la intensidad de la lluvia, tal y como se muestra en la Fórmula 4.53.

$$Q_p = \frac{C \cdot I \cdot A}{360}$$

Fórmula 4.53. Escurrimiento máximo instantáneo (Q_p : $m^3 \cdot s^{-1}$)

Donde:

C: Coeficiente de escurrimiento

I: Lluvia máxima en 24 horas (intensidad) para un período de retorno (mm)

A: Área de drenaje (ha)

360: Factor de ajuste de unidades

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

Un modelo es una representación simplificada de un sistema, por lo cual debe necesariamente desprestigiar variables del sistema real en función del objetivo para el cual fue o será creado. Un modelo está compuesto por variables o elementos interrelacionados en un intervalo de tiempo, que actúan (procesos) sobre una entrada (materia, energía o información) de manera controlada bajo ciertas restricciones para producir una salida (materia, energía o información).

Un sistema hidrológico natural es tan complejo que no se han desarrollado leyes exactas que puedan explicar completa y exactamente los fenómenos intervinientes. Cada uno de los elementos o procesos intervinientes de un sistema hidrológico es el resultado de muchos factores de gran variabilidad espacial y temporal, cuyas características físicas difícilmente pueden medirse directamente.

Un modelo hidrológico es una aproximación al sistema hidrológico real, sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas (Chow, *et al.* 1994).

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados de diversas maneras en función de diferentes criterios. Los modelos se dividen en dos categorías, la primera está constituida por los modelos físicos, éstos representan el sistema real en una escala reducida, como por ejemplo un modelo hidráulico del vertedero de una represa o dique. La segunda categoría corresponde a modelos abstractos, donde el sistema se representa en forma de ecuaciones matemáticas. Dentro de los modelos abstractos existe una variada gama de tipos de modelos, dentro de los cuales pueden clasificarse según diferentes criterios. A continuación se expondrán brevemente algunos de ellos.

Según la relación parámetros/procesos.

- Modelos empíricos: este tipo de modelos puede ser definido como una aproximación directa que incluye alguna ecuación matemática; no se considera la relación entre los parámetros de la ecuación con los procesos que están siendo considerados. Son creados a partir de la experimentación. Como ejemplo se puede citar el método del número de curva.
- Modelos conceptuales: A diferencia de los modelos empíricos este tipo de modelos se construye a partir de teorías y relaciones entre los parámetros de la ecuación y los procesos. Un ejemplo puede ser el balance de agua en el suelo tomando como variables el consumo de agua (plantas; atmósfera), la precolación (flujo vertical) y los escurrimientos subterráneos (flujo horizontal).

Según el tipo de respuesta.

- Modelos determinísticos: Se incluyen en esta categoría aquellos modelos que como resultado tienen un único valor para una combinación de variables determinada. Como ejemplo se puede citar nuevamente el método del número de curva, en este caso una combinación de suelos-vegetación para una precipitación establecida tienen como resultado una lámina de escurrimiento determinada.

- Modelos estocásticos: En los modelos estocásticos la variable respuesta se obtiene en términos de probabilidad. La determinación de caudales a través de la relación altura-caudal constituye un ejemplo claro de este tipo de modelos. La ecuación generada con estas variables posee un ajuste determinado, lo cual determina que la respuesta del modelo posee un intervalo de confianza con una probabilidad (P).

Según el alcance temporal.

- Modelos de evento: Calculan la variable respuesta para un suceso determinado en un momento dado, por ejemplo el escurrimiento generado para una precipitación.
- Modelos continuos: Los modelos continuos poseen un alcance de tiempo mayor, un ejemplo típico es el balance de agua en el suelo a nivel diario durante un mes, en este caso la variable entrada al sistema puede ser una precipitación, pero el estado del agua en el suelo varía diariamente en función de la evapotranspiración, los flujos internos verticales (percolación) y horizontales (escurrimientos subsuperficiales).

Según el alcance espacial.

- Modelos agregados: El alcance espacial de este tipo de modelos se limita a un punto, cada unidad es tratada como un promedio ponderado de la superficie real. Un ejemplo lo constituye la determinación del escurrimiento a través de la ponderación del número de curva para una subcuenca.
- Modelos distribuidos: Los modelos se clasifican como distribuidos cuando las variables tienen en cuenta su variación espacial.

Las clasificaciones antes expuestas pueden combinarse para obtener por ejemplo un modelo conceptual, determinístico, de evento y agregado. Existen numerosos modelos con combinaciones diversas de las clasificaciones citadas, cada uno de ellos satisface diferentes objetivos que deben tenerse en cuenta a la hora de su selección.

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

Debido a las limitaciones en las técnicas de medición de fenómenos del mundo real, modelos de simulación de diferentes tipos proveen medios de extrapolación cuantitativa o predicción, que permiten simular estados de un sistema hidrológico real cuando no hay datos disponibles en el espacio o en el tiempo y conocer el impacto de futuros cambios hidrológicos, ayudando de este modo a los tomadores de decisión ambiental (Urciuolo *et al.*, 2007).

Los modelos hidrológicos, al ser una representación incompleta de la realidad, no pueden responder a todos los aspectos del mundo real, es por ello que debe considerarse al momento de elegir un modelo y realizar simulaciones, el objetivo para el cual fue creado, la exactitud de la respuesta, las rutinas y subrutinas que lo componen y las variables entrada que utiliza (disponibilidad de bases de datos o costo y tiempo para su relevamiento).

A continuación, se desarrollan conceptos previos para la modelización hidrológica.

MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación es la fuente de agua que contribuye al escurrimiento superficial en una cuenca. Su medición y tratamiento constituyen una base importante en la modelización, ya que de ello depende en gran parte los resultados calculados por cualquier modelo.

La medición de la precipitación pluvial puede efectuarse básicamente de dos maneras, a través de pluviómetros o a través de pluviógrafos (Figura 4.42 a y b). Los pluviómetros son recipientes graduados en función de su área de captación de lluvia, los datos relevados generalmente corresponden a la lámina total precipitada durante una tormenta. Los pluviógrafos registran sobre un papel la lámina de agua precipitada de manera continua durante por lo menos una semana.

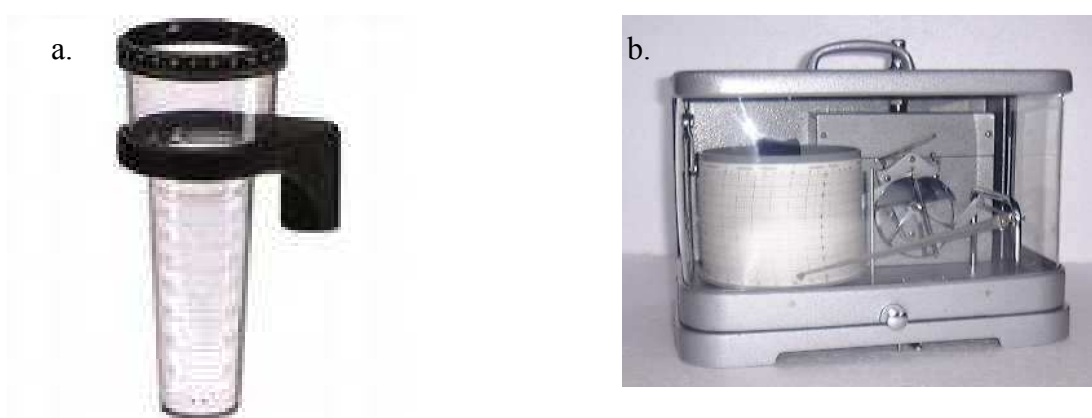


Figura 4.42. a) Pluviómetro. Fuente <http://www.thermolab.com.ar/>

b) Pluviógrafo. Fuente. <http://ing.univaq.it>

Los modelos hidrológicos, ya sean distribuidos o agregados, requieren como datos de entrada valores de precipitación. Según el tipo de distribución temporal de los datos para la simulación, se pueden utilizar registros pluviométricos (valores diarios de precipitación) o registros pluviográficos (valores horarios o sub-horarios de precipitación).

Los modelos de simulación hidrológica están basados en dos supuestos fundamentales concernientes a la precipitación, el primero consiste en la uniformidad espacial, es decir, el agua precipitada no posee variación espacial en magnitud dentro de la unidad hidrológica (cuenca, subcuenca o microcuenca dependiendo de la escala de trabajo), el segundo supuesto considera que su intensidad es constante durante el período de tiempo analizado. Estos supuestos determinan que se empleen métodos para el tratamiento de los datos de precipitación en el momento de realizar una simulación.

Si se cuenta con registros puntuales distribuidos en la cuenca es necesario asignarle un valor medio con el fin de cumplir los supuestos mencionados anteriormente, para ello existen diferentes métodos que serán descriptos a continuación:

1. Media aritmética. Consiste en calcular la precipitación media caída en la cuenca a través del promedio de las láminas registradas en los pluviómetros (Figura 4.43, Tabla 4.14). La ecuación que expresa esta relación se presenta en la Fórmula 4.54.

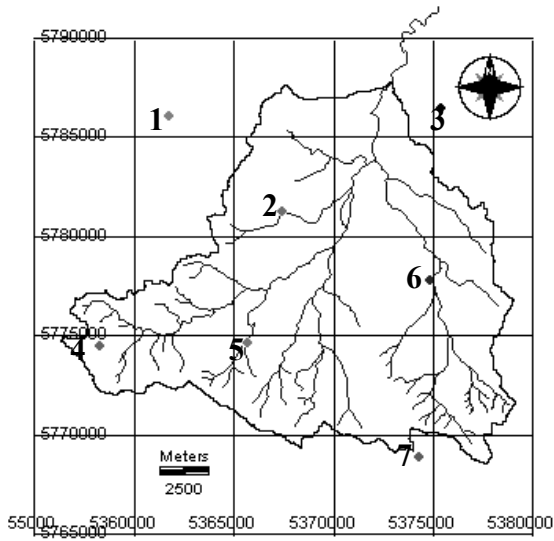


Figura 4.43: Distribución de pluviómetros en una cuenca

Pluviómetro	X (mm)	\bar{X} (mm)
1	22,5	
2	22	
3	20	
4	25,7	23,2
5	25	
6	22	
7	25,2	

Tabla 4.14: Lámina registrada en pluviómetros y lámina media en una cuenca.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Fórmula 4.54. Lámina de precipitación media caída en la cuenca (\bar{X})

Donde:

n: Número de pluviómetros.

X_i : Lámina de precipitación caída en la el pluviómetro i

2. Polígonos de Thiessen. Consiste en calcular la lámina de precipitación caída en la cuenca ponderada a través del área de influencia de cada pluviómetro. Para obtener el área de influencia se construyen los denominados polígonos de Thiessen. El procedimiento consta de 3 pasos, primero se dibujan líneas rectas que unen los puntos de ubicación de los pluviómetros con los mas cercanos formando una serie de triángulos (Figura 4.44 a), luego se procede a trazar las bisectrices de dichos triángulos, los puntos donde se cortan las líneas bisectrices forman los polígonos de Thiessen (Figura 4.44 b). El procedimiento descrito puede realizarse automáticamente a través de softwares específicos, haciendo más sencilla la operación. Luego deben ajustarse los polígonos creados a los límites de la cuenca. Posteriormente se procede a calcular la lámina de precipitación media ponderada para la cuenca (Tabla 4.15) a través de la Fórmula 4.55.

$$\bar{X} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n A_i X_i$$

Fórmula 4.55. Lámina de precipitación media ponderada caída en la cuenca (\bar{X}).

Donde:

At: Área total de la cuenca.

A_i: Área del polígono de Thiessen correspondiente al pluviómetro i .

X_i: Lámina de precipitación caída en el pluviómetro

n: Número de polígonos de Thiessen.

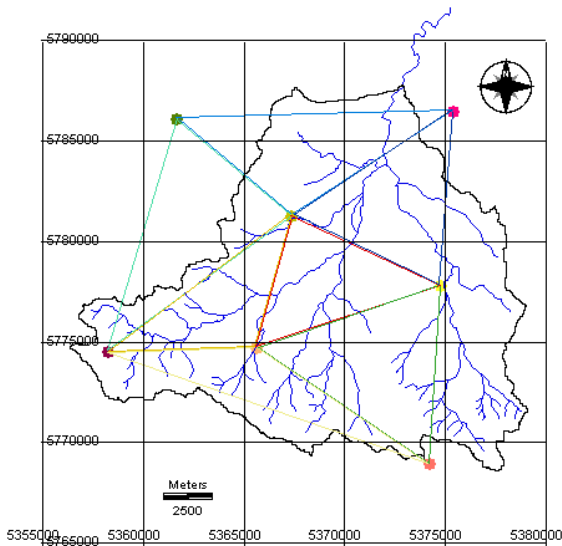


Figura 4.44 a. Formación de los triángulos a partir de los puntos de ubicación de los pluviómetros.

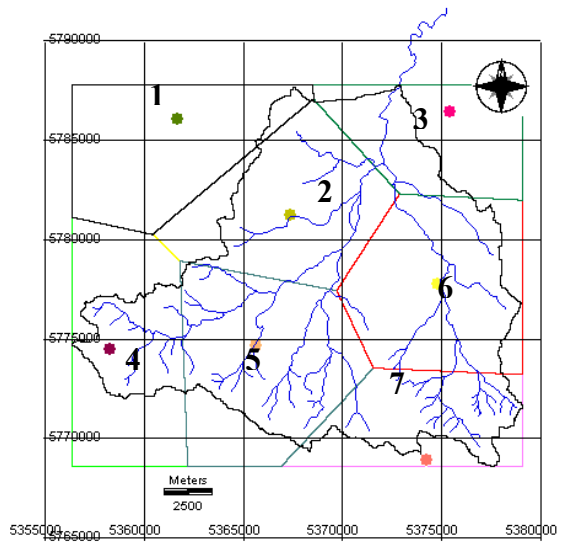


Figura 4.44 b. Formación de los polígonos de Thiessen a partir de las líneas bisectrices de los triángulos.

Tabla 4.15. Área de polígonos de Thiessen, lámina registrada en pluviómetros asignada a cada polígono y lámina media de precipitación en una cuenca.

Polígono	A _i	X (mm)	\bar{X} (mm)
1	18	22,5	
2	63	22	
3	50	20	
4	43	25,7	23,3
5	72	25	
6	88	22	
7	71	25,2	

3. Método de las isoyetas: El método consiste en el trazado de isoyetas (curvas que unen puntos de igual precipitación), a través de interpolación entre pluviómetros (Figura 4.45). Para determinar la precipitación media de la cuenca se procede a calcular el promedio de las láminas registradas entre dos isoyetas sucesivas y ponderarla por el área entre ambas, realizando la sumatoria de láminas ponderadas se obtiene el valor buscado (Tabla 4.16). La ecuación de cálculo se expresa en la Fórmula 4.56.

$$\bar{X} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n A_{ij} \bar{X}_{ij}$$

Fórmula 4.56. Lámina de precipitación media ponderada caída en la cuenca (\bar{X}).

Donde:

A_t: Área total de la cuenca.

A_{ij}: Área entre dos isoyetas sucesivas.

\bar{X}_{ij} : Lámina promedio entre dos isoyetas sucesivas

n: Número de áreas entre isoyetas.

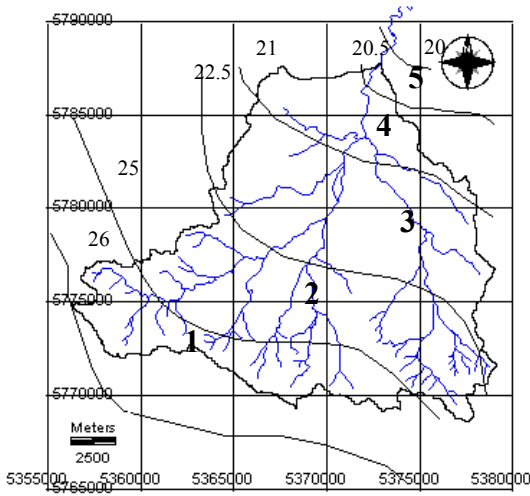


Figura 4.45. Trazado de isoyetas y cálculo de la lámina de precipitación promedio.

Area	A_{ij} (ha)	\bar{X}_{ij} (mm)	\bar{X} (mm)
1	50	25,5	
2	110	23,75	
3	180	21,75	22,6
4	60	20,75	
5	5	20,25	

Tabla 4.16. Área entre isoyetas, lámina registrada en pluviómetros asignada a cada área y lámina media de precipitación.

De los tres métodos descriptos, la media aritmética es el más sencillo, aunque posee el mayor error ya que asigna el mismo peso a todos los pluviómetros sin tener en cuenta su distribución espacial y su área de influencia. Los polígonos de Thiessen superan este último inconveniente, pero la variabilidad espacial no es contemplada. El método de las isoyetas contempla la variación espacial, siendo el más preciso si se utilizan los métodos adecuados para el trazado de las curvas.

En cada estudio particular, el método a utilizar será el que se adecue a los datos y tiempo que posea la persona que lleve a cabo el proceso. Por ejemplo, una baja densidad de pluviómetros implica que las curvas trazadas posean un error relativamente alto, con lo cual se aconseja la utilización de polígonos de Thiessen, método más sencillo y con resultados similares bajo estas condiciones.

De los modelos hidrológicos presentados, algunos utilizan como dato de entrada la precipitación total caída en una cuenca, otros requieren la distribución a nivel horario o subhorario de la lámina de agua caída durante una tormenta. Como se mencionó anteriormente éste tipo de datos es registrado por pluviógrafos, siendo ésta la lluvia acumulada por período de tiempo, denominada **curva de masa de lluvia**.

Al igual que los datos de lluvia total, se puede determinar una curva de masa de lluvia media (Figura 4.46); para ello se aplican los procedimientos antes citados.

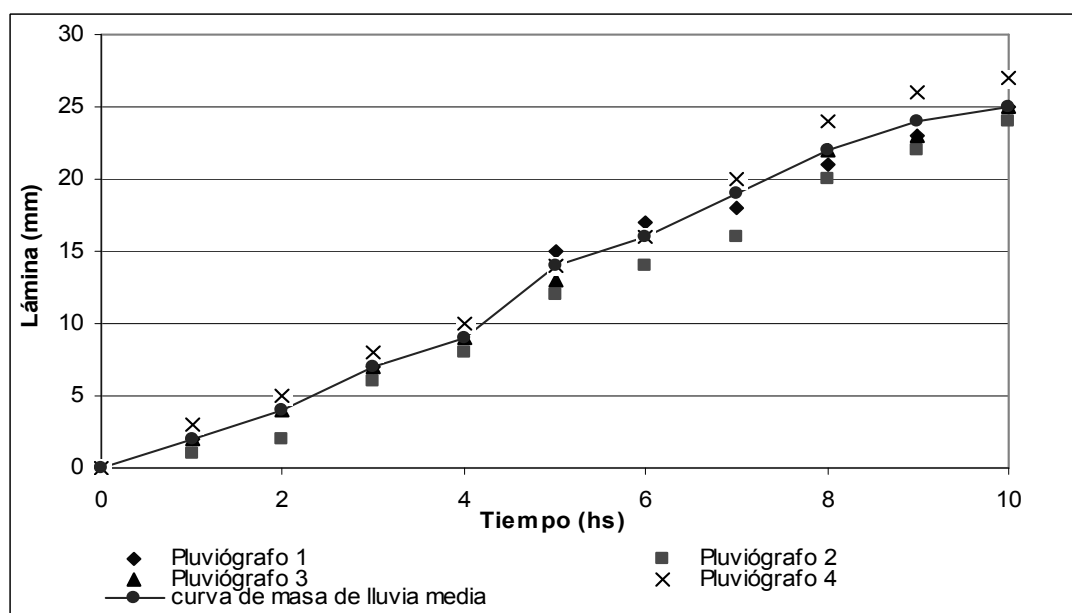


Figura 4.46. Curva de masa de lluvia media con datos publiográficos.

Como ejemplo de aplicación se expone la determinación de una curva de masa de lluvia media para 4 pluviómetros a través del método de la media aritmética (Tabla 4.17).

Tabla 4.17. Determinación de la curva de masa de lluvia media para cuatro pluviómetros (P.).

Tiempo (hs)	P. 1	P.2	P.3	P.4	Curva de masa de lluvia media (mm)
0	0	0	0	0	0
1	2	1	2	3	2
2	5	2	4	5	4
3	7	6	7	8	7
4	10	8	9	10	9
5	15	12	13	14	14
6	17	14	16	16	16
7	18	16	20	20	19
8	21	20	22	24	22
9	23	22	23	26	24
10	25	24	25	27	25

ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

La precipitación se caracteriza por su gran variabilidad, por ello es necesario a la hora de especificar e incluso utilizar este tipo de datos, sintetizar sus propiedades a través de lo que se denomina curvas de intensidad, duración, frecuencia.

Se denomina intensidad (I) a la masa o lámina de precipitación caída por unidad de tiempo. La intensidad de una precipitación se determina según la Fórmula 4.57.

$$I = \frac{\text{Lámina}}{\text{Tiempo}}$$

Fórmula 4.57. Ecuación básica de intensidad de una precipitación (I).

La duración (D) representa el tiempo (min.) transcurrido desde el inicio de la precipitación hasta que concluye. El número de años que en promedio presenta un evento de similares características (I, D) se denomina frecuencia (F), también suele denominarse intervalo de recurrencia o período de retorno. A continuación se expone en la Figura 4.47, la relación I-D-F para una cuenca modelo.

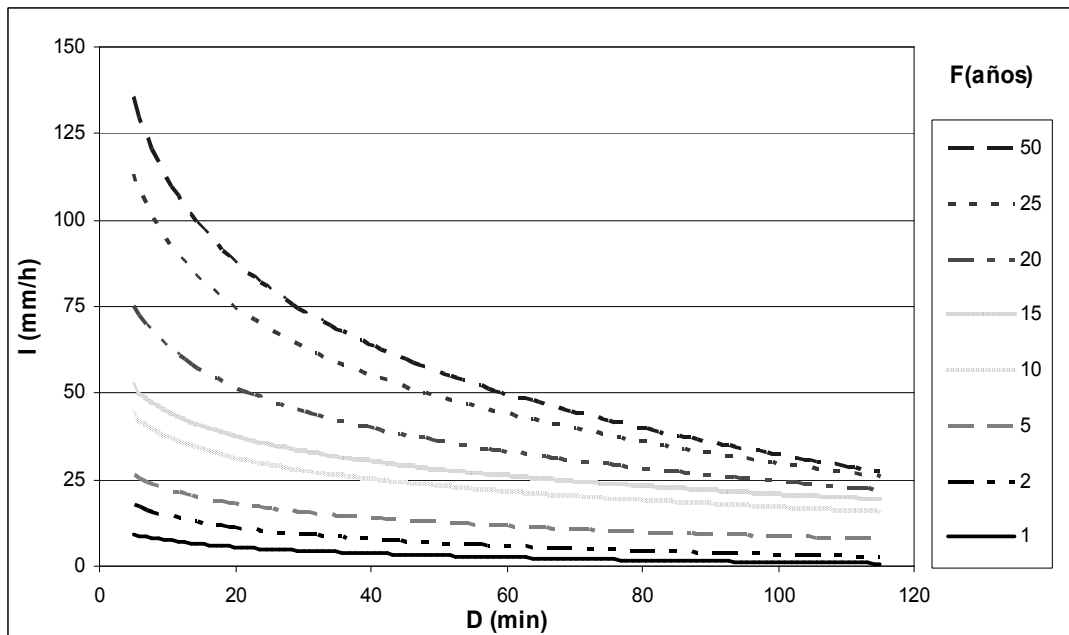


Figura 4.47. Curvas I-D-F en una cuenca modelo.

TORMENTA DE DISEÑO

Al momento de realizar simulaciones hidrológicas se requiere como dato de entrada una curva de masa de lluvia. A partir de ello se plantea un problema debido a la gran variabilidad de las intensidades, su duración y su período de retorno. La solución a esto suele resolverse a través de la construcción de una tormenta de diseño, es decir, se crea una tormenta basada en las curvas I-D-F.

El método desarrollado a continuación se denomina método de bloques alternos (Chow, *et al.*, 1994), para lo cual se debe fijar el período de retorno y la duración. La elección de estos parámetros depende del objetivo para el cual se realiza la simulación.

Por ejemplo: Se quiere construir una tormenta de diseño con una duración total de 210 minutos con intervalos de tiempo de 30 minutos para un período de retorno de 10 años.

- El primer paso consiste en determinar las intensidades para los intervalos de tiempo considerados. Se presenta la curva I-D para dicho período de retorno mostrando la determinación de la intensidad hasta cada período de tiempo (Figura 4.48).

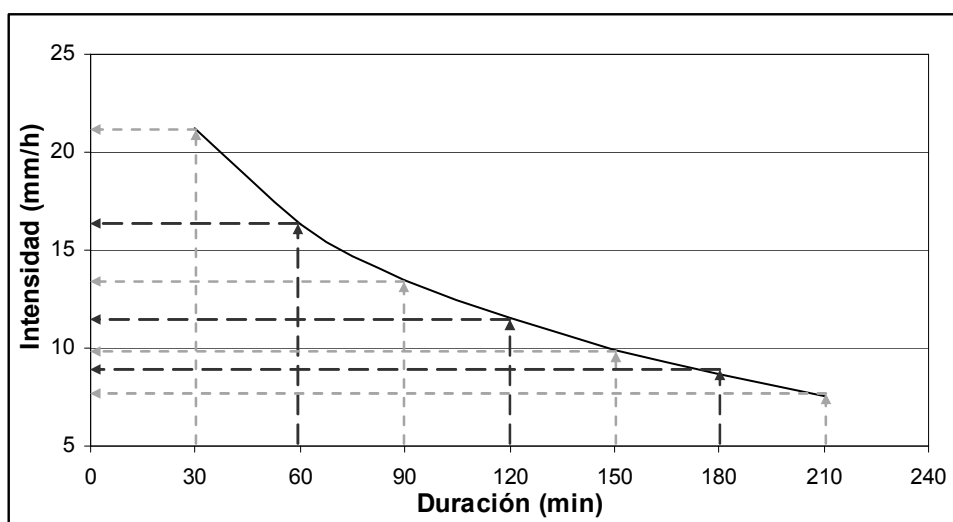


Figura 4.48. Determinación de intensidades para diferentes duraciones para una curva con período de retorno de 10 años.

- Luego se determina la precipitación caída hasta el intervalo, cuyo cálculo se realiza multiplicando la intensidad por la duración de la misma.
- El siguiente paso consiste en determinar la precipitación en cada intervalo de tiempo. Para ello se procede a restarle a la precipitación caída en el intervalo j la precipitación caída en el intervalo $j-1$, en forma general $\Delta P_j = P_j - P_{j-1}$.
- La Tabla 4.18 expresa los resultados, para intensidad con diferente duración para una curva con período de retorno de 10 años

Tabla 4.18. Ejemplo de cálculo de una tormenta de diseño.

Tiempo (min)	Tiempo (hs)	I (mm.h ⁻¹)	PP (mm)	ΔP (mm)
30	0,5	21,19	10,60	10,60
60	1	16,34	16,34	5,74
90	1,5	13,50	20,25	3,91
120	2	11,49	22,98	2,72
150	2,5	9,93	24,81	1,84
180	3	8,65	25,95	1,13
210	3,5	7,57	26,50	0,55

Los resultados obtenidos poseen orden descendente en función del tiempo. En general la precipitación caída en una región suele tener el pico máximo como valor central, es por ello que para construir el hietograma de diseño se coloca el mayor valor en el centro del hidrograma y luego en forma alternada a la derecha e izquierda respectivamente se colocan los demás valores en forma descendente (Tabla 4.19, Figura 4.49). Una mejor aproximación se realiza distribuyendo la precipitación, si se dispone de algunos hidrogramas de la zona, en función de la ubicación de sus picos, por ejemplo pueden situarse en el primer tercio del hidrograma.

Tiempo (min)	ΔP (mm)	Hietograma (mm)
30	10,60	0,55
60	5,74	1,84
90	3,91	3,91
120	2,72	10,60
150	1,84	5,74
180	1,13	2,72
210	0,55	1,13

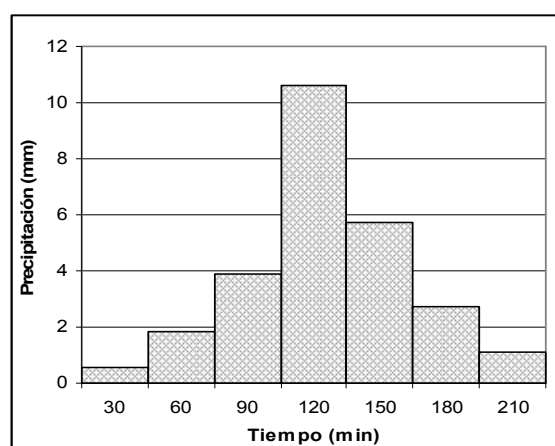


Tabla 4.19. Precipitación de diseño de duración 210 minutos y recurrencia de 10 años.

Figura 4.49. Hietograma de diseño de duración 210 minutos y recurrencia de 10 años.

MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN / ESCURRIMIENTO

La metodología del Número de curva creada por el Soil Conservation Service (S.C.S.) de los Estados Unidos, es un método empírico para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrimento. Surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente.

Para ello se estableció una clasificación de los complejos hidrológicos a los que asignó una capacidad de infiltración (Chow *et al.*, 1994; López Cadenas de Llano, 1998; Mintegui Aguirre y López Unzu, 1990). Cada complejo se especifica por un tipo geomorfológico y de suelo. Como se mencionó en el capítulo anterior, se definen cuatro grupos:

Grupo A (Suelo con el potencial de escurrimiento mínimo. Incluye a las arenas profundas con poco limo y arcilla, así como a los loess muy permeables).

Grupo B (Suelos en su mayor parte arenosos, menos profundos que los del grupo A, y loess menos profundos y mas compactos que los del grupo anterior).

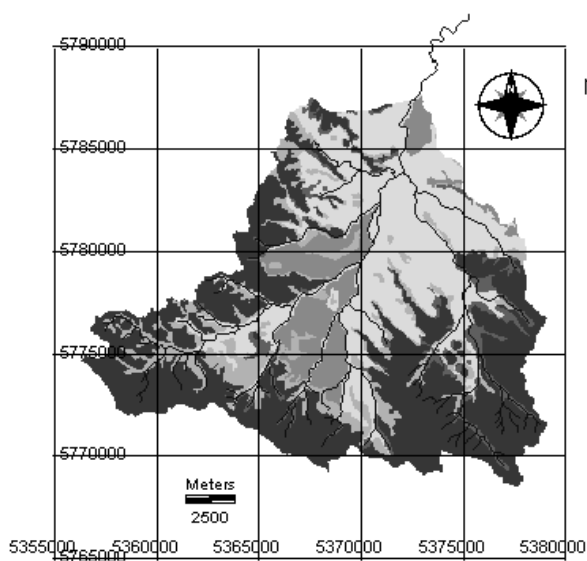
Grupo C (Suelos poco profundos con abundante cantidad de arcilla y coloides).

Grupo D (Potencial de escurrimiento máximo. Suelos con elevado contenido de arcillas, poco profundos, con sub horizontes casi impermeables cerca de la superficie).

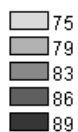
Conociendo el grupo hidrológico al que corresponden los diferentes suelos de la cuenca y teniendo en cuenta el uso del suelo, es decir la vegetación que sustentan, incluyendo el tratamiento cultural que reciben, se establecen los Números de Curva en las diferentes zonas de la cuenca (Gaspari y Senisterra, 2006).

El método se basa en que las combinaciones suelo-vegetación de características semejantes, responderán de manera análoga bajo el efecto de una tormenta de intensidad variable. A mayor valor de Número de Curva (NC), las condiciones de escurrimiento son más críticas, es decir, los valores de infiltración son menores.

Al igual que la precipitación, para modelos agregados, cada unidad hidrológica posee un único NC. Dentro de cada unidad puede existir variación de suelos, de geología y/o de vegetación, siendo de esta manera, debe procederse a determinar, por medio de ponderación areal, el número de curva que le corresponde. En la Figura 4.50 se presenta la distribución espacial del NC en una cuenca representativa. La Tabla 4.20 expone la superficie de ocupación para cada NC y la ponderación del mismo para la cuenca.



Número de Curva



Número de Curva	Superficie (ha)	Número de Curva Ponderado
75	7674,7	
79	3096,9	
83	2321,0	83
86	1445,1	
89	10549,9	

Figura 4.50: Distribución del número de curva en la cuenca hidrográfica.

Tabla 4.20. Superficie correspondiente a cada número de curva y número de curva ponderado para la cuenca hidrográfica.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN. ECUACIONES DE CÁLCULO

Se define tiempo de concentración (t_c) como el tiempo que transcurre desde el inicio de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma medido en la salida de la cuenca. Su determinación puede realizarse a campo o estimarse por medio de diferentes ecuaciones según las características de la cuenca.

A continuación, se detallan los métodos de cálculo de tiempo de concentración de mayor difusión, en la Tabla 4.21, tomada de Chow *et al* (1994).

Tabla 4.21. Métodos de cálculo del tiempo de concentración.

Método y fecha	Fórmula para t_c (min)	Observaciones
Kirpich (1940)	$t_c = 0.0078L^{0.77}S^{-0.385}$ L = longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, pies S = pendiente promedio de la cuenca, pies/pie	Desarrollada a partir de información del SCS en siete cuencas rurales en Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%); para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar t_c por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas.
California Culverts Practice (1942)	$t_c = 60(11.9L^3/H)^{0.385}$ L = longitud del curso de agua más largo, mi H = diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, pies	Esencialmente es la ecuación de Kirpich; desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California (U. S. Bureau of Reclamation, 1973, pp. 67-71).
Izzard (1946)	$t_c = \frac{41.025(0.0007i + c)L^{0.33}}{S^{0.333; 0.667}}$ i = intensidad de lluvia, pulg/h c = coeficiente de retardo L = longitud de la trayectoria de flujo, pies S = pendiente de la trayectoria de flujo, pies/pie	Desarrollada experimentalmente en laboratorio por el Bureau of Public Roads para flujo superficial en caminos y áreas de céspedes; los valores del coeficiente de retardo varían desde 0.0070 para pavimentos muy lisos hasta 0.012 para pavimentos de concreto y 0.06 para superficies densamente cubiertas de pasto; la solución requiere de procesos iterativos; el producto de i por L debe ser ≤ 500 .
Federal Aviation Administration (1970)	$t_c = 1.8(1.1 - C)L^{0.50}/S^{0.333}$ C = coeficiente de escorrentía del método racional L = longitud del flujo superficial, pies S = pendiente de la superficie, %	Desarrollada de información sobre el drenaje de aeropuertos recopilada por el Corps of Engineers; el método tiene como finalidad el ser usado en problemas de drenaje de aeropuertos, pero ha sido frecuentemente usado para flujo superficial en cuencas urbanas.
Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley (1965) Aron y Erborge (1973)	$t_c = \frac{0.94L^{0.6}n^{0.6}}{(i^{0.4}S^{0.3})}$ L = longitud del flujo superficial, pies n = coeficiente de rugosidad de Manning i = intensidad de lluvia, pulg/h S = pendiente promedio del terreno, pies/pie	Ecuación para flujo superficial desarrollada a partir de análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial desde superficies desarrolladas; el método requiere iteraciones debido a que tanto i (intensidad de lluvia) como t_c son desconocidos; la superposición de una curva de intensidad-duración-frecuencia da una solución gráfica directa para t_c .
Ecuación de retardo SCS (1973)	$t_c = \frac{100 L^{0.8} [(1,000/CN) - 9]^{0.7}}{1,900 S^{0.5}}$ L = longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo), pies CN = número de curva SCS S = Pendiente promedio de la cuenca, %	Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 2,000 acres; se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra completamente pavimentada; para áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación; se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización de superficies; la ecuación supone que $t_c = 1.67 \times$ retardo de la cuenca.
Cartas de velocidad promedio del SCS (1975, 1986)	$t_c = \frac{1}{60} \sum \frac{L}{V}$ L = longitud de la trayectoria de flujo, pies V = velocidad promedio en pies por segundo de la figura 3-1 del TR 55 para diferentes superficies	Las cartas de flujo superficial de la figura 3-1 del TR 55 muestran la velocidad promedio como una función de la pendiente del curso de agua y de la cubierta superficial. (Véase también la tabla 5.7.1)

DETERMINACIÓN DEL PERFIL TRANSVERSAL AL CAUCE.

El escurrimiento generado por una tormenta fluye hacia la red de drenaje de la cuenca para luego trasladarse hacia el punto de salida de la misma, según el tiempo de traslado. Este tiempo se establece a partir de dos características: la longitud cauce y la velocidad del flujo. Esta última es función de la morfometría y la rugosidad de la superficie del canal. Estas características generan el perfil transversal del cauce, que consiste en un relevamiento topográfico en sentido transversal al cauce representativo del tramo considerado.

La caracterización del perfil transversal es muy diversa, debido a las características de la planicie de inundación, que son áreas de superficie adyacentes al arroyo, río o riachuelo. Este límite está sujeto a inundaciones recurrentes.

La planicie de inundación se define topográficamente como plana a muy plana y se encuentra al lado de un río. Geomorfológicamente, es una forma de terreno compuesto primariamente de material depositado no consolidado, derivado de sedimentos transportados por el río en cuestión. Hidrológicamente, está mejor definida como una forma de terreno sujeta a inundaciones periódicas por un río padre. Una combinación de estas características posiblemente cubre los criterios esenciales para definir una planicie de inundación. Más sencillamente, una planicie de inundación se define como una franja de tierra relativamente plana, junto al río y que sufre desborde de las aguas durante las crecidas.

Debido a la naturaleza siempre cambiante de los cursos de agua, la planicie de inundación y otras áreas inundables deben ser examinadas para precisar la manera en que pueden afectar al desarrollo o ser afectadas por él. La dinámica de la planicie de inundación es básica y debe ser incorporada en un estudio de planificación para el desarrollo integrado. Es esencial que el estudio reconozca que los cambios causados por el desarrollo social y económico de la cuenca, pueden y han de afectar la planicie de inundación de muchos modos. Esta área presenta suelos fértiles, con la particularidad de ser generalmente plana, con disponibilidad de agua y fácil de usar para cualquiera de las actividades del hombre.

Para determinar el perfil transversal del cauce se procede a medir la profundidad del lecho tomando como profundidad 0 el comienzo de la planicie de inundación. La cantidad de puntos relevados depende de la uniformidad del cauce.

La Figura 4.51 muestra el procedimiento para el relevamiento de un perfil transversal y la Tabla 4.22, los datos de profundidad y cota tomados en ese perfil. Se visualiza que el primer paso es colocar una soga transversal al curso que considere el nivel cero. Posteriormente cada metro se mide la profundidad total, considerando la marcación de los puntos donde se visualiza la presencia de agua. Posteriormente, si es necesario, se convierte ese valor de cota tomado a campo a cota sobre el nivel del mar, el cual se considera al nivel cero, anteriormente mencionado.

Distancia (m)	Profundidad (m)	Cota (m.s.n.m)
0	0	432
1	0.38	431.62
2	0.67	431.33
3	0.89	431.11
4	0.95	431.05
5	0.95	431.05
6	1.14	430.86
7	1.46	430.54
8	2.05	429.95
9	2.05	429.95
10	2.2	429.8
11	3.27	428.73
12	3.29	428.71
13	3.27	428.73
14	3.29	428.71
15	3.34	428.66
16	3.38	428.62
17	3.42	428.58
18	3.33	428.67
19	3.33	428.67
20	3.2	428.8
21	2.45	429.55
22	1.74	430.26
23	1.04	430.96
24	0.46	431.54
25	0.64	431.36
26	0	432



Tabla 4.22. Registro de datos de un perfil transversal a un cauce.

Figura 4.51. Relevamiento de datos para la construcción de un perfil del cauce.

COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

El tránsito de avenidas por canales normalmente corresponde a flujos completamente turbulentos. En esta situación la ecuación de Manning es la mas apropiada y sencilla para el cálculo de velocidades del flujo dentro de un canal abierto. Su expresión deriva de la ecuación de Chezy, estableciéndose para su cálculo la Fórmula 4.58.

$$V = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{\eta}$$

Fórmula 4.58. Ecuación de velocidad del flujo ($V: m \cdot s^{-1}$);

Donde

R: Radio hidráulico (m).

S: Pendiente del canal ($m \cdot m^{-1}$).

η : Coeficiente de Manning (adimensional).

Por la ley de continuidad, y con la ecuación de V, se puede determinar el caudal de avenida (Fórmula 4.59).

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{\eta}$$

Fórmula 4.59. Caudal de avenida (Q: m³.s).

Siendo A el área (m²) y V la velocidad (m.s⁻¹).

R: Radio hidráulico (m).

S: Pendiente del canal (m . m⁻¹).

η : Coeficiente de Manning (adimensional).

La elaboración del coeficiente de Manning (η) se realizó empíricamente. A partir de ello, se construyeron tablas según características del canal para su determinación a campo.

A continuación se presenta la Tabla 4.23, con algunos valores de η .

Tabla 4.23: Valores de Coeficiente de rugosidad de Manning (η) para diferentes superficies.

MATERIAL	η		
Canales artificiales			
Vidrio	0,01	±	0,002
Latón	0,011	±	0,002
Acero liso	0,012	±	0,002
Acero pintado	0,014	±	0,003
Acero ribeteado	0,015	±	0,002
Hierro fundido	0,013	±	0,003
Cemento pulido	0,012	±	0,002
Cemento no pulido	0,014	±	0,002
Madera cepillada	0,012	±	0,002
Teja de arcilla	0,014	±	0,003
Enladrillado	0,015	±	0,002
Asfáltico	0,016	±	0,003
Metal ondulado	0,22	±	0,005
Mampostería de cascotes	0,025	±	0,005
Canales excavados en tierra			
Limpio	0,022	±	0,004
Con guijarros	0,025	±	0,005
Con maleza	0,03	±	0,005
Pedregoso, cantos rodados	0,035	±	0,01
Canales naturales			
Limpios y rectos	0,03	±	0,005
Amplios,aljibes profundos	0,04	±	0,01
Grandes ríos	0,035	±	0,01
Zonas inundadas			
Terrenos de pastos, labranza	0,035	±	0,01
Poca maleza	0,05	±	0,02
Mucha maleza	0,075	±	0,025
Árboles	0,15	±	0,05

AFORO

La cuantificación de un caudal se denomina aforo. Se designa caudal al volumen de agua que circula a través de un conducto (cauce natural o artificial, tuberías, etc.) por unidad de tiempo. En hidrología comúnmente se refiere a cauces naturales (arroyos o ríos) o artificiales (canales o acequias).

Una estación de aforo es un punto situado en el cauce de un río donde se mide el caudal del río (Q). La estación de aforo debe situarse en un sector del cauce del río que se encuentre en régimen de semimódulo, es decir cuando el caudal que circula por un cauce sólo depende del nivel de las aguas dentro del tramo que lo limita, pero no del nivel aguas abajo.

La medida directa en forma continua de los caudales es técnicamente complicada, por lo cual se busca la medida de una variable auxiliar cuyo conocimiento permita a través de una función intermedia la determinación del caudal. Esta medición se puede realizar con un instrumental denominado limnómetro o un limnógrafo en forma continua.

La variable auxiliar idónea será el nivel de las aguas en el cauce (h) y la función intermedia (f) se denomina curva de gastos, de modo que para cada valor instantáneo de h podemos obtener el valor del caudal Q en el mismo instante.

Para determinar la curva de gastos o caudal que establece una correspondencia entre los niveles o profundidad del corte transversal al cauce (h) y los caudales que circulan por la estación de aforo. Los aforos directos permiten obtener pares de valores (h_i, Q_i).

Se pueden determinar diferentes tipos de caudales, como ser:

- **Caudales** ($m^3 \cdot s^{-1}$; $l \cdot s^{-1}$). Aunque se trata de un dato instantáneo, pueden referirse al valor medio de distintos períodos de tiempo:
 - *Caudales diarios*: Pueden corresponder a la lectura diaria de una escala limnimétrica o corresponder a la ordenada media del gráfico diario de un limnígrafo.
 - *Caudales mensuales, mensuales medios*: Para un año concreto es la media de todos los días de ese mes, para una serie de años se refiere a la media de todos los “octubres”, “noviembres”, de la serie estudiada.
 - *Caudal anual, anual medio (módulo)*: Se determina para un año concreto, siendo la media de todos los días de ese año, para una serie de datos se refiere a la media de todos los años de la serie considerada.
- **Aportación anual o mensual**. Es el volumen de agua aportado por el cauce en el punto considerado durante año o un mes (hm^3).
- **Caudal específico** Caudal por unidad de superficie. Representa el caudal aportado por cada kilómetro cuadrado de cuenca ($l \cdot s^{-1} km^{-2}$). Permite comparar el caudal de diversas zonas, por ejemplo las áreas de montaña en relación con las partes bajas de la misma cuenca ($l \cdot s^{-1} km^{-2}$) (Fórmula 4.60).

$$\text{Caudal específico} = \frac{\text{Caudal anual}}{\text{Superficie de la cuenca}}$$

Fórmula 4.60. Ecuación básica para determinar caudal específico.

- **Lámina de agua equivalente (L.A.E.)**. Es el espesor de la lámina de agua que se obtendría repartiendo sobre toda la cuenca el volumen de la aportación anual (mm o m). Es útil para comparar el escurrimiento con las precipitaciones (Fórmula 4.61).

$$\text{L.A.E.} = \frac{\text{Aportación anual}}{\text{Superficie de la cuenca}}$$

Fórmula 4.61. Ecuación básica para determinar lámina de agua equivalente.

Dependiendo del tipo de conducto donde se realiza el aforo existen diferentes métodos para la determinación del caudal. A continuación se describe un método ampliamente utilizado en canales abiertos, aforo con molinete.

El molinete (Figuras 4.52 a, b, c, d) es un instrumento diseñado para medir la velocidad del flujo de agua en un punto del cauce. Este método requiere de la medición de una serie de puntos distribuidos en la sección del cauce en función de la distancia al margen (progresiva) y la profundidad (Figura 4.53).

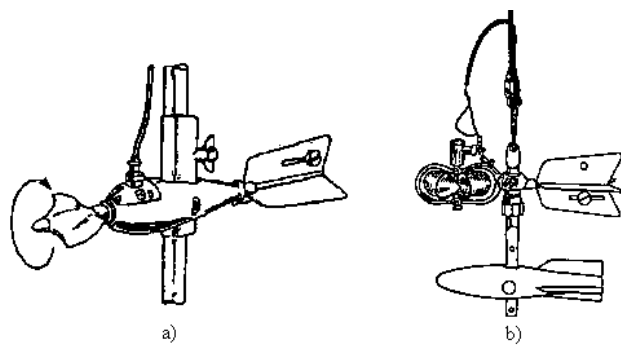


Figura 4.52. Molinete; a) tipo hélice; b) tipo cazoleta <http://ocwus.us.es/>

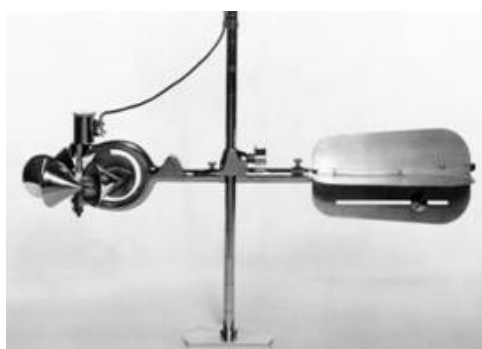


Figura 4.52. c) Molinete tipo cazoleta <http://www.aquaflow.cl>



Figura 4.52 d) Molinete tipo hélice <http://www.ott-hydrometry.de>

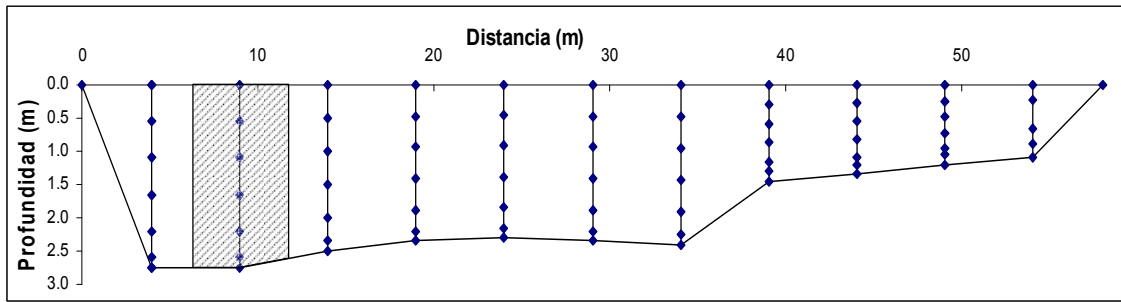


Figura 4.53. Perfil transversal y distribución de puntos de aforo para determinación del caudal.

La cuantificación del caudal total se determina como la sumatoria de caudales para cada progresiva. Este último surge de multiplicar la velocidad media de la progresiva por su área de influencia (trapecio) (Tabla 4.24).

Tabla 4.24. Cálculo del caudal a través de valores medios de velocidad por sección.

Progresiva (m)	Profundidad (m)	Velocidad (m.s ⁻¹)	Promedio (m.s ⁻¹)	Area trapezio(m ²)	Caudal (m ³ .s ⁻¹)
0	0.00	0.00	0.10	1.38	0.14
4	0.00	0.34			
4	0.55	0.12			
4	1.10	0.19			
4	1.65	0.18	0.17	9.63	1.63
4	2.20	0.27			
4	2.60	0.08			
4	2.75	0.00			
9	0.00	0.73			
9	0.55	0.68			
9	1.10	0.49			
9	1.65	0.44	0.44	13.59	5.98
9	2.20	0.29			
9	2.60	0.44			
9	2.75	0.00			
14	0.00	0.75			
14	0.50	0.75			
14	1.00	0.72			
14	1.50	0.70	0.60	12.56	7.53
14	2.00	0.71			
14	2.35	0.57			
14	2.50	0.00			
19	0.00	0.78			
19	0.47	0.80			
19	0.94	0.77			
19	1.41	0.73	0.59	11.81	7.02
19	1.88	0.56			
19	2.20	0.52			
19	2.35	0.00			
24	0.00	0.84			
24	0.46	0.78			
24	0.92	0.75			
24	1.38	0.77	0.63	11.56	7.27
24	1.84	0.68			
24	2.15	0.59			
24	2.30	0.00			
29	0.00	0.77			
29	0.47	0.77			
29	0.94	0.72			
29	1.41	0.70	0.58	11.75	6.85
29	1.88	0.59			
29	2.20	0.54			
29	2.35	0.00			
34	0.00	0.75			
34	0.48	0.70			
34	0.96	0.65			
34	1.44	0.60	0.49	11.38	5.58
34	1.92	0.53			
34	2.25	0.20			
34	2.40	0.00			
39	0.00	0.59			
39	0.29	0.55			
39	0.58	0.53			
39	0.87	0.46	0.44	7.78	3.43
39	1.16	0.44			
39	1.30	0.51			
39	1.45	0.00			
44	0.00	0.66			
44	0.27	0.62			
44	0.54	0.63			
44	0.81	0.58	0.48	6.72	3.26
44	1.08	0.44			
44	1.20	0.47			
44	1.35	0.00			
49	0.00	0.64			
49	0.24	0.58			
49	0.48	0.59			
49	0.72	0.53	0.47	6.03	2.86
49	0.96	0.50			
49	1.05	0.47			
49	1.20	0.00			
54	0.00	0.58			
54	0.22	0.57			
54	0.66	0.51	0.42	4.88	2.07
54	0.88	0.46			
54	1.10	0.00			
58	0.00	0.00	0.27	0.55	0.15
Caudal Total (m3/s)					53.75

CURVAS ALTURA-CAUDAL

El aforo de caudales con molinete es una tarea ardua que requiere de la calibración del instrumento y personal capacitado para efectuarla. El proceso de aforo puede simplificarse a través de la construcción de una curva altura-caudal o elevación-gasto, que consiste en la medición de la altura del pelo de agua con limnímetro (Figura 4.54) o limnígrafo (Figura 4.55). Simultáneamente con el aforo para la creación de una curva, por medio de regresión, en la que se exprese la relación entre estas dos variables. De esta manera, el aforo de caudales se simplifica a la medición del pelo de agua del curso.



Figura 4.54. Limnímetro. Fuente: <http://www.dnh.gub.uy>



Figura 4.55. Limnígrafo. Fuente: www.ott-hydrometry.de

Se deben tener en cuenta dos aspectos, respecto de este tipo de aforo:

1. La curva es válida siempre y cuando la sección donde se realizan las mediciones no varíe. La manera de solucionar este problema es realizar mediciones directas de caudal para ir calibrando la curva.
2. El efecto de histéresis provocado por el comportamiento de la altura según el caudal esté disminuyendo o aumentando (Figura 4.56), por lo tanto el caudal medido a través de la curva representa sólo una aproximación al real.

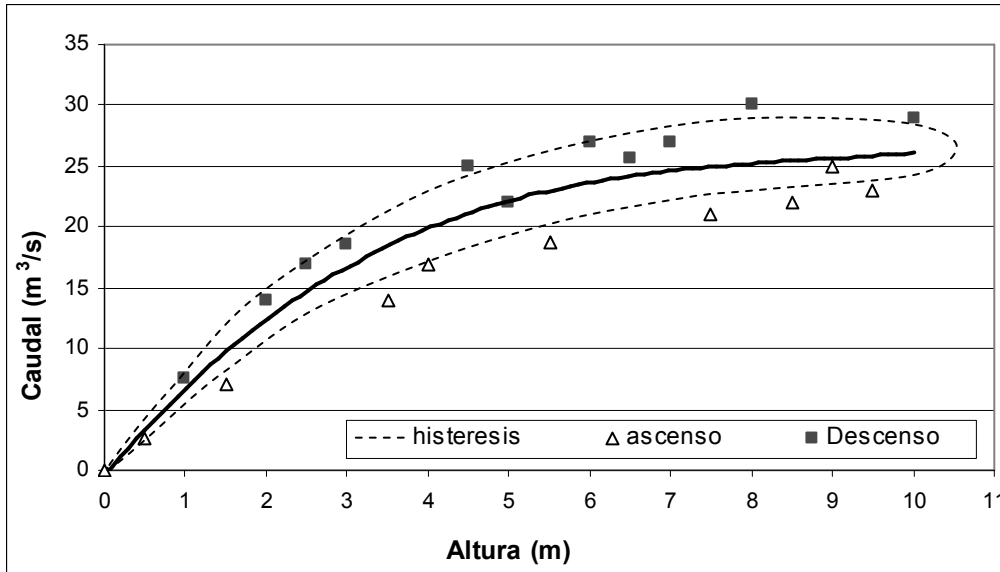


Figura 4.56. Representación de la curva altura-caudal mostrando la curva de histéresis por variación de la altura para los mismos caudales en función del ascenso o descenso del pelo de agua.

La modelización matemática permite crear curvas altura - caudal implementando ecuaciones para su cálculo (Figura 4.57). Un ejemplo de ello lo constituye el empleo de la ecuación de Manning vista con anterioridad.

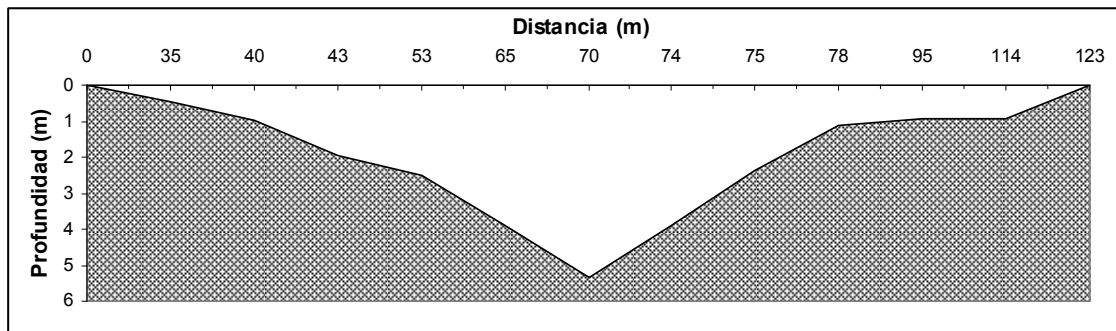


Figura 4.57. Perfil transversal de la sección de aforo.

La construcción de la curva se realiza utilizando los datos del perfil transversal en la sección de aforo (Figura 4.58) y su pendiente longitudinal con los valores de η para el lecho y sus planicies (Tabla 4.25).

De esta manera se extrae el radio hidráulico y el área en función del tirante (altura del pelo de agua respecto del punto más profundo del cauce en la sección considerada) y se calcula la velocidad y caudal del flujo de agua (Tabla 4.26).

η	Distancia (m)	S (m.m ⁻¹)
0,098	0	0
0,048	0,25	0,28
0,098	0,99	0,56

Tabla 4.25. Pendiente longitudinal (S) con los valores de Coeficiente de rugosidad de Manning η para el lecho y sus planicies de inundación.

Tirante (m)	Radio hidráulico (m)	Caudal (m ³ .s ⁻¹)
0	0	0
0,28	0,25	0,28
0,56	0,99	0,56
0,84	2,23	0,84
1,12	3,97	1,12
1,40	6,21	1,40
1,68	9,00	1,68
1,96	12,53	1,96
2,24	16,77	2,24
2,52	21,74	2,52
2,81	27,43	2,81
3,09	34,16	3,09
3,37	42,5	3,37
3,65	51,94	3,65
3,93	61,82	3,93
4,21	72,12	4,21
4,49	87,5	4,49
4,77	109,61	4,77

Tabla 4.26. Radio hidráulico y caudal en función del tirante.

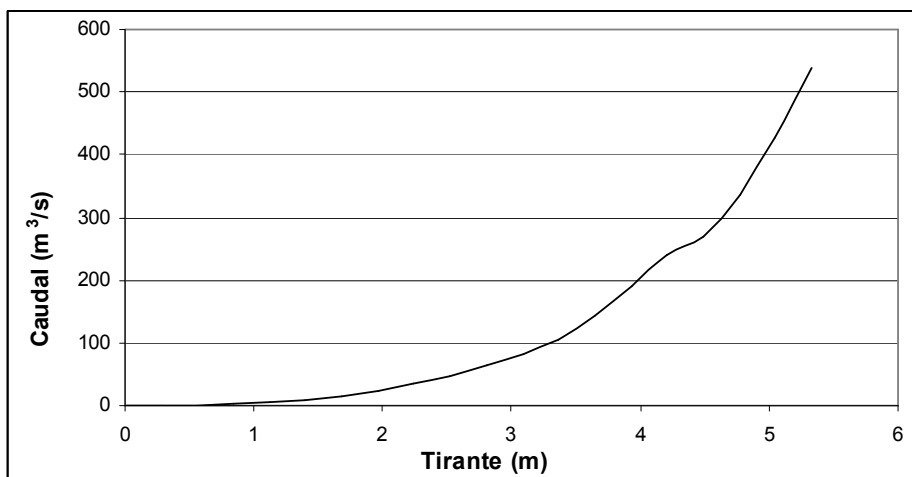


Figura 4.58. Ejemplo de Curva altura-caudal en la sección de aforo.

TRÁNSITO DE CAUDALES. MÉTODO DEL TIEMPO DE RETRASO

El método de tiempo de retraso (Lag Routing Method) consiste en un procedimiento para determinar el tiempo de traslado y la variación del caudal de salida en un punto considerado a partir de un hidrograma de entrada aguas arriba. Existen numerosos métodos para su determinación. El método más conocido es el de tiempo de retraso (Chow *et al.*, 1994).

El método de tránsito es el más simple, donde el hidrograma de salida es igual al de entrada y la forma del hidrograma no cambia (Figura 4.59), se utiliza generalmente en conductos de agua artificiales.

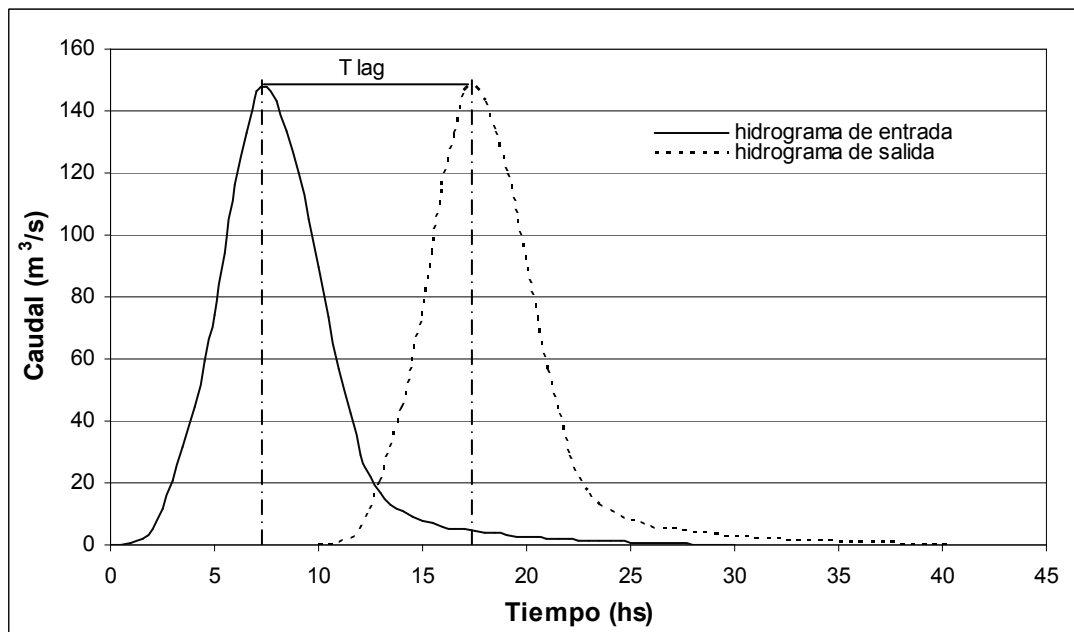


Figura 4.59. Hidrograma de entrada y salida para el método de tránsito de caudales tiempo de retraso.

La ecuación de cálculo mayormente utilizada para determinar el tiempo de retraso (T_{lag}) está expresada en la Fórmula 4.62, siendo t_c el tiempo de concentración.

$$T_{lag} = 0,6 \cdot t_c$$

Fórmula 4.62. Ecuación de cálculo del tiempo de retraso (T_{lag}).

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA POR PROGRAMAS INFORMÁTICOS

HYMO 10

El modelo HYMO 10 fue desarrollado bajo sistema informático D.O.S, y se emplea en cuencas pluviales con o sin datos de aforo de caudales. Es de fácil aplicación y se recomienda su utilización para áreas no mayores de 2.500 km². Además permite simular un sistema hidrológico ante el fenómeno lluvia-escorrimento sin que se utilice ley de probabilidad alguna, es decir que pertenece al contexto de los modelos determinísticos.

Según la clasificación expresada, el modelo HYMO 10 es:

- √ Conceptual: porque en todas las operaciones hidrológicas que realiza están presentes, permanentemente, las interacciones de todos los factores físicos que intervienen.
- √ Lineal: porque en todos los fenómenos hidrológicos que simula utiliza las propiedades de proporcionalidad y de superposición de los procesos lineales. Es decir que el fenómeno - respuesta está ligado al fenómeno - estímulo por un operador lineal.
- √ De parámetros concentrados: porque trata de una cuenca o subcuenca como única unidad, y en consecuencia los parámetros que la definen no varían de un punto a otro sino que están representados por valores promedios.
- √ De eventos aislados o discreto: porque no tiene capacidad de variar la humedad del suelo entre precipitaciones sucesivas.
- √ Invariable en el tiempo: porque los parámetros utilizados en el cálculo de los procesos no varían en el tiempo.
- √ De Caja Negra: porque presenta los resultados de la simulación sin que aparezcan los resultados de cálculos intermedios.

Los datos básicos para aplicar el modelo son: características morfométricas como superficie de la cuenca, el número de curva ponderado para la cuenca, el desnivel de la cuenca, la longitud de cauce, el corte transversal del cauce, la curva de masa de lluvia y un diagrama de circulación de flujo (diagrama de bloques).

Los parámetros de salida son: los hidrogramas parciales y total (tabular y gráfico), el escurrimiento por unidad hidrológica, caudal al pico y tiempo al pico, la curva de caudales y la caracterización del hidrograma unitario.

Para más detalles consulte el manual Modelo Hidrológico HYMO 10, elaborado por Fernández P.C., Maza J.A. y L.A. Fornero. (1984) INCyTH. Mendoza, Argentina.

HEC-HMS 2.1.1

En la práctica de la ingeniería de corrección de cuencas torrenciales, dado que normalmente se trata de cuencas de tamaño medio, de las que la información disponible, aunque sea suficiente, no suele ser excesivamente detallada, se utilizan modelos integrados de fácil manejo y ampliamente difundidos a través de programas informáticos. Para la simulación de las avenidas es habitual el empleo del programa HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), U. S. Army Corps of Engineers (diferentes versiones, 2000, 2001) y para la simulación de la

circulación de las avenidas por los cauces el programa HEC - RAS (River Analysis System), U. S. Army Corps of Engineers (1998) (Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez, 2008).

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System) es un software que permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos ya sea concentrados o distribuidos para el tránsito de caudales. Esta particularidad le otorga gran flexibilidad ya que permite combinar diferentes rutinas obteniendo así una mayor aproximación a la realidad. Este programa se ejecuta bajo sistema Microsoft Windows. Pueden simular la generación de las avenidas en la cuenca, con las características que ésta presenta en el momento de la simulación, en especial el uso del suelo o cubierta vegetal, para la serie de precipitaciones torrenciales seleccionadas. Existen varias versiones del software con actualizaciones.

El HEC - RAS puede simular el tránsito de las avenidas, correspondientes a la misma serie de precipitaciones torrenciales seleccionadas, por los cauces de drenaje de la cuenca; lo que permite estimar los diferentes niveles de inundación y las tensiones de arrastre correspondientes.

La base de procesamiento del modelo se expresa según la Figura 4.60 y la forma de emitir los resultados se presenta en la Figura 4.61.

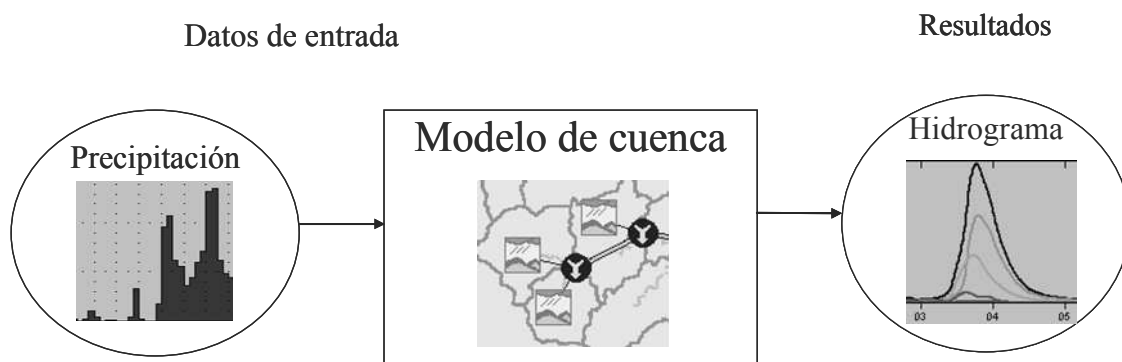


Figura 4.60. Secuencia de procesamiento del Modelo Hidrológico HEC-HMS.

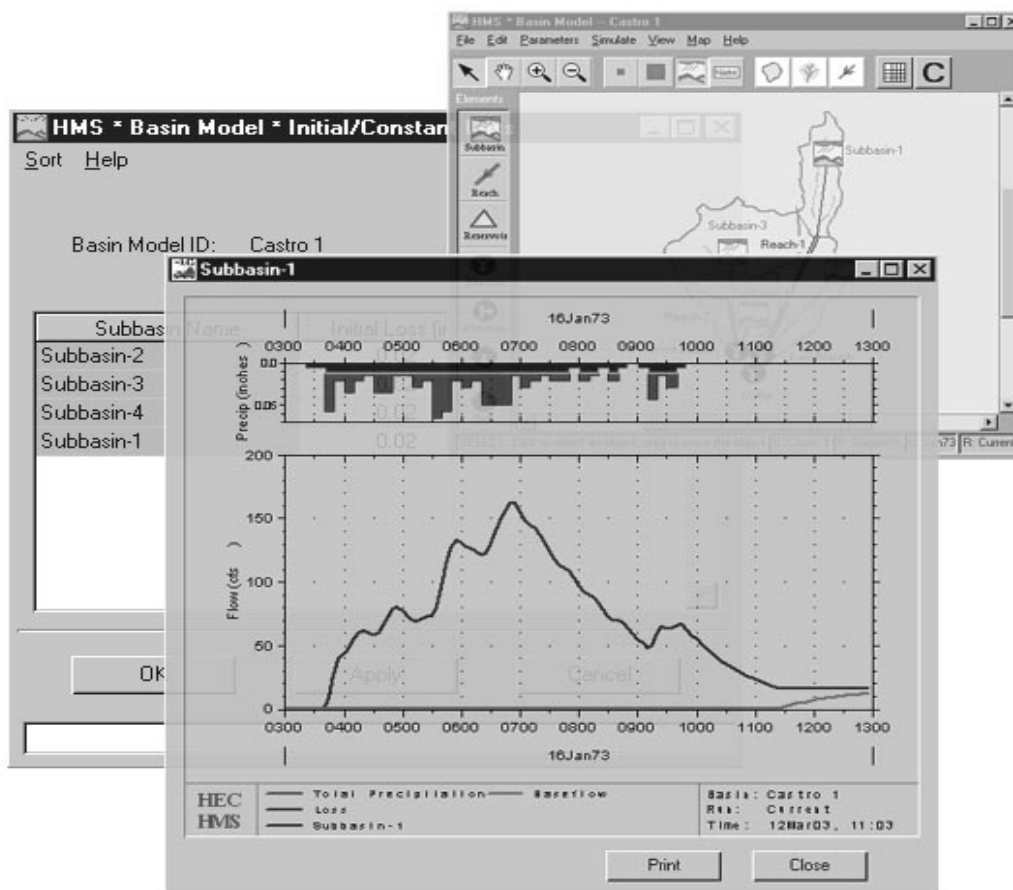


Figura 4.61. Formato de los resultados de la modelización con HEC-HMS.

Para mayor información consulte en <http://www.hec.usace.army.mil>.

ESTIMACIÓN DE CAUDAL SÓLIDO

CAPÍTULO 5

EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL

La erosión de suelos, la pérdida de suelos y la acumulación de sedimentos son términos con distintos significados en la tecnología de erosión de suelos. La erosión de suelos es la cantidad bruta de suelo retirado por la acción dispersante de las gotas de lluvia o por escurrimiento. La pérdida de suelo es el suelo desprendido de un campo o pendiente determinados, mientras que la acumulación de sedimentos es la pérdida de suelos depositada en un punto que está bajo evaluación (Kirkby, 1994).

La erosión en sentido estricto es el desgaste de la superficie terrestre por la acción de agentes externos como el agua o el viento. La erosión hídrica consiste en el proceso de disgregación y transporte de las partículas de suelo por la acción del agua. Se establece cuando las gotas de lluvia caen sobre un suelo y tienen la suficiente energía para remover sus partículas, siendo éstas liberadas y transportadas por el escurrimiento superficial hacia las corrientes de drenaje. El ciclo completo culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación, cuando la capacidad de arrastre de las aguas se reduce hasta el punto de no permitir el flujo de las partículas de sedimentos previamente incorporadas al mismo.

El ataque del agua al suelo puede producirse superficialmente (partículas de suelo arrastradas aisladamente), o en profundidad del perfil (partículas de suelo arrastradas masivamente).

La relación entre el diámetro de las partículas y la velocidad de erosión y sedimentación fue presentada por Hjulstrom (1935), por medio de una figura que sintetiza los diferentes movimientos superficiales de dichas partículas (Figura 5.1).

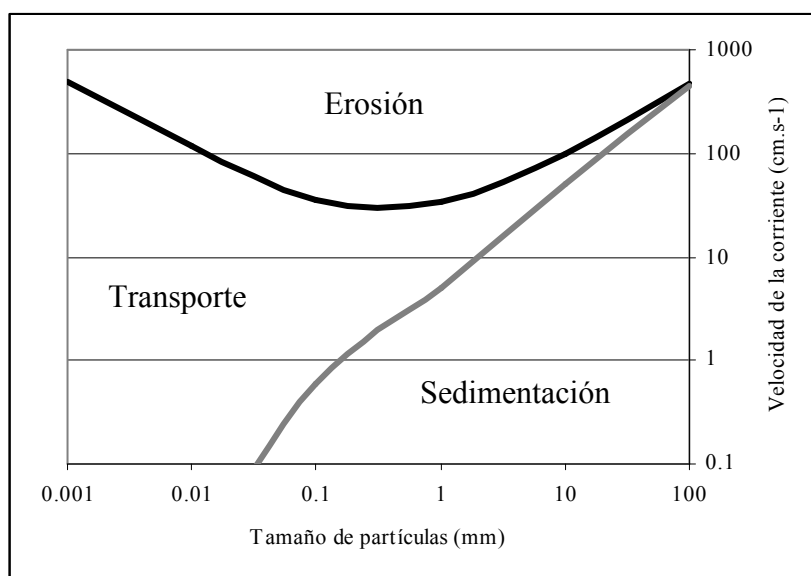


Figura 5.1. Relación entre tamaño de las partículas de suelo y velocidad de transporte.

Las curvas de Hjulstrom establecen tres campos, transporte, sedimentación y erosión. Por ejemplo una partícula de 0,1 mm de diámetro con una velocidad menor a $0,9 \text{ cm.s}^{-1}$, puede depositarse en el lecho, si su velocidad de transporte aumenta, esta partícula inicia su movimiento. Cuando la velocidad es mayor a 20 cm.s^{-1} inicia el proceso de erosión hídrica superficial.

EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL Y EN PROFUNDIDAD

La erosión hídrica superficial presenta dos componentes determinantes:

➤ Acción de las precipitaciones

Consiste en el efecto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo, conocido como “erosión por salpicadura”. La gota de lluvia sufre cambios en su tamaño a lo largo de su camino en la atmósfera (por condensación o evaporación). En ausencia de obstáculos golpea el suelo con considerable fuerza, disgregando las partículas terrosas y proyectándolas en el aire. A mayor intensidad del aguacero, mayor su poder erosivo. Debe tenerse en cuenta que cada tipo de suelo presentará una respuesta diferente frente a la presencia de determinado aguacero.

➤ Acción del escurrimiento

Su acción depende del régimen de las precipitaciones y de las características hidrológicas del suelo. El escurrimiento disgrega los elementos terrosos y al mismo tiempo transporta aquellas partículas de tierra que por su tamaño y forma son susceptibles de arrastre. La disgregación producida se debe mayoritariamente a la fricción de las partículas de agua con los elementos terrosos de la superficie del suelo, contribuyendo a tal fin las partículas sólidas transportadas por la corriente. Esta disgregación, junto al impacto de la gota de lluvia y los diferentes procesos de meteorización, constituyen la primer fase de la erosión o formación de elementos susceptibles de ser transportados. En cuanto al arrastre de las partículas de tierra, los frotamientos y choques de la corriente de agua con la superficie rugosa del suelo originan tensiones, que en el caso de ser superiores a la resistencia impuesta por el suelo, harán rodar, deslizar o saltar a las partículas terrosas.

La erosión hídrica en profundidad consiste en la penetración del agua en el perfil edáfico en flujos de suficiente cantidad, capaces de crear condiciones de inestabilidad en el suelo, que propicien su desplazamiento por gravedad. Este tipo de erosión se favorece por la saturación del suelo en áreas de fuertes pendientes, y cuando el agua que se infiltra por un horizonte edáfico permeable, se encuentra con una capa prácticamente impermeable. En este caso, se acumula entre ambos horizontes un flujo de escurrimiento, que dependiendo de la pendiente del terreno puede llegar a crear un desequilibrio tal, que ponga en movimiento el perfil del suelo situado encima del estrato impermeable.

FACTORES FÍSICOS DETERMINANTES DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Los factores físicos determinantes de la erosión hídrica pueden ser agrupados en cuatro categorías principales:

1) Factores climáticos

-La **lluvia**, con sus variaciones locales en cuanto a cantidad, intensidad, y distribución.

-La **temperatura**, que influye de múltiples maneras en la erosión, ya que presenta acción directa sobre las formas de vida. Las temperaturas elevadas descomponen rápidamente la materia orgánica, haciendo que el suelo pierda la capacidad de absorción de agua, repercutiendo finalmente en un mayor escurrimiento.

2) Factores edáficos

-El **suelo**. La textura, la agregación del suelo, la distribución de las partículas, la permeabilidad del perfil, la humedad inicial del suelo y la pedregosidad superficial son factores importantes en la erosión de los suelos. Los suelos con estructuras bien desarrolladas, estables y migajosas resisten por más tiempo la separación de partículas, absorbiendo las lluvias más rápidamente, reduciendo la magnitud del escurrimiento destructivo.

3) Factores topográficos

-El grado de **inclinación** de los suelos tiene marcada influencia en la magnitud de la erosión, debido a que las pérdidas de suelo son mucho mayores en los terrenos de pendiente pronunciada y extensa. La **longitud de la pendiente** toma notable importancia, en lo referido a los efectos de la pérdida de suelo en una ladera.

-La **orientación de las laderas**. Bajo algunas condiciones climáticas, y especialmente cuando las pendientes superan el 3 %, existe una relación entre la magnitud de la erosión y la orientación del terreno. Las laderas con orientación al sur están expuestas a menor radiación solar, como consecuencia de ello el suelo posee un mayor contenido de humedad provocando más escurrimiento que una ladera con exposición norte.

4) Factor de cobertura vegetal

-La **parte aérea** de la cubierta vegetal intercepta la lluvia, amortiguando su fuerza, y contribuyendo a disminuir su energía cinética inicial.

-La vegetación contribuye a disminuir el escurrimiento superficial y a decrecer los caudales pico de avenida, debido a que aumenta la permeabilidad del suelo y disminuye la velocidad de la lámina de escurrido.

-La hojarasca caída y las raíces de las plantas protegen el suelo y mejoran su estructura, la infiltración y la capacidad de retención de agua, además de retardar el escurrimiento. La vegetación también influye en los efectos del sol y el viento sobre la superficie del suelo.

-En cuanto a las masas forestales, existen distintos antecedentes en relación a su influencia sobre los recursos hídricos. Se ha evaluado positivamente el impacto de las plantaciones forestales en regiones montañosas, sobre la reducción de la erosión de los suelos y en la consolidación de cauces.

Para realizar el presente apartado se utilizaron textos de: Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Mac Laren, 1996; Giller y Malmqvist, 1998; Ellies, 2000.

FORMAS DE EROSIÓN

Debido a las formas de acción del agua sobre el suelo, se originan dos formas generales de erosión: la superficial y los movimientos en masa. En la Figura 5.2 se presenta un cuadro sinóptico de las formas de erosión, adaptado de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).

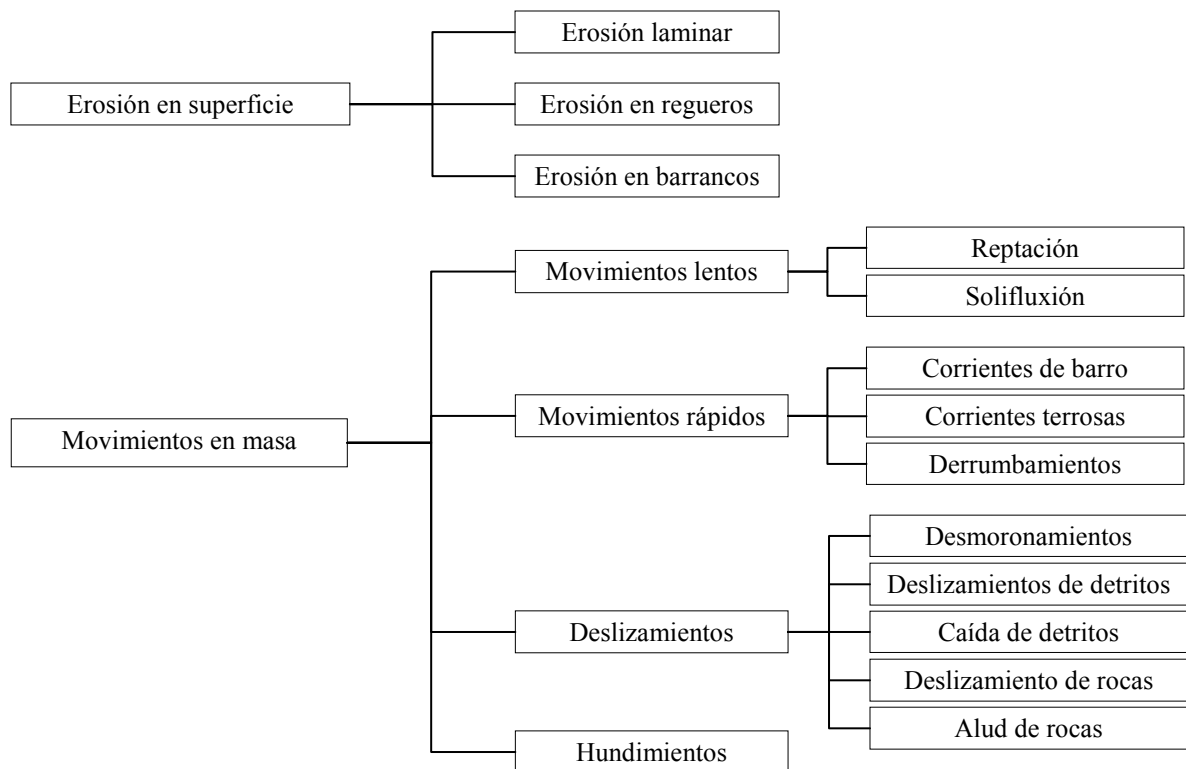


Figura 5.2. Cuadro sinóptico de los tipos de erosión hídrica.

EROSIÓN EN SUPERFICIE

Se describen a continuación las principales formas de erosión en superficie:

* **Erosión laminar:** se trata de la remoción de capas delgadas de suelo, extendidas con relativa homogeneidad dentro de la superficie. Se la considera como altamente perjudicial ya que determina grandes aportes de sedimentos en los cursos de agua, además de afectar a las partículas finas de la tierra, empobreciendo así la fertilidad del suelo. Generalmente suele ser difícil de detectar su presencia, manifestándose a través de los siguientes síntomas: plantas con sistema radical

descubierto, presencia de montículos en el suelo, pedregosidad e invasión de especies específicas de suelos degradados.

* **Erosión en regüeros y cárcavas:** es el arrastre de elementos terrosos producido al correr el agua por la superficie del suelo, con la consecuente formación de surcos o regüeros orientados más o menos normalmente a las curvas de nivel. Si bien se encuentran asociados a las irregularidades y desniveles del terreno, se ve favorecida por las tormentas de gran intensidad. Al ser fácilmente identificables, permiten la implementación de medidas correctivas a su debido tiempo.

* **Barrancos:** se evidencian como profundas incisiones en el terreno. Se originan generalmente cuando existe una gran concentración de escurrimiento en una zona determinada. Suelen originarse posteriormente a la erosión laminar y en regüeros, pero también pueden surgir como producto en un solo evento pluvial de características torrenciales. Sus perfiles pueden tener forma de U o V, dependiendo de la consistencia que presente el suelo a lo largo de sus horizontes.

MOVIMIENTOS EN MASA

En cuanto a los movimientos en masa, existen cuatro grupos principales:

1. Movimientos lentos.

Se producen generalmente en zonas montañosas o de alta montaña, favorecidos por el flujo de agua subsuperficial y subterráneo.

- **Reptación**

Es definido como un movimiento lento hacia las partes bajas de una pendiente de detritos rocosos o de suelo. Se considera a la dilatación por congelación como el proceso que mayormente provoca la reptación, aunque también puede ser originada por sucesivos calentamientos y enfriamientos de la superficie del suelo y el humedecimiento y desecado, considerando además, el efecto ejercido por las raíces de los vegetales durante su desarrollo.

- Reptación del suelo: movimiento imperceptible del suelo ladera abajo. Sus efectos son generalmente poco visibles sobre el suelo, pero sí se pueden apreciar sobre la vegetación y las estructuras establecidas en la ladera (como por ejemplo árboles y postes inclinados).

- Reptación de detritos de talud: se trata del movimiento cuesta abajo de escombros de talud. Suele producirse por la meteorización de acantilados, escarpas y laderas de cerros y montañas. Su constitución se basa principalmente en materiales de tamaño grande, adoptando generalmente formas cónicas con pendiente muy acentuada. Suelen producirse en lugares donde ocurre alternancia de fases de congelación y deshielo.

- Reptación de glaciación de piedra: surge cuando la reptación de detritos de talud adopta configuraciones semejantes a brazos de ríos de escombros que fluyen valle abajo.

➤ Reptación de rocas: se trata del movimiento individual de bloques de piedra, pendiente abajo. Suele producirse en formaciones geológicas de areniscas, conglomerados e incluso en rocas granitoides con diaclasas espaciadas.

- **Solifluxión**

Consiste en un movimiento lento pendiente abajo, de material terroso saturado de agua y no confinado a cauces definidos. Se ve favorecida por laderas con pendiente moderada a fuerte (relativamente carentes de vegetación), presencia de hielo por debajo de la superficie del terreno y por la producción rápida de detritos rocosos por meteorización. Suele ocurrir bajo climas subsolares o alpinos. También interviene la composición de las arcillas que constituyen el talud, favoreciéndose la solifluxión por la presencia de arcillas expandibles.

2. Movimientos rápidos.

Incluye tres tipos principales de movimientos.

- **Corrientes de barro**

Es el movimiento en cauces definidos de detritos saturados de agua. Están constituidos fundamentalmente por lodo o barro, pudiendo ser transportadas además grandes piedras. Su formación se ve favorecida por las pendientes pronunciadas, disposición abundante e intermitente de agua, escasa vegetación, y presencia en la superficie del terreno de materiales no consolidados que luego de humedecerse se tornan resbaladizos.

Suelen ocurrir en regiones áridas con precipitaciones poco frecuentes, pero torrenciales.

- **Corrientes terrosas**

Se manifiestan a través del movimiento ladera debajo de material terroso arcilloso o limoso saturado de agua. Son más lentas que las corrientes de barro, y pueden ser no perceptibles a simple vista, y no están confinadas a cauces.

Son características de regiones húmedas.

- **Derrumbamientos**

Se encuentran constituidos por un flujo laminar de detritos rocosos en laderas fuertemente inclinadas y con formaciones angostas. Son propias de zonas húmedas. Se distinguen de los deslizamientos principalmente por su mayor contenido de agua.

3. Deslizamientos

Consisten en rupturas en el perfil del terreno, acompañados de movimientos de masas de tierra, producto de la inestabilidad a que se ve sometido por el aumento de su peso al elevar el contenido de agua, provocando tensiones superiores a las que él puede soportar con el perfil inicial (el cual culmina variando su nivel y gradiente). Se diferencian cinco clases principales.

- **Desmoronamiento**

Es el deslizamiento de una o más unidades de detritos rocosos, generalmente presenta una rotación hacia atrás con respecto a la pendiente sobre la que tiene lugar el movimiento. Se considera un movimiento intermitente en una distancia corta, generando usualmente formas semejantes a escalones.

- **Deslizamiento de detritos**

Se trata de un deslizamiento o rodadura con movimiento rápido de detritos no consolidados, sin rotación hacia atrás.

- **Caída de detritos**

Movimiento libre de detritos terrosos desde una cara vertical o sobresaliente del terreno. Su presencia es usual en las márgenes socavadas por ríos y torrentes.

- **Deslizamiento de rocas**

Consisten en masas que se deslizan a lo largo de superficies de estratificación, de diaclasas o de fallas.

- **Alud de rocas**

Se trata de la caída libre de bloques de roca en cualquier pendiente de fuerte inclinación. Suelen producirse en las áreas de montaña, especialmente durante los descongelamientos ocurridos en la primavera.

4. Hundimientos

Es el asentamiento hacia debajo de material con escaso movimiento en sentido horizontal. Usualmente se genera por la remoción lenta de material debajo de la masa que se hunde. No ocurren a lo largo de una superficie libre.

En las Figuras 5.3 a 5.6 se pueden observar diferentes formas de erosión.



Figura 5.3. Formación e inicio de cárcava.



Figura 5.4. Erosión hídrica superficial con remoción en masa.



Figura 5.5. Deslizamiento planar.



Figura 5.6. Colada de barro.

MODELOS DE EVALUACIÓN. FÓRMULAS EMPÍRICAS

MODELO U.S.L.E.

El modelo U.S.L.E. (Universal Soil Loss Equation) o Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, es un modelo paramétrico creado con el fin de estimar la pérdida promedio anual de suelo en tierras agrícolas, siendo dado a conocer por Wischmeier y Smith, en 1965. Se trata de un modelo matemático de origen empírico, que utiliza información sobre precipitación, suelo, pendiente del terreno, y de uso y manejo del suelo.

Es una herramienta que combina la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica, para proporcionar datos de diseño en los planes de conservación (Wischmeier y Smith, 1978).

La pérdida promedio de suelo se puede estimar y utilizar para recomendar ajustes en el uso de la tierra a fin de mejorar la retención del suelo y reducir los efectos perjudiciales de la pérdida de suelo (Kirkby, 1994).

El modelo U.S.L.E. permite obtener tasas de erosión para varios sistemas de uso y manejo en unidades de tierra específicas. Cuando estas tasas se comparan con la tolerancia, se seleccionan las combinaciones de cultivo y manejo que permitan un control adecuado de la erosión, entre las cuales se puede elegir la más deseable y conveniente. Permite a los productores llevar a la práctica los resultados obtenidos en la investigación en pro de la conservación del suelo (Páez, 1992).

La expresión para el cálculo del modelo U.S.L.E. se expresa con la Fórmula 5.1

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Fórmula 5.1. Expresión matemática para determinación de la pérdida de suelo, según el modelo U.S.L.E.

Donde

- A:** Pérdida de suelo por erosión pluvial ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$).
- R:** Factor índice de erosión pluvial o de erosionabilidad del aguacero ($\text{J} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$).
- K:** Factor de erodabilidad del suelo ($\text{Mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).
- LS:** Factor topográfico, L: Factor longitud de pendiente; S: Factor gradiente de pendiente.
- C:** Factor ordenación de cultivos.
- P:** Factor de control de erosión mediante prácticas de cultivo.

FACTOR ÍNDICE DE EROSIÓN PLUVIAL O EROSIONABILIDAD DEL AGUACERO (R)

Representa la potencia del aguacero para erosionar superficialmente el suelo, por lo que en cierta medida se lo considera un índice de su torrencialidad. Fue establecido por Wischmeier

en 1959, tras analizar datos de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, y la velocidad Terminal de la gota de lluvia que aportaban una serie de investigaciones.

Este factor puede ser obtenido a partir de tablas, por valores de intensidad de lluvia (mm.h^{-1}) y de energía cinética por unidad de lluvia ($\text{J.m}^{-2}.\text{cm}^{-1}$), o puede calcularse a partir de los datos de intensidad del aguacero a intervalos fijos y la intensidad máxima de lluvia durante el aguacero.

R es definido como el producto de de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos, dividido 100, siendo su forma de cálculo como se expresa en la Fórmula 5.2.

$$R = \frac{EC \cdot I_{30}}{100}$$

Fórmula 5.2. Factor de erosión pluvial (R).

Donde:

EC: Energía cinética

I_{30} : Máxima intensidad en 30 minutos

También se puede representar con la Fórmula 5.3.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log I) \cdot (I \cdot T) \cdot I_{30}}{100}$$

Fórmula 5.3. Factor de erosión pluvial (R).

Siendo:

T: Período de tiempo, en horas, para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero.

I: Intensidad del aguacero en los intervalos citados, en cm.h^{-1} .

I_{30} : Intensidad máxima en 30 minutos durante el aguacero, en cm.h^{-1} .

Su valor difiere de una región a otra del planeta, pudiendo alcanzar valores cercanos a 100, y hasta $2.500 \text{ J cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

A nivel nacional, cabe mencionar la publicación realizada por Rojas y Conde (1985), titulada "Estimación del Factor "R" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para el centro-este de la República Argentina". En la misma se pueden encontrar valores de por ejemplo $786 \text{ J cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para Mercedes (Corrientes), mientras que para Bahía Blanca (Buenos Aires), el valor es de $246 \text{ J cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (K)

Representa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y está relacionado con la estabilidad estructural del mismo. Se calcula a partir del porcentaje de las distintas fracciones granulométricas, porcentaje de materia orgánica, permeabilidad y estructura, siendo sus unidades de medida expresadas en $\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$. (Fórmula 5.4)

$$100 \cdot K = 10^{-4} \cdot 2,71 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a) + 4,20 \cdot (b - 2) + 3,23 \cdot (c - 3)$$

Fórmula 5.4. Factor K.

$M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) \cdot (100 - \% \text{ arcilla})$, expresándose también como:
(% partículas entre 0,002 y 0,1 mm) . (% partículas entre 0,002 - 2,0 mm)

Siendo %: porcentaje

a = (Porcentaje de Carbono . 1,724) (representa el porcentaje de materia orgánica).

b = Indica la estructura del suelo.

1. Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo medio (1 - 2 mm)
3. Gránulo medio, grumo medio (2 - 5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático columnar y muy grueso (> 10 mm).

c = Clase de permeabilidad del perfil del suelo según *Soil Survey Manual del U.S.D.A*

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta
6. Muy lenta

Este factor c se puede estimar a partir de las curvas de conductividad hidráulica del suelo.

Con el fin de simplificar la ecuación podría prescindirse de los términos donde aparecen los factores b y c, obteniendo un K simplificado (Fórmula 5.5).

$$100 \cdot K = 10^{-4} \cdot 2,71 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a)$$

Fórmula 5.5. Factor K simplificado.

Para la determinación del Factor K se debe contar con datos provenientes de análisis de suelo, siendo fundamentales los referidos a la granulometría y al contenido de materia orgánica. En la Figura 5.7 se presenta el nomograma para cálculo del Factor K y la secuencia de pasos a seguir para su determinación (Wischmeier *et al.*, 1971).

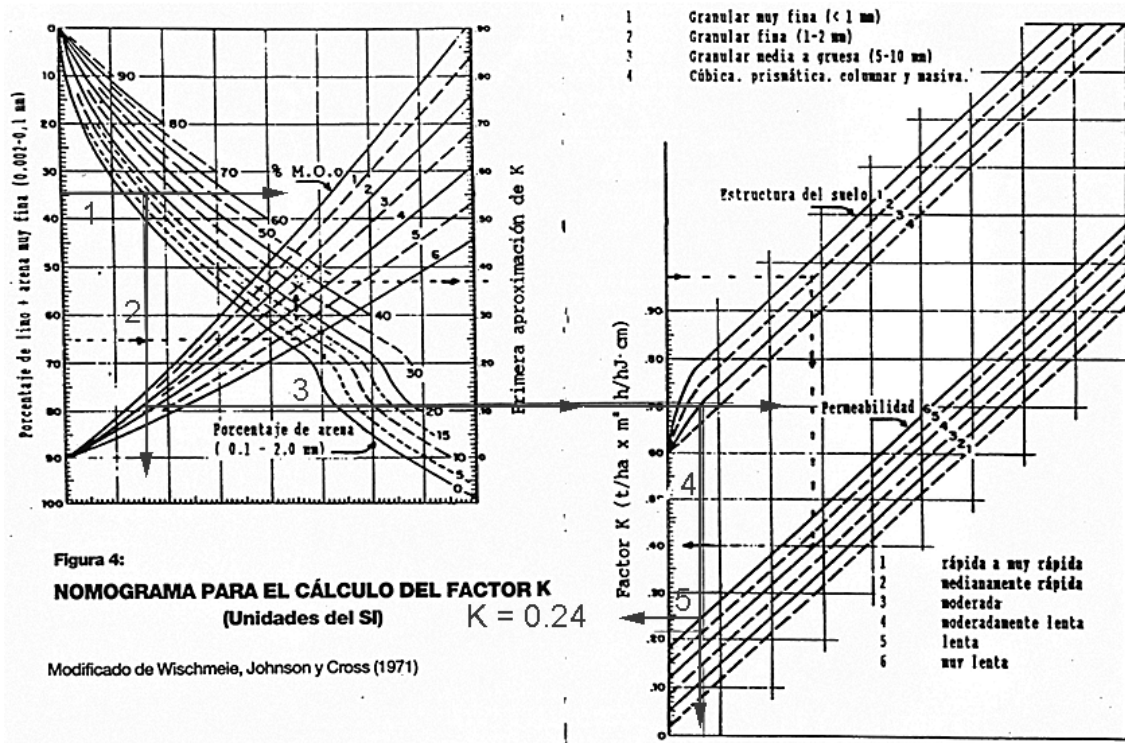


Figura 5.7. Nomograma para cálculo del Factor K.

Los valores de Factor K dependen de las características propias de cada suelo. Por ejemplo, según Irurtia *et al.*, en Argentina (2007) un suelo del tipo Hapludol tapto-argico ubicado en la llanura continental presenta un valor de 0,08, mientras que un Argiudol típico situado también en la llanura continental, tiene un valor de 0,46; en cambio para un Natralbol típico de la llanura continental se estimó el valor de 0,86 $Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$. (Gaspari *et al.* 2009).

FACTOR TOPOGRÁFICO (LS)

El valor del Factor topográfico (LS) quedó establecido en 1982. Está conformado por dos factores: el de longitud de pendiente y el de gradiente.

La longitud de pendiente (L) es la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo obtenidas en un campo de longitud de pendiente uniforme y dimensión variable, y el valor medio de la pérdida de suelo correspondiente a una parcela de longitud de pendiente uniforme de 22,1 m, para un mismo tipo de aguacero, suelo, y pendiente, con barbecho continuo (Factor C = 1) sin prácticas conservacionistas (Factor P = 1).

En la práctica, es la distancia entre el punto más alto de caída de la gota de lluvia y el punto donde la pendiente disminuye hasta dar comienzo a la deposición de los sedimentos, es decir aquel punto donde el escurrimiento entra a formar parte de un canal perfectamente definido.

En cuanto al Factor gradiente o Factor pendiente (S), se considera como la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo en un campo con pendiente cualquiera, con el que se obtendría en una parcela de 9 por ciento de pendiente uniforme, para las mismas condiciones en los restantes factores de lluvia, suelo y longitud de pendiente.

La diferencia entre el gradiente y la longitud de pendiente se visualiza en la Figura 5.8 expresado por Henaos (1988) y según Cenicafe (1949, 1956), donde se expone la pérdida de suelo generada por el escurrimiento superficial.

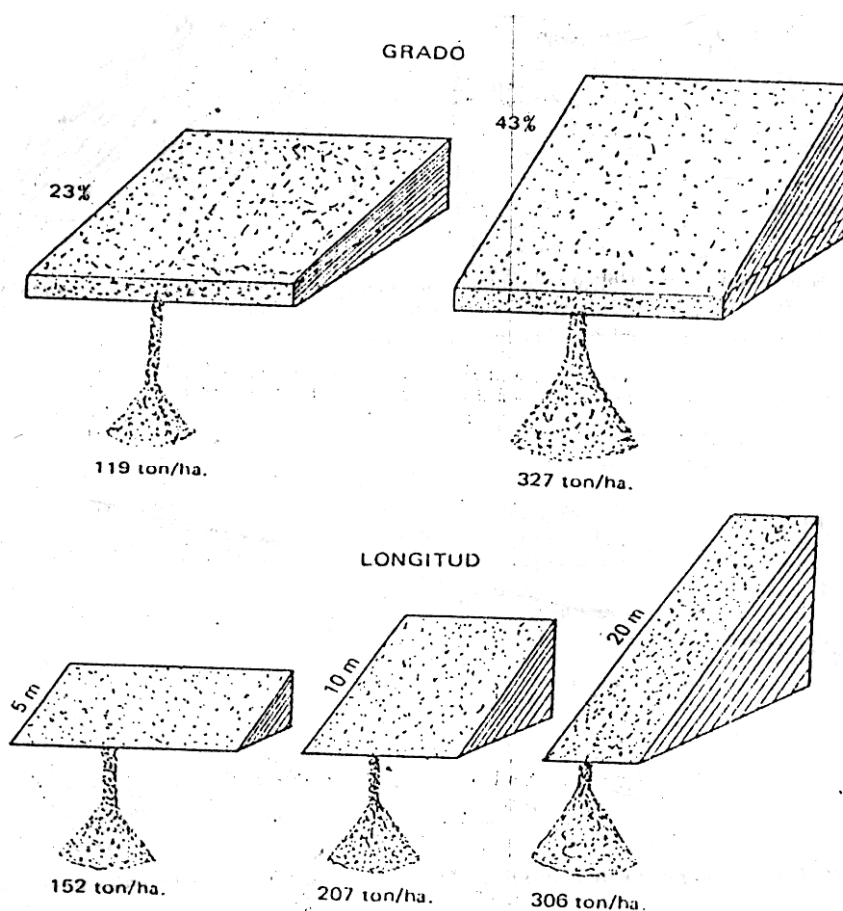


Figura 5.8. Efectos de la pendiente en las pérdidas de suelo por escurrimiento en lotes de igual superficie con suelos coluviales, con una precipitación promedio de 2.701 mm.

El factor LS a través de las siguientes ecuaciones de cálculo, dependiendo del valor de la pendiente del terreno (Fórmulas 5.6 y 5.7).

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{0,43 + 0,3 \cdot s + 0,043 \cdot s^2}{6,613} \right)$$

Fórmula 5.6. Factor LS, en áreas con pendientes menores al 9 %.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{s}{9} \right)^{1,3}$$

Fórmula 5.7. Factor LS, en áreas con pendientes mayores al 9 %.

Williams y Berndt, en 1976, basándose en que el Factor LS se encuentra influenciado por la interrelación entre el clima y el relieve de la cuenca, que el relieve se encuentra ligado al drenaje, y que el Factor LS representa en cierto modo la estabilidad de los materiales en el relieve de la cuenca, establecieron que la longitud de ladera (λ), se calcula a partir de la Fórmula 5.8.

$$\lambda = \frac{0,5 \cdot DA}{LCH}$$

Fórmula 5.8. Longitud de ladera.

Siendo

DA: Área del sector delimitado

LCH: Longitud total de los cursos que drenan por la misma

Mintegui Aguirre y López Unzu (1990) establecieron que la pendiente media de una subcuenca (s_i), se puede determinar en forma particular con la Fórmula 5.9.

$$s_i = \left[\frac{H \cdot (LC_i + LC_{i+1})}{2 \cdot DA_i} \right] \cdot 100$$

Fórmula 5.9. Pendiente media de por subcuenca (en %).

Siendo

s_i : Porcentaje medio de la pendiente para el área i , entre los contornos j y $(j + 1)$.

H : Diferencia de elevación entre contornos.

LC_i : Longitud del contorno j .

DA_i : Área entre los contornos j y $(j + 1)$.

Mientras que la pendiente media de la cuenca se determina por la Fórmula 5.10

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i \cdot DA_i}{DA} \right)$$

Fórmula 5.10. Pendiente media ponderada de la cuenca (en %).

La cuantificación del Factor LS también se puede establecer a partir de un nomograma generado a partir de datos de entrada como porcentaje de pendiente y longitud de la misma (Wischmeier y Smith, 1978), como se expresa en la Figura 5.9.

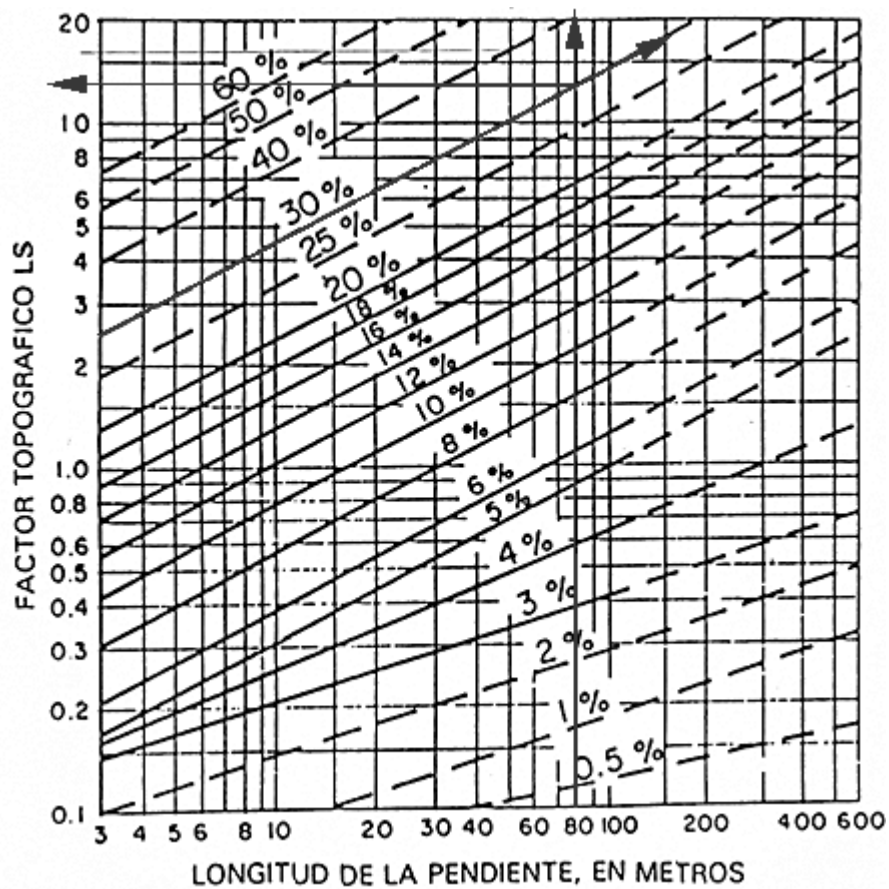


Figura 5.9. Nomograma para obtener Factor LS.

En la Figura 5.9 se presenta un ejemplo de aplicación para una longitud de pendiente de 80 metros y un gradiente de 30 % se establece que el LS es aproximadamente de 14.

La metodología cartográfica para determinar LS se esquematiza en la Figura 5.10, donde se expresa que partiendo de un modelo digital del terreno (o también un mapa topográfico) se puede obtener un mapa de pendientes. A partir de este último se separa en dos grandes grupos de pendientes: menores de 9% y mayores de 9%. Posteriormente aplicando las Fórmulas 5.6 y 5.7 respectivamente, se obtiene el valor de LS para cada área.

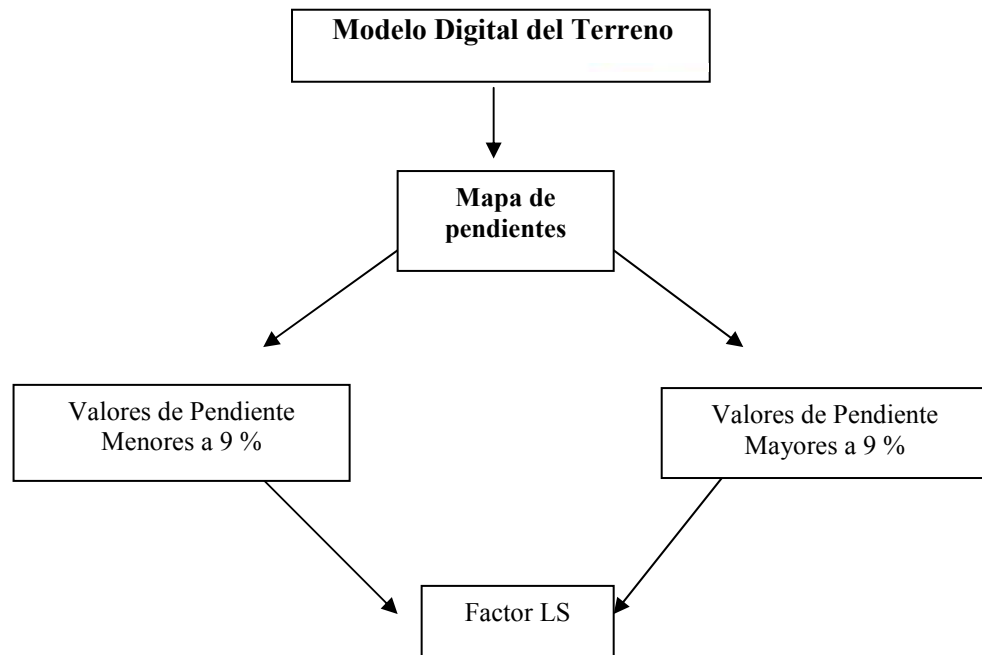


Figura 5.10. Esquema de obtención del valor de Factor LS.

Mintegui Aguirre (1988) desarrolló una tabla simplificada para la determinación del LS, según rangos porcentuales de pendiente (Tabla 5.1).

Integrando la metodología cartográfica de la Figura 5.10 con la metodología de Mintegui Aguirre (Tabla 5.1), se debe adecuar el mapa de pendientes en porcentaje reclasificando en los seis rangos establecidos para cada LS ponderado.

Tabla 5.1. Valores de LS según rangos de pendiente. Fuente: Mintegui Aguirre (1988)

Pendiente (%)	LS
0-3	0,3
3-12	1,5
12-18	3,4
18-24	5,6
24-30	8,7
> 30	> 14,6

FACTOR DE ORDENACIÓN DE CULTIVOS (C)

El factor C es definido como la relación entre el valor medio de pérdida de suelo en un campo cultivado o con vegetación y la pérdida en una parcela, en idénticas condiciones de lluvia, suelo y topografía, pero sometida a barbecho continuo. El factor C considera fundamentalmente:

- La protección que la vegetación proporciona al suelo, creando una especie de pabellón cubierto (Canopy Cover).
- La protección que proporciona la vegetación a ras del suelo, y el efecto beneficioso que se produce en la defensa del suelo contra la erosión, cuando el crecimiento de las plantas es lo bastante denso (Mulch and Close Growing Vegetation).
- Los efectos que los residuos de la vegetación tienen en la protección del suelo, por la cobertura y por el posible cambio de algunas de sus propiedades físicas, siempre que estas no estén consideradas en el Factor K (Residual Effects of the Land Use).

Se debe considerar que el valor del Factor C se determina experimentalmente para cada clase de cubierta, no siendo constante a lo largo del año para el caso de los cultivos agrícolas. Por ello, su valor estará determinado por las características de la cobertura vegetal: densidad de población, porcentaje de cubrimiento, edad, época del año y estado sanitario. A continuación se presenta una serie de tablas con valores medios anuales de Factor C, obtenidas a partir de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).

Para mayor información, consultar los manuales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y similares publicaciones, debido a que la determinación de su valor se encuentra en continua investigación.

En las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4 se expresan valores del Factor C, tomados de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).

Tabla 5.2. Valores de Factor C.

Cubierta vegetal	Valor de Factor C
Arbolado forestal denso	0,01
Arbolado forestal claro	0,03
Matorral con buena cobertura	0,08
Matorral ralo y eriales	0,2
Cultivos arbóreos y viñedos	0,4
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Cultivos en regadío	0,04

Tabla 5.3. Valores de Factor C para bosques

% de cabida cubierta	% de cubierta en contacto con el suelo ⁽¹⁾	Tipo de ordenación ⁽²⁾	
		C	NC
110 75	100 – 90	0,001	0,003 – 0,011
75 – 40	90 – 75	0,002 – 0,004	0,01 – 0,04
⁽³⁾ 40 - 20	70 – 40	0,003 – 0,009	0,02 – 0,09

Donde (1): Formada por al menos 5 cm de restos vegetales o plantas herbáceas.

(2): C = montes con control estricto del pastoreo; NC = sin control del pastoreo.

(3): Para cubiertas en contacto con el suelo, inferiores al 40 %, o cabida cubierta menor del 20 %, usar valores de la tabla anterior.

Tabla 5.4 Factor C elaborado por Wischmeier (Valores de Factor C x 10⁻³ para pastizales, matorrales y arbustos).

Cubierta vegetal		Cubierta en contacto con el suelo						
Tipo y altura de cubierta	% recubrimiento	Tipo	Porcentaje de cobertura del suelo					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable y matorrales (≤ 0,5 cm)		G	450	200	100	042	013	003
		W	450	240	150	090	043	011
Plantas herbáceas y matorrales (≤ 0,5 cm)	25	G	360	170	090	038	012	003
		W	360	200	130	082	041	011
	50	G	260	130	070	035	012	003
		W	260	160	110	075	039	011
	75	G	170	100	060	031	011	003
		W	170	120	090	067	038	011
Matorral (≤ 2 m)	25	G	400	130	090	040	013	003
		W	400	220	140	085	042	011
	50	G	340	160	085	038	012	003
		W	340	190	130	081	041	011
	75	G	280	140	080	036	012	003
		W	280	170	120	077	040	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable (≤ 4 m)	25	G	420	190	100	041	013	003
		W	420	230	140	087	042	011
	50	G	390	180	090	040	013	003
		W	390	210	140	083	042	011
	75	G	360	170	090	039	012	003
		W	360	200	130	083	041	011

El símbolo G hace referencia a cubierta en contacto con el suelo, formada por pastizal de al menos 5 cm de humus; mientras que en W tal cubierta está compuesta por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer.

Para determinar el valor de Factor C en un sitio, es conveniente el uso de cartografía en detalle, de modo de evitar generalizaciones (pero siempre teniendo en cuenta la escala de trabajo que se requiera). Además se recomienda la interpretación a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas, siendo siempre fundamental el apoyo del trabajo de campo en la corroboración.

FACTOR DE CONTROL DE EROSIÓN MEDIANTE PRÁCTICAS DE CULTIVO. (P)

El factor P puede definirse como la relación existente entre el valor medio de las pérdidas de suelo producidas en un campo donde se realizan las prácticas de conservación de suelo (cultivo a nivel, cultivo en fajas y terrazas), y las que se originarían en el mismo campo si se hicieran las labores en la dirección de la máxima pendiente. Las parcelas empleadas para los ensayos fueron de 22,1 m de longitud de pendiente y 9 % de pendiente. La tabla de valores que representa cada situación según las medidas de conservación para diferentes gradientes de pendiente, se presenta en la Tabla 5.6., elaborada por el Soil Conservation Service de Estados Unidos.

Tabla 5.6. Factor P.

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desagüe	Terrazas de infiltración
2 – 7	0,50	0,25	0,10	0,05
8 – 12	0,60	0,30	0,12	0,05
13 – 18	0,80	0,40	0,16	0,05
19 – 24	0,90	0,45	0,18	0,06

Según Mintegui Aguirre y López Unzú (1990), la cartografía a utilizar para delimitar la presencia del Factor P, conviene que se encuentre dentro de una escala de 1:10.000 a 1:25.000.

CLASIFICACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO

En cuanto a la tolerancia en la pérdida de suelo (A), FAO, PNUMA y UNESCO, en 1981, presentaron la “Clasificación Provisional para la evaluación de la Degradación de los Suelos” en una tabla con rangos según pérdida de suelo por aplicación de la U.S.L.E. (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990) (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial.

Pérdida de suelo (Mg.ha⁻¹.año⁻¹)	Grado de erosión hídrica
< 10	Ninguno o nulo
10 – 50	Moderado
50 – 200	Alto
> 200	Muy alto

Otra clasificación, en base a la tasa de pérdida de suelo aceptable por año, es la elaborada por Fletcher en 1996 (López Cadenas del Llano, 1998) (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Tasa de pérdida de suelo aceptable según las características del suelo.

Características del suelo	Tasa de pérdida aceptable (Mg.ha⁻¹.año⁻¹)
Suelo muy delgado sobre roca madre	0
Suelo muy delgado sobre roca madre no consolidada	5,6
Suelos muy delgado sobre roca madre intemperizada	11,2
Suelo moderadamente profundo sobre roca madre intemperizada	16,8
Suelo profundo sobre roca madre impermeable	22,4
Suelo profundo sobre roca madre poco permeable	28,0
Suelo profundo sobre roca madre muy permeable	33,6

La evaluación de tolerancia de pérdidas de suelo en un terreno, factor básico para la utilización de un modelo de ordenación territorial, depende de diversos factores, tales como la profundidad del suelo, sus propiedades físicas, el desarrollo del sistema radical de la vegetación, el contenido de materia orgánica, pérdida de nutrientes, entre otros (López Cadenas del Llano, 1998).

Según Wischmeier, las pérdidas de 12,5 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ son admisibles como máximo en un suelo profundo, de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable para la vida de las plantas.

Según Hudson, para suelos arenosos profundos son admisibles pérdidas de entre 4 a 6 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ y en suelos francos en un rango entre 13 y 15 Mg.ha⁻¹.año⁻¹. En general, para suelos agrícolas, se dan valores de 4 a 6 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ en suelos arenosos poco profundos; de 6 a

8 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ en suelos areno – arcillosos y de más de 12,5 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ para suelos francos, profundos y fértiles (López Cadenas del Llano, 1998).

La cuantificación de la tolerancia de pérdidas de suelos con situaciones de cultivos en sitios fértiles y profundos, se estima en pérdidas del perfil edáfico superior de 0,5 mm por año. Por lo tanto admitiendo que el peso específico del suelo es de 2 Mg.m⁻³, las pérdidas se evalúan 10 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ (Vich, 1989; Mintegui Aguirre y López Unzu, 1990). Esta cifra es normalmente superada, siendo frecuente que se sitúe entre 17 a 20 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ en zonas agrícolas de alta potencialidad y aplicándose una elevada tecnología agraria.

A continuación se presenta la descripción de la clasificación de los grados de erosión hídrica del suelo, adaptado de Mintegui Aguirre y López Unzu (1990) (Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Clasificación de grados de erosión hídrica del suelo.

Código	Grado	Observación
0	Ausente	No se aprecia pérdida de suelo
1	Ligero	Sólo se adelgaza el horizonte A o capa arable, observándose casi en su totalidad (menos del 25% del espesor). Aparecen pequeñas áreas desnudas (sin vegetación natural), formación de "patas de vaca" y acumulación de sedimentos en la base de las pendientes o en las depresiones.
2	Moderado	Poca formación de surquillos. El horizonte A o capa arable ha sido arrastrado en parte (entre 25% y 75%). Aparece mayor proporción de áreas desnudas y la formación de "patas de vaca". Algunas áreas pueden tener patrones intrincados que varían de manchas pequeñas a sitios erodados, donde el horizonte original A ha sido removido. En algunos lugares se puede encontrar mezcla del horizonte original A con el material del horizonte subyacente.
3	Severo	El arrastre del horizonte A o capa arable es casi total (mas del 75%). Frecuentemente ocurre formación de surcos y en ocasiones se presentan cárcavas aisladas. En áreas cultivadas el material que se encuentra debajo del horizonte A está expuesto en la superficie.
4	Muy severo	Pérdida completa del horizonte A. Se presenta formación de cárcavas en una red densa. Los suelos han sido destruidos casi totalmente, excepto en las pequeñas áreas que quedan entre cárcava y cárcava.

En la Tabla 5.9., se observa que las tasas de tolerancia de pérdida de suelo varían según las características peculiares de cada región bajo estudio, por lo cual se recomienda generar tablas de clasificación en rangos de pérdida de suelo, particulares para cada región. En la actualidad sigue siendo universalmente aceptada la clasificación elaborada por FAO en el año 1981.

Según Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008) plantean la ordenación de los usos del suelo en las diferentes superficies de la cuenca adoptando un valor tolerable de pérdidas de suelo (At) en la misma (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Ordenación de los usos del suelo en las diferentes superficies de la cuenca vertiente según el modelo U.S.L.E.

Aptitud	Código	Erosión	Uso actual del suelo
Terrenos Forestales	1	$A < At$	Compatible
	2	$A > At$	No compatible, se recomienda mejorar la cubierta vegetal
Terrenos Agrícolas	3	$A < At$	Compatible
	4	$A > At$	Compatible solo si se aplican las prácticas de conservación de suelos pertinentes
		$A < At$	
5	$A < At$ $A > At$	Incompatible, terrenos a recalificar	
Improductivos	6	-	-

MODELO M.U.S.L.E.

La Ecuación Modificada de Pérdida de Suelo (M.U.S.L.E.), brinda el valor de pérdida de suelo para una determinada cuenca (en Megagramos por hectárea), para un determinado evento pluviométrico. La misma fue generada por Renad (1974), Onstad y Foster (1975), y Williams (1975). La ecuación aplicada se presenta a continuación (Fórmula 5.11).

$$Y = 11,8 \cdot (Q \cdot q)^{0,56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Fórmula 5.11. Modelo MU.S.L.E.

Donde Y son los sedimentos emitidos por una tormenta aislada, en Mg en la cuenca; Q es el volumen de escurrimiento en m^3 y q el caudal máximo instantáneo (Caudal pico) en $m^3 \cdot s^{-1}$.

En este modelo el Factor R utilizado en la U.S.L.E. se ve reemplazado por el efecto del flujo de escurrimiento en el proceso erosivo, a través del Volumen Total Escurrido (Q), en m^3 , y de Caudal pico (q), en $m^3 \cdot s^{-1}$.

Para integrar los modelos U.S.L.E. y M.U.S.L.E. se presenta la Figura 5.11, que representa la secuencia de actividades recomendadas para determinar la pérdida de suelo en un aguacero concreto.

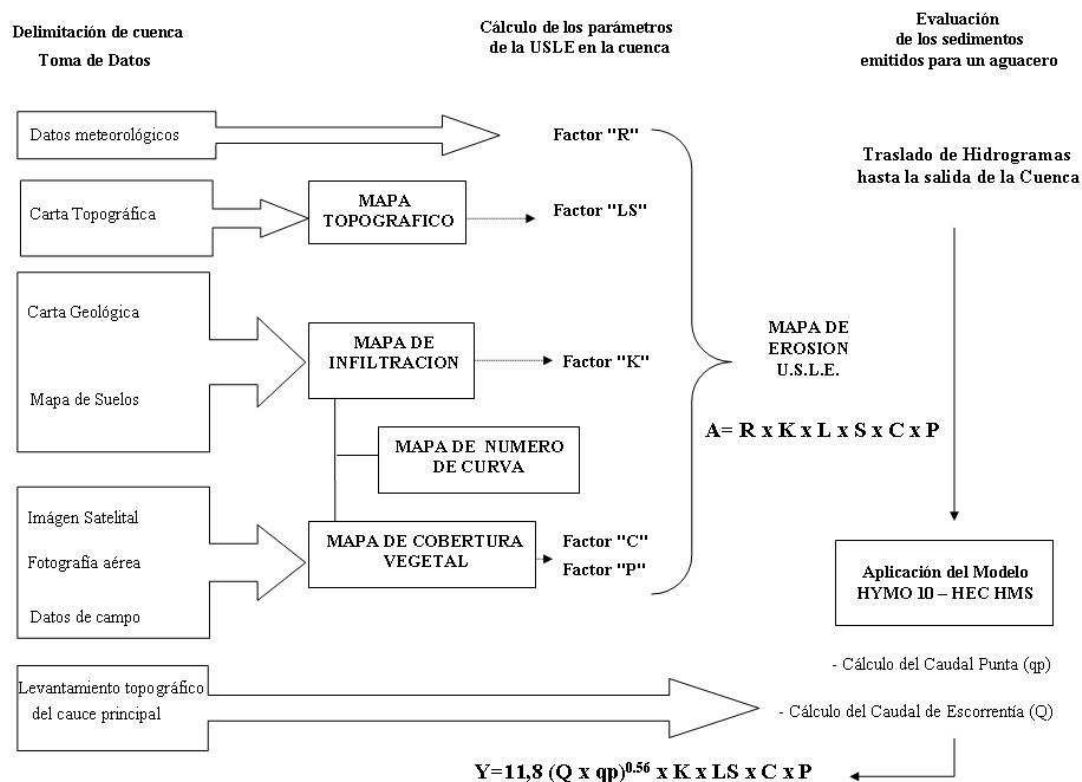


Figura 5.11. Secuencia de actividades para la determinación de la pérdida de suelo en un aguacero concreto.

MODELO R.U.S.L.E.

La metodología R.U.S.L.E. (Revised Universal Soil Loss Equation), depende de factores como: clima, propiedades del suelo, topografía, condiciones de uso del suelo y actividades antrópicas (Renard *et al.*, 1997). Este modelo predice los rangos de pérdida de suelo que están estrechamente correlacionados con los rendimientos medidos de sedimento. Las relaciones entre el rendimiento medido de sedimento y el predecido de pérdida de suelo que usa R.U.S.L.E., presentan una significancia de niveles del 1% o menos (Erskine *et al.*, 2002).

Se trata de un modelo estadístico relativamente simple, de estimación de la erosión del suelo, que es fácil de parametrizar y requiere pocos datos y tiempo para generar resultados. Integrar el modelo con el Sistemas de Información Geográfica facilita la manipulación de datos, aporte de datos y la salida espacial de datos (Lufafa *et al.*, 2003).

La metodología R.U.S.L.E. fue desarrollada para superar algunas de las limitaciones de U.S.L.E.. Sus avances incluyen los siguientes aspectos:

- Computarización de algoritmos para facilitar los cálculos.
- Desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable (K) y métodos alternativos de estimación de K cuando el nomograma no es aplicable.
- Un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando subfactores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta

vegetal del suelo (incluyendo fragmentos de roca en la superficie), y rugosidad del terreno.

- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente (LS) que consideran porcentajes de erosión en surcos e inter-surcos.
- La capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variable; y
- Nuevos valores de prácticas de conservación (P) para cultivo en fajas alternadas, uso de drenaje subterráneo, y praderas.

La R.U.S.L.E. es una ecuación empírica desarrollada para campos o parcelas con una capacidad limitada de desprendimiento y con curvatura muy moderada y sin rastros de deposición. Representa la pérdida promedio de suelo sobre un período de tiempo y en un área total (Renard *et al.*, 1997; Lu *et al.*, 2001; Mati *et al.*, 2000). La ecuación se expresa por la Fórmula 5.12.

$$E(r) = R \cdot K \cdot LS(r) \cdot C \cdot P$$

Fórmula 5.12. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (R.U.S.L.E.).

Donde:

- E(r): Promedio de pérdida de suelos (Mg.ha⁻¹);
 R: Factor de intensidad de lluvia (erosividad) (J.cm. m².h⁻¹);
 K: Factor de erodabilidad del suelo (Mg.ha⁻¹ por unidad de R);
 LS (r): Factor topográfico (longitud – pendiente) (adimensional);
 C: Factor de cobertura (adimensional);
 P: Factor de conservación del suelo y de prácticas (adimensional).

El factor LS presenta una modificación, como se expresa en la Fórmula 5.13.

$$LS(r) = (m + 1) \cdot \left(\frac{A(r)}{22,13} \right)^m \cdot \left(\frac{\sin\beta(r)}{0,0896} \right)^n$$

Fórmula 5.13. Factor topográfico (LSr). R.U.S.L.E. Fuente: (Renard *et al.*, 1997).

Donde:

- LS (r): Factor topográfico;
 A (r): Área contribuyente pendiente arriba por unidad de ancho;
 $\beta(r)$: Ángulo de pendiente más inclinado;
 $r_{(x,y)}$, m y n: Coeficientes que dependen del tipo de flujo.

Esta ecuación es una aproximación del factor LS (r) para la estimación de la pérdida de suelo usando R.U.S.L.E., suponiendo que la capacidad de transporte excede a la capacidad limitada de desprendimiento.

El factor de cobertura del suelo C, contempla las diferencias de comportamiento del suelo frente a la erosión en función de su cobertura. El coeficiente C considera el efecto de la cobertura sobre la erosión según características del ecosistema tales como la especie o especies, el estado del ecosistema en sincronización con los períodos de lluvias, las características de la materia orgánica acumulada sobre la superficie del suelo, las labores sobre el suelo (en sentido diferente a las prácticas de conservación). La relación de pérdida de suelo por vegetación y manejo de residuos de cultivo se calcula en base de cinco subfactores, con la expresión de la Fórmula 5.14.

$$SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM$$

Fórmula 5.14. Factor de cobertura de suelo (C). R.U.S.L.E.. Fuente: (Renard *et al.*, 1997).

Donde:

SLR: Relación de pérdida de suelo debido a la vegetación, cultivos y prácticas de arado de suelo;

PLU: Subfactor de uso de suelo previo;

CC: Subfactor de cobertura de dosel;

SC: Subfactor de cobertura de la superficie;

SR: Subfactor de rugosidad de la superficie;

SM: Subfactor de humedad del suelo.

Los subfactores individuales calculados por R.U.S.L.E. están expresados en función de una o más variables, incluyendo cobertura de residuos, cobertura de dosel, altura de dosel, rugosidad de la superficie, biomasa del subsuelo (masa de raíz más residuos incorporados), cultivos previos, humedad del suelo y tiempo. El coeficiente C para la cuenca se calcula por aplicación de una media ponderada en relación a la ocupación areal de cada tipo de cobertura. Posee una variación temporal en base a los cambios de cosecha, de estación e incluso de las etapas de crecimiento de los cultivos.

El factor P considera las pérdidas del suelo con respecto a las prácticas de labranza en pendiente, tendientes a disminuir esta pérdida. Estas prácticas al modificar los patrones de flujo y el grado y dirección de la superficie de escurrimiento, influyen directamente en la conservación o no del suelo. Para las prácticas de soporte de tierras cultivadas, generalmente incluye contorno, cultivos en faja, terraceo y drenaje subsuperficial.

Debe mencionarse que la ecuación de R.U.S.L.E. sólo puede ser aplicada apropiadamente en áreas que sufren erosión neta; áreas con deposición deben ser identificadas y excluidas del análisis con R.U.S.L.E. (Renard *et al.*, 1997; López Cadenas del Llano, 1998).

MÉTODO DE FOURNIER

El Método de Fournier ha sido desarrollado en 1960, con el fin de evaluar la degradación específica de una cuenca, basándose sólo en dos factores intervinientes en la erosión hídrica: el clima (precipitación y temperatura) y el relieve. Cabe mencionar que el Método de Fournier es indicado sólo para cuencas con superficies superiores a los 2.000 km². Este método considera al índice de agresividad del clima, definido por la Fórmula 5.16.

$$Y = \frac{p^2}{P}$$

Fórmula 5.16. Índice de agresividad del clima.

Donde:

p²: Precipitación del mes más lluvioso del año (mm).

P: Módulo pluviométrico (mm.año⁻¹).

En cuanto al relieve, se utiliza el coeficiente orográfico y coeficiente de masividad de De Martonne, términos explicados en la temática de morfometría de cuenca hidrográfica. La correlación lineal existente entre la degradación específica de la cuenca (DE) y el índice de agresividad del clima (Y), se considera que posee un alto grado de confianza. La Fórmula 5.17 expresa una forma de determinar la degradación específica (DE) simultáneamente con los factores de clima y relieve, anteriormente detallados.

$$DE = 0,0275 \cdot \left(\frac{p^2}{P} \right)^{2,65} \cdot (h \cdot \text{tg}\alpha)^{0,46}$$

Fórmula 5.17. Degradación Específica (DE) en Mg.km⁻².año⁻¹

Donde:

p²: Precipitación del mes más lluvioso del año (mm).

P: Módulo pluviométrico (mm.año⁻¹).

h: Altura media del relieve de la cuenca (m).

tgα: Coeficiente de masividad de Martone.

Se evidencia la importancia de las precipitaciones dentro de los procesos de degradación específica, ya que el parámetro que lo define (índice de agresividad del clima), presenta un exponente que quintuplica al asignado al factor relieve (coeficiente orográfico).

Posteriormente, Fournier modificó la expresión de su índice, de modo de ajustarlo mejor a zonas húmedas (Fórmula 5.18), manteniendo los mismos datos determinantes.

$$Y = \frac{1}{12} \cdot \sum \left(\frac{p^2}{P} \right)$$

Fórmula 5.18. Índice ajustado de Fournier.

Donde:

p^2 : Precipitación del mes más lluvioso del año (mm).

P: Módulo pluviométrico (mm.año⁻¹).

Según Gaspari *et al.* (2008), el valor de Índice de Agresividad para la localidad de Coronel Suárez es de 12,44, mientras que para Quiñihual es de 14,53 y para Tornquist de 11,20. Para un mayor detalle, se evaluó el Índice Modificado, siendo los valores de 95, 108 y 87, respectivamente, de este modo los dos primeros casos presentan un valor moderado, y Tornquist un valor considerado como bajo.

MÉTODOS DE DJOROVIC

Se trata de un método desarrollado en 1974, con posterioridad al de Fournier. Calcula la degradación específica de cuencas, especialmente para cuencas torrenciales, a través de una serie de parámetros que establece como representativos de cada uno de los factores determinantes de los procesos erosivos: clima, suelo, relieve y vegetación, además de un parámetro para estimar la influencia del grado de intensidad alcanzado por los procesos erosivos y el tipo de erosión predominante. La ecuación que lo define se presenta en la Fórmula 5.19.

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot (Z)^{3/2} \cdot F$$

Fórmula 5.19. Degradación específica según Djorovic.

Siendo:

W: Caudal sólido en m³ por año

T: $((t_0/10) + 1)^{1/2}$, siendo t_0 la temperatura media anual en °C.

h: Precipitación media anual (mm)

π : 3,1416

F: Fuerza de la cuenca en km²

Z: Coeficiente de erosión. Refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo en la cuenca, y valora la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve. Se calcula a partir de la Fórmula 5.20.

$$Z = y \cdot X_a \cdot (\delta + p)^{1/2}$$

Formula 5.20. Coeficiente de erosión.

Siendo:

y: Coeficiente adimensional de erosionabilidad del suelo que varía de 0,5 para suelos con buena estructura, a valores de 2 para arenas, gravas y suelos sueltos.

X_a: Coeficiente adimensional para cuantificar el estado de la cubierta vegetal y las prácticas conservacionistas. Varía de 0,05 para bosques y vegetación arbustiva bien cubierta, a valores de 1 para suelos desnudos.

δ: Coeficiente adimensional que cuantifica el estado erosivo de la cuenca. Varía desde 0,2 para cuencas con pequeños síntomas de erosión, hasta valores de 0,1 en cuencas con erosión manifiesta.

p: Pendiente media de la cuenca, en %.

El valor de Z a nivel de cuenca se obtiene por medio de la ponderación por superficie, a partir de los sectores con valores homogéneos.

Por último, se presenta la **clasificación de los procesos erosivos** en cinco categorías, en función de los valores de coeficiente Z obtenidos:

I) Erosión excesiva	1,01 < Z < 1,5
II) Erosión intensa	0,70 < Z < 1,0
III) Erosión media	0,41 < Z < 0,7
IV) Erosión débil	0,2 < Z < 0,4
V) Erosión muy débil	0,01 < Z < 0,19

MODELOS DE EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELOS EN CANALES DE ESCURRIMIENTO

Hacia el año 1975 Onstad y Foster propusieron una nueva expresión para el modelo U.S.L.E., con el fin de distinguir entre la erosión procedente de los canales de escurrimiento de la que ocurre entre ellos. Se sustituyó el término R de la U.S.L.E., por el factor W, determinado a través de la Fórmula 5.21.

$$W = a \cdot Rst + (1 - a) \cdot 0,40 \cdot Q \cdot qs^{1/3}$$

Fórmula 5.21. Determinación del factor W.

Siendo:

Rst : Factor aguacero (J.cm.m⁻².h⁻¹)

- Q: Volumen de escurrimiento (mm)
qs: Pico de escurrimiento (mm/h)
a: Representa la importancia relativa de la energía del aguacero, comparada con la energía de la escurrimiento necesaria para arrancar el suelo. Su valor oscila entre 0 y 1.

Para evaluar las pérdidas de suelo producidas por el desplazamiento hacia aguas arriba de la cabecera de la cárcava, barranca incipiente o remontante, Thompson en 1964 propuso la expresión de la Fórmula 5.22.

$$R = (7,13 \cdot 10^{-5}) \cdot A^{0,49} \cdot S^{0,14} \cdot P^{0,74} \cdot E$$

Fórmula 5.22. Determinación del avance de la cabecera del remontante.

Siendo:

- R: Avance de la cabecera del remontante para el período de tiempo considerado (m)
A: Área de drenaje por encima de la cabecera del remontante (m²)
S: Pendiente de entrada del canal por encima de la cabecera (%)
P: Sumatoria de las tormentas en 24 hs, iguales o mayores que 12,7 mm.
E: Contenido de arcilla del perfil erosionable del suelo (%)

En 1966, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos estableció una ecuación para determinar el promedio anual de avance de la cabecera de los remontantes (Fórmula 5.23).

$$R = (5,25 \cdot 10^{-3}) \cdot A^{0,46} \cdot P^{0,20}$$

Fórmula 5.23. Determinación del promedio anual de avance de la cabecera del remontante (R).

Siendo:

- R: Promedio anual de avance de la cabecera del remontante (m)
A: Área de drenaje, por encima de la cabecera del barranco (m²)
P: Total de lluvias, de precipitaciones mayores o iguales a 12,7mm en 24 horas (mm)

Para evaluar las pérdidas de suelo producidas por la migración hacia arriba del punto más alto de equilibrio del thalweg (o lecho del cauce), puede considerarse que las mismas variables que afectan el avance de la cabecera del barranco determinan a su vez su punto de equilibrio.

El aumento del ancho de la sección transversal de la incisión se considerará, se determina, a falta de medidas directas que permitan establecer una relación específica, con la Fórmula 5.24.

$$\Rightarrow \text{Para áreas con materiales coherentes: } D = 0,34 \cdot A$$
$$\Rightarrow \text{Para áreas con materiales incoherentes: } D = 0,57 \cdot A$$

Fórmula 5.24. Aumento del ancho de la sección transversal.

Siendo D la profundidad del barranco (m) y A su ancho (m).

Por otro lado, la determinación del transporte sólido acarreado por los flujos de avenida, se establece con otro tipo de ecuaciones, entre las que se pueden mencionar las basadas en: Du Boys, Schoklitsch y Einstein. Para profundizar en su determinación, consultar Mintegui Aguirre y López Unzu (1990).

RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO FORESTAL

Según Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008) el control de la erosión en las diferentes zonas de una cuenca vertiente está íntimamente relacionado con el uso de los sistemas agronómicos sustentables, cuyo antecedente moderno se encuentra en la Clasificación Agrológica de Suelos de Bennett (1939), que se ha adaptado en el transcurso del tiempo a las condiciones de las nuevas técnicas agronómicas y a las particularidades de los distintos países en los que se ha ido introduciendo; en la actualidad su implantación resulta prácticamente universal.

La Tabla 5.11 muestra una versión de dicha Clasificación Agrológica de Suelos de Bennett a la situación del agro en España. También ha contribuido sustancialmente en el estudio de la erosión hídrica del suelo y en la adopción de medidas para su control el U.S.D.A. Soil Conservation Service (1935), en sus comienzos específicamente para áreas de , pero posteriormente abarcando todo tipo de cubiertas vegetales; en dicho organismo, Wischmeier y Smith investigan y difunden en el transcurso de un largo período los fundamentos del modelo paramétrico U.S.L.E.

Tabla 5.11. Adaptación de la Clasificación Agrológica de Suelos de Bennett para España.

Capacidad agrológica	Clase	Clima	Característica del suelo					Medidas de conservación	Observaciones
			Pendiente	Profundidad	Fertilidad	Laboreo	Erosión		
Apropiados para el cultivo	I	Permite como mínimo una cosecha anual sin barbecho	< 3 %	Muy profundo > 1,00 m	Muy buena	Fácil	Nula o no apreciable	No se necesitan. Atender a la fertilidad	Vegas. Suelos bien drenados y sin piedras.
	II	Permite como mínimo una alternativa cereal-leguminosa-barbecho	(3-7) %	Profundo 0,75-1,00 m	Buena	Fácil	Nula a ligera	Senecillas, cultivo a nivel, en fajas, etc.	Secanos muy buenos, bien drenados y con pocas piedras. Vegas con algún problema
	III	Idem	< 20 %	Mediano a profundo < 0,75 m	Regular puede llegar a mala	Presenta algunas dificultades	Ligera a moderada	Importantes: terrazas, drenajes, etc.	Buenos secanos a veces en pendientes altas. Drenajes suficientes
Admite el cultivo ocasional	IV	Permite como mínimo una cosecha con descanso	> 5 % (son frecuentes pendientes elevadas)	Mediano a poco profundo < 0,50 m	Regular, necesita largos descansos	Presenta dificultades	Moderada a fuerte	Importantes: terrazas, drenajes y barbechos	Cultivos ocasionales por razones sociales
Adecuados únicamente para pastos	V	Debe permitir vegetación aprovechable.	< 5 %	Superficial < 0,25 m	Regular a muy escasa	Solo vegetación natural	Ligera a moderada	No se aplican, pues no se cultivan	Páramos, áreas que se inundan o pedregosas, etc.
Adecuados únicamente para pastos y bosques	VI	Puede ser extremado pero debe permitir una vegetación aprovechable	< 35 %	Mediano a poco profundo < 0,50 m	Regular	No aconsejable	Moderada a fuerte	Importantes si se cultivan. Pastos; bosques	Áreas de vegetación permanente: pastos; bosque
	VII	Puede ser extremado pero debe permitir una vegetación aprovechable	> 35 %	Variable	Regular a escasa				
No agronómicos	VIII	Todo tipo de limitaciones	Cualquiera	Cualquiera	Nula	-	De nula a acusada	No proceden	Áreas que no se aprovechan

El grado de protección del suelo contra la erosión hídrica superficial, generado por las diferentes masas arboladas y por las vegetaciones arbustivas y pastizales, se establece por medio de índices para la restauración hidrológico-forestal (Tabla 5.12).

Estos índices para España, han sido elaborados por López Cadenas de Llano y M. Blanco Criado (1968), apoyados en los trabajos de García Nájera (1955-56) y en las recomendaciones de FAO.

Tabla 5.12. Índices de protección del suelo por la vegetación.

Tipo de Vegetación	Estado de la vegetación	Pendiente del terreno	Índices de protección
FORESTAL	Masas arboladas densas (cabida cubierta \geq 0,7)	Cualquiera	1,0
	Masas arboladas de cabida cubierta < 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo no degradado		1,0
	Masas arboladas de cabida cubierta < 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo degradado	3	0,4
		2	0,8
		1	1,0
	Vegetación arbustiva no degradada	Cualquiera	1,0
	Vegetación arbustiva degradada	3	0,2
		2	0,6
		1	0,8
	Pastizales bien conservados	< 30 %	0,9
> 30 %		0,6	
Pastizales degradados	Cualquiera	0,3	
AGRÍCOLA	Cultivos agrícolas sin prácticas de conservación de suelos	3	0,0
		2	0,5
		1	0,9
	Cultivos agrícolas con prácticas de conservación de suelos	3	0,3
		2 y 1	1,0
NO PRODUCTIVO	Terrenos desnudos	3	0,0
		2	0,5
		1	0,9

Siendo:

1. Pendiente inferior al de iniciación de la erosión.
2. Pendiente comprendida entre la iniciación de la erosión y la de arrastre total.
3. Pendiente superior a la de arrastre total.

Los índices de protección del suelo presentados en la Tabla 5.12. en conjunción con los modelos U.S.L.E. y M.U.S.L.E., permiten establecer una metodología simple, aportando criterios clarificadores del comportamiento de la cuenca vertiente ante eventos torrenciales. A partir de ellos se puede establecer la ordenación agrohidrológica ante la previsible restauración hidrológico-forestal posterior, si del análisis de la ordenación así se dedujera.

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

CAPÍTULO 6

CARTOGRAFÍA

La Cartografía permite representar la superficie de la tierra sobre un plano, procurando obtener como resultado la mínima deformación al pasar de una superficie curva (la Tierra) a una plana. Existen distintos tipos de cartografía, pudiéndose clasificar según su contenido (Cartas topográficas, Carta imagen satelital, Cartas edáficas, Cartas Geológicas, Cartas catastrales); según su escala (Generales (< 1:500.000) o Detallados (> 1:500.000)) y según el soporte (Analógico o Digital).

A partir del Sistema de Coordenadas Geográficas se determina la posición de cualquier punto de la superficie terrestre, utilizando dos coordenadas angulares de un sistema de coordenadas esféricas que está alineado con el eje de rotación de la Tierra. Éste define dos ángulos medidos desde el centro de la Tierra denominados:

- **Latitud:** es un ángulo medido a partir del Ecuador y a lo largo de los meridianos. Tiene valor positivo hacia el Norte y negativo hacia el Sur.
- **Longitud:** es el ángulo que se mide a partir del meridiano de Greenwich. Tiene valor positivo al Este y negativo al Oeste. La distancia de un grado de Latitud se mantiene constante a lo largo del meridiano. En cambio, la distancia de un grado varía con respecto a la Latitud.

SISTEMAS DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Una proyección cartográfica es una correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie terrestre y sus transformados en el plano, llamado plano de proyección. Este método consiste en establecer una radiación de semirrectas a través de un punto, llamado vértice de proyección; se consigue así una correspondencia entre cada punto interceptado en la esfera y su homólogo en el plano cortado por la misma semirrecta. Las proyecciones tampoco evitan ciertas distorsiones que, según como se proyecten, pueden afectar a la forma, al área, a las distancias o a los ángulos de los elementos representados, y aquí surge otro aspecto importante de la cartografía: decidir qué proyección se va a utilizar para minimizar esas distorsiones (<http://www.fomento.es>) (Instituto Geografico Militar de España).

Todos los tipos de proyección cartográfica y la elección de un sistema en particular dependen de la características que se quieran conservar (la forma (ángulos), las áreas o alguna cualidad especial). En el caso de definir la forma de la Tierra, se considera que la misma presenta una conformación semejante a una situación intermedia a:

- **Geoide:** forma aproximada de la Tierra, tomando como referencia el nivel del mar en equilibrio y su prolongación en las áreas continentales. A partir del geoide es posible acercarse sin demasiado error a otra forma que pueda ser definida geoméricamente.
- **Elipsoide:** se trata de una superficie definida por la longitud de su radio ecuatorial (el mayor) y un radio polar.

En la Figura 6.1 se presenta una representación gráfica de la corteza terrestre, junto al geoide y el elipsoide, de modo brindar una mejor visualización y comprensión de los conceptos.

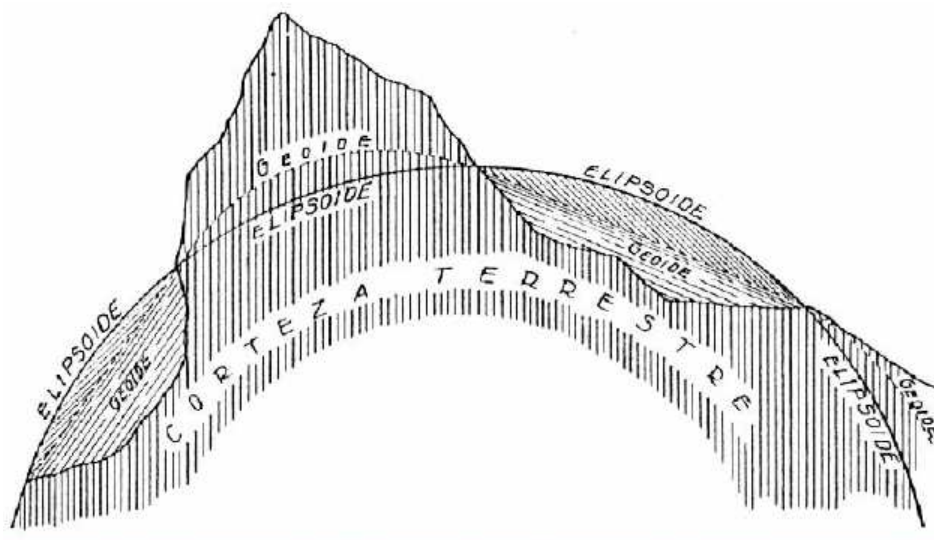


Figura 6.1. Representación de la corteza terrestre, el geoide y el elipsoide.

Para asemejar el elipsoide al geoide se fueron definiendo diferentes conjuntos de valores, dependiendo de la zona. En Argentina se adoptó el Elipsoide Internacional o Hayford. Como entre ambas superficies hay desplazamientos se deben determinar puntos de contacto entre elipsoide y geoide. Estos puntos se conocen como **datum**, con coordenadas elipsóidicas mucho más precisas. En Argentina se adoptó en un principio el datum Campo Inchauspe 69, mientras que actualmente, tanto en el país como a nivel mundial el datum utilizado es el WGS 84 (World Geodetic System 1984), el cual es un sistema geocentrado en el centro de la masa de la Tierra (magma).

La elección de un sistema de proyección no es arbitraria, depende de las características que se quieran conservar en la representación y de la forma que tenga el área a ser representada. Se clasifican según los siguientes criterios:

- a. Forma o superficie que se asuma para representar la Tierra.
- b. Característica que conservan.
- c. Plano de proyección (superficie desarrollable en un plano).
- d. Posición de la superficie de representación.

En Argentina se utiliza el sistema de proyección Gauss-Krüger para la elaboración de cartografía. La misma utiliza un cilindro tangente a un meridiano como superficie auxiliar, se trata de una proyección geodésica, conforme y transversa. Para reducir las deformaciones en Argentina, dividió al país en siete fajas de 3° de Longitud (Figura 6.2). El sistema de coordenadas se estructura como un sistema de doble eje (Y, X), siendo el eje X vertical y tiene su origen de coordenadas en el Polo Sur, en nuestro caso (a una Latitud de -90°). En tanto que el eje Y es horizontal y tiene su origen en el meridiano de tangencia, pero éste no es igual a cero, sino que se le asignó el número de faja como unidad de millón, más 500.000 metros. Este sistema evita la existencia de coordenadas con valores negativos.

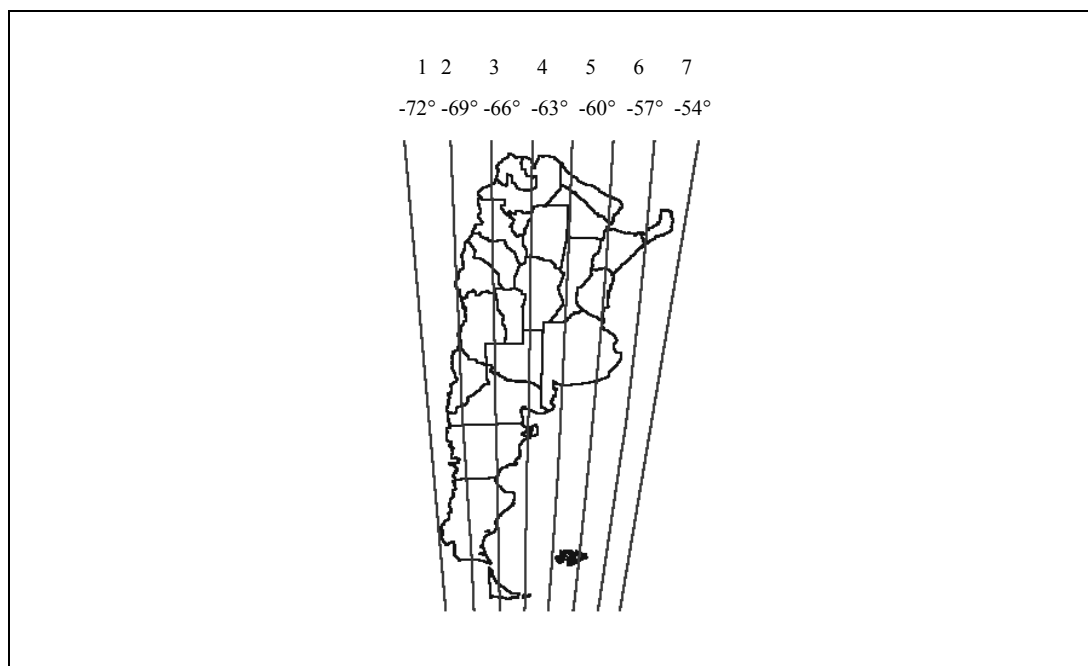


Figura 6.2. Representación del sistema de proyección Gauss-Krüger en Argentina.

Se presenta en la Tabla 6.1, el valor asignado de origen cartográfico para cada una de las siete fajas en que queda dividida la República Argentina, además de la Longitud de meridiano central de cada faja de 3°.

Tabla 6.1. Valores de Origen y límites por Faja cartográfica para el sistema de proyección Gauss-Krüger en Argentina

Faja cartográfica	Longitud Oeste del Meridiano central	Meridianos límites Longitud Oeste		Origen cartográfico del meridiano central
1	72°	70° 30'	73° 30'	1.500.000
2	69°	67° 30'	70° 30'	2.500.000
3	66°	64° 30'	67° 30'	3.500.000
4	63°	61° 30'	64° 30'	4.500.000
5	60°	58° 30'	61° 30'	5.500.000
6	57°	55° 30'	58° 30'	6.500.000
7	54°	52° 30'	55° 30'	7.500.000

ESCALA

La escala es una relación de semejanza entre una distancia en el plano y su correspondencia sobre el terreno. Toda representación, como toda imagen, está en una relación de tamaño (proporción) con el objeto representado, es decir, en una determinada escala.

La escala puede ser expresada en forma numérica o gráfica. La escala numérica se presenta como un número fraccionario 1:50.000 ó 1/50.000. El numerador significa unidad en el plano, reducida tantas veces como lo indica el denominador. La escala gráfica es una línea dividida en segmentos numerados, expresados en m o km que permite, midiendo las distancias en la carta y comparándola con dichos segmentos, determinar las medidas del terreno.

Es fundamental determinar qué escala de trabajo es la indicada a utilizar, según el objetivo de trabajo que se tenga. Ya que si la escala escogida es demasiado grande (por ejemplo 1: 10.000), y el área de trabajo es extensa (1 millón de hectáreas), quizás sea demasiado tedioso el manipuleo de toda la información. Por otro lado, si la escala es demasiado chica (por ejemplo 1:500.000), y el área de trabajo es reducida (como en el caso de una pequeña cuenca de 1.000 hectáreas), el grado de detalle brindado por la cartografía no reflejará certeramente lo ocurrido en el terreno, ya que las particularidades de cada sitio se verán superadas por la generalización.

En la Tabla 6.2 se relaciona la escala con la nomenclatura de las cartas en Argentina.

Tabla 6.2. Escala y nomenclatura de las cartas.

Escala	Nomenclatura	Descripción
1:500.000	3166	Cuadro externo.
1:250.000	3166 - I	El conjunto de nueve cuadros del anterior, es decir un cuarto del externo de 1 500.000.
1:100.000	3166 - 1	Un cuadro de 36, es decir una novena parte de 1:250.000.
1:50.000	3166 - 1 - 1	Una cuarta parte de 1:100.000.
1:25.000	3166 - 1 - 1a	Una cuarta parte de 1:50.000.

La Figura 6.3 se presenta un ejemplo que expresa la nomenclatura asignada a cada escala de cartografía utilizada en la República Argentina, siendo la base de la nomenclatura la escala 1:500.000, que expresa la latitud – longitud del centro de cuadrícula.

Posteriormente cada cuadro a esta escala se divide en 36 partes, generando la nomenclatura en 1:100.000. Cada uno de estos últimos genera un cuadro de una novena parte a escala en 50.000 que coincide con el tamaño generado por la cuadrícula anterior. Por último cada cuarto de este último establece un cuadro a escala 1:25.000.

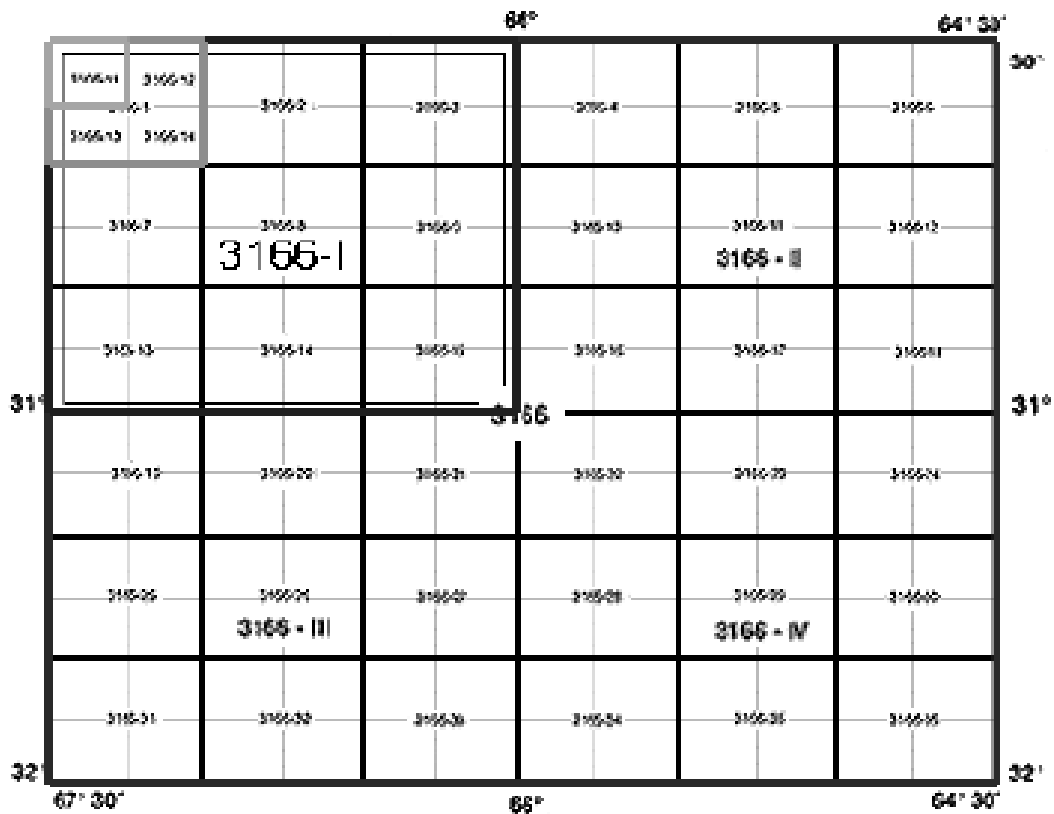


Figura 6.3. Representación de las distintas escalas y su nomenclatura.

Otro elemento fundamental de la cartografía son los datos marginales. Estos constituyen el conjunto de datos técnicos en el margen de una carta, a tener en cuenta para su correcta lectura. Cada carta varía sus marcas marginales según la zona que representa y la escala utilizada.

Entre los elementos alfabéticos, numéricos y gráficos que conforman los mencionados datos marginales, se encuentran: Situación de la hoja cartográfica, Título, Escalas gráficas y numéricas, Créditos y fechas, Símbolos y Rotulaciones, Norte y declinación magnética, Leyenda, entre otros.

TIPOS DE CARTOGRAFÍA

La Cartografía se puede agrupar en tres tipos principales según el grado de procesamiento que presente la información:

1. Primaria o de primer orden: se elabora a partir de procesos directos de observación y medición de la superficie terrestre. Ejemplo: topografía, suelos, red de drenaje.
2. Secundaria o de segundo orden: obtenida por procesamiento de la cartografía primaria. Ejemplo: grupos hidrológicos, rangos de pendiente, orientación de laderas.

3. Terciaria o de tercer orden: se obtiene por procesamiento conjunto de una o más cartografía primaria y/o secundaria. Ejemplo: riesgo de erosión, Número de Curva.

La cartografía puede ser generada en formato digital o en papel. El formato digital presenta ventajas en relación a la cartografía en papel, debido a que es más sencillo de actualizar, la transferencia de la información es rápida y accesible, requiere pequeño espacio de almacenamiento, de fácil mantenimiento y su procesamiento y análisis puede ser automático.

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICAS (S.I.G.)

La noción de S.I.G. o Sistemas de Información Geográfica se origina en la década de 1960, como resultado de la extensión de los sistemas de base de datos a todo tipo de dato geográfico. Básicamente se trata de un dispositivo informático para analizar datos espaciales, capaz de realizar distintas funciones operativas. Existe una amplia gama de definiciones sobre el concepto S.I.G., a continuación se mencionan sólo algunas:

-*Tamura et al. (1984)*: un S.I.G. provee información de una porción de la superficie terrestre. Procesa y analiza los datos convirtiéndolos en información digital con el fin último de la producción cartográfica, el análisis espacial y la ayuda en las decisiones.

-*La Sociedad Francesa de Fotogrametría y Teledetección (1989)*: define al S.I.G. como un sistema informático el cual reúne, organiza, maneja, analiza, combina, elabora y presenta datos geográficamente localizados a partir de diferentes fuentes y contribuye en particular al manejo del espacio.

-*Goodchild y Gopal (1989)*: sistema de hardware, software, y procedimientos diseñados para apoyar la adquisición, gestión, manipulación, análisis, modelización y visualización de datos referenciados espacialmente para resolver complejos problemas de planificación y gestión.

-*Dagorne et al (1991)*: un S.I.G. es una base de datos geográfica (con datos físicos, humanos o socio-económicos) relacional, digital, textual y gráfica, la cual complementa bases de datos estadísticas y bibliográficas.

-*Bonham-Carter (1994)*: propone una definición simple: "un sistema de información geográfica es un sistema informático para la gestión de datos espaciales". El adjetivo geográfica implica que la situación espacial de los distintos objetos es conocida, o puede ser calculada, en términos de coordenadas geográficas (por ejemplo, latitud-longitud).

El S.I.G. presenta diferentes funciones según el procesamiento digital y el programa informático empleado. Entre las más importantes se destacan:

- Incorporación y almacenamiento de datos: digitalización, edición, construcción de topología, transformación de proyecciones, conversión de formatos y asignación de atributos.
- Creación de una base de datos coherente y económica que conserve sus características: archivos de datos, elección del modelo de base de datos (jerárquica, relacional, orientada a objetos), y consulta de atributos.
- Análisis y generación de nueva información a partir del original: operaciones de medición, operaciones de superposición, operaciones de intersección y clasificaciones.

- Representación de los datos: transformación de escala, mapas temáticos, representaciones en dos y tres dimensiones (2D y 3D), mapa estadístico, tablas y figuras.

Las aplicaciones prácticas más desarrolladas que presenta un S.I.G. son:

- Delimitación de tipo de cobertura y uso del suelo: generación y actualización de mapas a partir de imágenes satelitales y datos de campo. Análisis de cambios.
- Inventarios forestales: monitoreo de plantaciones comerciales. Monitoreo de superficies invadidas por especies exóticas.
- Monitoreo de plagas y cultivos agrícolas.
- Monitoreo de emergencias: inundaciones, sequías, incendios.
- Actualización de catastro rural y urbano. Planificación.

COMPONENTES DE UN S.I.G.

Los elementos constitutivos de un S.I.G. son: el hardware (computadora), el software (programas de procesamiento de la información georeferenciada), los datos geográficos y un equipo humano idóneo. Para la operación de un S.I.G. se lleva adelante un proceso denominado de Abstracción. El mismo se basa en que el S.I.G. genere una representación simplificada del mundo real, por medio de diversos niveles de información en capas, que establece en relación a la concepción de la estructura de base de datos.

Dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir según un objeto geográfico definido, que permitirá la obtención de los respectivos datos temáticos a cartografiar (Figura 6.4 a).

Las capas temáticas de información a utilizar pueden ser varias y de muy diversa índole, entre las cuales puede citarse a modo de ejemplo la cartografía con datos de hidrografía, topografía, geología, red vial, edafología, geomorfología, vegetación y uso del suelo, áreas protegidas, información catastral, entre otros (Figura 6.4 b).

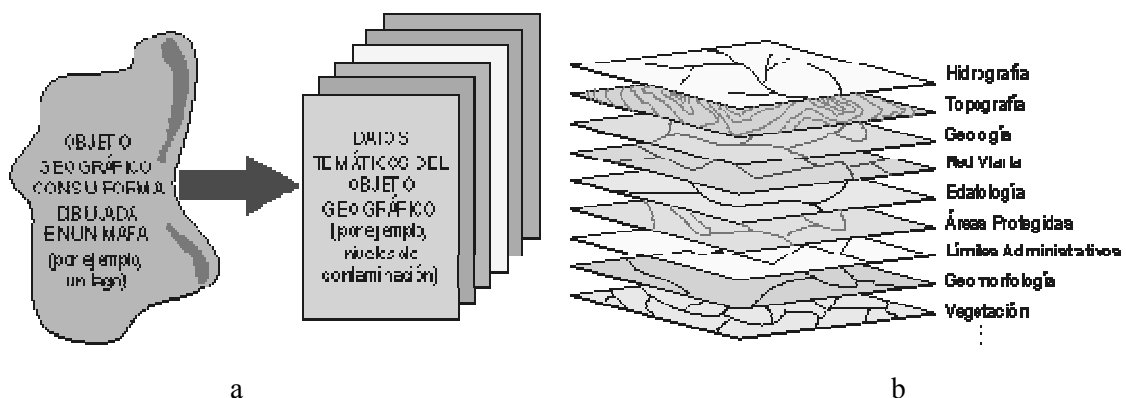


Figura 6.4. Proceso de abstracción de datos temáticos (Eastman, 2006).

TIPO DE DATOS DE UN S.I.G.

El dato geográfico espacial presenta dos componentes relacionados:

- **Temático:** un objeto o fenómeno se encuentra descrito por sus atributos. Por ej.: un bosque se describe por su superficie, especies presentes, número de estratos de la vegetación, etc.
- **Espacial:** hace referencia a la geometría y a la topología (relación entre objetos vecinos).

Cada punto en el espacio presenta una *Geometría* que establece su ubicación sobre la superficie terrestre, descrita generalmente por sus coordenadas, por ejemplo: coordenadas geográficas (latitud / longitud) o planas. Además cada objeto consta de *Topología* que se refiere a las relaciones entre los objetos, por ejemplo: relación de inclusión, adyacencia, jerarquía, etc.

La Figura 6.5 representa el flujo de información de un S.I.G., donde se define que a partir de una base de datos espacial – temática se puede establecer la caracterización general de un sitio, según el Manual de Usuario del Programa Idrisi (Eastman, 2006).

La implementación de varios sistemas de procesamiento, como ser: digitalización y procesamiento de imágenes, análisis estadístico, manejo de base de datos, análisis geográfico, todos ellos generados a partir de una base de datos espaciales y temáticos, permite lograr un objeto final a partir del sistema de despliegue cartográfico = MAPAS.

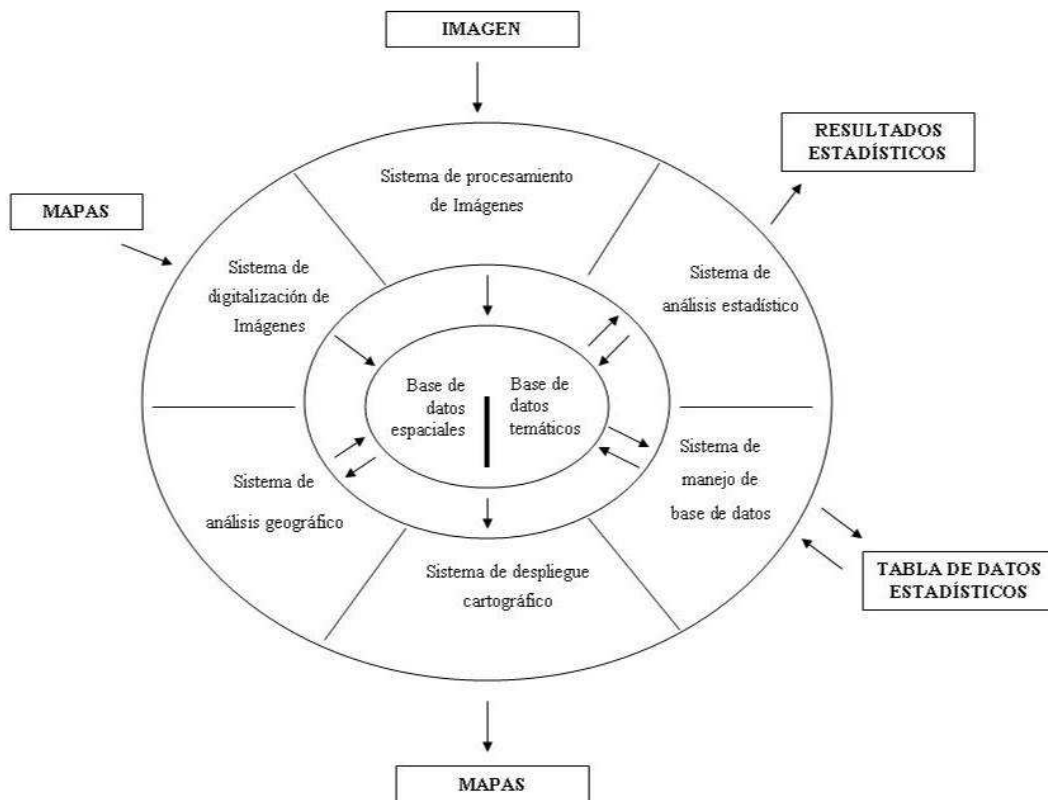


Figura 6.5 Representación del flujo de información a partir de un S.I.G.

Las fuentes de datos espaciales son muy diversas, entre las mismas se encuentran: fotografías aéreas, imágenes satelitales, mapas analógicos, datos de campo (por ejemplo los tomados con GPS), entre otros. Los tipos de bases de datos para S.I.G. se utilizan bajo dos formatos: vectorial y/o grilla (cuadrícula o raster).

S.I.G. VECTORIAL

Son aquellos Sistemas de Información Geográfica que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico. Se basan en la siguiente concepción:

- 1) Con un par de coordenadas (X, Y) y su atributo gestionan un punto (Z, vértice geodésico o valor del atributo), generando el punto (X, Y, Z).
- 2) Con dos puntos generan una línea.
- 3) Con una agrupación de líneas forman polígonos.

En los sistemas **vectoriales**, las líneas se representan mediante una serie de segmentos rectos llamados vectores. Las coordenadas X, Y del final de cada vector se digitalizan y se almacenan de forma explícita, y las conexiones se indican mediante la organización de los puntos en la base de datos. A partir de la información definida, se pueden obtener diferentes tipos de vectores:

- **Punto:** abstracción de un objeto de cero dimensiones representado por un par de coordenadas (X, Y). Normalmente un punto representa una entidad geográfica demasiado pequeña para ser representada como una línea o como una superficie.
- **Línea:** conjunto de pares de coordenadas ordenados que representan la forma de entidades geográficas demasiado finas para ser visualizadas como superficies a la escala dada (curvas de nivel, ejes de calles, o ríos), o entidades lineales sin área (límites administrativos). Si la línea presenta curvatura, se denomina **arco**.
- **Polígono:** entidad utilizada para representar superficies. Un polígono se define por las líneas que forman su contorno y por un punto interno que lo identifica. Los polígonos tienen atributos que describen al elemento geográfico que representan.

Las fuentes directas de datos en formato vectorial pueden ser: tablas con puntos (X, Y, Z), líneas generadas de continuidades entre puntos, datos provenientes de GPS y navegadores.

En tanto que las fuentes indirectas de datos en formato vectorial son digitalización manual (plancheta o pantalla) de cartografía papel y escaneado y procesamiento con software específico.

La generación de un polígono se establece con un formato básico, donde se caracteriza detalladamente el tipo de vector.

A continuación se presenta el listado de este formato básico de información que se genera para dibujar un polígono en el espacio georreferenciado, representado en la Figura 6.6. En éste, se visualiza un polígono de 10 vértices (cuyo inicio y fin son el mismo vértice del único polígono cerrado), con sistema de referencia en latitud – longitud, en grados, de valor entero, y con coordenadas límite de dibujo y coordenadas de punto, según se indica a continuación.

Vector Layer Name: poligono
 Vector Layer Type: Polygon
 Reference System: latlong
 Reference Units: deg
 Unit Distance: 1
 ID/Value Type: Integer
 Number of Features: 1
 Minimum X : -61.60
 Maximum X: -61.44
 Minimum Y: 38.22
 Maximum Y: 38.06
 Number of Vertices : 10
 Coordinates (X,Y) : **-61.57 38.09**
 : -61.53 38.06
 : -61.48 38.07
 : -61.44 38.10
 : -61.44 38.15
 : -61.50 38.22
 : -61.57 38.22
 : -61.58 38.17
 : -61.60 38.12
 : **-61.57 38.09**

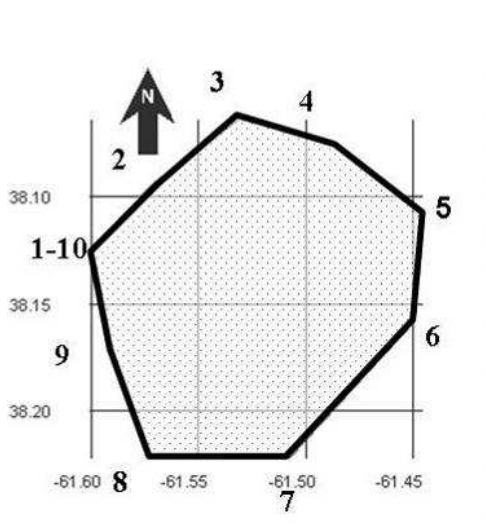


Figura 6.6. Representación de un polígono georreferenciado.

S.I.G. RASTER

En los sistemas raster, de cuadrículas o celdas, el mapa se representa en formato rectangular o en células rectangulares o cuadradas, a cada una de las cuales se le asigna un valor. En este tipo de base de datos, la unidad básica de información geográfica es denominada píxel. Su implementación consiste en la subdivisión del área en una malla de celdas, cada unidad posee coordenadas geográficas (centro del píxel) y un identificador (cualitativo o cuantitativo). El procedimiento para obtener un píxel es el siguiente:

- 1) Se divide la zona en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (píxel).

- 2) Se le atribuye un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático.
- 3) Dado que la malla es regular (el tamaño del píxel es constante) y que se conoce la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los píxeles están *georreferenciados*.
- 4) Las fuentes directas de datos en formato raster son principalmente las imágenes satelitales (Landsat, Aster, Spot, Quick Bird) y radar (Modelo Digital de Elevación obtenido a partir de SRTM). Entre las fuentes indirectas de datos en formato raster pueden citarse: el producto del rasterizado de cartografía en formato vectorial y/o el escaneado y procesamiento con software específico.
- 5) La generación de un mapa raster o cuadrícula se establece al generar una grilla sobre el mapa generado por el/los vectores. Esta grilla se establece por filas y columnas, como se expresa en la Figura 6.7 (derecha), que es la rasterización de la Figura 6.7 (izquierda)

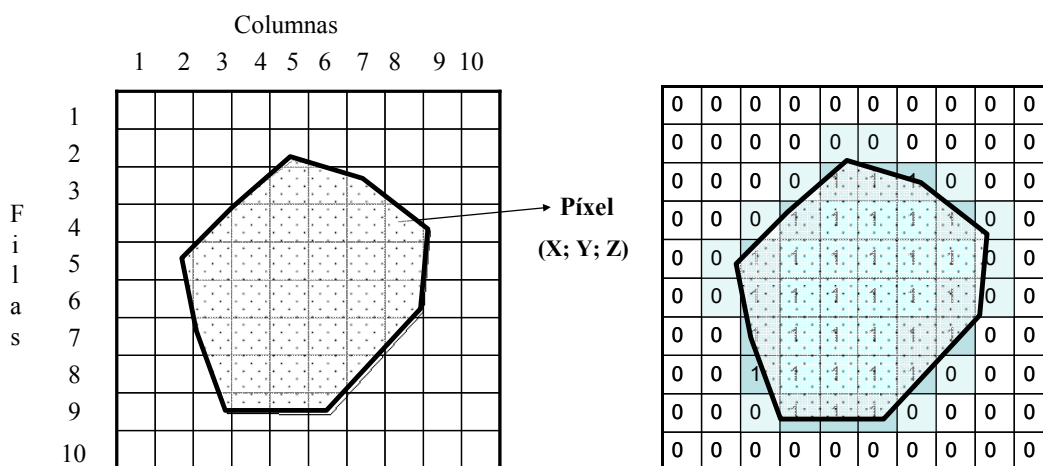


Figura 6.7. Representación de la grilla de un polígono vectorial

La Figura 6.7 de la derecha representa la cuadrícula del polígono de la Figura 6.7 de la izquierda, indicando la cantidad de filas y columnas y el píxel. Además, se presenta el valor que se le otorga a cada píxel, es decir al píxel que contiene al polígono se lo denomina 1 y al que está fuera del polígono se lo nombra cero (a la derecha). Sobre el límite del polígono se considera el valor de 1 al píxel que presenta una ocupación mayor al 50% con dicho polígono.

Al realizar la transformación de datos vectoriales a raster es muy importante definir la cantidad de filas y columnas de la grilla, ya que al aumentar el número de éstas se disminuye el tamaño del píxel, generando un mayor detalle y precisión al definir los límites de los vectores que integran el mapa.

En el caso de que en el mapa exista más de un vector se debe definir más cuidadosamente las dimensiones del mapa raster a generar (Figura 6.8) (Eastman, 2006).

La relación entre las bases de datos vectorial y raster se exponen como ejemplo en la Figura 6.8 a, que representa al mapa con tres polígonos (1, 2, 3) y su rasterización en la Figura 6.8 b.



Figura 6.8 a. Base de datos de tipo vectorial.

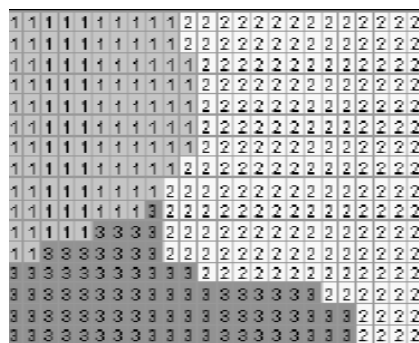


Figura 6.8 b. Base de datos de tipo raster.

Al analizar las características de cada tipo de S.I.G. se establece que cada formato posee sus utilidades favorables, como se expresa en la Tabla 6.3, donde se presenta un listado de las características de cada tipo de base de datos y se indica su beneficio (+) o dificultad (-) para su uso.

Tabla 6.3. Características de los sistemas raster y vector.

Característica	Vector	Raster
Precisión gráfica	+	-
Cartografía tradicional	+	-
Volumen de datos	+	-
Topología	+	-
Operaciones de cálculo	-	+
Actualización	-	+
Variación espacial continua	-	+
Integración	-	+
Variación espacial discontinua	+	-

SISTEMAS ORIENTADOS A OBJETOS

Mientras los modelos de dato vectorial y raster estructuran su información mediante capas, los sistemas orientados a objetos intentan organizar la información geográfica a partir del propio objeto geográfico y sus relaciones con otros. Además, introducen un carácter dinámico temporal y espacial a la información incluida en el sistema, frente a los modelos de datos vectoriales y raster que tienen un carácter estático. A partir de ello se puede definir herencia, como al conjunto de atributos temáticos de cada objeto geográfico, resultado de aplicar unas determinadas funciones que varían según las relaciones del objeto de referencia con su entorno. Este tipo de sistema representa la dinamicidad de los datos.

MÉTODOS PARA INTRODUCIR DATOS GEOGRÁFICOS A UN S.I.G.

Luego de caracterizar los tipos de base de datos que pueden utilizarse y desarrollarse en un S.I.G., se pueden mencionar que los principales métodos utilizados para introducir datos geográficos a estos, son los siguientes:

- Digitalización manual.
- Escaneado de mapas analógicos.
- Entrada de datos en forma de imágenes satelitales y conversión al S.I.G.
- Transferencia de datos a partir de fuentes digitales existentes.
- Entrada directa de datos, incluyendo los provenientes de GPS.

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

A continuación se presenta una breve introducción al concepto de GPS (Sistema de Posicionamiento Global), el cual a pesar de su origen bélico, se ha convertido en una herramienta de gran divulgación en la actualidad. Útil tanto en actividades de investigación y desarrollo, como a nivel turístico y recreativo. Este instrumento permite obtener la posición geodésica en cualquier instante y navegar en una dirección del terreno conociendo las coordenadas del punto destino. La posición instantánea y navegación en el terreno son calculadas por el receptor GPS en base a la información brindada por la constelación de 24 Satélites que se encuentran en órbita a 20.000 km de altura sobre la superficie terrestre.

Una vez que el receptor GPS ha captado la señal de, al menos, tres satélites, entonces puede conocer la distancia a cada uno de ellos y puede calcular su propia posición en la Tierra mediante la triangulación de la posición de los satélites captados, presentándola en pantalla como Longitud y Latitud. Si un cuarto satélite es captado, proporciona aún más precisión a los cálculos, brindando además información altitudinal (este aspecto debe ser utilizado con cautela, ya que no siempre el dato altitudinal brindado es correcto).

Sus principales aplicaciones son: Geoposicionamiento, Medición de áreas y distancias, Marcado de caminos, Medición de altitud y Navegación.

TELEDETECCIÓN

Según Chuvieco (2000), se define a la teledetección (o remote sensing), como la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento (sensor), que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación.

El término sensor se aplica a un dispositivo que permite detectar radiaciones electromagnéticas en forma de luz, calor y ondas de radio y convertirlas en señales, que pueden ser registradas en una emulsión sensible o bien en un conjunto de datos numéricos capaces de ser procesados. A los sensores remotos se los clasifica según el siguiente criterio:

- ❖ **Sensores activos:** son aquellos que tienen su propia fuente de energía.

Ej. SLAR (Slide Looking Airborne Radar) o Radar de visión lateral.; SAR (Synthetic Aperture Radar) o Radar de Apertura Sintética; STAR Radar de Apertura sintética que provee datos digitales con 12 m de resolución.

❖ **Sensores pasivos:** aprovechan la energía electromagnética proveniente del Sol y reflejada por la cubierta terrestre y también la emitida por los objetos en virtud de su propia temperatura. Estos sensores pasivos también se pueden clasificar en función del procedimiento que emplean para registrar la radiación:

a) Fotográficos: Cámaras fotográficas: convencional, de gran altitud y espaciales.

b) Óptico electrónicos: Barredores Multiespectrales, de barrido y de empuje. Cámaras Vidicon, Cámaras digitales.

c) De antena: Radiómetros de micro-ondas.

Las distintas plataformas sobre las que pueden ir montados los sensores son enunciadas a continuación:

- Satélites no tripulados (Landsat (USA), SPot (Francia), ERS-1/2 (Europa), Aster (Japón), IRS (India), Meteosat (Europa), Radarsat (Canadá), Aviris NASA, Eros Imagesat (USA), Sac C (Argentina), Ikonos Space Imaging (USA).

- Satélites tripulados

- Transbordadores espaciales
- Aviones de reconocimientos
- Aviones medianos

ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

La energía electromagnética es la energía propagada a través del espacio o de otro medio material en un modelo armónico ondulatorio con un componente magnético y otro eléctrico. Mientras que el término espectro electromagnético hace referencia a la agrupación de la radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar (Chuvieco, 2000).

El concepto de onda explica como la energía electromagnética se propaga, pero esta energía sólo puede ser detectada cuando interactúa con la materia. En esta interacción la energía electromagnética consiste en cantidad de cuerpos individuales llamados fotones. Las ondas electromagnéticas pueden ser descritas en término de velocidad, longitud y frecuencia (Figura 6.9).

Velocidad (v): comúnmente referida a la velocidad de la luz = $300.000 \text{ km.seg}^{-1}$.

Longitud de onda (λ): es la distancia entre dos puntos homólogos en ondas sucesivas. El micrómetro (μ) es la unidad utilizada para las longitudes de onda correspondientes a la porción del espectro visible e infrarrojo.

Frecuencia (F): es el número de crestas de ondas que pasan por un punto en una unidad de tiempo. La frecuencia fue normalmente expresada en ciclos por segundo, pero hoy se usa el Hertz que es la unidad de una frecuencia de un ciclo por segundo. La frecuencia es empleada por ingenieros electrónicos para designar a la región del espectro electromagnético correspondiente a las ondas de radio y radar. Habitualmente se usa más la longitud de onda que la frecuencia.

La relación de velocidad (v), longitud de onda (λ) y frecuencia (F) está dada por la Fórmula 6.1 y representada en la Figura 6.9 se presenta el esquema de la onda electromagnética según Chuvieco (2000).

$$v = \lambda \cdot F$$

Fórmula 6.1. Velocidad

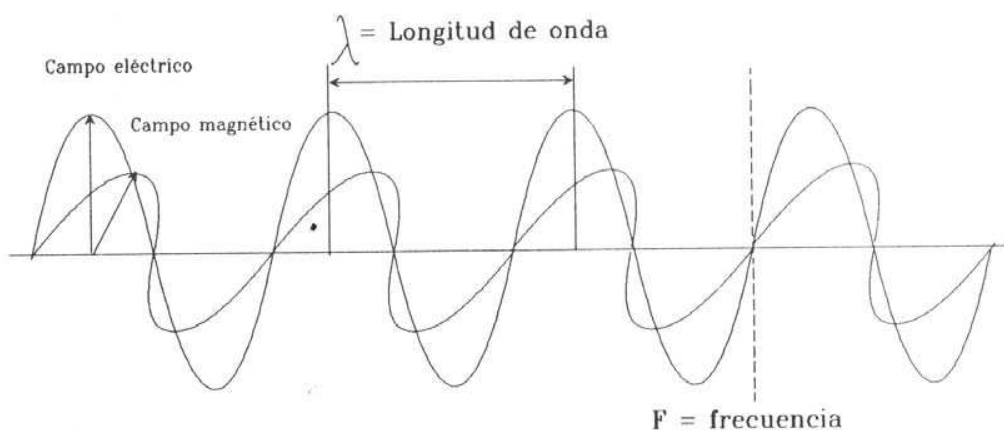


Figura 6.9. Esquema de la onda electromagnética.

Durante la interacción de la radiación electromagnética y la materia, la radiación puede ser:

- Transmitida, cuando se refracta pasando de un medio (sustancia) a otro de distinto índice de refracción. Es decir que la velocidad de propagación cambia cuando la onda electromagnética pasa de un medio a otro.
- Absorbida por la sustancia.
- Emitida por la sustancia. Toda materia a temperatura por encima del "cero absoluto" (0° K) emite energía.
- Reflejada cuando la radiación electromagnética puede ser reflejada con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia.

Estas formas de interacción de la energía con la materia proveen las bases de la percepción remota. La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa. Esta proporción varía en distintas bandas del espectro. Conociéndose el comportamiento de dicha cubierta en diferentes longitudes de onda, permitirá discriminarla correctamente.

En la Figura 6.10 se representa el espectro electromagnético y la discriminación según la longitud de onda.

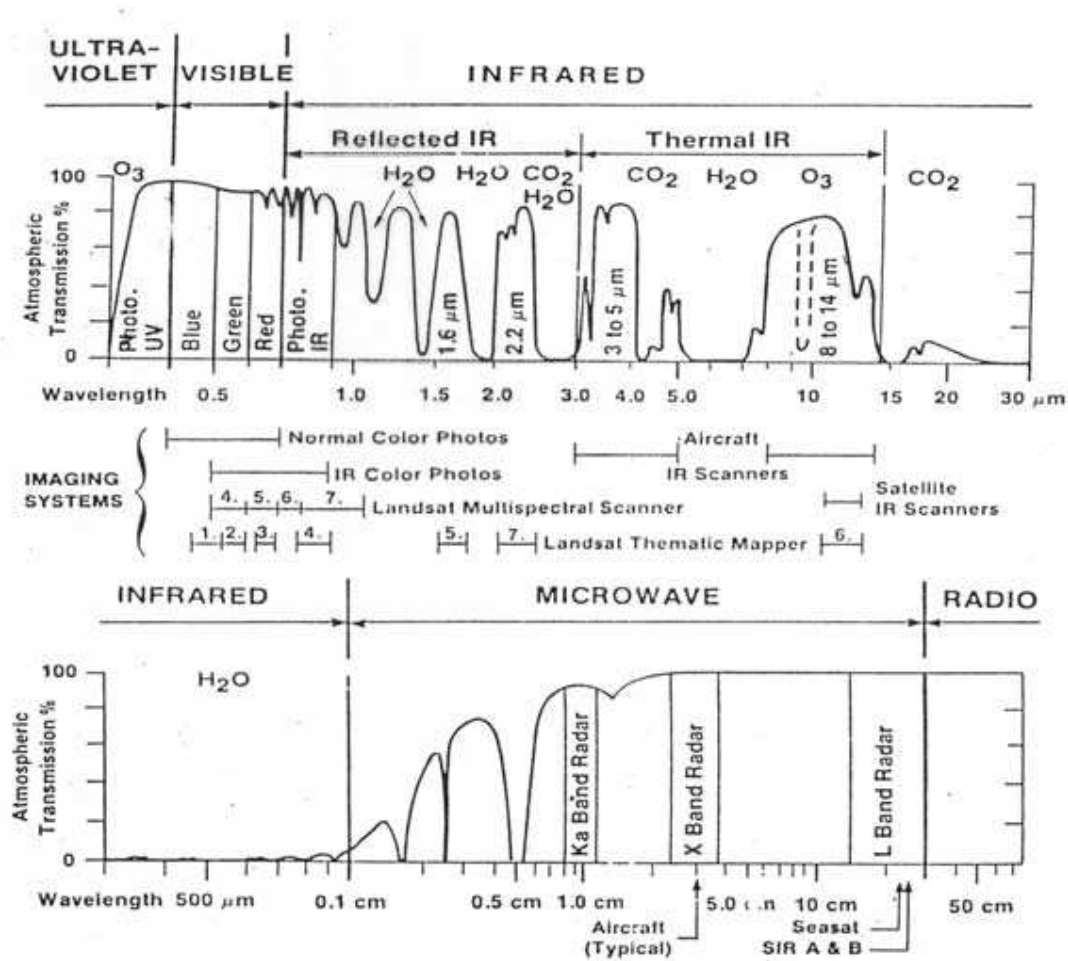


Figura 6.11. Esquema representativo del espectro electromagnético.

IMÁGENES SATELITALES

El término imagen hace referencia a cualquier forma de representación pictórica de los datos no obtenida por medios fotográficos (Chuvieco, 2000).

COLOR

El color es un elemento fundamental en la interpretación visual de imágenes. Chuvieco sostiene que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad luminosa (2000). El color percibido está en relación con la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda.

El ojo humano capta las longitudes de onda entre 0,4 en la región del violeta y 0,7 micrones en el rojo, separando la energía que se recibe en tres componentes que son los colores primarios: azul, verde y rojo. Con la combinación de éstos pueden lograrse los restantes colores del arco iris. Este es el criterio que se utiliza en las composiciones coloreadas, cuando se combinan tres bandas a las que se le asignan los colores primarios.

Además de la luz que puede ser vista por el ojo humano, existe también radiación electromagnética invisible. La radiación invisible se manifiesta a ambos extremos del espectro visible. Más allá del violeta está la radiación ultravioleta de ondas relativamente cortas (0,32 –

0,30 micrones.) La radiación ultravioleta es invisible pero tiene acción fuerte sobre los materiales fotográficos, lo cual facilita su detección por este medio.

Al otro lado del espectro visible, a longitudes de onda mayores que el rojo, aparece el infrarrojo, que puede ser dividido en tres regiones: cercano (0,7 – 1,3 micrones), intermedio (1,3 – 3,0), éstos dos son reflejados y se encuentran dentro de la región fotográfica. La tercer región pertenece al infrarrojo emitido ó termal (3,0 – 14 micrones).

En la Figura 6.12, se representa el espectro de longitudes de onda, indicando la frecuencia mínima que capta el ojo humano en relación a toda la distribución de longitud de onda conocida.

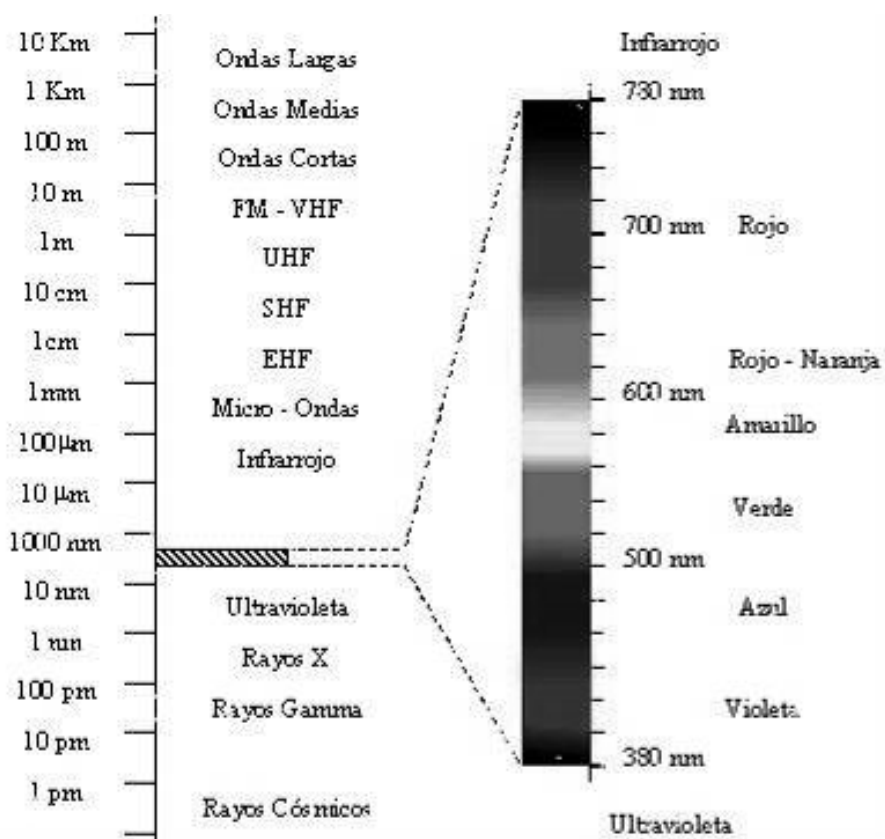


Figura 6.12. Espectro de longitudes de onda.

RESOLUCIÓN

La resolución es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen (Chuvieco, 2000). Existen cuatro tipos de resolución:

- **Resolución espacial**

Puede ser considerada en términos de distancia mínima distinguible en una imagen.

- **Resolución espectral**

Indica el número y ancho de la banda que puede discriminar el sensor. Un sensor será más completo cuanto mayor sea el número de bandas que ofrezca, ya que facilitará la caracterización espectral de diferentes cubiertas.

- **Resolución temporal**

Se refiere a la periodicidad con que el sensor puede adquirir imágenes del mismo lugar de la superficie terrestre.

- **Resolución radiométrica**

Hace mención a la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe.

DISTORSIÓN Y CORRECCIÓN DE LAS IMÁGENES

Todas las imágenes obtenidas por un sensor remoto aéreo o espacial presentan distorsiones geométricas y radiométricas.

Los errores sistemáticos, como los debidos a la curvatura terrestre, distorsión panorámica y rotación terrestre, son corregidos en el preprocesamiento por parte de la agencia responsable de la toma de las imágenes. Existen varias fuentes de error:

- Generados por la plataforma: por pequeños cambios en altitud u orientación de la órbita.
- Propios del sensor: ángulo de barrido, distorsión panorámica, calibración de los detectores, rotación terrestre.
- Errores geométricos inherentes al traslado de una superficie a un plano.
- Distorsiones generadas por la atmósfera.

La corrección de la imagen se refiere a aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, en relación con su localización ó en los píxeles que la integran. Las correcciones de estas anomalías resultan clave para realizar estudios cuantitativos a partir de la imagen, así como para integrar la información resultante con otros datos auxiliares (en el contexto de un S.I.G.), y para realizar estudios multitemporales (comparación entre imágenes correspondientes a diferentes épocas). Los tipos de correcciones se clasifican en:

- Corrección geométrica: incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que forman la imagen.
- Corrección atmosférica: la corrección atmosférica se hace imprescindible al realizar estudios multitemporales. El método más simple consiste en desplazar hacia el cero el histograma de cada banda. Se deduce que las diferencias entre el cero y los valores mínimos de los histogramas de las distintas bandas afectadas, se deben al incremento de la radiancia absorbida por el sensor como consecuencia de la radiación difusa de la atmósfera.

CONTRASTE

El contraste hace referencia a las diferencias entre las partes claras y oscuras. La idea de contraste digital puede ilustrarse con un símil fotográfico. Una fotografía aparece poco contrastada, desvaída, cuando no existe una gran diferencia entre sus tonos más claros y

oscuros. Indica la amplitud del intervalo de los Números digitales (ND). Éstos son los valores que toman los píxeles en la imagen que puede proporcionar un sensor determinado.

Cada píxel se define por un byte y éstos pueden estar descriptos con arreglos de 8 bits con 256 niveles digitales posibles (2^8 , de 0 a 256 niveles); de 16 bits no signado con 65536 niveles digitales posibles (de 0 a 2^{16}); de 16 bits signado (desde $-2^{16}/2$ a $2^{16}/2$). La imagen que más discriminación expresa es de niveles de grises configurada en 32 bits real. (<http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/tratamiento.htm>).

Se denomina ajuste del contraste a cualquier procedimiento encaminado a adecuar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad de exhibición del sistema, representada por el margen dinámico del monitor ó del número de niveles de gris que pueda proporcionar otro periférico de salida, por ejemplo, una impresora.

En aquellos casos en que la resolución radiométrica del sensor supere la capacidad de representación de valores de la tarjeta gráfica que se utilice, será necesario comprimir el rango de visualización hasta adecuarlo al equipo disponible. La mayoría de los equipos de tratamiento de imágenes permiten la representación de 256 niveles de gris (2^8) o bien 2.563 colores diferentes. Sin embargo las tarjetas VGA y SVGA solamente disponen de 16 y 256 niveles diferentes por píxel, respectivamente, lo que impide la visualización de todo el margen dinámico original de la imagen. Por otro lado algunos sensores como el AVHRR del satélite NOAA codifican la señal en 10 bits, dando como resultado 1.024 niveles de gris por banda. Este margen escapa a la mayoría de los equipos, que codifican en 8 bits.

La mayoría de las imágenes presentan un rango de ND inferior a las posibilidades de visualización del equipo de procesamiento, aún habiendo sido adquiridas por sensores de igual resolución radiométrica que el rango soportado por la tarjeta gráfica. Ello se debe a que la resolución radiométrica del sensor está diseñada para abarcar toda la gama de reflectancias posibles para una cubierta desde la baja reflectancia de las aguas profundas y limpias hasta la muy alta de las zonas nevadas.

TÉCNICA DE FILTRADO

Se trata de métodos para resaltar o suprimir, de forma selectiva, información contenida en una imagen a diferentes escalas espaciales, para destacar algunos elementos de la imagen, o también para ocultar valores anómalos. Otra técnica para aislar información correspondiente a diferentes escalas espaciales es la transformación a través del método de Fourier.

El proceso de filtrado consiste en la aplicación a cada uno de los píxeles de la imagen de una matriz de filtrado de tamaño NxN (generalmente de 3 x 3, aunque puede ser mayor) compuesta por números enteros y que genera un nuevo valor mediante una función del valor original y los de los píxeles circundantes. El resultado final se divide entre un escalar, generalmente la suma de los coeficientes de ponderación. Mediante diferentes combinaciones de parámetros asignados a los diferentes píxeles circundantes se pueden conseguir diferentes efectos. En general los efectos deseados se relacionan con el aspecto borroso que tienen las imágenes de satélite, y también la fotografía aérea, debido a la dispersión atmosférica y la reflectividad lambertiana.

Una diferencia importante entre las técnicas de filtrado y las de visualización, es que el filtrado modifica necesariamente la imagen ya que pretende extraer información cuantitativa que debe almacenarse como una nueva capa en lugar de como una paleta de colores.

Su objetivo es suavizar la imagen, son útiles cuando se supone que la imagen tiene gran cantidad de ruido y se quiere eliminar. También pueden utilizarse para resaltar la información correspondiente a una determinada escala (tamaño de la matriz de filtrado); por ejemplo en el

caso de que se quiera eliminar la variabilidad asociada a los tipos de cubierta presentes en la imagen uniformizando de esta manera su respuesta.

Según Chuvieco (2000) el proceso abordado en un filtraje puede ilustrarse con un sencillo ejemplo. Se pretende aplicar un filtro de paso bajo a una pequeña imagen de 5 x 6 píxeles, sobre una matriz de coeficiente de filtraje de 3 x 3. La observación del resultado permite algunas consideraciones de interés. En primer lugar, se constata que el área filtrada se limita a los píxeles centrales. Los píxeles de borde no se afectan por el proceso, puesto que no tienen los 8 vecinos necesarios para realizar el cálculo. Esta característica es común a cualquier filtraje, ya sea de paso alto o bajo. Obviamente en el caso de una imagen de mayor tamaño (512 x 512 píxeles, por ejemplo) las pérdidas de esos píxeles de borde no supone un grave inconveniente. Otros autores prefieren aplicar algún promedio especial a estos píxeles, en lugar de igualarlos a cero (Figura 6.13).

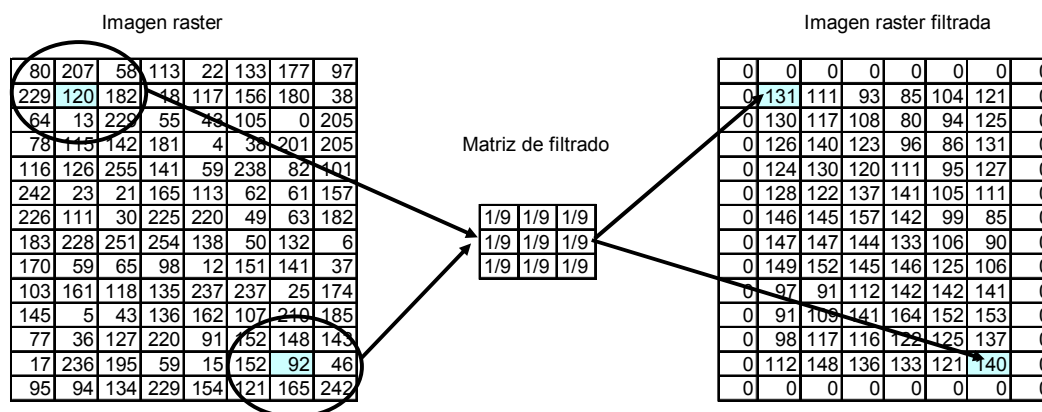


Figura 6.13. Ejemplo Filtrado de imagen raster

INTERPRETACIÓN VISUAL - TRATAMIENTO DIGITAL

La elaboración de cartografía temática es uno de los productos más importantes que pueden obtenerse a partir del tratamiento de imágenes de satélite; la información exhaustiva y periódica que éstas proporcionan, así como la posibilidad de analizar las cubiertas del suelo mediante bandas del espectro no accesibles por el ojo humano, las convierte en un medio idóneo para estudios medioambientales de todo tipo.

El análisis de una imagen de satélite se puede llevar a cabo mediante dos técnicas:

- **Interpretación visual:** semejante a la foteointerpretación tradicional. Las imágenes de satélite se presentan en formato analógico, mediante una conversión de la información digital captada por el sensor en tonos de gris o color.
- **Tratamiento digital:** aborda el procesamiento directo de la información digital captada por el sensor mediante equipos informáticos adecuados.

A la hora de decidir cuál se usará, conviene considerar aspectos de índole económica, recursos humanos disponibles, rapidez y precisión exigida, tipo y continuidad de las tareas, homogeneidad de la superficie analizada, entre otros.

El tratamiento digital permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles al análisis visual. Garantiza una clasificación más rápida de la zona de estudio, manteniendo una coherencia en la asignación de aéreas vecinas a dos categorías. Resulta mucho más ventajoso cuando se pretende establecer modelos cuantitativos de interpretación (por ejemplo, generación de mapas de temperaturas del suelo), para la detección de cambios entre

imágenes y para realizar medidas morfométricas en las mismas (por ejemplo, en ecología del paisaje). Por su parte, el análisis virtual es una buena alternativa para actualizar cartografía existente o realizar inventarios a escalas medias. Auxilia a la clasificación digital para evitar confusiones entre coberturas heterogéneas, o entre aquellas que son similares espectralmente pero de distinto significado temático. El tratamiento digital supone una fuerte inversión de entrada, pero los costos del análisis visual son lineales, suponiendo una débil inversión de partida. Por último, el tratamiento digital facilita la introducción de los resultados en un Sistema de Información Geográfica.

INTRODUCCIÓN A LOS SATÉLITES Y SENSORES DE USO MÁS FRECUENTE EN EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

LANDSAT

El Programa Landsat se constituye de una serie de misiones satélites de observación de la Tierra, manejadas en conjunto por la NASA y el U.S. Geological Survey. Comenzó su funcionamiento en 1972. Por lo que constituyen un archivo sistemático que refleja los cambios del planeta a escala regional. En la actualidad se encuentran en funcionamiento el Satélite Landsat 5 y Landsat 7. Cuenta con una resolución temporal de 16 días. Posee una órbita polar, no sincrónica. Y su horario de cruce por el Ecuador es a las 10 am. Se describen a continuación los sensores instalados sobre el Satélite Landsat:

Sensor TM (Thematic Mapper)

- A partir del lanzamiento del Landsat 4 (1982), un nuevo sensor fue puesto en órbita, el Mapeador Temático (TM). La incorporación de este sensor en la serie Landsat permitió un notable adelanto en la adquisición de imágenes multiespectrales respecto de las obtenidas mediante el sensor MSS (MultiSpectral Scanner).
- Las imágenes en la banda 6 sólo pueden ser obtenidas de noche.

La resolución espectral alcanzó a 8 bandas (una pancromática), aumentando la resolución espacial a un píxel de 30 metros para 6 de las bandas y de 120 metros para la banda térmica (banda 6).

- La resolución radiométrica es de 8 bits (256 colores).

El sensor TM, cuyo mecanismo de espejos y sensores es similar al MSS, consta de 16 detectores por cada barrido en las bandas del espectro visible e infrarrojo medio, a diferencia de las 6 líneas del sensor anterior (el MSS), además de 4 detectores para el infrarrojo termal. La dimensión de la imagen es de 185 x 157 kilómetros, la primera en sentido transversal a la trayectoria orbital.

Sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper Plus)

- El sensor ETM+ incorporado en la plataforma Landsat 7 (1999), es básicamente similar al TM, aunque con notables mejoras.
- Los sensores se agrupan en 3 rangos espectrales específicos:
 - espectro visible y banda en el infrarrojo cercano: bandas 1, 2, 3, 4 y 8 (pancromática) entre los rangos 0,4 y 1,0 μm .
 - infrarrojo medio: bandas 5 y 7 con un rango espectral comprendido entre 1,0 y 3,0 μm .
 - infrarrojo termal: banda 6, con un rango espectral entre 10,4 y 12,0 μm .

- La dimensión de la imagen obtenida es de 183 x 170 kilómetros, la primera en sentido transversal a la trayectoria orbital. Esto determina que, entre los paralelos 81°N y 81°S (rango en el cuál barre la superficie terrestre), Landsat 7 mapea completamente el planeta en 57.784 escenas.

Las bandas, su rango espectral y comportamiento frente a diferentes objetos en el Landsat 7, son:

***Banda 1: 0,45 – 0,52 μm (azul).** Presenta una gran penetración en cuerpos de agua, con elevada transparencia, permitiendo estudios batimétricos. Sufre absorción significativa por la clorofila y otros pigmentos fotosintéticos auxiliares (como los carotenoides). Presenta sensibilidad a las nubes de humo provenientes de incendios o actividad industrial. Puede presentar atenuación por influencia de la atmósfera.

***Banda 2: 0,52 – 0,60 μm (verde).** Presenta una gran sensibilidad a la presencia de sedimentos en suspensión, posibilitando su análisis en términos de cantidad y calidad de éstos en cuerpos de agua.

***Banda 3: 0,63 – 0,69 μm (rojo).** La vegetación verde, densa y uniforme, presenta una gran absorción, apareciendo como intensamente oscura en la imagen. Permite obtener un buen contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (estepa, cultivos, bosque, otros). Se logra el análisis litológico en regiones con poca cobertura vegetal. Permite el mapeamiento del drenaje a través de la visualización de vegetación continua sobre las márgenes de los cursos de agua y entornos con escasa vegetación. Es la banda más utilizada para delimitar contornos y loteos urbanos, así como de áreas agrícolas.

***Banda 4: 0,76 – 0,90 μm (infrarrojo cercano).** Los cuerpos de agua absorben mucha energía en esta banda y por ello aparecen oscuros, permitiendo el mapeamiento de las redes de drenaje y el delineamiento de los cuerpos de agua. La vegetación verde, densa y uniforme, refleja mucha energía, apareciendo como zonas claras en la imagen. Esta banda presenta sensibilidad a la morfología del terreno permitiendo la obtención de información sobre geomorfología, edafología y geología.

***Banda 5: 1,55 – 1,75 μm (infrarrojo mediano).** Presenta sensibilidad al tenor de humedad de las plantas, sirviendo para observar el estrés en la vegetación, cuando éste es causado por el desequilibrio hídrico. Esta banda sufre perturbaciones en el caso en que ocurran excesos de lluvia inmediatamente antes de la obtención de la escena por el satélite.

***Banda 6: 10,4 – 12,5 μm (infrarrojo térmico).** Alta sensibilidad a los fenómenos relacionados con contrastes de temperatura, sirviendo para detectar propiedades o estados térmicos de rocas, suelos, vegetación y aguas.

***Banda 7: 2,08 – 2,35 μm (infrarrojo mediano).** Presenta sensibilidad a la morfología del terreno, permitiendo obtener información sobre geomorfología, suelos y geología. Es potencialmente favorable para la discriminación de productos de la alteración hidrotermal al permitir la identificación de minerales.

ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

La tecnología fue desarrollada por Japón con el fin de obtener datos geológicos detallados y estudiar fenómenos que pudieran producir un impacto ambiental a nivel global, como por ejemplo la actividad volcánica.

El sensor satelital Aster es un sensor óptico montado en el satélite Terra, lanzado el 18 de diciembre de 1999. Genera 14 bandas espectrales desde la región visible del espectro electromagnético al infrarrojo termal. Este sensor tiene 3 subsistemas que registran datos simultáneamente de las regiones del espectro correspondiente al visible e infrarrojo cercano (VNIR), infrarrojo medio o de onda corta (SWIR) y del infrarrojo termal (TIR). Es posible obtener pares estereoscópicos a lo largo del camino orbital. Además posee alta precisión geométrica y radiométrica.

El ancho de barrido es de 60 km, orbitando a una altura de 705 Km de polo a polo cada 100 min. Puede brindar mas o menos 60 imágenes de alta resolución por día, cada una cubriendo un área de 60 x 60 Km. Con un tamaño del pixel de 15 metros en las bandas 1, 2 y 3.

En cuanto a su resolución espacial:

- VNIR (visible e infrarrojo cercano) de 0,5 a 0,9 μm = 15 m
- SWIR (infrarrojo medio o de onda corta) de 1,6 a 2,5 μm = 30 m
- TIR (infrarrojo termal) de 8 a 12 μm = 90 m

Mientras que su resolución espectral es la siguiente:

- VNIR = 3 bandas
- SWIR = 6 bandas
- TIR = 5 bandas

En cuanto a su resolución temporal: la misma es de 16 días, sin embargo, en caso de emergencias tales como vulcanismo, incendios o inundaciones, se pueden obtener datos cada 2 días en virtud de la posibilidad de reorientar el sensor hasta -24° y $+24^\circ$ (UNIR) para registrar imágenes en las órbitas adyacentes. Su resolución radiométrica: es de 8 bits para VNIR y SWIR, mientras que para TIR es de 12 bits.

IKONOS

El término proviene del griego y significa “imagen”. El satélite Ikonos es el primer satélite de tipo comercial que posibilita la captación de imágenes con un metro de resolución espacial. Colecta información de cualquier área en promedio dos veces al día, cubriendo superficies de 20.000 km² en una misma pasada y produciendo como resultado imágenes de 1 metro de resolución cada tres días y de 2 m de resolución todos los días. Estas imágenes son consecuencia directa de la liberación tecnológica promovida en 1994 por el gobierno de los Estados Unidos de América. Anteriormente, esta tecnología estaba sólo disponible para satélites con fines militares.

QUICKBIRD

QuickBird es un satélite de alta resolución de propiedad y operado por DigitalGlobe. QuickBird utiliza un sensor remoto con un grado de detalle de píxeles de 0,61m de resolución. Este satélite es una excelente fuente de información ambiental para el análisis de los cambios en la utilización terrestre, en la agricultura y climatización forestal. La capacidad de imagen de QuickBird puede aplicarse a una variedad de industrias, incluyendo la, ingeniería y construcción y estudios ambientales. Su resolución espacial es de 61 x 61 cm. en la pancromática, y de 2,44 x 2,44 m. en la multiespectral. La fusión de imágenes de ambos sensores permite obtener data multiespectral a 70 cm de resolución. En cuanto a la resolución espectral, es la siguiente: Pancromática (0,45-0,9 μm), Azul (0,45-0,52 μm), Verde (0,52-0,6 μm), Rojo (0,62- 0,69 μm) e Infrarrojo cercano (0,76-0,9 μm). Mientras que la resolución radiométrica es de 11 bits (2048 tonos de gris), y la Resolución temporal es de 1 a 3,5 días dependiendo de la Latitud. Su área de cobertura es de 16,5 x 16,5 km.

SAC-C

Es el primer satélite de observación construido y diseñado en Argentina, al igual que las 3 cámaras que porta, y lanzado al espacio por la NASA en Octubre del año 2000. El mismo fue diseñado para el estudio de ecosistemas terrestres y marinos, monitoreo de la temperatura y contenido del vapor de agua de la atmósfera, medición del campo magnético de la Tierra, estudios de la estructura y dinámica de la atmósfera y la ionósfera, y la determinación de

componentes de onda larga del campo gravitatorio terrestre. El SAC-C es el resultado del proyecto de cooperación entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de Estados Unidos, y otros países como Italia, Brasil y Francia.

Sus características principales son:

- Tipo de órbita: Cuasipolar, heliosincrónica
- Altura de la órbita: 707 km
- Inclinação de la órbita: 98,2°
- Hora local: 10: 21 hs. am \pm 6 min.
- Período orbital: 99 minutos
- Frecuencia de revisita: 9 días (posibles cambios a 7 y 2 días)

Desde el año 2001, la Argentina participa de la Constelación matutina, un complejo de cuatro satélites (Landsat 7, EO-1, Terra y SAC-C) que trabajan en equipo y se ocupan del monitoreo ambiental.

La CONAE integra la carta internacional “El espacio y las catástrofes”. Iniciativa de cooperación entre diferentes agencias espaciales. Esos datos hacen referencia a situaciones de emergencia, causadas por desastres de origen natural o antrópico. La misma está integrada por SAC-C (Argentina), ERS y Envisat (Europa), RADARSAT (Canada), NOAA (USA) e IRS (India).

SPOT

El Sistema SPOT (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre), se encuentra en operación desde 1986. Spot 2 se le unió en órbita en enero de 1990, seguido por Spot 3 en septiembre de 1993, Spot 4 en marzo de 1998 y Spot 5 en mayo de 2002. La continuidad del sistema estará asegurada por una nueva generación de minisatélites, llamada Pléiades. La gama de imágenes Spot incluye distintos productos definidos por las características de los instrumentos de toma de imágenes, los preprocesamientos aplicados y su formato. La constelación de 3 satélites Spot ofrece una capacidad de adquisición y de revisita inigualada que permite adquirir diariamente una imagen de cualquier punto del globo. El instrumento HRS de Spot 5 permite asimismo la adquisición simultánea de pares estereoscópicos. La carga útil de cada satélite Spot está constituida por instrumentos ópticos, registradores de datos y un sistema de transmisión de imágenes hacia las estaciones de recepción terrenas.

Cada satélite Spot se coloca sobre una órbita polar, circular, heliosincrónica y en fases con relación a la Tierra. La capacidad de visión oblicua de los instrumentos asegura una gran repetitividad de las observaciones y permite obtener una visión estereoscópica. La transmisión de datos a la tierra puede ser inmediata si el satélite es visible desde una estación de recepción o diferida luego del almacenamiento a bordo. Gracias a la combinación de los datos emitidos por los satélites Spot 1 a 5, resulta posible generar datos a 4 niveles de resolución (20 m, 10 m, 5 m y 2,5 m), en modo blanco y negro y color, y para un campo de observación de 60 km en el suelo. Para mayor información visitar el sitio <http://www.spotimage.fr/web/es/320-resoluciones-y-modos-espectrales.php>.

Spot 3D: el instrumento HRS de Spot 5 realiza la adquisición simultánea de pares estereoscópicos, 2 telescopios, uno apuntado hacia adelante y uno hacia atrás de la vertical del satélite, con ángulos de visión de 20°; un intervalo de toma de imágenes de 90 segundos a lo largo de la traza, y un campo de visión de 600 km x 120 km (72.000 km²).

RADAR

El radar es un sensor activo que emite una señal dentro del campo de hiperfrecuencias, y registra la respuesta reenviada por las superficies y los objetos observados. Este sensor permite emitir y recibir una señal cualesquiera sean las condiciones atmosféricas y las condiciones de iluminación. Permite adquirir imágenes a través de las nubes, la bruma, la niebla o el humo; tanto de día como de noche. Permite además la medición de características físicas y geométricas de los objetos observados. Los productos radar son adquiridos por los satélites: Envisat, ERS y Radarsat.

El satélite Radarsat-1 recoge imágenes radar desde 1995 (adquisiciones en banda C). Posee un instrumento de toma de imágenes orientable que permite una cobertura diaria de los polos y de cada 2 a 5 días del ecuador.

- Resolución fina (modo Fine): Productos de 8 m (50 km x 50 km).
- Alta resolución (modos Standard y Extended High, modos Wide y Extended Low): Productos de 25 m (100 km x 100 km; 75 km x 75 km) y 30 m (150 km x 150 km; 170 km x 170 km).
- Mediana resolución con gran cobertura (modos ScanSAR Narrow y ScanSAR Wide): Productos de 50 m (300 km x 300 km) y 100 m (500 km x 500 km).

Utiliza únicamente la banda C de una sola frecuencia correspondiente a 5.3 GHz. Por ser imágenes monobanda se visualizan en blanco y negro. El agua es oscura ya que su reflejo especular retorna una señal débil al satélite. Las zonas urbanas son muy brillantes gracias a los reflejos sobre extensas superficies verticales.

Los datos Radarsat se utilizan en geología (exploración minera y petrolera), en cartografía (en particular producción de MDE para radargrametría), en defensa (cartografía y observación), en gestión de riesgos (control de inundaciones), en agricultura y forestación, como así también en vigilancia marítima (detección de derrames de hidrocarburos, vigilancia de los hielos para la navegación y detección de buques).

Los satélites ERS adquieren imágenes radar con un ángulo fijo (23°), mientras que el satélite Envisat posee un instrumento de toma de imágenes orientable que permite una cobertura hebdomadaria del ecuador y diaria de los polos. El satélite Envisat fue lanzado en 2002 como continuación del ERS-1 (1991-2001) y del ERS-2 (lanzado en 1993). El modo Image asegura la continuidad de los productos ERS: productos con resolución de 25 m con una cobertura de 56-100 km x 100 km. El modo Alternating Polarisation ofrece 2 imágenes de polarizaciones diferentes sobre un mismo sitio. El modo Wide Swath provee productos de mediana resolución y de gran cobertura (400 km x 400 km).

IRS (Indian Remote Sensing Satellite)

La serie IRS se inició con el lanzamiento de IRS-1A en 1988, seguido por IRS-1B (1991), ambos equipados con sensores multispectrales. La tercera generación de satélites, IRS-1C lanzado en 1996, tiene sensores multispectrales y pancromáticos, capaces de generar imágenes con alta resolución espacial. La inexistencia de grabadores a bordo y de una antena de recepción puso dificultades en la utilización de los datos desde las plataformas de América del Sur.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

El objetivo específico de este tipo de satélites artificiales es el de mantener bajo control la atmósfera terrestre, con el fin de recoger elementos útiles para el servicio mundial de previsiones meteorológicas. Son satélites meteorológicos de órbita polar o heliosincrónicos. Se alimentan de energía mediante paneles solares. Orbitan a una altura entre 800 y 900 km. Orbitan quietos (sin rotar sobre un eje) y poseen un radiómetro (sensor) llamado AVHRR. Pasan dos

veces al día por el mismo punto. Trabajan en cinco bandas, dos en visible y tres en IR (infrarrojo), y tienen un tiempo de operatividad de aproximadamente dos años.

OPERACIONES CON IMÁGENES

A continuación se brindará una breve explicación sobre operaciones de composición entre bandas, clasificación de imágenes satelitales (supervisada y no supervisada), y de determinación de diferentes índices de vegetación.

COMPOSICIONES EN COLOR

A partir de la información multispectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse diferentes composiciones de color. Basta para ello aplicar cada uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) a una banda distinta de la imagen, seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno. El proceso permite visualizar simultáneamente imágenes de distintas regiones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas (Chuvieco, 2000).

En las Figuras 6.14, 6.15 y 6.16, se presentan tres combinaciones de bandas distintas, efectuadas para la misma imagen satelital de una cuenca hidrográfica, tomada de un recorte de imagen Landsat 5 TM, fecha de toma: 5 de enero de 2007 y un Nivel de procesamiento 4X, manteniendo el orden R-G-B (rojo – verde – azul) y alternando el número de banda para cada combinación de color.

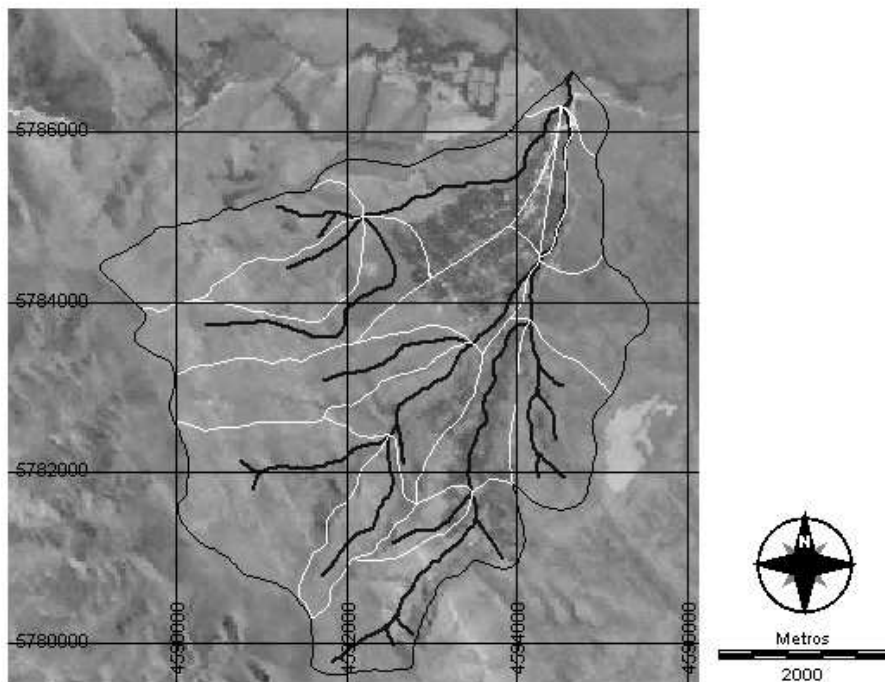


Figura 6.14. Composición de bandas 2-3-4.

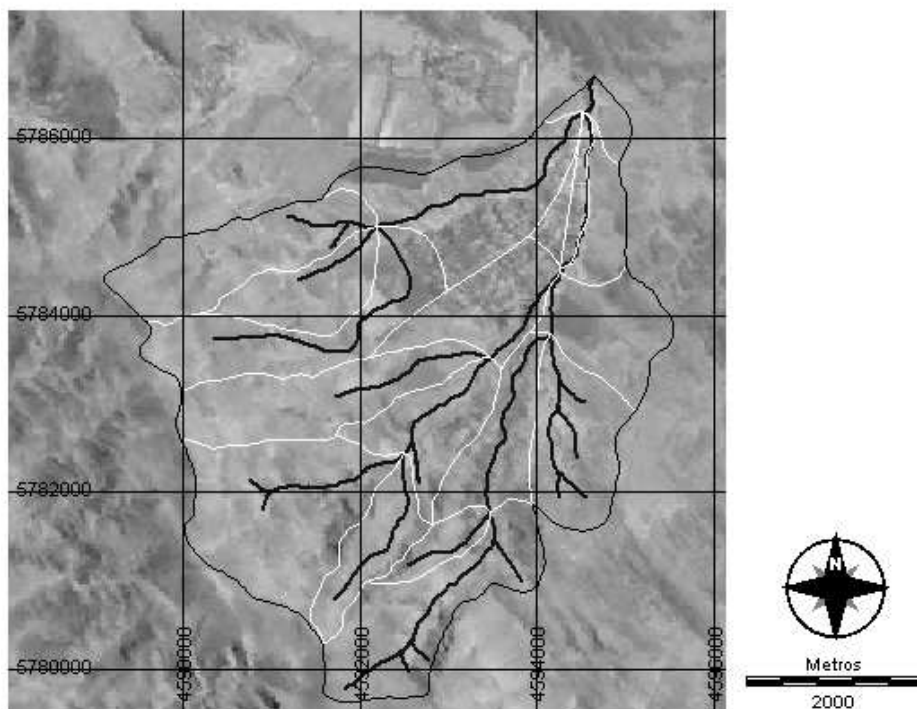


Figura 6.15. Combinación de bandas 3-4-5.

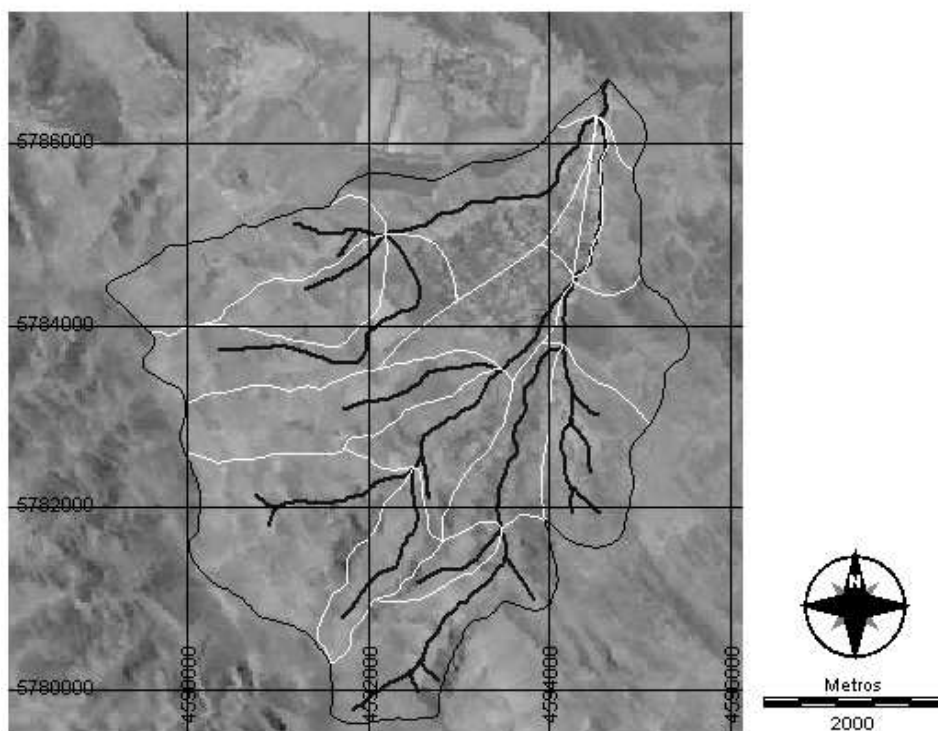


Figura 6.16. Combinación de bandas 3-4-7.

En las Figuras 6.14 6.15 y 6.16 se observa la diferencia visual obtenida según las tres combinaciones R-G-B distintas. Dependiendo del tipo de cobertura a evaluar o identificar, se torna más conveniente una combinación que otra. Estos cambios visuales se deben a las

características particulares de cada objeto en el terreno, ya que cada uno de ellos expone una respuesta espectral diferente.

CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

La clasificación digital consiste, básicamente, en dividir el conjunto de píxeles que componen la imagen, en clases temáticas previamente definidas o por definir, según sea el método clasificatorio que se decida utilizar. Durante la clasificación digital se requiere la adopción de unos métodos que incorporen reglas de decisión, los cuales se pueden agrupar en dos grandes categorías, los supervisados y los no supervisados (Chuvieco, 2000).

La diferencia fundamental entre ambos tipos de métodos es que, en el caso de los primeros, se requiere necesariamente un conocimiento previo y muy preciso de las clases informacionales a clasificar. Mientras que en los no supervisados, la segmentación de las clases espectrales se obtiene en base a un procedimiento estadístico, lo cual genera clases estadísticas, las que posteriormente, deberán ser asignadas a clases o categorías de información de acuerdo con antecedentes de terreno. Las fases de la clasificación son:

1. Definición digital de las categorías (Fase de entrenamiento).
2. Distribución de los píxeles de la imagen en una de esas categorías (Fase de asignación).
3. Comprobación y verificación de los resultados.

Dentro de la fase de asignación se realiza una división entre el Método supervisado (se conoce el terreno previamente), y el Método no supervisado (búsqueda de valores homogéneos).

CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

La clasificación supervisada se utiliza cuando se conoce *a priori*, para un subconjunto muestral de píxeles de la imagen, a qué clase pertenecen, y pueden ser utilizados como áreas de entrenamiento para los algoritmos de clasificación. Es necesario tener áreas de entrenamiento para todas las clases a considerar. A partir de esta información se construye una especie de clave de identificación numérica con la que se compara cada píxel de la imagen y se etiqueta con el nombre de aquella a la que más se asemeje. Este proceso implica la realización de dos etapas fundamentales:

1. -Fase de Entrenamiento: consiste en la caracterización de las clases informacionales de acuerdo con patrones de reconocimiento del terreno. Se trata de delimitar parcelas de muestreo (polígonos), en donde los píxeles que las componen se suponen representativos de cada una de las categorías de información que se desea identificar.
2. -Fase de Asignación: definidas las clases y sus respectivas parcelas de muestreo, se debe encontrar una función matemática dentro de los métodos supervisados, para proceder a la asignación de los píxeles de la imagen a cada una de las categorías.

CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

La clasificación no supervisada se aplica cuando no se tienen áreas de entrenamiento disponibles, y se desarrolla a través del análisis de clusters. Se deben considerar los tres aspectos enunciados a continuación:

1. Selección de las bandas (originales o transformadas) analizadas
2. Selección de un criterio para medir la similitud entre píxeles
3. Selección de un criterio para agrupar los casos similares

ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Una operación con S.I.G. de gran relevancia en el ámbito de las Ciencias Naturales es la determinación de los Índices de Vegetación (IV), de los cuales existe una amplia variedad. Los mismos son indicadores que señalan el estado y abundancia de la cobertura vegetal y biomasa en un sitio por medio del procesamiento con imágenes satelitales.

El IV calcula valores de vegetación verde a través de la combinación de la banda visible roja y la banda infrarroja cercana en imágenes satelitales de observación terrestre, en función de la reflectibilidad de las diferentes coberturas relacionando la radiación (μm) y su reflectividad, como se expresa en la Figura 6.17.

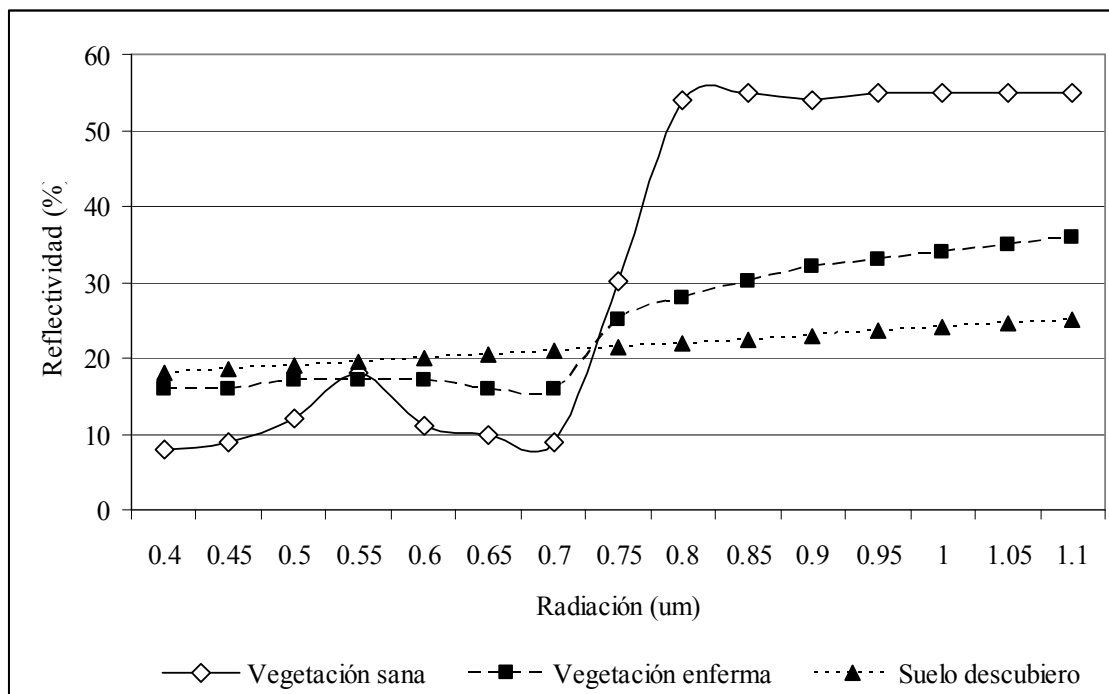


Figura 6.17. Nivel de reflectancia según tipo de cobertura.

Las ventajas de los IV es que estos índices realzan la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de las superficies, atenuando los factores que pueden incidir sobre la cobertura vegetal, como ser el suelo, atmósfera, iluminación y topografía. Además, permite un seguimiento temporal por medio de patrones de precipitación y temperatura, de la productividad de la vegetación, la determinación del área foliar, los efectos del calentamiento global sobre la vegetación, de la determinación y predicción del estado de las cosechas, definición de las condiciones de sequía y riesgo de incendio. También los IV permiten resaltar el contenido de humedad del suelo, identificar cursos de agua y realzar áreas incendiadas, entre otros usos.

A continuación se desarrolla la metodología de aplicación de diferentes índices de vegetación.

- **RATIO**

Este índice de vegetación fue propuesto por Rouse *et al.* (1974), separa la vegetación verde del suelo desnudo. El resultado expresa valores altos en donde la combinación de píxeles es baja en reflectancia en el rojo (por la absorción de la clorofila) y alta en el infrarrojo (por la estructura foliar) (Fórmula 6.2).

$$\text{RATIO} = \frac{\text{Infrarrojo}}{\text{Rojo}}$$

Fórmula 6.2. Índice de Vegetación RATIO.

- **N.D.V.I.: Índice normalizado de vegetación**

El N.D.V.I. (Normalized Difference Vegetation Index) fue introducido por Rouse *et al.* (1974), deriva de la medición de la reflectancia en las porciones del rojo e infrarrojo del espectro electromagnético para describir el peso relativo de la biomasa verde en un área de estudio, según lo expresado en la Fórmula 6.3.

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo})}{(\text{Infrarrojo cercano} + \text{Rojo})}$$

Fórmula 6.3. Índice de Vegetación de Rouse.

El empleo del índice de vegetación N.D.V.I. para la zonificación de la cobertura vegetal se establece a partir del procesamiento de la reflectividad en diferentes bandas en imágenes satelitales, que indican la abundancia y estado de la vegetación, basándose en el comportamiento reflectivo particular de la vegetación para un momento determinado. La signatura o firma espectral característica de la vegetación sana presenta un fuerte contraste entre la baja reflectividad en el rojo (630 – 690 nm) (Red) y la alta reflectividad en el infrarrojo de longitud de onda más corta (760 - 900 nm) (NIR). Esta diferencia es tanto mayor cuanto mayor es la densidad de la vegetación y mejor su estado fitosanitario. En esta idea se basan la mayor

parte de los índices de vegetación. Para las imágenes Landsat utilizadas, la reflectividad del rojo corresponde a la banda 3 y la del infrarrojo a la banda 4.

El N.D.V.I. es derivado de la combinación de bandas captadas en la zona del rojo y del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Se basa en la absorción de la luz roja por parte de la vegetación sana y refleja la luz infrarroja. Cuanto mayor es la diferencia entre la luz roja (Red) e infrarroja (NIR), mejor es el estado de la vegetación, en condiciones normales de humedad. En cambio, cuando la diferencia entre los valores detectados entre estas dos bandas es pequeña, podría significar que las plantas presentan algún tipo de stress, o que no cubren completamente el suelo (cultivo recién implantado) y hasta incluso la falta de vegetación. El N.D.V.I. no responde a ninguna variable concreta, sino a una amalgama de factores (cobertura, estado fenológico, estado fitosanitario), aportando un conocimiento de conjunto acerca de su estado de la cobertura vegetal. Posee la capacidad de minimizar los efectos topográficos.

Por otro lado, permite expresar los resultados en una escala linear de medición, la cual posee la conveniente propiedad de ir desde (-1) a (+1), correspondiendo el valor de cero a la ausencia de cobertura vegetal (Eastman, 2006). Los valores entre 0 y 1 son indicadores de la presencia de vegetación. Cuanto más cercano a 1 es el valor, indica vegetación más saludable; mientras que los valores menores a 0 indican falta de vegetación o suelo desnudo. Se considera como umbral crítico para cubiertas vegetales un valor de 0,1 y para la vegetación densa 0,5. Cualquier valor negativo implica ausencia de vegetación, por lo que debiera reclasificarse a cero. En la Figura 6.18 se expone un ejemplo de aplicación obtenido de <http://earthobservatory.nasa.gov>.

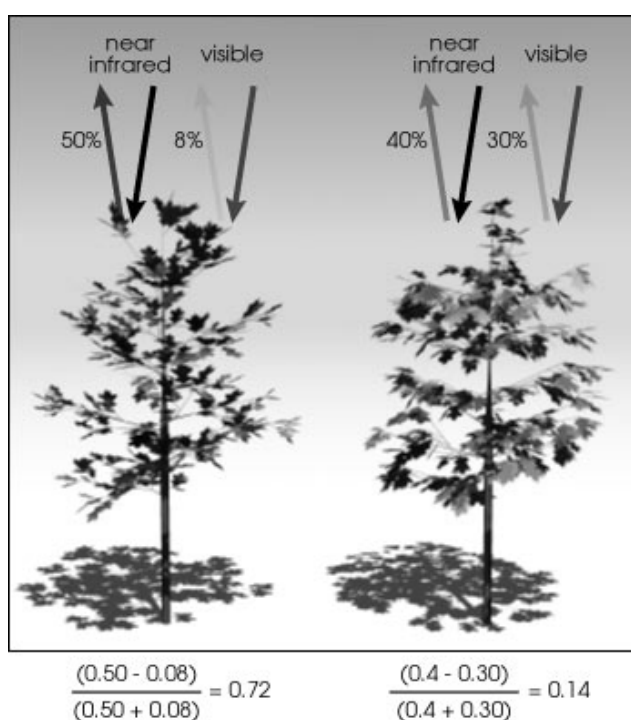


Figura 6.18. N.D.V.I. en primavera (a la izquierda de la figura) y N.D.V.I. en otoño (a la derecha de la figura).

En la Figura 6.19 se presenta la escala de valores utilizada en la leyenda de la cartografía para la representación del NDVI.

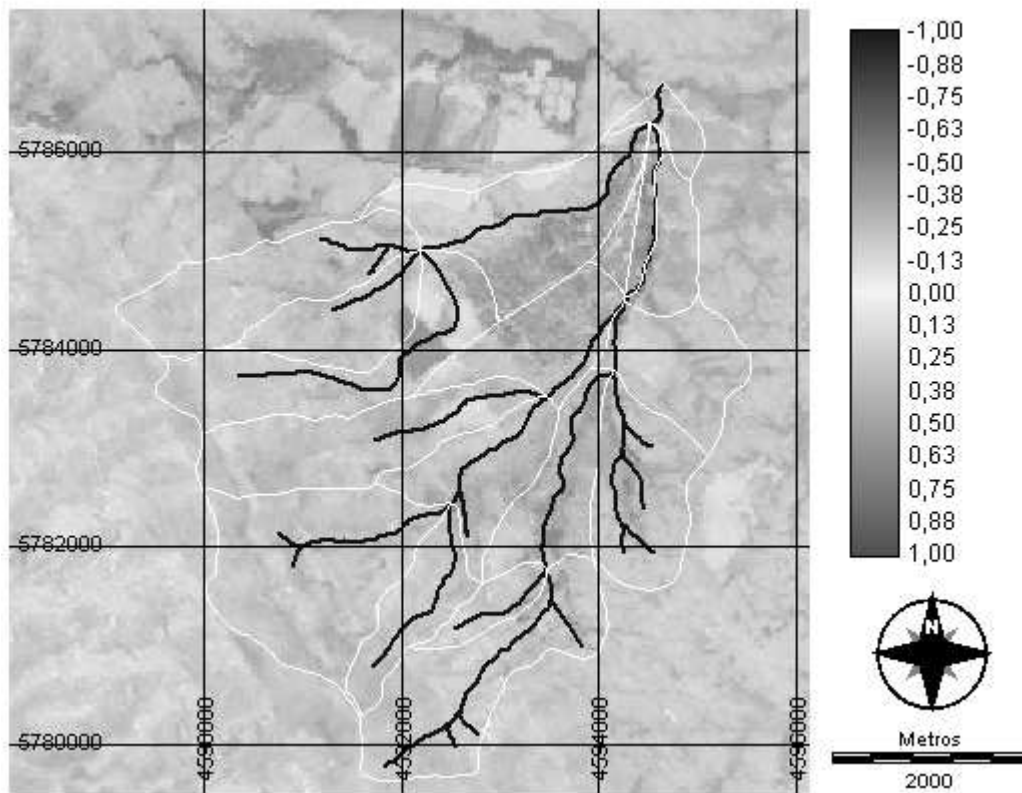


Figura 6.21. Mapa de N.D.V.I. para el mes de enero.

Se aprecia la variación en los valores de N.D.V.I. obtenidos para las dos situaciones, debido principalmente al diferente estado fenológico de la vegetación. A partir de dicho análisis es importante considerar las condiciones climáticas presentes cuando se aplican los IV, ya que la interpretación de la cobertura vegetal (según su estado fenológico) se encuentra netamente influenciada, como así también su valor de reflectancia.

A partir de los dos IV presentados, el RATIO y el N.D.V.I., se presenta en la Figura 6.22, la cartografía generada para cada uno. La misma se clasificó según los valores extremos en una escala de grises que indica el estado de la vegetación en situación primavera - verano y otoño - invierno. Los rangos de cada IV alcanzaron respectivamente en las estaciones del año, un valor de RATIO entre -0,49 hasta 6,88 y para N.D.V.I. un rango entre -0,34 hasta 0,75.

Imagen RATIO en primavera-verano

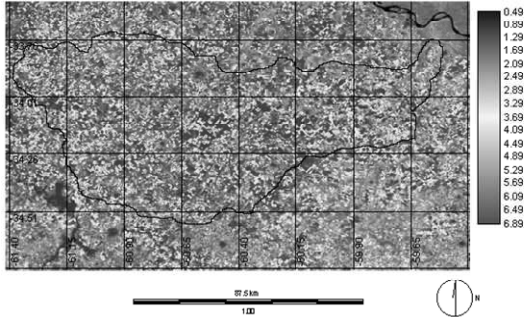


Imagen RATIO en otoño-invierno

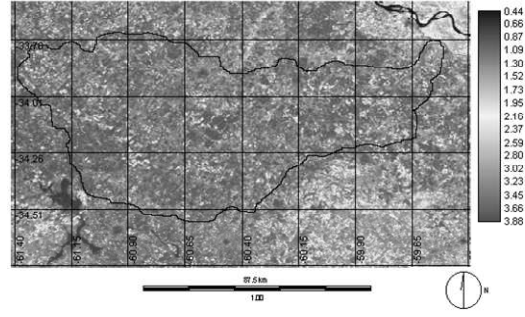


Imagen NDVI en primavera-verano

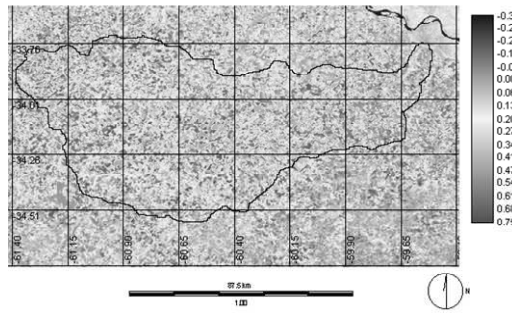


Imagen NDVI en otoño-invierno

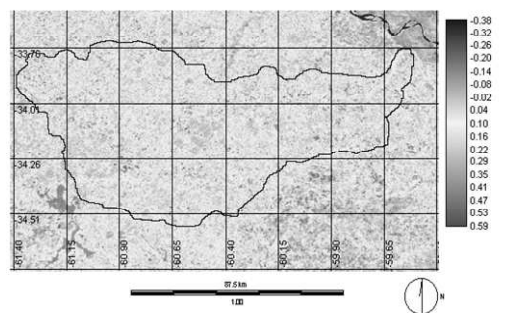


Figura 6.22. Imágenes NDVI para diferentes estaciones

OTROS ÍNDICES DE VEGETACIÓN

En la actualidad los IV son una herramienta útil para generar cartografía del estrés hídrico y determinar áreas quemadas. Debido a la influencia atmosférica que presenta el N.D.V.I., se han generado un grupo de otros IV, algunos de los cuales se presentan en la Fórmula 6.3

Diferencia simple = Infrarrojo - Rojo

$$TVI = \sqrt{\frac{\text{Infrarrojo} - \text{Rojo}}{\text{Infrarrojo} + \text{Rojo}}} + 0,5$$

$$AFRI\ 1.6 = \frac{(TM4 \cdot 0,66 \cdot TM5)}{(TM4 + 0,66 \cdot TM5)}$$

$$AFRI\ 2.1 = \frac{(TM4 - 0,5 \cdot TM7)}{(TM4 + 0,5 \cdot TM7)}$$

Fórmula 6.3. AFRI (Aerosol Free Vegetation Index).

El AFRI depende de las bandas del Landsat TM, y es recomendado para utilizar para vegetación en áreas con contaminación atmosférica, como por ejemplo presencia de humo, polución, polvo volcánico.

$$ARVI = \frac{(TM4 - \rho b)}{(TM4 + \rho b)}$$

Fórmula 6.4. ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index),

Donde $\rho b = TM1 - 1 \cdot (TM1 - TM3)$, y también depende del Landsat.

El ARVI es cuatro veces más sensible que el N.D.V.I. a los efectos atmosféricos y es bueno para reducir el efecto de aerosoles de pequeño tamaño (urbanos, humo).

$$EVI = \frac{\rho \text{Infrarrojo} - \rho \text{Rojo}}{\rho \text{Infrarrojo} + C1 \cdot \rho \text{Rojo} - C2 \cdot \rho \text{Azul} + L}$$

Fórmula 6.5. EVI (Índice de Vegetación Mejorado (Enhanced Vegetation Index)).

El EVI es un NDVI modificado con un factor de corrección del suelo $L (=1)$ y dos coeficientes $C1=6$ y $C2=7,5$ que intentan corregir efectos de dispersión atmosférica. G (gain factor) = 2,5. Siendo P la banda del satélite MODIS.

EVI fue desarrollado para optimizar la señal de la vegetación con sensibilidad mejorada para altas densidades de biomasa, lográndose esto al separar la señal proveniente de la vegetación y la influencia atmosférica (Huete and Justice, 1999).

El NDVI y el EVI, son producidos globalmente sobre la Tierra, con resoluciones espaciales de 1 km, 500 y 250 m; composiciones de períodos de 16 días en donde se compila una imagen que muestra el máximo valor (Composición de Máximo Valor o CMV), cuya principal diferencia es:

- El NDVI representa la cantidad y el vigor de la vegetación (actividad fotosintética). Está estrechamente relacionado con el tipo de vegetación y con las condiciones climáticas, así como con el patrón predominante de uso de las tierras. Este índice es sensible a la clorofila.
- El EVI obtiene respuesta de las variaciones estructurales del dosel vegetal, incluyendo el índice de área foliar LAI (leaf area index), tipo y arquitectura del dosel y fisonomía de la planta.

PROCESAMIENTO DE CAPAS TEMÁTICAS

El S.I.G. es un conjunto de herramientas informáticas que por medio del procesamiento de la información digital georeferenciada y metodologías particulares objeto del procesamiento, actúan lógica, coordinada y sistemáticamente según el requerimiento del operador. Este procesamiento permite almacenar, desplegar, consultar, analizar y modelar datos geoespaciales, de tal manera que sirva como información base para la toma de decisiones forestales, agrícolas, sociales y territoriales.

El tratamiento de información también permite desarrollar metodologías concretas para identificar el valor de un píxel en particular, debido a que cada nivel contiene datos espaciales y atributos, que están conectados por un identificador común, su georreferenciación.

Por ejemplo, se puede realizar un procesamiento sencillo de superposición de capas temáticas vectoriales para identificar un sistema de drenaje (Figura 6.23) o realizar multiprocesamientos de información vectorial con raster. Como por ejemplo, determinar cartografía raster del número de curva (NC) de un punto en una cuenca hidrográfica (de base vectorial) a partir de la multiplicación de los datos de un mapa de grupo hidrológico (GH) con un mapa de cobertura y uso del suelo (VEG), para luego establecer con ayuda de un mapa de pendientes, los sitios con un potencial degradativo cualitativo de pérdida de suelo superficial (PSS) (Figura 6.24).

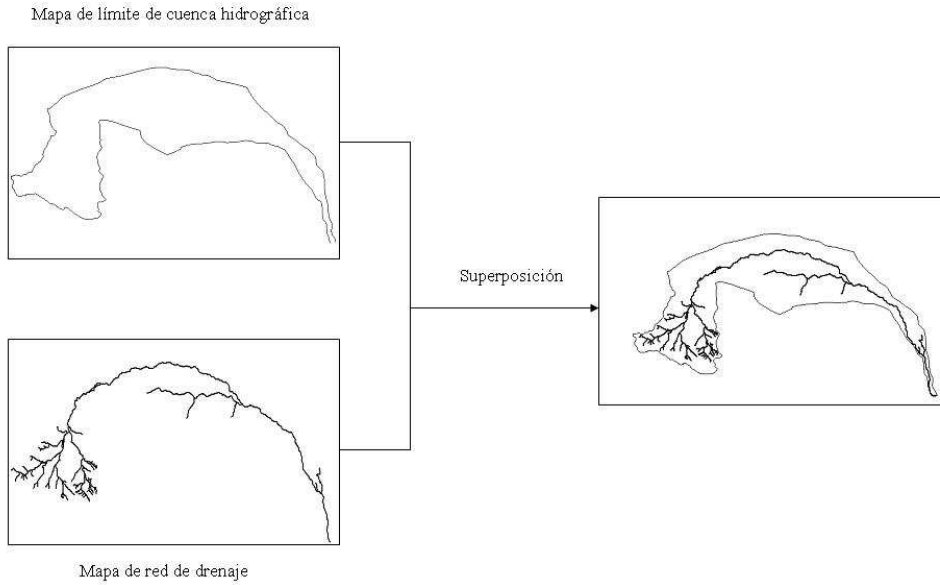


Figura 6.23 Procesamiento vectorial de superposición de límite de una cuenca hidrográfica con su red de drenaje superficial.

En la Figura 6.24, se presenta el modelo cartográfico establecido a partir de la conjunción de los mapas de cobertura y uso del suelo (VEG) con grupo hidrológico (GH); se obtiene el número de curva (NC) y según gradiente de pendiente se genera el mapa de potencial degradativo cualitativo de pérdida de suelo superficial (PSS) en una cuenca hidrográfica.

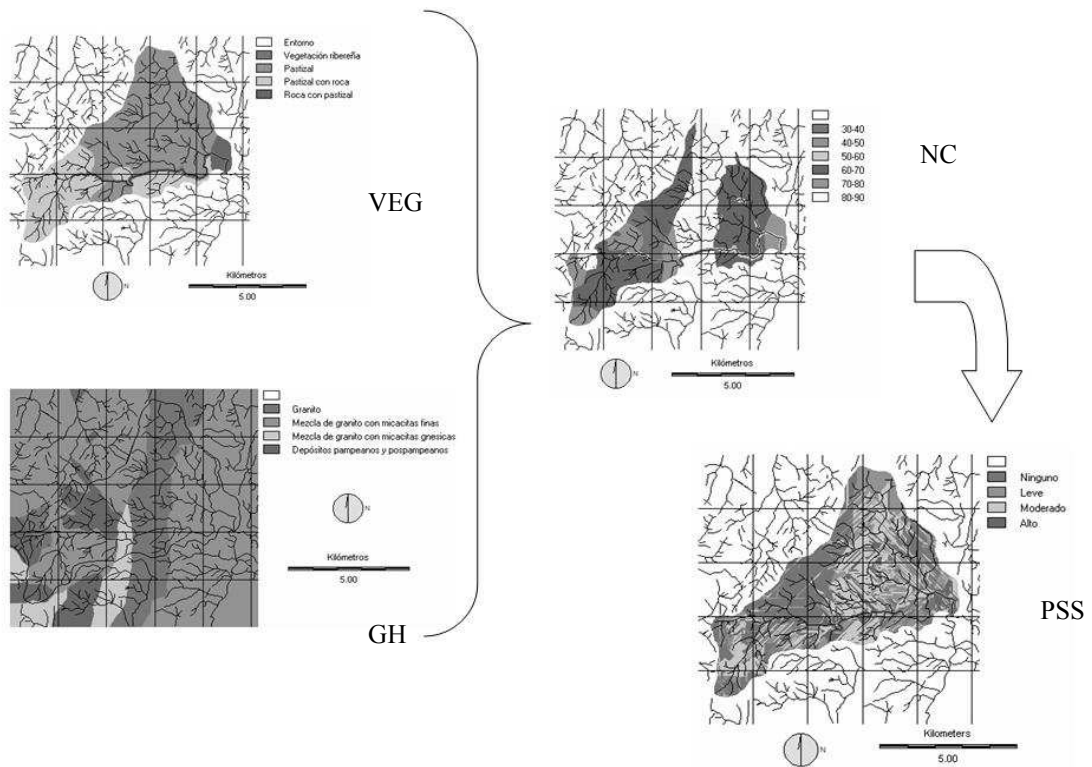


Figura 6.24. Procesamiento cartográfico para determinar el potencial degradativo cualitativo de pérdida de suelo superficial (PSS) en una cuenca hidrográfica.

EL FENÓMENO DEL GEODINAMISMO TORRENCIAL.

CAPÍTULO 7

DINÁMICA DE UN SISTEMA HIDROGRÁFICO

La hidrología aluvional se encarga de caracterizar y modelar el proceso físico denominado aluvión, originado por tormentas de corta duración y gran intensidad sobre cauces torrenciales. Los aluviones son frecuentes en la región pedemontana y se producen por el escurrimiento generado por: lluvias estivales, pendientes pronunciadas, escasa vegetación y condiciones edafológicas determinadas, donde las aguas encauzadas, arrastran material sólido desprendido aumentando su capacidad erosiva.

Cuando los cursos de agua aumentan de caudal, como consecuencia de las lluvias en su cuenca, o el deshielo, el flujo reclama su territorio invadido por el hombre, produciéndose cada vez con mayor frecuencia catástrofes que involucran pérdidas de vidas humanas y económicas cuantiosas. La memoria del agua es tal que por más que durante años no se haya manifestado, al cabo del tiempo hace presencia tratando de recobrar sus territorios (Suárez, 1993).

Esta corriente de agua temporal o permanente en áreas de fuertes pendientes que genera crecidas violentas y repentinas y de caudal líquido y sólido muy variable, se denomina TORRENTE. Según García Nájera (1962) a pesar de ser algo meramente teórico, de esta forma se describe bastante bien lo que ocurre en tiempos de muchas lluvias o deshielos.

La dinámica de vertientes se clasifica en tres procesos principales:

- movimientos de gravedad, que ocurren frecuentemente en pendientes fuertes y rocosas;
- movimientos en masa, que suceden en pendientes no rocosas y de menor grado;
- erosión superficial, que se expresa sobre las laderas de la cuenca.

Particularmente los movimientos en masa son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior de la original sin que medie ostensiblemente medio de transporte alguno, siendo tan sólo necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superadas por las desestabilizadoras.

Por lo general, los movimientos en masa dependen del grado de saturación del terreno, velocidad del desplazamiento, profundidad de la masa desplazada y grado y longitud de la pendiente del terreno.

ESTABILIDAD DE LADERAS

Este tipo de procesos gravitatorios se interrelacionan mutuamente con las precipitaciones altas, de tal forma que frecuentemente las lluvias torrenciales son causantes y/o precursoras de los movimientos en masa, ya que aumentan las fuerzas desestabilizadoras y reducen la resistencia del suelo al deslizamiento.

De esta manera se establece el grado de estabilidad de las laderas por medio del balance que determina su grado de equilibrio. El balance está definido por las fuerzas de resistencia y corte del suelo, siendo la precipitación la fuerza activa y la vegetación y el suelo las fuerzas de resistencia a la erosión, como se expresa en la Figura 7.1, definido por la expresión de la Fórmula 7.1.

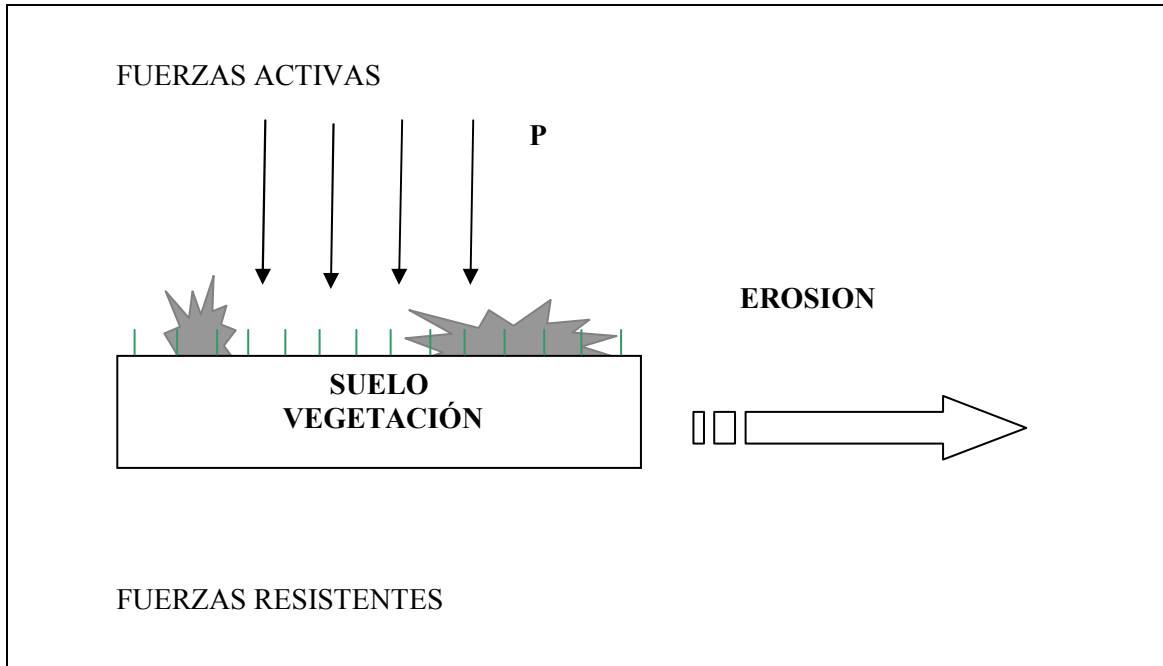


Figura 7.1. Fuerzas intervinientes en la estabilidad de las laderas.

$$R = \frac{\text{Fuerza de corte}}{\text{Resistencia al corte}}$$

Fórmula 7.1. Relación de estabilidad de un suelo (R).

Cuando R es mayor que 1,0 (> corte) el peligro de movimiento es inminente y se considera que estos dos sistemas de fuerzas en una pendiente son dinámicos.

Coulomb establece que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección dada de éste llega a igualar a la resistencia a la cizalladura en esa misma dirección, la cual depende de la cohesión y de la fricción interna entre los granos. La ecuación de Coulomb (1773) se expresa por medio de la Fórmula 7.2.

$$S = C + \sigma_n \cdot \tan\phi$$

Fórmula 7.2. Ecuación de Coulomb.

Donde S es el esfuerzo cortante o resistencia al cortante tangencial, C es la cohesión del suelo, σ_n es el esfuerzo normal sobre un plano crítico, $\tan \phi$ es el coeficiente de fricción y ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

Los cambios en las fuerzas de corte o de resistencia pueden ser irreversibles (por ejemplo, socavación de cursos, deslizamientos, cárcavas) o reversibles (cambios en la humedad del suelo, deforestación, modificación del tipo de uso del suelo), siendo muy importante la acción antrópica.

La fuerza activa del agua es el principal elemento que afecta la estabilidad de las laderas, debido a que puede:

- aumentar el peso de la masa,
- disminuir las fuerzas resistentes del suelo,
- aumentar la plasticidad de ciertos materiales y
- disolver uniones solubles.

Las causas de los deslizamientos bajo condiciones naturales han sido agrupadas en condiciones pasivas, que favorecen la ocurrencia del movimiento, y activas, que lo inician. Las principales causas pasivas son: litológicas, estructurales, topográficas e hidrológicas.

Por ejemplo, un aumento de erosión hídrica superficial y de los movimientos en masa están frecuentemente asociados con la conversión de la vegetación arbórea a pastos, por acción antrópica. Estos últimos si bien favorecen la infiltración, no brindan un anclaje tan fuerte como la vegetación arbórea.

En pocos estudios hidrológicos se tiene en cuenta la influencia del sistema radical de las plantas en el incremento de la cohesión del suelo, encontrada por muchos investigadores a nivel internacional, tales como O'Loughlin y Ziemer, 1982; Beltrán y Corredor 1989, quienes afirman, que la cohesión C del suelo, está muy influenciada por el sistema radical de las plantas.

El efecto de refuerzo mecánico impartido por las raíces, se relaciona con la resistencia del suelo a esfuerzos de corte tangencial, ya que se mejora ampliamente el valor de la cohesión. Además, el anclaje que proporcionan las raíces y la penetración parcial del tallo, se asemeja a una pila de refuerzo que contrarresta las fuerzas paralelas a la pendiente, y el peso de la vegetación ejerce sobre el suelo una componente vertical que aumenta la carga normal y por consiguiente la resistencia al deslizamiento.

ORÍGEN DEL CAUDAL SÓLIDO

La inmensa mayoría de los torrentes transportan durante las crecidas grandes cantidades de materiales sólidos. El volumen de sólidos que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo, constituye el caudal sólido. Las causas que originan este caudal son: caída de detritos de rocas desde las partes altas, movimientos en masa en general, erosión en las laderas y en el cauce y glaciares y aludes.

Las condiciones climáticas y la vegetación influyen en la formación de torrentes y del caudal líquido y sólido, pero una vez formados y en plena actividad, las características de su caudal sólido son consecuencia directa de la composición mineralógica y de la tectónica de su cuenca.

EL FENÓMENO TORRENCIAL

El fenómeno torrencial representa la dinámica de un sistema hidrográfico en cuencas de montaña, que expresa el movimiento generado por los torrentes. Las características generales corresponden a que:

1. Son corrientes naturales de agua que tienen una cuenca reducida, con pendientes fuertes e irregulares.
2. Producen crecidas violentas, erosión y depósito de grandes cantidades de sedimentos.
3. La erosión hídrica bajo sus distintos tipos (laminar, digital y en cárcavas), es uno de los fenómenos principales en los torrentes, sobre todo en las laderas.
4. En el cauce se produce erosión lateral y de fondo, que origina muchas veces, movimientos en masa de las laderas que han perdido su estabilidad.

En general, cuando se habla de erosión torrencial se diferencian los procesos donde el agua es el factor principal, como la erosión superficial y subsuperficial, y aquellos procesos en los cuales el agente erosivo es principalmente la fuerza de gravedad como los movimientos en masa.

A menudo, el término torrente se emplea como sinónimo de barranco aunque este último parece tener una relación más estrecha con el cauce de un torrente que con la propia corriente fluvial del mismo. También se emplea con mucha frecuencia, sobre todo en la parte oriental de la península Ibérica, el término de origen árabe, rambla. Algunos torrentes de áreas muy secas en las regiones propiamente desérticas reciben el nombre árabe de uadis y representan el caso extremo de un torrente con crecidas ocasionales e impetuosas en cauces que permanecen secos el resto del tiempo. También reciben el nombre de lluvias torrenciales las que son muy intensas y de breve duración.

Cuando se expresa la línea que marca la parte más honda de un valle, se indica la zona de Vaguada, siendo este el acceso por donde van las aguas de las corrientes naturales. En términos científicos se utiliza también el nombre de thalweg, voz procedente del alemán que significa "camino del valle", es la línea que une los puntos de menor altura en un valle o en el cauce de un río y donde la corriente, si la hay, es más rápida

RÉGIMEN TORRENCIAL

Por analogía con la intensidad de las crecidas y de la breve duración de las mismas, se denomina régimen torrencial de un río a un comportamiento muy irregular de su caudal, casi seco durante gran parte del tiempo y con crecidas violentas y destructoras en ciertos momentos.

Las partes constitutivas de un torrente quedan definidas por las características generales de la cuenca hidrográfica que lo compone. Se explican por medio de una caracterización particular de las partes típicas de un torrente.

Según García Nájera (1962), las partes de un torrente se pueden identificar con áreas definidas morfológicamente, como se expresa en la Figura 7.2. Las mismas son:

- Cuenca de recepción: donde se recogen las aguas durante las lluvias y se establece la alimentación del torrente. En esta área es importante definir la inclinación y exposición de laderas, debido a que definirán el modo de circulación del agua superficial y el caudal líquido general del torrente.
- Garganta: donde se concentra los caudales y se genera el transporte propiamente dicho de agua y sedimentos.
- Cono de deyección o abanico aluvial: donde se acumulan los sedimentos (bloques, cantos rodados, grava, arena) arrastrados por las aguas del torrente durante las crecidas, que se acumulan en forma de abanico al llegar a zonas de menor pendiente, generalmente, en el fondo del valle principal. Puede intuirse el cambio brusco de pendiente en el comienzo del cono de deyección.
- Canal de desagüe: donde se constituye la evacuación del flujo por lo cual el cauce se hace más angosto y profundo al acentuarse la erosión vertical. Forma un valle en "V" típico cuando su origen está exclusivamente en las aguas fluviales.

Cuenca de recepción:
Constituida por arroyos de la cabecera que reciben agua de zonas próximas y canalizan al canal de desagüe (predomina la erosión).

Garganta con Canal de desagüe: Forma la vía de drenaje que conduce agua hacia las zonas bajas, donde se genera erosión y transporte.

Cono de deyección: Es el depósito de materiales transportados en la zona baja del torrente.

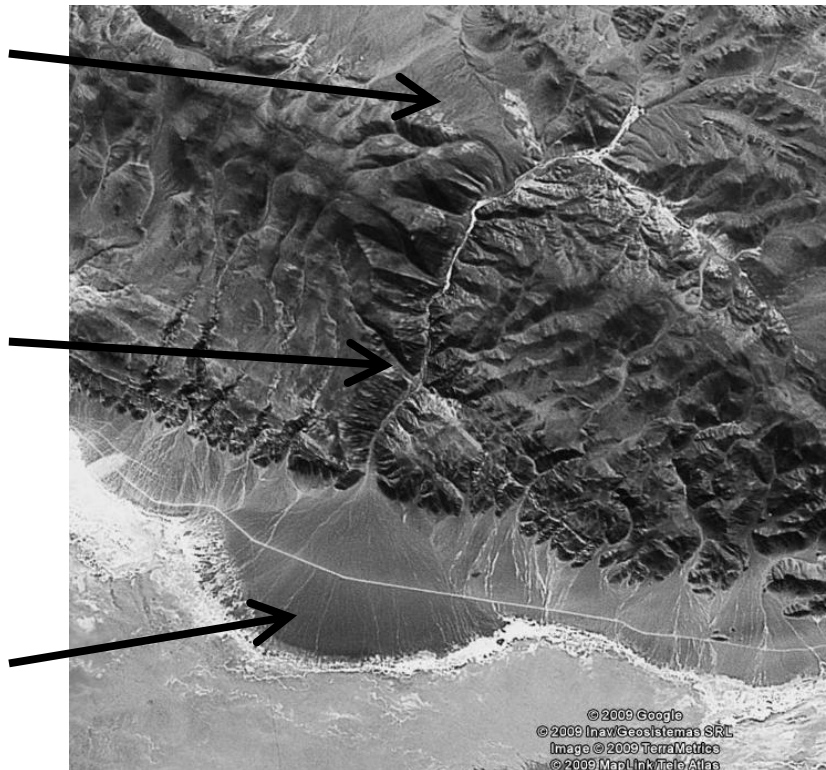


Figura 7.2. Partes de un torrente, según García Nájera. Vista aérea.

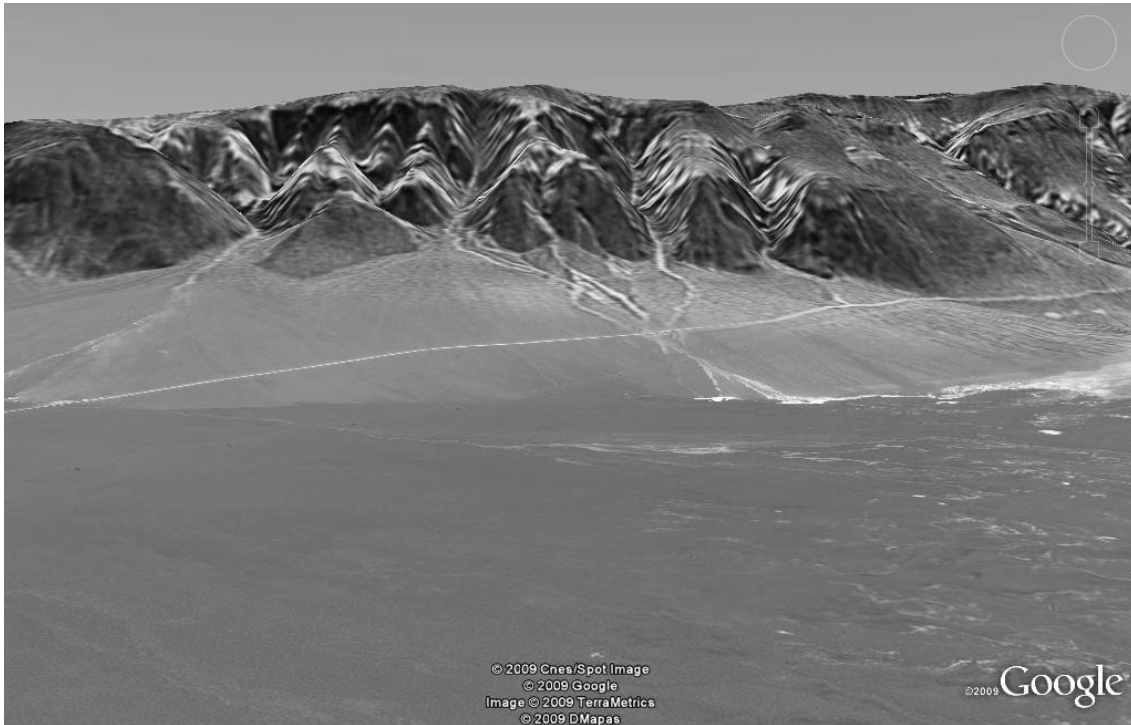


Figura 7.3. Torrente vista de frente.

En la Figura 7.3 se presenta el sistema de torrentes de la Figura 7.2, con vista de frente, donde se visualizan claramente las partes constitutivas del mismo, diferenciando la cuenca de recepción (en la cabecera de la cuenca), el canal de desagüe (parte media a baja) y el cono de deyección (sobre la salida de la cuenca), de los diversos torrentes que constituyen el complejo torrencial.

A partir de la delimitación de estas partes se puede comenzar a definir las medidas de protección, recuperación, control y rehabilitación en la cuenca de recepción o diques de corrección de cauces en la garganta.

CLASIFICACIÓN DE LOS TORRENTES

Distintas clasificaciones de los torrentes se han hecho de acuerdo a la posición, forma, extensión de la cuenca y origen del caudal sólido. La clasificación, basada en el origen de los materiales acarreados, los divide en tres clases:

1. Torrentes de erosión: Son los que sólo acarrear materiales provenientes de su propio lecho o de las laderas de las montañas. El origen de su caudal sólido es solamente la erosión longitudinal y transversal, con los hundimientos y deslizamientos consiguientes.
2. Torrentes de canchales: En ellos, a los productos de la erosión se agregan los materiales que provienen de canchales y conos de aludes.
3. Torrentes glaciares: Son los que nacen al final de un glaciar y transportan materiales que proceden de las morenas de aquél.

CONTROL DE LA ACTIVIDAD TORRENCIAL

La alteración del régimen hidrológico de las cuencas con grandes picos de crecidas debe ser observada para poder establecer las características del fenómeno torrencial. La identificación de áreas prioritarias torrenciales y el establecimiento de actividades de tratamiento de prevención mediante técnicas de corrección de torrentes es una manera de controlar, advertir, aconsejar e informar de la actividad del fenómeno.

Los daños producidos por la acción torrencial pueden ser corregidos mediante medidas estructurales y/o no estructurales. Estas medidas tienen como objetivo evitar daños y roturas sobre infraestructura de carreteras, puentes, vías férreas, edificios; reducir la capacidad y vida útil de reservorios de agua, como por ejemplo embalses; mantener la mejor calidad física del agua debida al aporte de sedimentos; prevenir que se altere la calidad química del agua por la presencia de herbicidas, insecticidas y residuos industriales, entre otros.

Las medidas a implementar pueden ser de tipo activas, para reducir procesos torrenciales (inundaciones, erosión, sedimentos, etc.), y/o pasivas, para reducir y/o controlar en el área las actividades socio-económicas degradativas. Estas medidas se diseñan y proyectan por medio de técnicas para control de erosión en la cuenca y/o en el cauce. A continuación se presenta la Tabla 7.1 que define los diferentes propósitos de un sistema corrector de una cuenca torrencial, según López Cadenas del Llano (1998) y Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008), caracterizando según la localización del sitio de implementación de la obra, las diferentes acciones recomendadas. Se establece que las medidas de tipo no estructurales se pueden desarrollar en toda la cuenca por medio de acciones biológicas, prácticas mecánicas y pequeñas obras transversales, en cambio cuando la actividad erosiva es principalmente identificada en el cauce, se puede corregir por medio de obras estructurales.

Localización		Medidas correctoras			Objetivos
Posición	Espacio	Actuaciones	Especificaciones		
Área dominante de la cuenca hidrográfica	Superficies vertientes	Mantenimiento y creación de cubiertas forestales	Conservación de las masas arboladas y del matorral denso no degradado existente Replantaciones forestales Control y aprovechamiento de pastizales		Reducir y controlar el escurrimiento directo por mejora de la infiltración Controlar la humedad del suelo Controlar la erosión laminar y regueros Controlar los barrancos incipientes y la erosión remontante en laderas
		Medidas de control de escurrimiento y Prácticas de conservación de suelos	Control de laderas con obras de materiales vivos (vegetación)	Fajinadas	Controlar las cárcavas y deslizamientos superficiales
			Terrazas Bancales Albarradas Drenajes	Palizadas	Controlar la erosión en masa incipiente: reptación y soliflucción
	Cauces de drenaje	Obras transversales	Diques de retención total Diques de consolidación Diques de retención selectiva		Establecer la pendiente de compensación (flujo monofásico) o de equilibrio (flujo bifásico) Controlar la erosión remontante del lecho del torrente Retener los sedimentos aguas arriba del dique En los diques de consolidación, estabilizar la erosión en el lecho y movimientos de laderas Estabilizar el lecho y controlar su erosión
			Umbrales de fondo		
		Obras longitudinales	Protección de márgenes mediante malecones (escolleras) o espigones		Defender los márgenes de la erosión causada por la abrasión de la corriente
Área dominada de la cuenca hidrográfica	Obras mixtas	Perfil escalonado de tramos erosionables		Evacuar rápidamente la corriente torrencial en las avenidas por un canal de tramos erosionables	
	Obras longitudinales	Protección de márgenes mediante malecones (escolleras) o espigones Protección de márgenes y riberas con vegetación arbolada, acompañada o no de escolleras		Defender los márgenes de la erosión causada por la abrasión de la corriente Defensa de los márgenes de inundación y de la erosión por abrasión de la corriente Rectificación del eje hidráulico	

Tabla 7.1. Sistema corrector de una cuenca torrencial. Fuente Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008).

Existe una variedad de técnicas o medidas estructurales para corrección de torrentes, cuyo objetivo general se basa en disminuir la erosión y reducir y/o evitar hasta donde sea posible la producción de sedimentos. Las medidas estructurales pueden ser multipropósito, debido a ello se pueden agrupar en medidas con orientación a:

- Conservación de cuencas: Incluye la reforestación y la construcción de presas, embalses y cauces de alivio o aliviaderos (canales artificiales para dirigir el agua procedente de la inundación).
- Control de erosión: Por medio de recuperación de áreas degradadas.
- Regulación de avenidas: Su propósito inicial es servir como embalses de agua para el riego y otros usos domésticos, así como para la obtención de energía.

Según Suárez (1993) las técnicas para corrección de torrentes se pueden clasificar desde varios puntos de vista:

1. Técnicas para control de torrentes depositantes, cuyo objetivo es disminuir el aporte de sedimentos al cauce, mediante la ejecución de trabajos de estabilización en la cuenca.

2. Técnicas para control de torrentes socavantes, que pueden tener cabeceras de cuencas bien forestadas, por lo cual la conservación y recuperación no son actividades prioritarias.

En general, los torrentes depositantes requieren de acciones en forma integral en toda la cuenca, en cambio los torrentes socavantes necesitan de acciones en el cauce, que sirvan tanto para corregir las zonas de la garganta, del cono de deyección y de canal de desagüe. El problema en los socavantes se centra generalmente en el propio cauce del torrente, su tendencia a la profundización y a la erosión regresiva, que avanza hacia la parte superior de la cuenca, requiere que sea estabilizado por medio de medidas estructurales.

Particularmente, las medidas estructurales de regulación torrencial son obras de ingeniería que se aplican en combinación con las biológicas, desarrolladas especialmente en aquellas áreas donde la cobertura vegetal es escasa, estableciendo que su función principal es resistir las fuerzas torrenciales. Estas medidas técnicas incluyen obras transversales sobre el curso de agua como diques de retención, de consolidación, espolones, entre otros, y/u obras longitudinales como escolleras y muros laterales. Sobre las laderas, las obras estructurales pueden ser medidas clásicas de conservación de suelos con pendiente, como terrazas, zanjas, muros de piedra en seco, gaviones, y en combinación con biológicas como forestación, cultivo en fajas, rotaciones de cultivos.

La función de las medidas estructurales en el cauce es, principalmente, levantar el lecho como sostenimiento del pie de las laderas, proteger el fondo y las márgenes en los sectores críticos del río y retener el material sólido.

En las laderas estas estructuras tienden a frenar el escurrimiento superficial, retener el sedimento y escudar contra la erosión y movimientos en masa, que Vargas et al. (1998) lo expresa con las fotografías presentadas en las Figuras 7.4 y 7.5.



Figura 7.4. Obras longitudinales sobre laderas con palizadas, cubrimiento de suelo con encañado y direccionamiento de escurrimiento mediante embolsado.



Figura 7.5. Obras longitudinales sobre laderas con pequeñas terrazas contenidas con postes, empastadas.

Vargas *et al.* (1998) publicaron el “Manual de control de erosión”, en Chile, en el marco de un Convenio CONAF – JICA. El mismo parte de los resultados alcanzados en un Proyecto demostrativo de actividades de conservación de suelos degradados, el cual es de gran utilidad para los forestadores interesados en realizar estas obras, contribuyendo a disminuir la erosión de sus suelos. El Manual está disponible en internet.

A continuación se presentan fotografías obtenidas del manual, las cuales expresan con claridad diferentes medidas estructurales y biológicas de control de escurrimiento superficial y posiblemente de manejo del caudal líquido y sólido que se genere en un torrente (Figura 7.6 a la Figura 7.14 y la Figura 7.16).

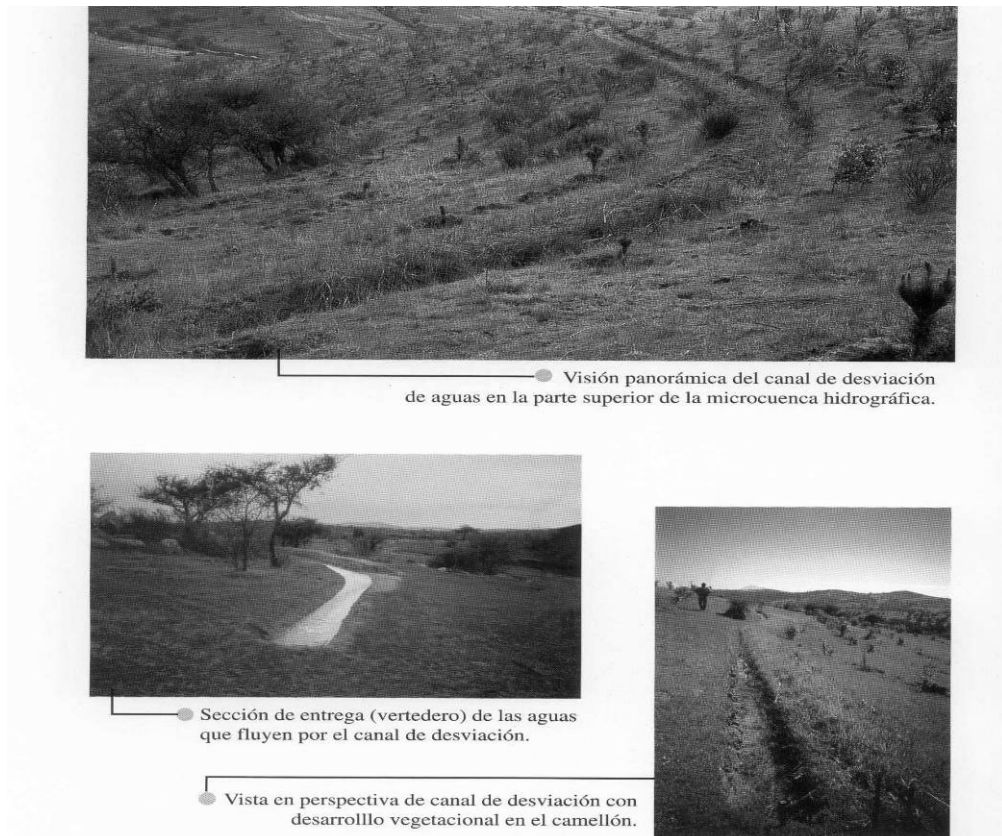


Figura 7.6. Tratamientos de regulación de flujos superficiales. Vargas *et al.* (1998).

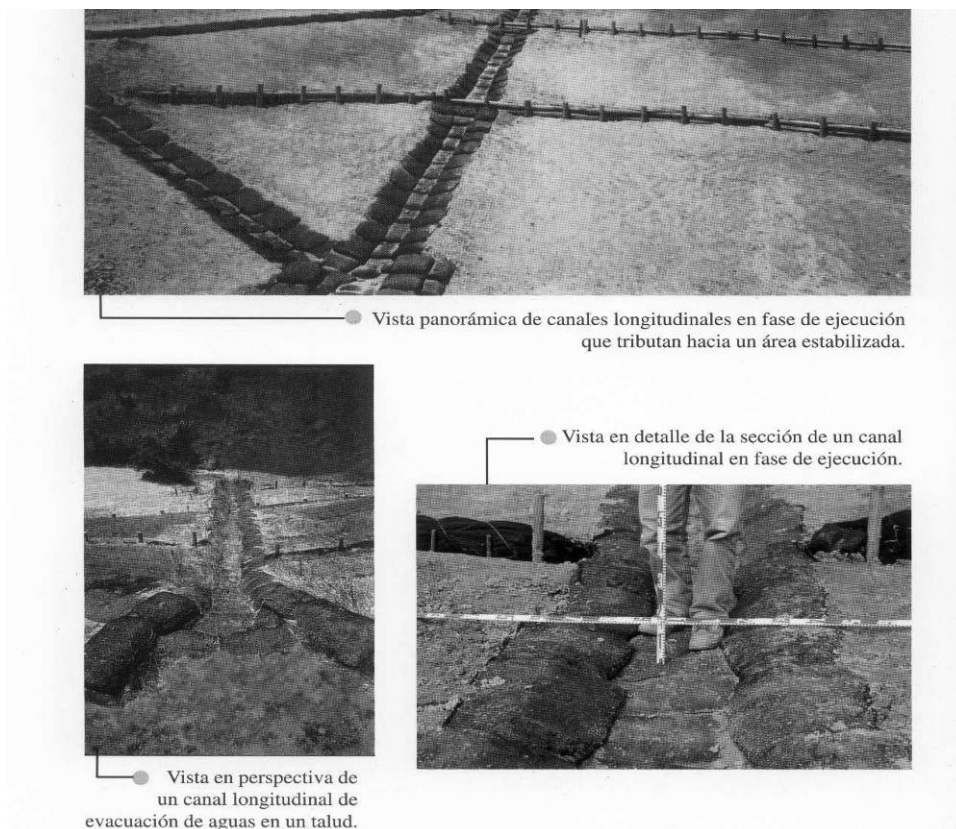


Figura 7.7. Direccionamiento del flujo superficial. Vargas *et al.* (1998).

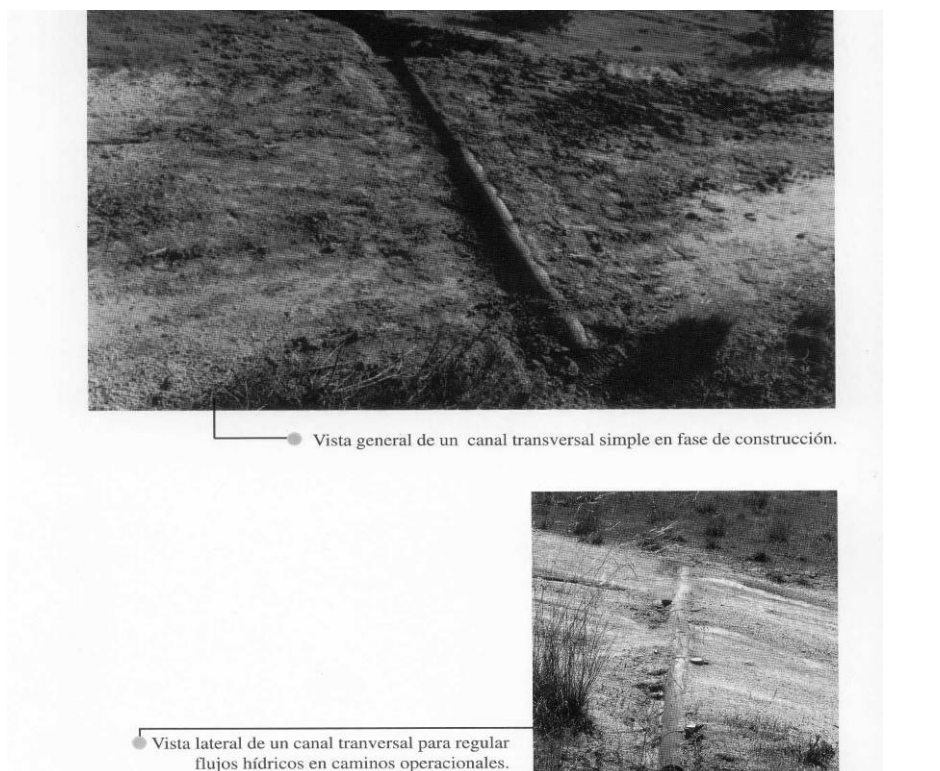


Figura 7.8. Regulación del flujo superficial. Vargas *et al.* (1998).

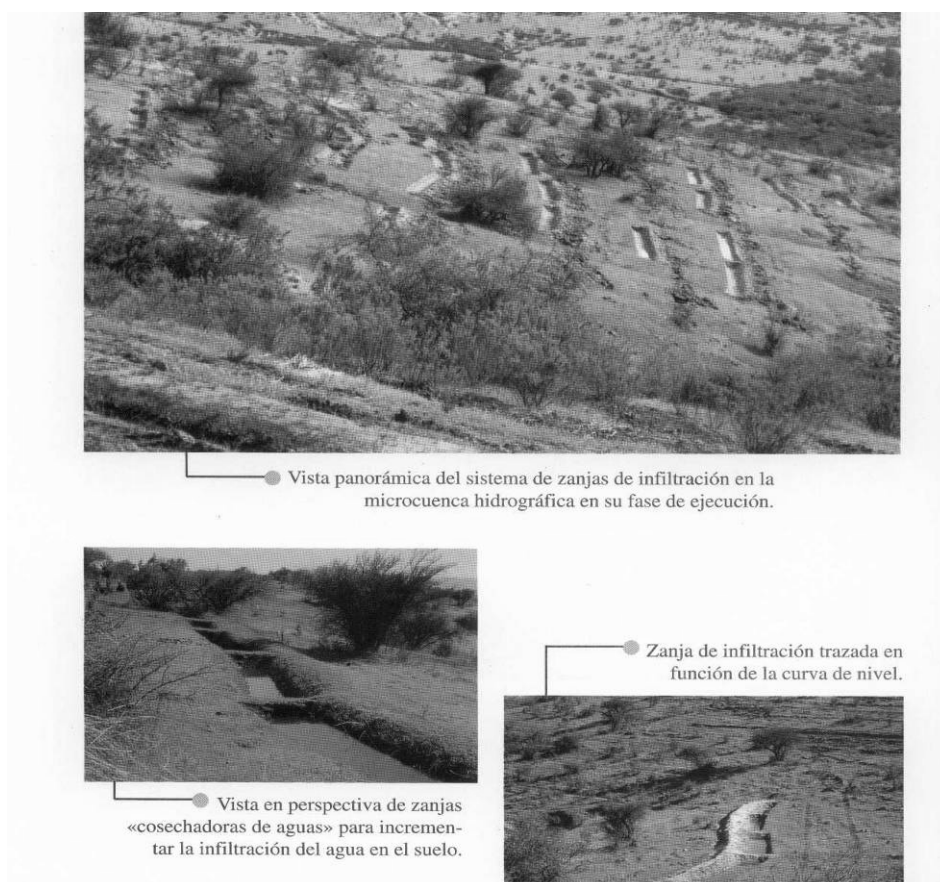
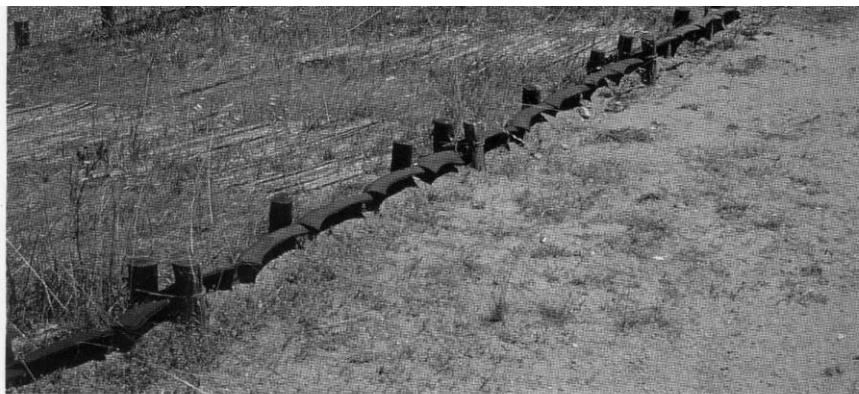


Figura 7.9. Tratamientos de incremento de la infiltración. Vargas *et al.* (1998).



● Vista general de tratamientos lineales con revestimientos de neumáticos en la cabecera de una obra



● Vista detallada de tratamientos lineales con revestimientos de neumáticos

Figura 7.10. Tratamientos lineales de control de laderas. Vargas *et al.* (1998).



● Vista detallada de tratamiento lineal con fajinas de sarmiento trenzadas. Este material se puede obtener en la época de poda de suelos cultivados con vides.



● Vista en perspectiva de tratamiento lineal con fajinas de sarmiento en fase de estabilización.

Figura 7.11. Tratamientos lineales de control de laderas. Vargas *et al.* (1998).

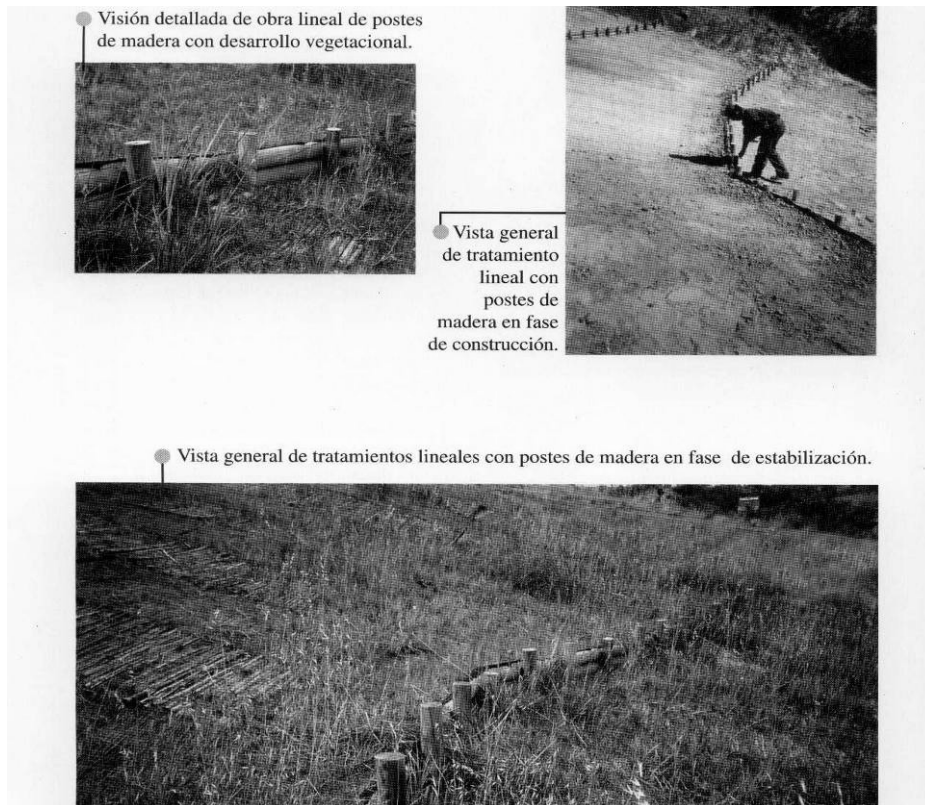


Figura 7.12. Tratamientos lineales de control de laderas. Vargas *et al.* (1998).

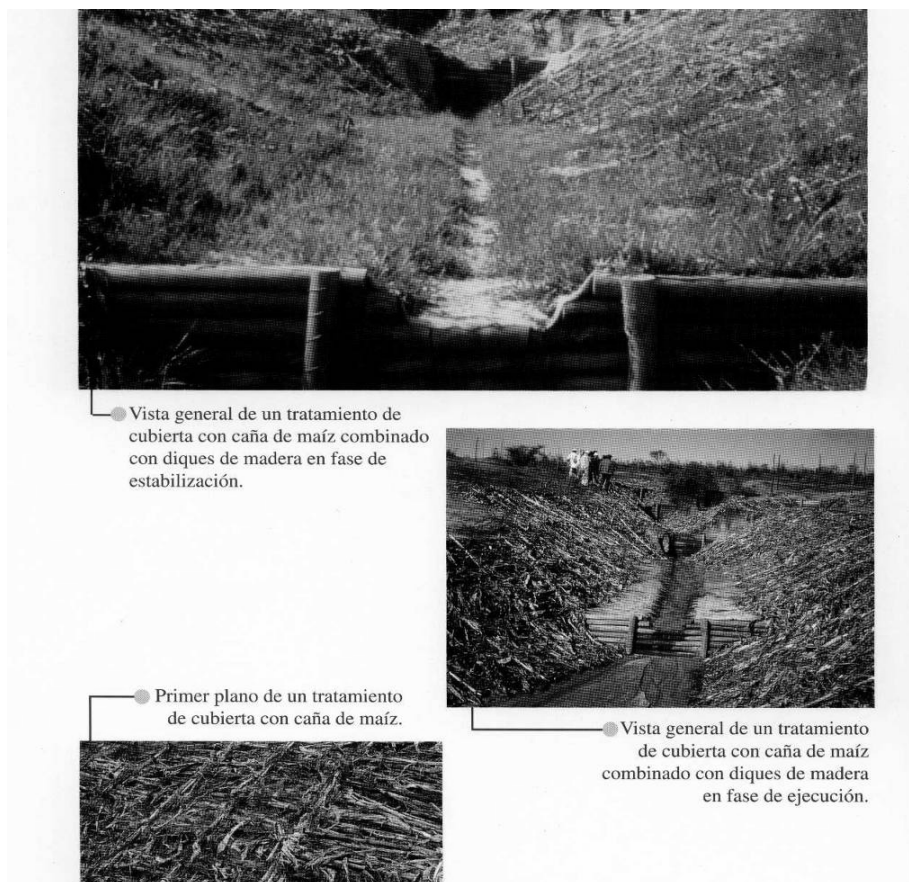


Figura 7.13. Tratamiento de cubiertas superficiales. Vargas *et al.* (1998).



● Vista general de una estructura de postes de madera y sacos de malla de sombra para el control de erosión en taludes.



● Visión detallada de la fase de estabilización de la obra a través del desarrollo de pastos.



Figura 7.14. Estabilización de taludes con estructura de postes de madera - malla media sombra - neumáticos. Vargas *et al.* (1998).



Figura 7.15. Estabilización de laderas con estructura de postes de madera en medialuna y plantación de especies forestales nativas.

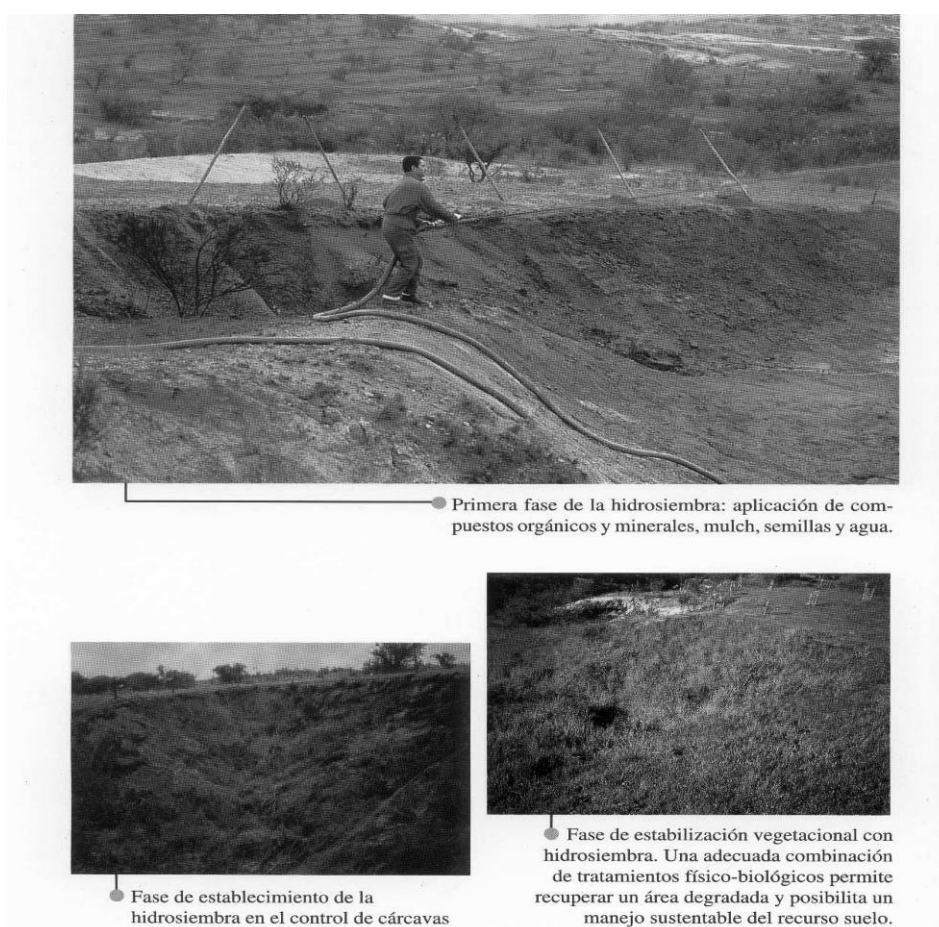


Figura 7.16. Tratamientos biológicos. Vargas *et al.* (1998).



Figura 7.17. Tratamientos integrales biológicos y estructurales en la zona cordillerana. Argentina. (2006).

Las acciones estructurales y/o biológicas indicadas (Figuras 7. 15 y 7.17) deben ser realizadas de manera integral en la estabilización de una determinada cuenca torrencial.

Para la estabilización de laderas y cauces existen otro tipo de obras de menor porte, de índole estructural, que permiten el control de los flujos superficiales. Según la Resolución 229/2002 de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 7.18) se definen como:

- Canal: Conducción recta a superficie libre y encauzada. Puede o no presentar terraplenes
- Terraplén: Montículo de suelo u otro material que modifica el escurrimiento superficial del agua en forma lineal o transversal al flujo.
- Azud: Obra de suelo u otro material, ubicada transversal al escurrimiento, que retiene total o parcialmente el agua.
- Zanja: Conducción recta o serpenteante de pequeñas dimensiones a superficie libre
- Alcantarilla: Conducción de agua bajo camino.
- Diques. Muro construido para contener el empuje del agua.

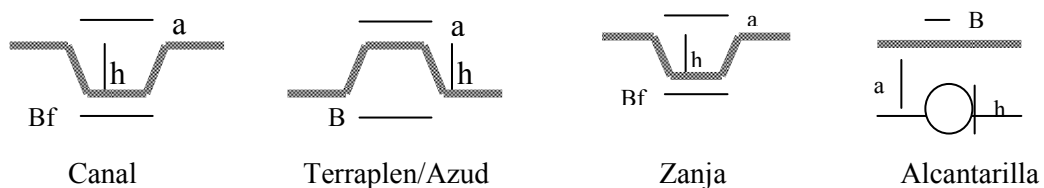


Figura 7.18. Obras estructurales de menor porte.

Siendo a (ancho), h (profundidad) y B_f (base de fondo) los datos básicos a considerar para su construcción.

En las Figuras 7.19 y 7.20 se exponen diferentes medidas estructurales de control de caudales de avenida, a una escala local.



Figura 7.19. Azudes sobre canal de drenaje natural.



Figura 7.20. Alcantarilla.

Las acciones para estabilización de torrentes adaptadas de Suárez (1993), son medidas de control de corrección sobre dos tipos de torrentes: depositantes y socavantes, los cuales se detallan a continuación.

1. Corrección de torrentes depositantes. Las acciones que se requieren para estabilizar estos torrentes son trabajos que toman años para su culminación y son costosos. Las más difundidas sobre laderas, como medidas conservacionistas, prácticas y tratamientos para el control de la erosión, son las siguientes: Conservación de suelos y forestación, enfajinado de laderas, mallas ancladas, terracedo de laderas, estabilización de deslizamientos, drenajes, zanjas interceptoras, muros interceptores y empalizadas interceptoras, entre otros. También, se pueden implementar obras directamente en el cauce, tales como diques escalonados y abiertos.

2. Corrección de torrentes socavantes. Las técnicas más usadas, según Suárez (1993) son la construcción de diques escalonados, umbrales de fondo y revestimientos del cauce.

TIPOS DE DIQUES PARA CORRECCIÓN DE TORRENTES

Los diques artificiales previenen la inundación de aquellos lugares como pueblos o campos que están cerca de los ríos, debido que el agua disminuye su velocidad de flujo, protegiendo las áreas aledañas contra el embate de las crecidas.

Un dique se trata de una obra que se construye en sentido perpendicular al eje del cauce de la quebrada, cuya función es regular la pendiente de cauce disminuyendo la velocidad de los flujos de lodo y piedra, reteniendo el material sólido transportado.

Los diferentes tipos de diques según su aplicación se denominan:

- Diques de retención: tienen como función principal, almacenar los materiales arrastrados, en una primera etapa de funcionamiento. En una segunda etapa, una vez colmatados, cumplen la función de regular el flujo de los sedimentos, principalmente por el efecto que causa la disminución de la pendiente. Estos diques deben ser construidos preferentemente aguas abajo de ampliaciones del valle torrencial, para contar así con una mayor capacidad de almacenamiento de sólidos y pueden ser escalonados a lo largo del torrente. En algunos casos, cuando la situación lo amerite en razón de la importancia de la infraestructura existente aguas abajo, puede ser necesario excavar y remover con cierta periodicidad parte del volumen de los sedimentos acumulados tras los diques, para así disponer nuevamente de capacidad de almacenamiento de sólidos (Figura 7.21). Los materiales excavados pueden ser utilizados en la construcción como bases granulares de calzadas, agregados de concreto, entre otros.



Figura 7.21. Tratamientos estructurales. Vargas *et al.* (1998).

- La construcción de diques escalonados a lo largo del cauce para reducir la fuerza erosiva de la corriente de torrente socavante, disminuye la velocidad del flujo al frenar casi totalmente el flujo torrencial y almacenar los sedimentos transportados (Figura 7.22). La cadena de diques sirve para evitar la erosión en el cauce y retener sedimentos. Posteriormente, una vez colmatados, regulan el flujo del agua y los sedimentos mediante la reducción de la pendiente, el aumento del ancho del cauce y la disipación de la energía del flujo en los distintos escalones sucesivos al pie de cada dique.

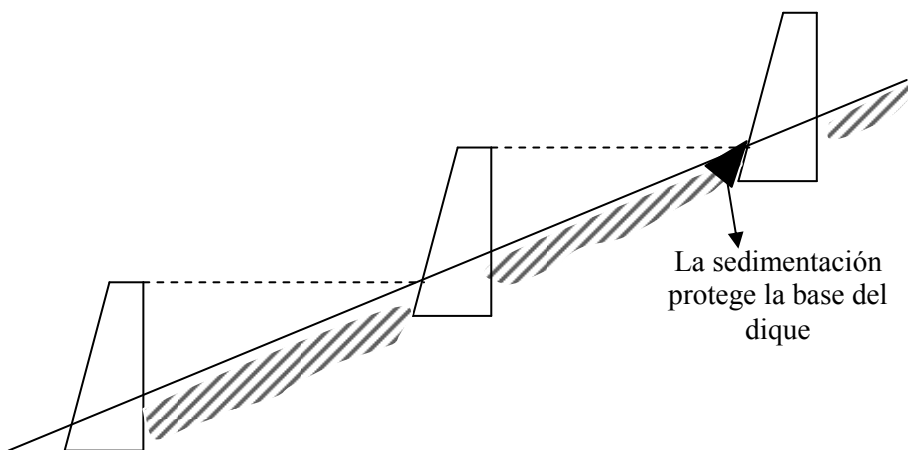


Figura 7.22. Estabilización de cauces. Diques escalonados.

- Los diques en este caso se denominan de consolidación, ya que su función principal es fijar el fondo del cauce, evitando que el proceso de profundización del mismo continúe degradándolo. Por medio de la consolidación, es decir reteniendo sedimentos y consolidando las laderas convergentes a la obra, se evita la erosión lateral y de fondo. La nueva pendiente modificada del cauce, una vez colmatadas las presas, se denomina pendiente de compensación (p), con la cual se alcanza un estado de equilibrio entre la erosión y la sedimentación en el cauce (una compensa a la otra) (Figura 7.23). La estabilización que otorga este tipo de diques está basada en que la pendiente de compensación se alcanza con una sobreelevación del aluvión (sedimentación) aguas arriba de la obra.

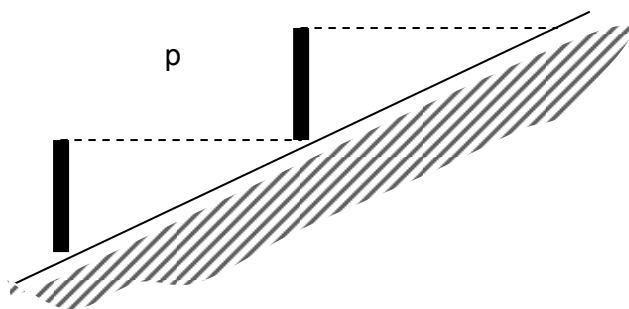


Figura 7.23. Formación de la pendiente de compensación (p) aguas arriba de una obra.

- Para la retención permanente, se recomienda el tipo de dique cerrado, pero en el caso de retención temporaria se pueden implementar diques abiertos (grandes mecinales o rejas barras que se sacan. Ej: cada 60 cm). Los diques abiertos están provistos de grandes aberturas, retienen principalmente los sedimentos de mayor tamaño transportados durante las crecientes y dejan pasar gradualmente los de tamaños medios y finos, efectuando una selección granulométrica altamente beneficiosa, ya que las partículas de mayor tamaño son las que tienen el mayor potencial destructivo para la infraestructura existente aguas abajo, y en consecuencia son las que más interesa retener. Estos diques están especialmente indicados en el caso de los torrentes depositantes. Una solución aconsejable para la estabilización de estos torrentes consiste en construir un dique tipo abierto en el extremo aguas arriba del tramo a equipar, y continuar hacia aguas abajo con la construcción de diques convencionales escalonados a lo largo del cauce. Los diques abiertos se pueden limpiar con mayor sencillez (Figura 7.24).

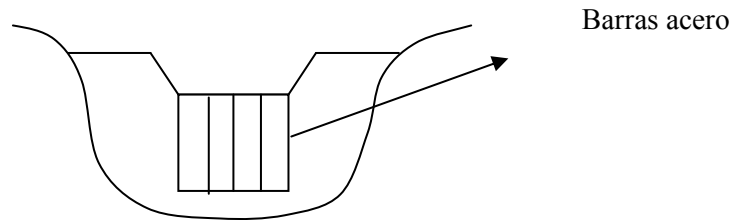
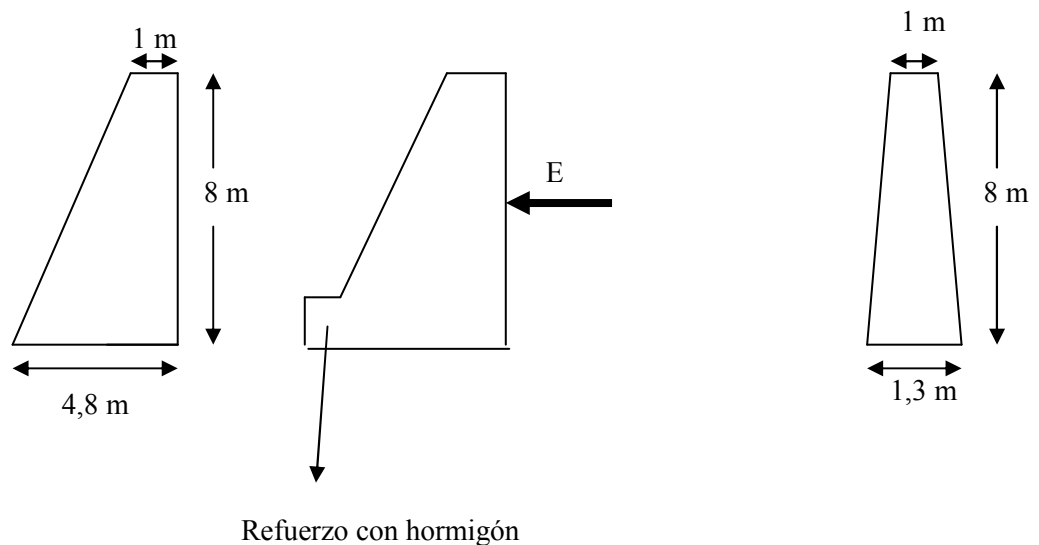


Figura 7.24. Estabilización de cauces. Dique abierto.

- En los diques rectos o de gravedad, la fuerza de empuje del agua (E) se transmite directamente al dique y puede voltearlo y/o desplazarlo, por ello en situaciones de cauces estrechos es recomendable implementar diques curvos, debido a que la fuerza E se transmite directamente a las laderas, como se representa en la Figura 7.25, donde se indica comparativamente un dique recto y curvo, con dimensiones ideales.



RECTO

CURVO

Figura 7.25. Dimensiones ideales de un dique para la estabilización de cauces.

- Diques curvos: se aplican en secciones del cauce angosto y profundo, debido a ello las laderas deben ser resistentes. El dique curvo es más económico que el recto porque es más delgado, pero se necesitan especialistas para el encofrado (Figura 7.26).

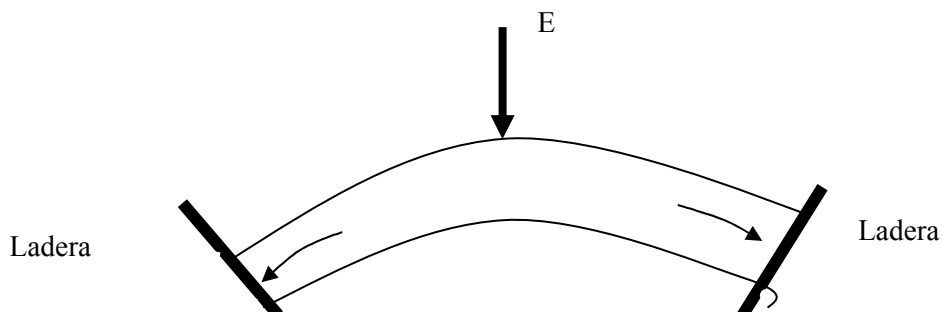


Figura 7.26. Diseño característico de un dique curvo para la estabilización de cauces.

- Los umbrales de fondo son obras transversales que no emergen sensiblemente del fondo del cauce. Para que se logre el equilibrio del cauce con la construcción de umbrales, es necesario que se produzca una cierta erosión del perfil longitudinal del fondo.
- Los revestimientos del cauce contribuyen a controlar la profundización de los cauces en los torrentes socavantes, ya que los hace no erosionables. Revestimientos comunes son el enrocado y el concreto. Esta solución puede utilizarse cuando por alguna razón no sea posible permitir la elevación del fondo del cauce. La desventaja fundamental de las obras de revestimiento, es que están sujetas a la abrasión y al desgaste que producen los sedimentos arrastrados por el flujo.
- Los revestimientos secos de piedras son la construcción más simple generada con piedras esquinadas que se colocan densamente en el fondo y taludes del cauce, formando una capa. El tamaño de las piedras depende de las fuerzas de arrastre que actúan, siendo el mínimo de 0,30 -0,40 m. Aquí también pueden utilizarse gaviones o mampostería.
- Las obras de gaviones consisten en diques elaborados con cajas de alambre tejido de forma de paralelepípedo o tubular, que se llenan con piedras y gravas (Figura 7.27). Se utiliza alambre galvanizado, flexible, de malla hexagonal y doble torsión, de 0,2 -0,3 cm de diámetro. Estas construcciones son simples, flexibles y se adaptan bien a los movimientos del terreno; por tal motivo se utilizan en la construcción de diques bajos, escolleras y espolones. Una forma especial de gavión la constituye el "colchón", que es una caja similar al anterior pero de menor altura, de 2-3 m de largo y 1 m de ancho, que se unen entre sí con alambres reforzados y de mayor diámetro, formando un verdadero "colchón". Estas estructuras se usan para proteger contra la erosión, el fondo y márgenes de ríos, taludes, entre otros.

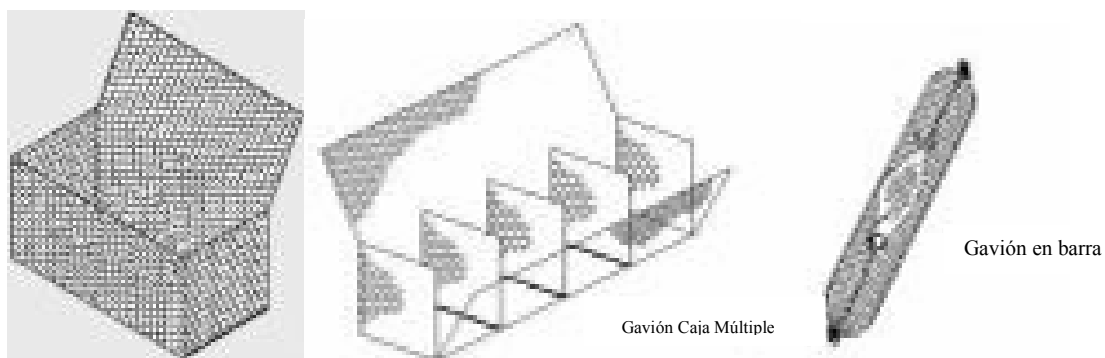


Figura 7.27. Modelos de gavión.

- Tratamientos integrales biológicos y estructurales. En la Figura 7.28 se presenta una obra integrada por tratamientos biológicos de forestación de planicies de inundación y laderas en conjunción con un tratamiento estructural compuesto por una cadena de diques de gaviones, realizados con materiales disponibles en la zona de influencia.



Figura 7.28. Tratamiento integral biológico y estructural en la zona cordillerana. Argentina. Detalle de un dique gavionado (2006).

ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DIQUE DE CORRECCIÓN DE TORRENTES.

Las obras de corrección torrencial cumplen diferentes funciones durante su vida útil, las cuales se pueden definir en forma temporal desde su instalación hasta la colmatación, de la siguiente manera:

1. Al terminar la construcción y antes de la colmatación, el dique ejerce un control prácticamente total del transporte de sólidos y una mitigación apreciable de los picos de las crecientes, debido a su capacidad de almacenamiento.
2. Una vez colmatado, ejerce un efecto regulador del transporte sólido y la atenuación de los picos de las crecientes, aunque en menor grado que antes de la colmatación.
3. En esta etapa, se produce la consolidación del fondo del cauce fijando el perfil longitudinal del mismo, evitando en muchos casos su degradación y la erosión regresiva.



Figura 7.29. Detalle de un dique colmatado.

4. Alcanzada la colmatación, como producto de la formación de la cuña de aterramiento y el centrado del flujo, disminuye la erosión lateral en las márgenes y propicia el crecimiento de vegetación sobre los sedimentos acumulados. Ambos efectos se traducen en una reducción de los aportes sólidos a la corriente.

5. La colmatación contribuye a evitar deslizamientos en laderas inestables, al inducir la sedimentación y como consecuencia la formación de una masa estabilizante (cuña de aterramiento) en la base, reduciendo así los aportes sólidos al torrente.

6. Además, cumple la función de detener las avalanchas de lodo o lavas torrenciales, bien sea mediante el impacto directo de las mismas contra las presas, antes de su colmatación, o por el efecto de frenado que produce el aumento del ancho del cauce y la disminución de la pendiente, una vez colmatadas.

Esta secuencia se expresa en las Figuras 7.30 y 7.31 generadas por Gaspari y Bruno en 1997, en las cuales se presenta la fase de implantación de un pequeño dique de corrección de torrentes luego de un incendio forestal, donde se visualiza el estado de degradación incipiente del terreno. Posteriormente se presenta el estado de colmatación del mismo dique, años más tarde, representada en la Figura 7.32, tomada por Gaspari y Leonart en el año 2005.



Figura 7.30. Tratamientos estructurales. Vista de aguas arriba de un dique de postes quemados.



Figura 7.31. Tratamientos estructurales. Vista de frente de un dique de postes quemados (Año 2001).



Figura 7.32. El mismo dique que la Figura 7.31, en estado de colmatación (Año 2005).

El estado de colmatación y cubrimiento de vegetación sobre el aterramiento de un dique de mayor infraestructura se presenta en la Figura 7.33., donde se refleja en color blanquecino la obra estructural que representa un dique de mampostería de retención en combinación con tratamientos biológicos.



Figura 7.33. Detalle de un dique colmatado ya estabilizado, por implementación de tratamientos integrales biológicos y estructurales.

RETENCIÓN DEL MATERIAL SÓLIDO

Una práctica de retención de material sólido es construir las obras de regulación y canalización que apoyen la acción del dique, en el tramo inferior del torrente (cono de deyección), donde generalmente se encuentran las ciudades y zonas agrícolas, una vez concluidos los diques (garganta) y los trabajos de estabilización de laderas (cuenca), cuando el volumen de los sedimentos transportados por el flujo haya disminuido considerablemente, ya que de lo contrario los costos de mantenimiento de la canalización serían muy elevados, a causa de la abrasión.

Con la obra se inicia la acumulación de materiales aguas arriba, denominado aterramiento, y con ello la formación de la pendiente de compensación (p). Esta pendiente se forma cuando están en equilibrio los sedimentos que son arrastrados y depositados por la corriente con los que se incorporan a la misma, y se produce en el momento de colmatación del fondo del cauce detrás del dique.

En el caso de que el torrente pase por un lecho no erosionable, la pendiente se denomina pendiente de saturación, debido a que no hay compensación ni equilibrio en el movimiento de sólido - líquido.

La pendiente de divagación se forma cuando el lecho de un torrente deja de estar encauzado, las aguas se dispersan y la altura de acumulación de sedimentos del aterramiento (h) resulta pequeña, aumentando notablemente la pendiente de compensación hasta quebrarla.

Estas tres pendientes se basan en la Ley de selección - Ley de Transporte Máximo.

La pendiente de compensación (p) y la longitud del aterramiento varían según la intensidad y duración de las crecidas y la cantidad y tipo de material arrastrado (Figura 7.34).

En la Figura 7.36 se presenta un dique totalmente colmatado, cuya vida útil ya ha sido superada, debido al déficit de implementación de medidas de mantenimiento de la obra ni de laderas adenañas.



Figura 7.36. Detalle de un dique de piedra colmatado sin medidas de mantenimiento.

FORMACIÓN DEL CONO DE DEYECCIÓN Y DEL CANAL DE DESAGÜE

La teoría de García Nájera (1962) de formación del cono de deyección y del canal de desagüe, simula la formación del lecho de deyección, para lo cual se admite que durante todo el proceso de formación del lecho, el caudal líquido y el sólido son invariables, es decir se supone una crecida constante y uniforme en todos sus caracteres.

Estas hipótesis naturalmente no se realizan nunca, por lo tanto esta teoría es un caso puramente ideal cuyas variantes reales se presentan en el desarrollo del presente capítulo.

La teoría se basa en cuatro fases, considerando el caso de la Figura 7.37, que presenta una vista en planta de un torrente, en que el torrente está representado por la línea AB-ab que desemboca en una llanura horizontal a una altura BT, esta recta se supone vertical.

A continuación se presentan las cuatro fases que definen la formación ideal del cono de deyección.

1º Fase: Al desembocar el torrente AB-ab y caer sobre la llanura, las aguas se desparraman y los materiales empiezan a quedar depositados al pie de BT, formando un semicono cuyas generatrices CD-cd tendrán la pendiente de divagación, debido a que las aguas extendidas como sabana por la llanura sólo pueden depositar sobre ésta los limos y elementos menudos que pueden sostenerse en suspensión, todos los demás materiales han de quedar al pie de BT. Al continuar llegando materiales, el semicono irá creciendo hasta que su vértice llegue a B-b, dando fin a la primera fase.

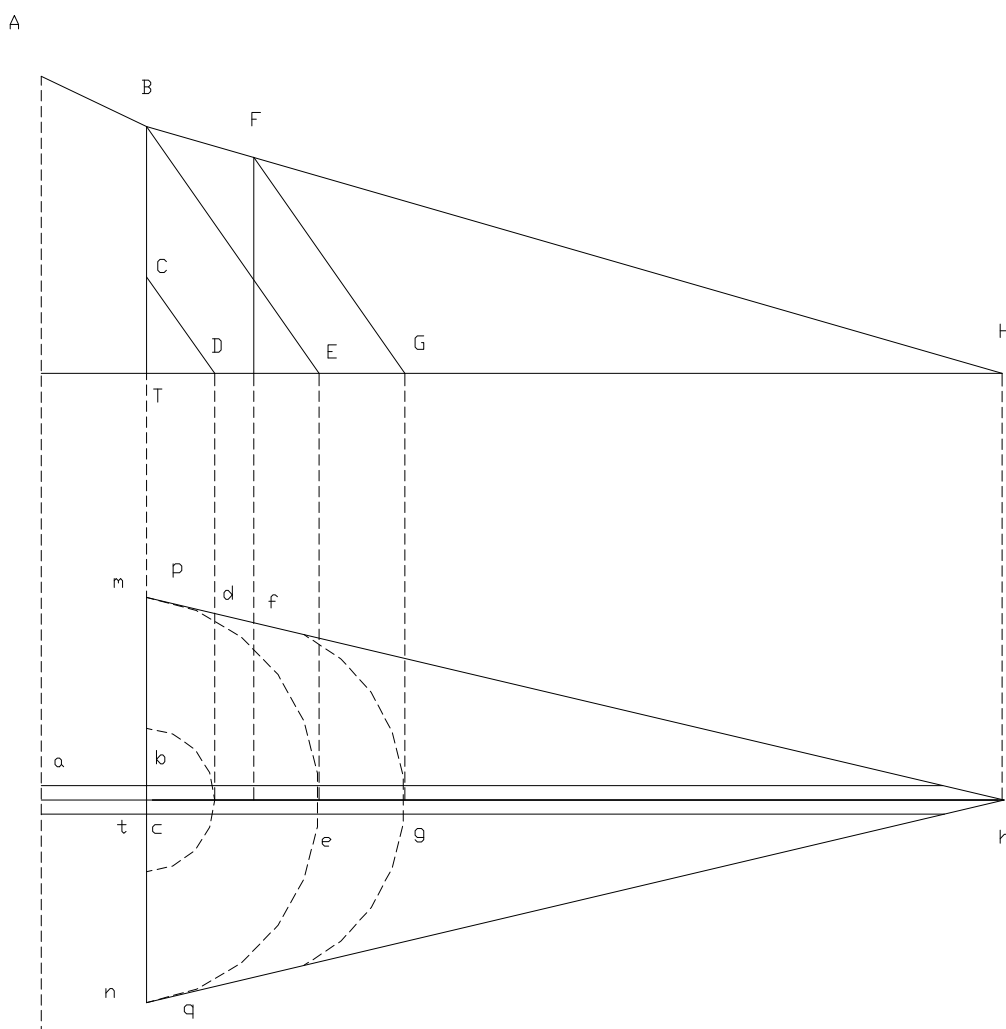


Figura 7.37. Fases en la formación del cono de deyección.

2° Fase: Hasta aquí se ha supuesto que el cauce del torrente es una línea matemática ABH-abh con una cierta anchura, haciendo que el semicono de la fase 1° no termine en un vértice, sino que en realidad sea un semicono truncado cuya base superior es un semicírculo de diámetro igual a la anchura del canal. Por lo tanto al ir llegando más material, es evidente que los materiales del centro serán empujados hacia adelante, mientras los de los lados tenderán a depositarse formando un pequeño canal de prolongación AB-ab. Al continuar la llegada de materiales se irán formando otros semiconos tales como FG-fg, tomado el canal BF-bf la pendiente de compensación, pues si la tuviera menor entonces habría depositación y el canal quedaría obstruido. De esta forma se continúa hasta llegar a H-h y cuya pirámide es BT-mn, terminando la segunda fase.

La figura que toman los depósitos es la superficie envolvente de todos los conos, como FG-fg, siendo una superficie de una pirámide triangular apoyada sobre la llanura de vértice H-h y cuya base se proyecta en Bt-mn.

pendiente de compensación debe conservarse mientras el estado de torrencialidad no varíe; así se irán formando pirámides como RK-hik.

Esta 4° fase puede durar hasta la extinción del torrente o hasta que el punto k llegue a una corriente con la suficiente potencia de arrastre para llevarse todos los materiales que le suministra el torrente.

Las cuatro fases de formación del lecho de deyección, según García Nájera (1962), están representadas en forma ideal con un régimen de crecida uniforme y constante, indicando lo que sucedería en condiciones reales y conociendo que los depósitos que se formen en la realidad por diferentes crecidas generarán detenciones e incluso regresiones en la marcha del fenómeno, llegando igualmente al mismo esquema ideal.

En el caso que la línea BT (Figuras 7.37 y 7.38) no es vertical, sino tiene cierta pendiente mayor a la de divagación, la simulación se reduce a que en la 1° fase, y en lugar de estar cortado por el plano vertical mn, lo estará por un plano que pasando por el punto B, tenga una paralela a mn, y naturalmente si BT tiene una pendiente igual o inferior a la de divagación (BE), pero superior a la de compensación (BH), faltará totalmente el cono de la 1° fase. Si aquella pendiente es inferior a la de compensación entonces el depósito se realiza divagando las aguas y remontando el torrente, según la 4° fase.

El que la llanura tenga una pendiente en sentido longitudinal del torrente, si es menor que la de compensación, no tiene otro efecto que alargar la pirámide de la 2° fase; en el caso de que sea igual entonces no hay depósito y la 2° fase dura indefinidamente. Si es mayor habrá erosión y el torrente tenderá a encajarse.

Finalmente si la llanura tiene una pendiente transversal, los fenómenos son los mismos y todo se reduce a que las pirámides de depósito de la 2° y 3° fase no resultarán simétricas.

IMPORTANCIA DE LA SEGUNDA FASE

La 1° fase es generalmente breve, pero la 2° fase suele durar mucho. Pero en relación a la seguridad que otorga la 2° fase, es asombroso encontrar cultivos, pueblos y hasta ciudades edificadas en lugares continuamente expuestos a catástrofes que el torrente produce frecuentemente. Es que estos pueblos se edifican antes de que el lecho de deyección entrase en la 3° fase de su formación cuando el peligro era muy pequeño y estaba sobradamente compensado por la fertilidad del terreno que se podía cultivar.

Durante la 2° fase hay cierta seguridad para los cultivos y pueblos edificados sobre sus flancos o en sus proximidades, puesto que durante toda esa fase el torrente pasa por el canal formado en su arista superior sin desparramarse por sus laderas y los arrastres la prolongan. En el caso de una crecida extraordinaria u obstrucción del canal la fase 2° se rompe rápidamente, generando grandes trastornos.

Si el río al cual afluye el torrente pasa a poca distancia de la desembocadura del torrente en una llanura y trunca la pirámide, y si además tiene suficiente potencia de arrastre para llevarse los materiales, resulta que la 2° fase es interminable. El torrente desemboca en el río cayendo a él por la generatriz del último cono formado que tiene la pendiente de divagación siempre grande. Las crecidas moderadas con pocos arrastres, tenderán a abarrancar este cono y rebajar el fondo del canal, con lo que encaja el torrente y causa una profundización del cauce, dando mayor seguridad al mismo.

En el caso, en el que el río se retire, por obras hidráulicas o instalación de pueblos sobre sus riberas, antes del encajonamiento del cauce, entonces los materiales comienzan a

acumularse nuevamente y se comienza a desarrollar la 3° fase, desapareciendo la seguridad otorgada por la 2° fase.

DISEÑO DE DIQUES DE CORRECCIÓN DE TORRENTES

Los diques responden como grandes filtros que permiten el depósito de rocas, troncos, ramas y derivan solo los fluidos a las áreas ocupadas, minimizando el riesgo destructivo. En todos los casos después de que los diques hayan soportado avenidas torrenciales, es necesario verificar el estado de la estructura en época de estiaje, para soportar una nueva avenida.

Cuando se acomete el programa de estabilización de un determinado torrente mediante la construcción de diques pequeños escalonados, se tiene como objetivo final la transformación de un curso natural de agua, caracterizado por una fuerte pendiente continua, en otro provisto de una serie de pequeñas obras implantadas a lo largo del cauce, que lo convierten en una especie de escalonamiento constituido por tramos con pendientes menores a la original, seguidos de saltos o caídas.

Los diques deben colocarse en las partes medias y/o altas del cauce de las quebradas, recomendándose ubicarlos sobre el inicio de la garganta del torrente. La ubicación y el distanciamiento entre una secuencia de diques depende de las condiciones del terreno, del caudal generado por el arroyo o río y de la profundidad del cauce.

El poder destructivo del flujo del agua y los sedimentos, que anteriormente se precipitaban pendiente abajo por el cauce natural, queda muy disminuido, o eliminado, al ser transformado dicho flujo en otro de menor velocidad, que va disipando gradualmente su energía en las caídas sucesivas a lo largo del torrente, Suárez (1993).

Mediante la construcción de diques es posible controlar la denudación, erosión y degradación que caracteriza a muchas cuencas de montaña obteniendo con el tiempo un estado de equilibrio, reforestación y estabilidad general. Además se considera como una parte muy específica de las labores y acciones que se requieren para lograr la recuperación y estabilización integral de una determinada cuenca por lo que deben combinarse con la utilización de técnicas biológicas y la ejecución de otros trabajos en las cuencas y en los cauces.

METODOLOGÍA BÁSICA DE DISEÑO DE DIQUES

El primer paso en la construcción de una obra es definir el objetivo de su construcción, que puede ser:

- a. Resistir el desgaste del fondo de las cárcavas o quebradas por efecto del arrastre ejercido por el agua.
- b. Estabilizar las pendientes del lecho en las cárcavas o quebradas.
- c. Preparar las condiciones para la plantación y la siembra en cárcavas o quebradas.
- d. Otros.

Para iniciar las actividades de diseño se necesita evaluar las pendientes del terreno, de valles y cauce para determinar topográficamente el lugar de emplazamiento. Esto se logra a partir de la construcción de perfiles transversales y longitudinales a campo, en el sitio de ubicación tentativa de la obra. Además se debe contar con datos del caudal líquido, que se

pueden obtener mediante modelización hidrológica (Hymo, HEC, CN, entre otros) y/o por toma de datos con limnógrafo y estaciones de aforo.

En relación al caudal sólido emitido por ese torrente, se necesitan datos de volumetría de sedimentos transportados, rugosidad del cauce y planicie de inundación y proporción de acarreo de sedimentos, entre otros.

También se debe conocer el material que se utilizará para la construcción de la obra. Los materiales más utilizados para la construcción de diques son:

1. Hormigón sin piedras o muy chicas
2. Piedra y hormigón
3. Mampostería (con mortero de cemento) construido con piedras brutas o poco labradas unidas con cemento.
4. Gaviones formados por piedras dentro de jaulas de alambre en forma de paralelepípedo rectangular, alambre galvanizado o acerado.
5. Mampostería en seco que son sólo con piedras ordenadas, sin cemento, piedras grandes y paredes de asiento plano.

Con estos datos básicos se recomienda la aplicación de la metodología de cálculo propuesta por García Nájera (1962) para definir la pendiente de compensación, las dimensiones estructurales del dique y comprobar las fuerzas de estabilización - resistencia a las solicitaciones de la obra.

PARTES CONSTITUTIVAS DE UN DIQUE

La vista transversal de un dique expresa diferentes partes según su distribución en el cauce. La obra se forma de dos partes principales: el cuerpo y las dos alas laterales. Dentro del cuerpo de obra se establece el vertedero o cubeta y los mechinales.

La Figura 7.39 presenta las partes principales de la obra.

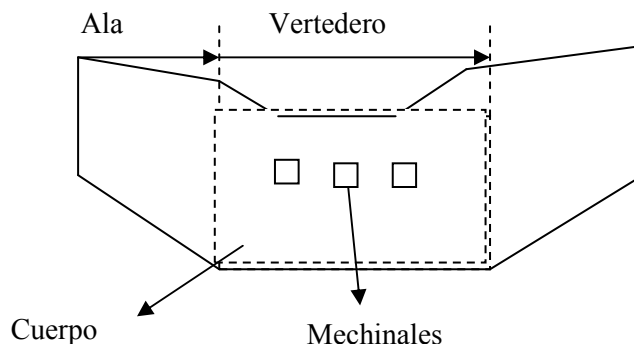


Figura 7.39. Partes principales de la obra.

El vertedero está ubicado en la parte superior del cuerpo de obra y centrado, principalmente, sobre el área de mayor profundidad de obra, debido a que su función es permitir

la circulación del agua de mayor velocidad y conducir el agua una vez estabilizado el torrente. Éste presenta forma rectangular o trapezoidal, siendo este último el más usado, y debe poseer un ancho y profundidad dependiente de la forma del terreno, para reducir la erosión aguas abajo.

Aparte del vertedero, los elementos más comunes y sencillos de evacuación del agua en los diques de corrección de torrentes son los mechinales. Los mechinales son orificios o conductos sobre el cuerpo o paramento, que atraviesan la masa del dique a diferentes alturas, con cierta pendiente aguas abajo, por donde pasa el agua y el sedimento más fino. Cumplen diferentes funciones a lo largo de la vida útil del dique, según progresa la colmatación por sedimentos. Mientras el mechinal no es alcanzado por el aterramiento, contribuye a la capacidad de desagüe, con lo cual ayuda a evitar el desbordamiento. Luego del aterramiento, el mechinal drena la cuña de sedimentos aguas arriba, para disminuir el volumen de agua en la cuña, aumentando la coherencia de la misma. Al finalizar este período la función de los mechinales es casi nula. Su tamaño depende del tamaño del sedimento a retener y se ubican debajo del vertedero, no sobre el ala. Generalmente presentan forma circular o cuadrada, con las dimensiones aproximadas, como se presenta en la Figura 7.40.

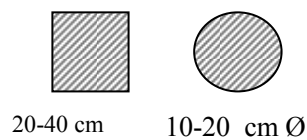


Figura 7.40. Dimensionamiento de los mechinales.

Las alas deben poseer una pendiente sobre el terreno de aproximadamente entre 5-20% para seguridad cuando el nivel de agua supera el vertedero.

En las Figura 7.41 a y b se presentan las vistas para el dimensionamiento transversal y lateral más detallado de las partes principales de la obra, donde se definen los componentes estructurales para su cálculo.

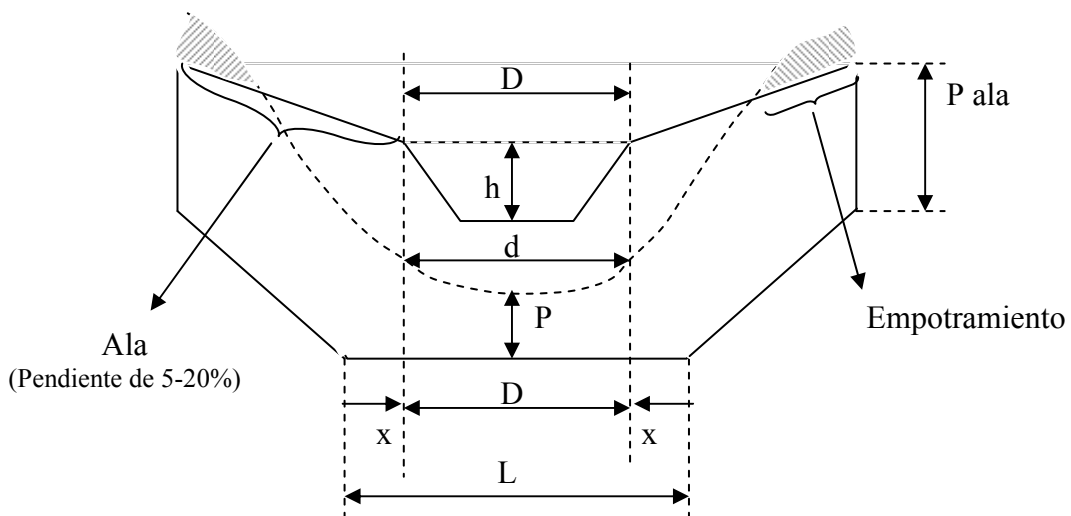


Figura 7.41 a. Corte transversal para el dimensionamiento de las partes principales de la obra.

Siendo:

d: Ancho lecho/cauce

D: Ancho vertedero

$D \leq d$

H: Profundidad del vertedero ($\pm 1-2m$)

L: Ancho fundamento (ancho cauce + x cm)

P ala: Profundidad del ala

P: Profundidad del fundamento (distancia entre fondo del lecho y borde inferior del dique), se recomienda que un dique torrencial alcance entre 0,5 y 0,8m.

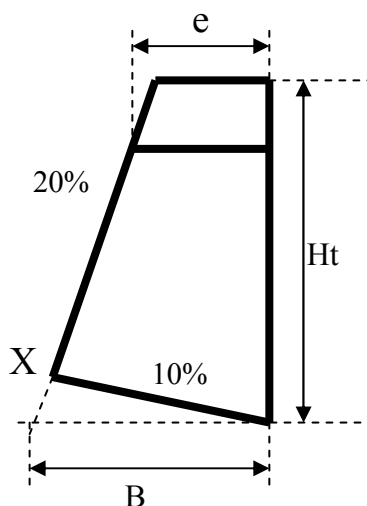


Figura 7.41 b. Corte lateral para el dimensionamiento de las partes principales de la obra.

Ht: Altura total dique (0,5 – 6 m)

B: Base del dique

e: Espesor del dique = Coronación (0,6-1,50 m – generalmente 1 metro)

X: Punto crítico de movimiento de la obra.

En el punto X se ejerce mucha presión sobre el suelo, por lo tanto debe ser resistente, lográndose por medio de un buen diseño de estabilidad de la estructura del cuerpo del dique.

ESTABILIDAD DE UN DIQUE

Si suponemos que una corriente saturada tiene una velocidad tal que cuando pasa sobre un lecho formado por acarreo de igual naturaleza y composición granulométrica que los que

constituyen el caudal sólido de la corriente, y algunos de estos materiales se depositan y otros se incorporan a la misma, quedando la proporción de acarreo prácticamente constante, entonces se dice que este lecho adoptó la pendiente de compensación.

El método para su cálculo, permite determinar la velocidad que tendrán las aguas desprovistas de acarreo. Conocida esta velocidad (u) y la pendiente natural (J) puede deducirse la pendiente de compensación (j).

Para su determinación se aplica el procedimiento propuesto por J.M.García Nájera en Principios de Hidráulica Torrencial (1962) y el detallado en “La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación” de J.A.Mintegui Aguirre y F.López Unzu (1990).

Para los ajustes finales de las ecuaciones, se recomienda que las iteraciones se realicen con la ayuda de una planilla de cálculo.

La estabilidad del dique está dada por la resultante R de las fuerzas de peso propio de la obra (G) y empuje del agua y/o sedimentos (E), donde se considera que R debe pasar por la base del dique, particularmente por el tercio central, generando una tensión de valor cero. En este caso R se transmite al suelo.

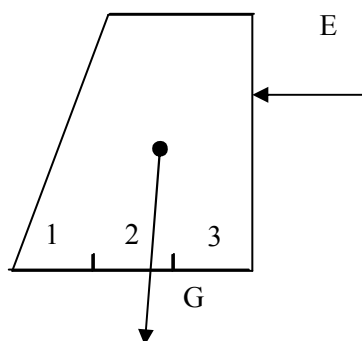


Figura 7.42. Fuerza ejercidas sobre un dique.

E: Empuje del agua o sedimentos aguas arriba. G: Peso propio de la obra.

Si el momento de E (fuerza de empuje) de la tierra y el agua es menor que el momento de estabilidad dado por el peso G , no se vuelca.

El empuje del agua, cuando todavía no está colmatado el dique, es muy importante, ya que deberá soportar diferentes esfuerzos según el tipo de caudal líquido emitido por cada tormenta. En el caso de que el aterramiento aún no se haya establecido, el empuje del agua en las diferentes tormentas es variable. Por ejemplo, en la Figura 7.43 se presentan diferentes almacenamientos de agua en el cauce para diferentes descargas hídricas (caudales) de avenida de índole normal (en el caso de la izquierda) y tipo torrencial (en el caso de la derecha), las cuales generarán diferentes E sobre una obra instalada en ese sitio.

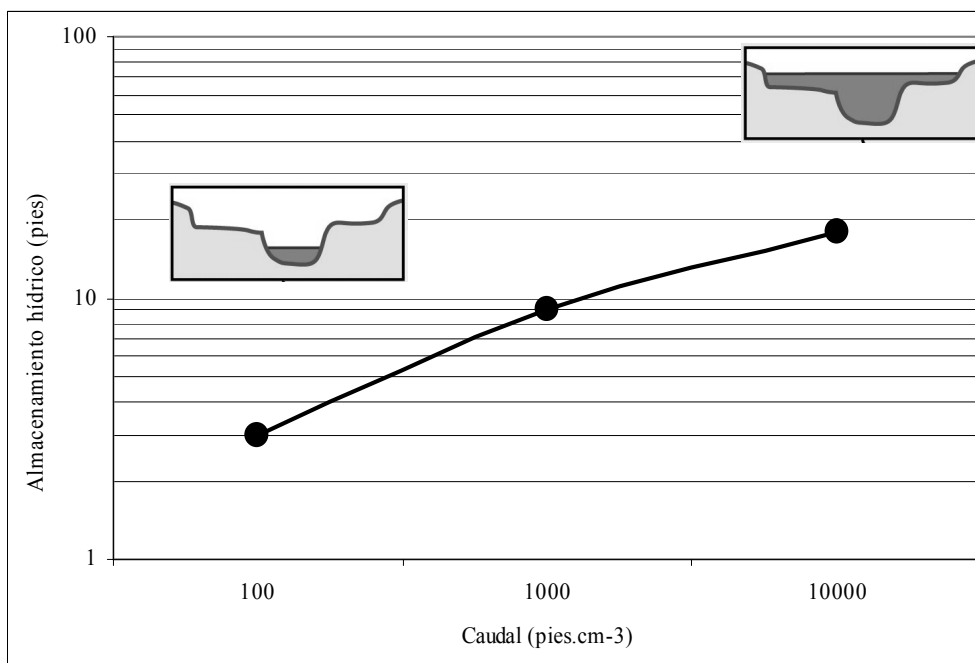


Figura 7.43. Relación de caudal – almacenamiento hídrico para una cuenca.

Los esfuerzos más comunes que se presentan sobre el cuerpo de la obra son el de corte por desplazamiento sobre su base y el esfuerzo de vuelco. Estos esfuerzos de empuje son generados primeramente por el agua y posteriormente por los sedimentos acumulados desde la base hasta la coronación, sucesivamente en el tiempo.

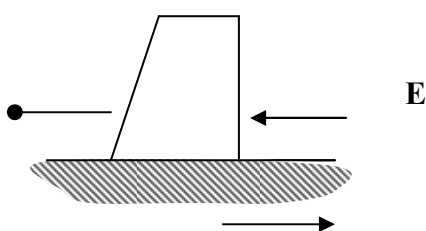


Figura 7.44. Fuerza de empuje (E) sobre la obra y el terreno de emplazamiento.

EFFECTOS HIDROLÓGICOS DE LOS DIQUES

El dique durante su vida genera efectos muy diversos, sobre el ambiente puntual, local y hasta regional, y de índole desde ambiental hasta socio – económico y cultural. Algunos de estos efectos se presentan a continuación:

1. Sobre el comportamiento hidráulico de la corriente

- Aguas arriba del dique se genera el depósito de sedimentos (retención total ó selectiva), la elevación del lecho, el ensanchamiento de la sección, la reducción de la pendiente, el almacenamiento de agua (coadyuva a laminación, recarga de acuíferos)

• Aguas abajo del dique, principalmente controla el flujo con alta capacidad erosiva y de transporte por medio de estructuras de disipación.

2. Tipo funcionales

La función básica de un dique es la retención de sedimentos, la cual se acompaña de la consolidación de lecho y laderas inestables, ayuda a la recarga de acuíferos, la laminación y el control de aludes, entre otros.

3. Sobre infraestructuras

La defensa de puentes, drenajes, encauzamientos e infraestructuras viarias es muy importante, además produce la prolongación de la vida útil de embalses aguas abajo, reduce los efectos negativos de circulación de caudales líquidos y sólidos en entornos urbanos y periurbanos

4. Ambientales

Se reconoce que provoca una alteración de la dinámica morfológica de barrancos, torrentes y ramblas y sobre la transitabilidad para la ictiofauna.

DIMENSIONAMIENTO DE UN DIQUE TORRENCIAL

La metodología de cálculo para el dimensionamiento de un dique de características torrenciales fue adaptada del libro “Principios de Hidráulica Torrencial” de García Nájera (1962).

Como se mencionó anteriormente, un torrente esta formado por cuenca de recepción (alimentación del torrente), garganta (concentración de caudales), cono de deyección y canal de desagüe (evacuación del flujo). A partir de la delimitación de estas partes se puede comenzar con medidas de protección (cuenca de recepción) o diques de corrección de cauces (garganta), para regular el caudal pico de un torrente por medio de un proyecto de una obra de retención o consolidación. En relación al ancho del cauce es directamente proporcional al caudal sólido (Q_s) y al caudal líquido (Q).

El modelo de cálculo para el dimensionamiento de un dique de control de torrentes de hormigón, se basa en determinar las diferentes características estructurales del mismo y los empujes que se generan sobre el cuerpo, por medio de la aplicación de la conservación de la energía a una corriente con arrastres (García Nájera, 1962).

La determinación y diseño del dique se realiza en tres etapas:

- 1) Caracterización del sitio de emplazamiento del dique.
- 2) Determinación de la pendiente de compensación.
- 3) Dimensionamiento hidráulico de la obra.

A continuación se desarrolla cada etapa.

1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE EMPLAZAMIENTO DEL DIQUE

La toma de datos del sitio de emplazamiento se realiza mediante un análisis topográfico en el terreno por medio de:

- ✓ Diagrama del corte transversal del curso de agua y planicies de inundación.
- ✓ Esquema del corte longitudinal del curso de agua caracterizando un tramo de mayor longitud posible.
- ✓ Detalle de la pendiente longitudinal del cauce del tramo anterior y de las planicies de inundación.
- ✓ Caudal en el lugar de emplazamiento Q (m³/s)
- ✓ Pendiente longitudinal del cauce J (%)

Además se deben conocer otros datos que se pueden generar en gabinete, que se obtienen del procesamiento de los datos de campo (corte transversal), como ser:

- ✓ Ancho medio del cauce b (m)
- ✓ Ancho del corte transversal a (m)
- ✓ Longitud del dique L (m)
- ✓ Longitud de la cubeta Lc (m)
- ✓ Altura total del dique Ht (m)

En relación a la caracterización de la pendiente de compensación, se necesitan datos que son de conocimiento público y/o se pueden obtener de tablas de hidrología general e hidráulica, que según García Nájera (1962) presentan el valor de:

- ✓ Aceleración de la gravedad (g) (m.s⁻¹) = 9,81
- ✓ Peso específico del agua (ω_0) (Mg.m⁻³) = 1
- ✓ Peso específico de los materiales de arrastre (δ) (Mg.m⁻³)
 - Piedras ----- 2,65
 - Mamostería hidráulica ----- 2,20
- ✓ Densidad del hormigón (δh^o) = 2,4
- ✓ Proporción de arrastres (χ) = 0,05 a 0,20
- ✓ Rugosidad del lecho (β) = 1,75 a 2,00
- ✓ Volumen máximo del material de arrastre (V) (m³) = 0,2 a 0,5
- ✓ Volumen medio del material de arrastre (Vm) (m³) = 0,00001 a
0,00004
- ✓ Coeficiente de forma de los acarrees en movimiento (λ).
 - Piedra esférica ----- 0,83
 - Arena ----- 0,80 – 0,94
 - Grava ----- 2,10
 - Hojas de pizarra ----- 2,63

✓ Coeficiente de rugosidad	(γ).
Madera cepillada -----	0,06
Mampostería – ladrillo -----	0,16
Mampostería en seco - piedra partida-----	0,46
Lecho de tierra muy liso -----	0,85
Canal de tierra corriente -----	1,30
Canal de tierra con resistencias -----	1,75
Lecho muy rugoso -----	≥ 2
✓ Coeficiente de seguridad	(c) = 1 a 1,5
✓ Coeficiente rozamiento de obra	(f)
Arena -----	0,55
Hormigón sobre roca -----	0,70

2. DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE DE COMPENSACIÓN

El procedimiento de cálculo de García Nájera (1962) permite determinar la pendiente de compensación cumpliendo la ley de transporte máximo, siguiendo la forma de cálculo por iteraciones sucesivas a partir del caudal característico (q) del torrente y determinar la velocidad límite de arrastre (u), que se establece debido a que es la velocidad del agua necesaria y suficiente para provocar el movimiento de los acarreos (Fórmula 7.3).

$$u^7 + q \cdot u^4 - 3 \cdot \zeta^2 \cdot q = 0$$

Fórmula 7.3. Velocidad límite de arrastre

La ecuación de la Fórmula 7.3 permite calcular la velocidad que tendrán las aguas desprovistas de acarreos (u), es decir la velocidad de la suspensión en cuyo seno se mueven todos los materiales considerados como acarreos, suponiendo que éstos no existan. Conocida esta velocidad se puede deducir la pendiente que le corresponde, es decir la pendiente de compensación.

En la Tabla 7.2 se expone un esquema de la Metodología desarrollada por García Nájera (1962), para el cálculo de la pendiente de compensación de un torrente, adaptada por los autores. La misma se inicia en la primera columna de la izquierda, donde se presentan los datos necesarios para iniciar el cálculo. Posteriormente se inicia la secuencia de fórmulas a seguir para lograr en la columna de la derecha el valor de pendiente de compensación.

Q	$q = g \cdot Q \cdot (2 \cdot b)^{-1}$				
b					
g					
δ	$C = \frac{87}{1 + \frac{\beta}{\sqrt{h}}}$	$C_s = C \cdot \sqrt{\frac{\omega_0^3}{(1 + \chi) (\omega_0 + \chi \cdot \delta)^3}}$	$\zeta = C_s^2 \cdot \gamma$	$u^7 + q \cdot u^4 - 3 \cdot \zeta^2 \cdot q = 0$	$j = \frac{g \cdot u^3}{2 \cdot C_s^2 \cdot q}$
χ					
β					
C					
ω_0	$\omega = \omega_0 + \chi \cdot (\delta - \omega_0)$	$\gamma = \frac{\sqrt{0,385 \cdot \delta \cdot (\delta - \omega) \cdot \lambda \cdot V}}{\omega \left[1 + \sqrt[4]{10,5 \cdot \left(\frac{V}{V_m} - 1 \right)} \right]}$			
V					
Vm					

Tabla 7.2. Esquema de la secuencia de cálculo de la pendiente de compensación de un torrente (García Nájera, 1962). Adaptación por los autores.

Donde:

- b: Ancho medio del cauce
- C: Coeficiente de Bazin
- Cs: Coeficiente de Bazin Modificado
- g: Aceleración de la gravedad
- j: Pendiente de compensación
- Q: Caudal
- q: Caudal característico
- u: Velocidad límite de arrastre
- V: Volumen Máximo de materiales
- Vm: Volumen Medio materiales
- γ : Fuerza límite de arrastre
- δ : Peso específico de los materiales de arrastre
- χ : Proporción de arrastres
- β : Rugosidad del lecho
- ω_0 : Peso específico del agua

La secuencia de cálculo de la pendiente de compensación de García Nájera, como se presenta en la Tabla 7. 2, se inicia con el cálculo del caudal característico, cuya fórmula es la 7.4.

- Caudal característico (q) ($m^3 \cdot m^{-3}$)

$$q = g \cdot Q \cdot (2 \cdot b)^{-1}$$

Fórmula 7.4. Caudal característico

Al ser u (velocidad del movimiento de una corriente con arrastres) una incógnita, se opta por tomar un valor inicial de Coeficiente de Bazin (C), según la Metodología de García Nájera (1962) para comenzar el cálculo con iteraciones sucesivas, como se indica a continuación (Fórmula 7.5.).

- Coeficiente de Bazin (C) ($m^2 \cdot s^{-1}$)

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\beta}{\sqrt{h}}}$$

Fórmula 7.5. Coeficiente de Bazin

En el caso de poseer lechos de gran rugosidad, C se expresa con la Fórmula 7.6.

$$C = \frac{87}{1 + \frac{2}{\sqrt{h}}}$$

Fórmula 7.6. Coeficiente de Bazin para lechos de gran rugosidad

- El valor h (m) corresponde a la profundidad y sustituye al radio hidráulico en cauces anchos. Su valor está dado por la Fórmula 7.7. y depende de u, por lo tanto formará parte de la iteración del cálculo.

$$h = \frac{Q}{(b \cdot u)}$$

Fórmula 7.7. Profundidad

- Según García Nájera (1962) el Peso específico del agua con arrastres (ω) ($Mg \cdot m^{-3}$) se determina con la Fórmula 7.8.

$$\omega = \omega_0 + \chi \cdot (\delta - \omega_0)$$

Fórmula 7.8. Peso específico del agua con arrastres

- Coeficiente de Bazin para una suspensión ($C_s = m^2 \cdot s^{-1}$) se establece según García Nájera (1962) con la Fórmula 7.9.

$$C_s = C \cdot \sqrt{\frac{\omega_o^3}{(1 + \chi) (\omega_o + \chi \cdot \delta)^3}}$$

Fórmula 7.9. Coeficiente de Bazin para una suspensión

El valor de χ puede tomarse como 0,10, ya que no es corriente en una suspensión verdadera una mayor proporción de elementos sólidos, y por otra parte, en un régimen muy turbulento de las crecidas de los torrentes hay muchos materiales que, sin estar en verdadera suspensión, marchan como si lo estuvieran.

- La Fuerza límite de arrastre (γ) (m) se determina con la Fórmula 7.10.

$$\gamma = \frac{\sqrt{0,385 \cdot \delta \cdot (\delta - \omega) \cdot \lambda \cdot V}}{\omega \left[1 + \sqrt[4]{10,5 \cdot \left(\frac{V}{V_m} - 1 \right)} \right]}$$

Fórmula 7.10. Fuerza límite de arrastre

- Con el valor C_s se obtiene un primer valor de ζ ($m^2 \cdot m^{-2}$) (Fórmula 7.11):

$$\zeta = C_s^2 \cdot \gamma$$

Fórmula 7.11.

- Con la ecuación de séptimo grado de la Fórmula 7.12, por medio de iteraciones sucesivas, se busca un valor de u ($m \cdot s^{-1}$) que tienda a anularla.

$$u^7 + q \cdot u^4 - 3 \cdot \zeta^2 \cdot q = 0$$

Fórmula 7.12.

- Obtenido el valor de u (Fórmula 7.3) se puede redefinir el h (Fórmula 7.7). Este valor se reemplaza en la Fórmula del Coeficiente de Bazin (C_s) (Fórmula 7.9) y se obtiene el valor final de C . A partir de estos datos se puede calcular nuevamente C_s y ζ con las Fórmulas 7.9 y 7.11.

Los valores de q y de γ no varían.

Para determinar el valor final de u , se recomienda la ejecución de iteraciones hasta que la Fórmula 7.12 se iguale a cero, alcanzando finalmente el valor de u definitivo.

- Para obtener la pendiente de compensación (j), se aplica la Fórmula 7.13.

$$j = \frac{g \cdot u^3}{2 \cdot C_s^2 \cdot q}$$

Fórmula 7.13. Pendiente de compensación

La pendiente de compensación (j) se puede expresar en forma decimal y/o porcentual.

En la Figura 7.45 se presenta el ábaco de la pendiente de compensación generado por García Nájera (1962), acompañando y facilitando a la metodología de cálculo.

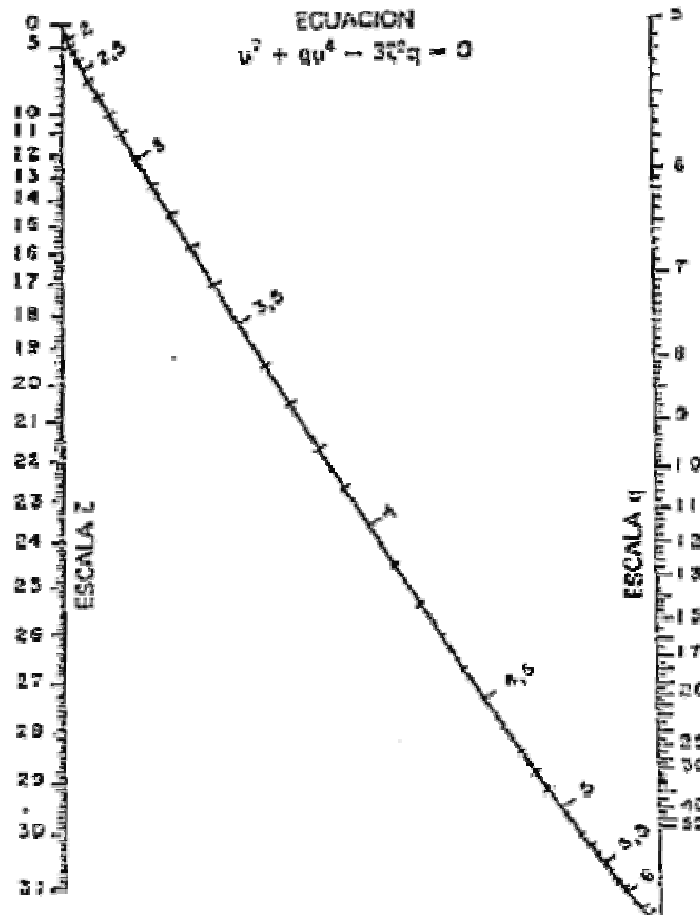


Figura 7.45. Ábaco para determinar la pendiente de compensación.

La longitud que alcanza la pendiente de compensación (L) se expresa con la Fórmula 7.14.

$$L = \frac{H}{(J - j)}$$

$$H = L \cdot (J - j)$$

Fórmula 7.14. Longitud de la pendiente de compensación

Siendo:

- L: Longitud del aterramiento.
- H: Altura del aterramiento.
- J: Pendiente natural del terreno.
- j: Pendiente de compensación.

En la Figura 7.46 y 7.47 se presentan dos cortes topográficos donde se expresan las curvas de nivel de un área montañosa y el diagrama de la triangulación del aterramiento de un posible dique.

En la Figura 7.46 el aterramiento está gráficamente mal establecido, debido a que es incorrecta su ubicación y diseño de aterramiento, por lo cual L está mal proporcionada, provocando un error en el cálculo de la cantidad de sedimentos acumulados sobre el dique cuando este se colmate. En la Figura 7.47 se presenta un diseño de aterramiento acorde al corte transversal del terreno. En ambas figuras la línea que corta en dos al triángulo expresa el sitio donde se establecería el ancho medio del aterramiento.

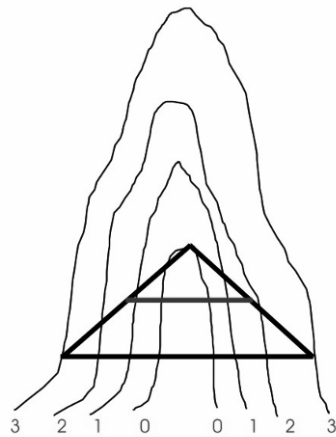


Figura 7.46

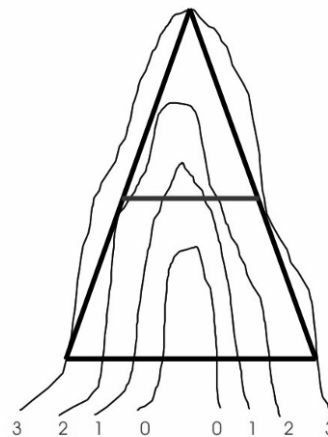


Figura 7.47

La determinación de la longitud y ancho de la potencial pendiente de compensación se determina en forma gráfica según la Figura 7.47.

3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA OBRA

El procedimiento para el dimensionamiento de la obra se basa en los datos de campo determinados con el corte transversal y longitudinal del curso de agua, la pendiente longitudinal del cauce y la pendiente de compensación, obtenida por la Metodología de García Nájera (1962).

El procedimiento cumple con una serie de etapas:

1. Dimensionamiento de la cubeta.
2. Determinación del espesor de coronación (e).
3. Cálculo del ancho de la base (B).
4. Verificaciones de las condiciones de estabilidad del dique.
5. Determinación de la defensa al pie.
6. Definición de mechinales.

A continuación se presenta el desarrollo del cálculo de las diferentes etapas.

1. Dimensionamiento de la cubeta

Las dimensiones de la cubeta permiten establecer el futuro direccionamiento del dique. Se inicia el cálculo con la determinación de la longitud y altura de la cubeta o vertedero, se recomienda que present un tamaño igual o mayor a la altura de la lámina vertiente. Se obtiene por la Fórmula de Kozeny. Juntamente con la altura total del dique (Ht) se puede determinar la altura útil del dique (H) necesaria en el cálculo del largo de la pendiente de compensación.

De esta manera se obtienen las características de la cubeta y se define su forma (trapezoidal – rectangular), considerando una inclinación de ambos lados de aproximadamente 45%. El borde superior del dique tendrá una inclinación del 3% de las alas, desde los bordes hacia el centro.

- Longitud de cubeta (Lc) (m)

$$Lc \cong \frac{1}{3} \cdot L$$

Fórmula 7.15. Longitud de cubeta

- Altura de cubeta (hc) (m)

$$hc = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot Lc^2}}$$

Fórmula 7.16. Altura de cubeta

La altura de la cubeta (hc) es aumentada un 5% como revancha de seguridad.

- Altura útil del dique (H) (m)

$$H = Ht - hc$$

Fórmula 7.17. Altura útil del dique

2. Espesor de coronación (e):

Su determinación se realiza a partir de la Fórmula 7.18, empírica (en metros), con los datos mencionados para la determinación de la pendiente de compensación.

$$e = c \cdot \left(\frac{\omega \cdot hc}{f \cdot \delta h^{\circ}} \right)$$

Fórmula 7.18. Espesor de coronación

3. Ancho de la base (B)

Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación (en metros).

$$B = \sqrt{\left(\left(\frac{5}{4} \cdot e^2 \right) + \left(\frac{\omega}{\delta h^{\circ}} \cdot H^2 \right) \right)} - \frac{e}{2}$$

Fórmula 7.19. Ancho de la base

4. Condiciones de estabilidad del dique

4.1. Cálculo de las fuerzas intervinientes:

a- Fuerza desfavorable: Empuje hidrostático ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-1}$).

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H^2$$

Fórmula 7.20. Empuje puntual

$$E = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H^2 \cdot a$$

Fórmula 7.21. Empuje de toda la estructura

b- Fuerza favorable: Debida al peso de la obra ($Mg \cdot m^{-1}$).

$$G1 = \delta h^{\circ} \cdot e \cdot H$$

$$G2 = \frac{1}{2} \cdot (B - e) \cdot \delta h^{\circ} \cdot H$$

$$G = G1 + G2$$

Fórmula 7.22. G: Peso de la obra.

4. 2. Comprobaciones de estabilidad

Para determinar la estabilidad de un dique se deben cumplir tres condiciones: estabilidad al vuelco, al deslizamiento y a las tensiones admisibles, siendo estas últimas determinadas por tres condiciones particulares. A continuación se expone la metodología de cálculo de cada una.

a- Estabilidad al vuelco:

$$Me = G \cdot (X)$$

$$X = \frac{11}{9 \cdot e}$$

$$Mv = Ep \cdot \frac{1}{3} \cdot H$$

Fórmula 7.23. Me: Momento estabilizante ($Mg \cdot m^{-1}$) - Mv: Momento de vuelco ($Mg \cdot m^{-1}$)

$$\left(\frac{Me}{Mv} \right) \geq 1,5$$

Cumple condición

b- Estabilidad al deslizamiento:

$$Fr = G \cdot f$$

Fórmula 7.24. Fr (Mg.m⁻¹) Fuerza de roce

$$\left(\frac{Fr}{Ep}\right) \geq 1,1 \quad \text{Cumple condición}$$

$$\left(\frac{Ep}{G}\right) < 0,7 \quad \text{Cumple condición}$$

c- Condición de las tensiones:

$$MR = Me - Mv$$

Fórmula 7.25. MR: Momento resultante (Mg.m⁻¹)

c.1. Determinación de la excentricidad (e*):

$$e^* = \left(\frac{MR}{G}\right) - \left(\frac{B}{2}\right) = m - \left(\frac{B}{2}\right)$$

Fórmula 7.26.: Excentricidad de la obra (e*)

$$e^* \leq \frac{B}{6}$$

c.2. Determinación de tensiones extremas:

$$\sigma_1 = \frac{G}{B} \cdot \left[1 + \left(6 \cdot \frac{e^*}{B} \right) \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{G}{B} \cdot \left[1 - \left(6 \cdot \frac{e^*}{B} \right) \right]$$

Fórmula 7.27. Tensiones extremas.

Siendo:

 σ_1 Tensión extrema aguas abajo (máxima) σ_2 Tensión extrema aguas arriba (mínima)

c.3. Determinación de la tensión media:

Cuando la σ_2 es mayor que cero (> 0) $\sigma_m = \frac{1}{4} \cdot (3 \cdot \sigma_1 + \sigma_2)$

Cuando la σ_2 es menor o igual que cero (≤ 0) $\sigma_m = \frac{3}{4} \cdot \sigma_1$

Cumple condición cuando la tensión media entra dentro de los siguientes rangos, según corresponda el sitio de emplazamiento de la obra:

σ_m	Suelos de grava	entre 5 y 10 Mg.m ⁻² (= kg.cm ⁻²)
	Suelos de arenas gruesas	entre 3 y 5 Mg.m ⁻²
	Suelos de arenas medias	entre 1,5 y 3 Mg.m ⁻²
	Suelos granulados	mayor de 2 Mg.m ⁻²
	Suelos cohesivos	mayor de 3 Mg.m ⁻²

La forma gráfica del diseño de un dique para determinar la estabilidad del mismo según el núcleo central de la sección, es estableciendo gráficamente el área por dentro de la cual debe pasar la carga resultante para evitar el esfuerzo de tracción, por medio de la realización de un polígono funicular.

En una sección rectangular que represente las dimensiones ya calculadas del dique, el núcleo central es un rombo cuyas diagonales son los tercios centrales de los ejes principales de la sección. La resultante debe pasar por el tercio medio (núcleo central).

Considerando un dique de forma trapezoidal, el empuje (E) y el peso (G) se representan como un diagrama de tensiones de resistencia de materiales, transportando cada línea paralelamente sobre el diagrama del dique (Figura 7.48).

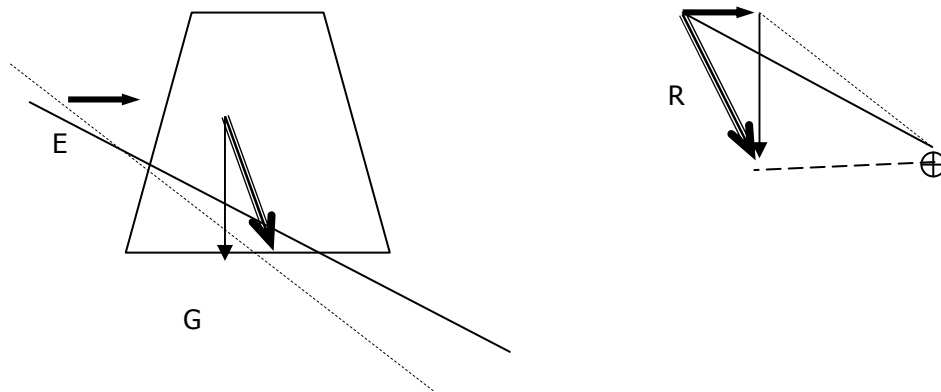


Figura 7.48. Diagrama resultante sobre un dique trapezoidal.

5. Defensa al pie

Es una infraestructura unida al dique aguas abajo del mismo, necesaria para impedir el descalce de las fundaciones por causa de la erosión que produce la caída de la lámina vertiente. Se considera que debe ser mayor o igual a dos veces la altura total de la obra. La longitud de la defensa se calcula por la Fórmula de Angherholzer:

$$d = \left(u + \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2 \cdot H}}{g} \right)$$

Fórmula 7.28. Longitud de la defensa

En el caso de la realización de un zampeado, la longitud debe ser mayor que la longitud de la lámina vertiente (lv), que se determina con la Fórmula 7.29.

$$lv = \sqrt{2 \cdot H \cdot hc + hc^2}$$

Fórmula 7.29. Longitud de la defensa con zampeado.

6. Mechinales

Para aliviar el empuje que debe soportar la obra se dejan ventanas que sirven para drenar el aterramiento. Pueden tener forma circular o rectangular y presentar una distribución a tresbolillo.

La cantidad óptima de mechinales en un dique, se estima que es uno cada 5 a 8 m² de paramento.

PROPÓSITO DE LA CORRECCIÓN DE TORRENTES

Es importante definir muy bien el propósito de una medida de corrección de torrentes tanto sobre el cauce como sobre las laderas en una cuenca hidrográfica, debido a que cuando se realiza una obra fluvial que altere las condiciones de estabilidad de un río, se producirá una reacción tendente a volver, en lo posible, a la situación inicial, que era de equilibrio.

Como el equilibrio del río con su contorno, es un equilibrio dinámico, fruto del equilibrio entre erosión, transporte y sedimentación; éste puede ser alterado por distintas causas. Por ello, antes de realizar cualquier actuación en un río deberán ser evaluadas las situaciones antes y después, desde todos los puntos de vista.

Por lo tanto se recomiendan actuaciones lo menos “duras” posible, evitando fuertes modificaciones en sección, pendiente, trazado en planta, etc.

Según Hudson (1982), en el control de la erosión por cárcavas, es más eficaz un bulto de fertilizante que un bulto de cemento, ya que aunque las obras de concreto son a veces necesarias, es preferible restaurar las cárcavas mediante el uso de la vegetación. Las estructuras ya sean de hormigón, concreto, madera o cualquier otro tipo de material de construcción, se deterioran y socavan con el tiempo, lo que las hace menos eficaces. La vegetación por el contrario, al multiplicarse, prospera y mejora a través de los años.

Un ejemplo de una obra deficiente de control de torrentes y protección para el avance de una cárcava se presenta en la Figura 7.49. En cambio una obra de tipo dique de consolidación de laderas con muy buenos resultados se expone en la Figura 7.50, siendo estos trabajos de restauración hidrológico-forestal en el Monte de Utilidad Pública N° 206 "Valcaliente, Galano y Cabezo la Torre", perteneciente al ayuntamiento de Aldeanueva de Ebro (La Rioja), España, realizado por el Ingeniero de Montes José Antonio Ruiz de los Ríos.



Figura 7.49. Obra incorrecta para corrección de cárcavas



Figura 7.50. Trabajos de restauración hidrológico-forestal.

ORDENACIÓN AGROHIDROLÓGICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

CAPÍTULO 8

La ordenación agrohidrológica de cuencas aborda la corrección del fenómeno torrencial teniendo como unidad de estudio la cuenca vertiente, que es el gran colector que recoge las precipitaciones en forma de lluvia y las transforma en escurrimientos que originan los ríos. Las soluciones deben ser concebidas como una conjunción de mejora de la cubierta vegetal e hidrotecnias, armónicamente distribuidas entre la cuenca y sus cauces.

Los tres principios esenciales sobre los que se fundamenta la ordenación de los espacios naturales, rurales y forestales de las cuencas hidrográficas son:

- El reconocimiento de la multifuncionalidad de dichos espacios, que obliga a conciliar los intereses de los diferentes sectores y actores implicados en el uso del territorio.
- La necesidad de preservar la biodiversidad, los valores naturales y las funciones ecológicas de dichos espacios.
- La búsqueda de un modelo sostenible de desarrollo que permita la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales preservando el medio ambiente y no comprometiendo el futuro de las generaciones venideras.

El objetivo principal de la ordenación agrohidrológica es la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales mediante la protección de los suelos, la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. A su vez, la mejora de los recursos económicos propios permitirá generar empleo y estabilizar la población evitando las migraciones en origen, potenciando el desarrollo de los sectores económicos basados fundamentalmente en el aprovechamiento ordenado de los recursos naturales propios: sector forestal, turismo rural, caza y pesca, sector agro-ganadero, productos naturales (miel, hongos, semillas,...) entre otros (Rábade Blanco, 2006).

Todo esto supone un modelo de desarrollo sostenible que dé respuestas a la problemática ambiental, social y económica principalmente de las zonas rurales. Esto implica la retención del suelo mediante el control de la erosión, tratando al mismo tiempo de aprovechar este recurso y la regulación de las avenidas y del transporte de materiales provocado por las mismas, así como la sedimentación de estos últimos en las áreas dominadas y la provisión hídrica (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Históricamente, la planificación del medio natural es relativamente reciente y la tecnología ha hecho posible que el hombre pudiera incidir en la naturaleza, en forma negativa o positiva. Para poder llevar adelante una correcta planificación agrohidrológica se deben definir correctamente los objetivos. Según Mintegui Aguirre *et al.* (2006) estos objetivos se pueden dividir en dos grandes grupos:

- La resolución de los problemas generados por los eventos torrenciales acaecidos en la cuenca.
- La utilización agrícola y forestal de la cuenca aprovechando racionalmente sus recursos hídricos, potenciando la agricultura en los lugares idóneos y

concretando las potencialidades vegetativas en las diferentes zonas de la misma; de modo que la vegetación permanente no se imponga sólo como protección integral de la cuenca, sino que se instale ajustada a la realidad física del territorio y su clima, en función del comportamiento del ciclo del agua en la zona.

El geo-dinamismo torrencial produce erosión en la cuenca, transporte de los materiales erosionados por las avenidas y depósito de los mismos en las áreas dominadas. Esto se manifiesta en los terrenos agrícolas en los que no se realizan cultivos con prácticas de conservación de suelos adecuadas; en los pastizales en los que no se tiene en cuenta la carga ganadera ni se llevan a cabo medidas de mantenimiento adecuadas y en las áreas forestadas cuyas prácticas silvícolas son deficientes y no se realizan las medidas necesarias para que el aprovechamiento racional del bosque proteja el suelo y el ecosistema.

Generalmente los problemas que produce el geo-dinamismo torrencial, se inician fundamentalmente en las áreas altas de la cuenca distribuyéndose por los valles hasta llegar a las partes bajas. La idea es corregir los torrentes de montaña y la consolidación en el tiempo de esas correcciones, protegiendo sus cuencas. Generalmente si el suelo y el clima lo permiten el asentamiento de un monte arbolado de montaña en la cabecera de la cuenca constituye una infraestructura básica de protección para los valles o áreas dominadas. Las consecuencias del geo-dinamismo torrencial son las pérdidas de suelo, las inundaciones, los depósitos de sedimentos y el conjunto de problemas que esto produce, como pérdida de cosechas, la colmatación de las obras de infraestructura, destrucción de caminos, viviendas y en muchos casos riesgos para la vida de los habitantes de la cuenca. Todo esto exige que no sólo se contemplen las acciones en los cauces de evacuación sino también en las cuencas que sirven de alimentación de éstos.

ORDENACIÓN AGROHIDROLÓGICA Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

El manejo integral de cuencas se puede concebir como la formulación y aplicación en toda la cuenca hidrográfica, tanto aguas abajo como aguas arriba, de un conjunto integrado de acciones en la búsqueda del desarrollo sostenible, minimizando los efectos ambientales negativos sobre el recurso hídrico que la población utiliza aguas abajo.

El desarrollo sostenible en manejo de cuencas puede orientar sus acciones hacia:

- a) Un desarrollo económico, social, cultural que respete las limitaciones del ambiente natural, los valores del hombre y su familia, que sea permanente en el territorio y en el tiempo, en armonía con la naturaleza.
- b) Una actividad económica diversificada, basada en un desarrollo agropecuario y forestal rentable, que sea menos contaminante y más endógeno en el aprovechamiento de los recursos humanos, naturales y paisajísticos.
- c) Una arquitectura autóctona y paisajismo acorde con el bioclima y que aproveche las tecnologías más adecuadas.
- d) Un alto grado de autogestión a través de la participación, organización, capacitación, educación y divulgación de logros, unido al apoyo decisivo de las instituciones públicas en la construcción de infraestructura y prestación de servicios básicos esenciales.

El manejo de cuencas es un método potente de planificación que aplica un enfoque holístico, destacando la interconectividad de los recursos naturales entre los usuarios aguas arriba y aguas abajo, aplicando el concepto de ecosistema, los principios de la ciencia ecológica y los lineamientos del desarrollo sostenible. Además, facilita el monitoreo y evaluación del efecto de las inversiones en conservación de vertientes para protección del agua y privilegia la protección del valor estratégico del recurso.

Los parámetros fundamentales en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente son los que, además de contribuir a la descripción de su estado físico, permiten definir en ella el movimiento de los ciclos del agua y de los sedimentos. A continuación se establecen los tipos de parámetros recomendados por Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008):

1. La pendiente del terreno, porque de ella depende la velocidad del agua en la ladera y la energía cinética que tiene la lámina de agua en su recorrido.
2. La posición geográfica, porque a mayor altitud mayor es el recorrido de la lámina de agua; luego hay más energía potencial para convertirse en cinética. De acuerdo con la misma se establecen las áreas dominantes y dominadas en la cuenca.
3. El tipo de suelo, porque representa el rozamiento que ofrece la obra a la circulación de la lámina de agua y, por tanto, constituye una pérdida de energía. Si a la lámina le sobra energía, supone el inicio de la erosión superficial.
4. La vegetación, porque representa un rozamiento al movimiento de la lámina de agua en la ladera. Además interviene activamente en el ciclo del agua y de los sedimentos.
5. Índices de protección del suelo por la vegetación, por ser una resultante de los factores anteriores: suelo, pendiente y vegetación.
6. El índice de erosión pluvial del modelo U.S.L.E., porque representa la energía con que inciden las gotas de lluvia sobre el suelo.
7. El propio modelo U.S.L.E., por ser una combinación de los factores anteriores.
8. La geología y la edafología, la primera por estar relacionada con la resistencia del suelo a erosionarse y la segunda porque representa al perfil del suelo y la capacidad de éste para sustentar la vegetación.
9. Un índice fito-climático, que permita establecer la capacidad de las diferentes áreas de la cuenca para mantener una determinada vegetación climática. Este índice, a diferencia de los anteriores, representa la potencialidad de la cuenca para recuperar su vegetación climática y por tanto sus posibilidades de rehabilitación a través de actuaciones hidrológico-forestales.

ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Desde una visión holística y sistemática de la relación sociedad-naturaleza, el territorio puede ser entendido como el espacio de interacción de los subsistemas natural y social, que componen el medio ambiente nacional, regional y local, estableciéndose una relación de complementariedad entre los conceptos de territorio y medio ambiente. De esta manera, el territorio no es solamente el entorno físico donde se enmarca la vida humana, animal y vegetal y donde están contenidos los recursos naturales, sino que comprende también la actividad del hombre que modifica este espacio.

Se puede decir que el territorio es el espacio geográfico en donde se asienta la población. Está conformado por el suelo, el mar territorial, y la plataforma continental. En Derecho se denomina territorio a la división de la superficie terrestre perteneciente a una nación, región o provincia. Conceptualmente, el territorio implica una ocupación concreta del espacio, implícitamente tomando en cuenta la transformación del paisaje natural en un paisaje ocupado y, por ello, transformado. El territorio debe ser comprendido y analizado con una visión histórica, dado que en él se han ido reflejando las acciones del pasado y las tendencias que se observarán a futuro, mostrando una realidad concreta.

Cuando se habla de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, considerando a la cuenca como parte fundamental del territorio, se está definiendo “la gestión que el hombre realiza en un determinado sistema hidrográfico para aprovechar y proteger los recursos naturales que le ofrece con el fin de obtener una producción óptima y sostenida” (FAO, 1998). Este manejo otorga al desarrollo sustentable un ámbito geográfico de aplicación, incluye un proceso realizado por el hombre consistente en planear, organizar, dirigir, evaluar y controlar la ejecución de sus acciones preservando los recursos con el fin de garantizar el crecimiento económico y el bienestar social de las generaciones presentes y futuras.

La zonificación del paisaje o Zonificación Geográfica es el resultado de la aplicación de una metodología para delimitar un espacio de la superficie terrestre con ciertos atributos particulares, conformando unidades homogéneas con respecto a sus componentes constituyentes, como son el relieve, las formas del relieve, litología, suelo, vegetación, condiciones hidrológicas y las interrelaciones con las actividades del hombre, es decir el arreglo espacial de dichos componentes. Es así como surgen las Unidades Territoriales (UT) que son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sustentable. La Unidad Territorial constituye un sistema ambiental integrado por factores naturales, socioculturales y económicos, dinámicos e interrelacionados entre sí, los cuales operan dentro y fuera de la misma Unidad Territorial.

El Ordenamiento Territorial es un instrumento de planificación del desarrollo sostenible y tiene por objetivo la adecuación de las actividades económicas en los espacios geográficos más recomendables, buscando el equilibrio entre la mejor calidad de vida de la población y la optimización del uso sostenible de los recursos naturales. Para ellos se deben tener en cuenta los principios de:

- **Integralidad.** El proceso de Ordenamiento Territorial interrelaciona las dimensiones territorial, cultural, económica, social, ambiental y política.
- **Participación.** El proceso de Ordenamiento Territorial implica un proceso interactivo entre el Estado y la Sociedad, donde los actores son sujetos de su construcción.
- **Subsidiariedad.** El proceso de Ordenamiento Territorial es un proceso descentralizado con responsabilidades definidas en cada uno de los niveles nacional, departamental y municipal.
- **Equidad.** El proceso de Ordenamiento Territorial está orientado a generar condiciones para asegurar mejor correlación de la diversidad territorial en los procesos de toma de decisiones, acceso a recursos productivos, financieros y no financieros, de tal forma que se garanticen las oportunidades, bienes y servicios en todo el país.
- **Precautorio.** Expresa el hecho de que el Ordenamiento Territorial está orientado a adoptar medidas precautorias cuando existan indicios de que una práctica u omisión en el uso u ocupación del territorio pueda generar daños graves o irreversibles.
- **Prevalencia del Interés General sobre el Particular.** Expresa el hecho de que el Ordenamiento Territorial está orientado a optimizar la ocupación y el aprovechamiento del territorio buscando la preponderancia del interés general sobre el particular en caso de coalición e intereses.

La planificación regional y ordenamiento territorial precisan de metodologías para la obtención de sus objetivos. Estas metodologías pueden variar, pero fundamentalmente han de estar basadas en un proceso informativo (levantamiento, sistematización interpretación y diagnóstico), un proceso evaluativo (zonificación o categorización física y económica) y un proceso de toma de decisiones, concertación y reglamentación (políticas, planificación y ordenamiento territorial).

PLAN DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El desarrollo de un Plan de Manejo de una Cuenca Hidrográfica es definido también como Plan de ordenamiento de la cuenca, cuyos objetivos pueden ser: la regulación del régimen hidrológico, el control de la erosión, el control de las inundaciones y la conservación de los recursos naturales, entre otros. El plan de manejo está integrado por: Programas, Subprogramas y Proyectos Específicos. El esquema metodológico de un Plan de Manejo de Cuencas Hidrográficas se basa en los siguientes ítems:

1. RESUMEN. Debe ser breve y explicativo de todo el plan. Está integrado por parte de cada uno de los capítulos. Se elabora al final.

2. INTRODUCCION

2.1. Importancia del plan

- ✓ 2.1.1 Económica.
- ✓ 2.1.2 Social
- ✓ 2.1.3. Política.
- ✓ 2.1.4. Ambiental
- ✓ 2.1.5. Recurso suelo.
- ✓ 2.1.6. Recursos hidráulicos
- ✓ 2.1.7. Recurso vegetación
- ✓ 2.1.8. Recurso fauna
- ✓ 2.1.9. Recursos turísticos. Utilización de embalses. Áreas silvestres.

2.2 Sectorización de la unidad de planificación

- ✓ 2.2.1. Unidad de planificación. Criterios, cada país debe fijar y definir sus unidades de planificación.
 - a) Político territorial (Provincias, departamentos, municipios)
 - b) Político administrativo (Región, subregión, áreas demostrativas)
 - c) Geopolíticos (Ejes territoriales. Ejes de desarrollo)
 - d) Hidrológicos (Cuencas hidrográficas. Subcuencas. Microcuencas)
- ✓ 2.2.2. Definición de la unidad de planificación
 - a) Político territorial
 - b) Político administrativo
 - c) Geopolítico
 - d) Hidrológico
 - i) Superficie (Cuenca - Subcuenca – Microcuenca)
 - ii) Altitud. Se fijan criterios de altitud ó de aguas arriba de la infraestructura (dique), como ser Cuenca alta = cuenca de recepción, Cuenca media = garganta y/o Cuenca baja = cono de deyección
- ✓ 2.2.3 Ubicación
 - a) Político territorial

- b) Político administrativo
- c) Político hidrológico

2.3. Características del plan de manejo

- a) Temporal
- b) Espacial
- c) Sectorial
- d) Escala del plan

2.4. Metodología

2.5. Equipo humano e institucional

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Planificación

- a) Relaciones del plan con planes nacionales y regionales
- b) Relaciones del plan con las políticas de desarrollo nacional y regional.

3.2. Institucional

3.3. Jurídico. Relaciones del plan de manejo con leyes, reglamentos y decretos. Enmarcar el plan de manejo en planes regionales y nacionales

4. INVENTARIO

5. DIAGNÓSTICO

El inventario y el diagnóstico siempre van juntos, y constan de los siguientes ítems generales.

4.1. Inventario del recurso suelo y físico conservacionista

5.1. Diagnóstico físico conservacionista y diagnóstico de los conflictos de uso (Comparación entre el mapa de uso actual y potencial).

4.2. Inventario hidrológico

- ✓ 4.2.1. Catastro de los recursos hídricos. Disponibilidad
- ✓ 4.2.2. Uso actual de los recursos hídricos
- ✓ 4.2.3. Demanda de los recursos hídricos para distintos usos

4.3. Inventario socioeconómico

- ✓ 4.3.1. Nivel de las comunidades y población total

✓ 4.3.2. Encuestas

5.3. Diagnóstico socio-económico. Identificación de factores sociales, económicos y tecnológicos basados en el grado de uso, conservación y deterioro de los recursos naturales renovables y el ambiente. El objetivo del diagnóstico socio económico es establecer las relaciones entre factores sociales, económicos, productivos y ambientales de la cuenca para el uso, conservación y/o recuperación del recurso.

4.4. Inventario de infraestructura

- ✓ 4.4.1. Productiva
- ✓ 4.4.2. Social
- ✓ 4.2.2. Conservacionista
- ✓ 4.2.3. Industrial
- ✓ 4.2.4. Minera
- ✓ 4.2.5. Otros

5.4. Diagnóstico de infraestructura. Se establece por medio de determinar el grado de mantenimiento de infraestructura, el uso, conservación y deterioro de los recursos naturales y la definición de los conflictos de uso de los recursos naturales.

4.5. Inventario de fauna

- ✓ 4.5.1. Especies
- ✓ 4.5.2. Importancia

5.5. Diagnóstico de fauna, por medio del estado actual de la fauna, uso, conservación y deterioro de especies y conflictos de uso de los recursos naturales

4.6. Inventario de vegetación

No es detallado en cuanto a especies sino a especies dominantes y generadoras de riqueza. Es importante considerar la protección vegetal que brindan.

- ✓ 4.6.1. Bosque natural ó praderas y cultivos
- ✓ 4.6.2. Plantaciones forestales
- ✓ 4.6.3. Áreas bajo régimen especial

5.6. Diagnóstico de vegetación, establecido por el estado actual, el uso, conservación y deterioro y conflictos de uso. El conflicto de uso establece si el pastizal ó el bosque es utilizado de acuerdo a su capacidad y potencial.

6. PRIORIDADES. En base base a los inventarios y diagnósticos de toda la cuenca se establecen las subcuencas y microcuencas prioritarias.

7. OBJETIVOS. Están relacionados con los objetivos de los programas y subprogramas del plan de manejo. El Objetivo general es ordenar los recursos naturales renovables y administrar bien esos recursos

8. PROGRAMAS Y SUBPROGRAMAS

- Programa de infraestructura
- Programa de administración del ambiente
- Programa de ordenamiento
- Programa de investigación y capacitación

Por ejemplo, programa de infraestructura cuyo subprogramas pueden ser conservación de suelos y aguas, reforestación, control de torrentes, infraestructura social conservacionista. Este está integrado a un programa administración del ambiente cuyo subprograma se basa en mapa síntesis, administración recurso suelo, administración recursos hídricos, Administración del recurso fauna, Administración del recurso vegetal.

9. MARCO FINANCIERO. Se establecen metas físicas y financieras de cada programa y subprograma. Cuanto existe de cada recurso y que meta se llegará. Quién financia y cuando cuesta cada programa y subprograma.

10. FACTIBILIDAD. Se establece la factibilidad física y financiera de cada programa y subprograma. Pueden no existir suficientes fondos ó recursos humanos en algún programa.

11. JUSTIFICACIÓN. Se establece la justificación de cada programa y subprograma desde el punto de vista económico, social, político, cultural y ambiental.

12. ESTRATEGIA. Se establece la forma y los mecanismos para hacer las cosas. Quién las hará (Instituciones). Cada programa tiene su propia estrategia.

13. EVALUACIÓN. Esta etapa puede ser de índole física, económica: relaciones costos/beneficios, social (beneficios sociales, algunos intangibles), impacto ambiental: impacto de obras de ingeniería (presas, carreteras) sobre el ambiente.

14. CONTROL. Se establecen mecanismos de control sobre cada programa para verificar se implementación y el cumplimiento de las etapas.

15. BIBLIOGRAFÍA

16. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. Están referidas al plan de manejo en sí y son de tipo institucional. Por ejemplo se recomienda que la secretaría de agricultura ó la universidad organicen seminarios ó cursos de capacitación.

FUNCIÓN DE UN PROGRAMA DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La función de un programa de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas tiende a desarrollar programas de investigación aplicada y difusión en el ámbito de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas. Además permite evaluar y monitorear los procesos que inciden en la degradación y funcionamiento de cuencas hidrográficas.

Dourojeanni (1990) ha desarrollado un cronograma generalizado indicando la secuencia de actividades para desarrollar la formulación de un plan de manejo de cuenca, que se presenta en forma simplificado en la Figura 8.1.

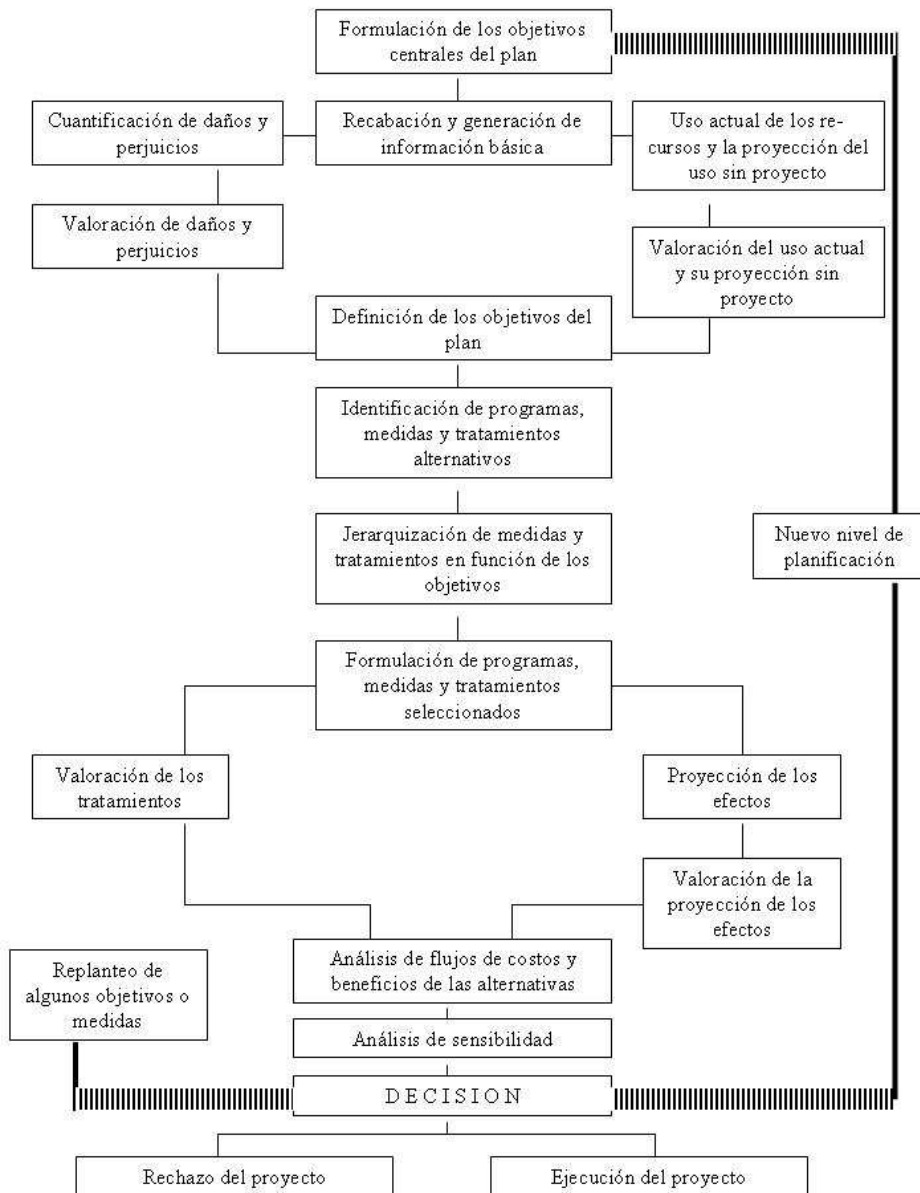


Figura 8.1. Secuencia de actividades para desarrollar un proceso de decisión en un Plan de Manejo de Cuencas Hidrográficas.

A partir de la aplicación de este tipo de programas se promueve la participación de la población y comunidad local a todo nivel mediante campañas de difusión y sensibilización, fundamentalmente para fortalecer una cultura del agua y del suelo en el ámbito del manejo integral de recursos naturales asociados a cuencas.

Las principales líneas programáticas desarrolladas mundialmente en la actualidad son: la ordenación territorial, la restauración hidrológica forestal, la recuperación y conservación de suelos y aguas y el monitoreo de recursos asociados a cuencas hidrográficas, entre otras.

GESTIÓN DE CATÁSTROFES NATURALES.

Las grandes lluvias son la causa de diferentes tipos de catástrofes naturales, siendo la principal las inundaciones, provocando un gran número de víctimas en el mundo.

Se pueden observar las llanuras de inundación desde varias perspectivas diferentes: "La definición de llanuras de inundación depende en parte de las metas que se tenga en mente. Como categoría topográfica es muy plana y se encuentra al lado un río; geomorfológicamente, es una forma de terreno compuesto primariamente de material depositado no consolidado, derivado de sedimentos transportados por el río en cuestión; hidrológicamente, está mejor definida como una forma de terreno sujeta a inundaciones periódicas por un río padre. Una combinación de estas características posiblemente cubre los criterios esenciales para definir una llanura de inundaciones" (Schmudde, 1968). Más sencillamente, una llanura de inundación se define como "una franja de tierra relativamente plana, junto a un río y que sufre desborde de las aguas durante las crecidas" (Leopold *et al.*, 1964; OAS, 1993).

Las inundaciones son un evento natural y recurrente de un río, siendo el resultado de lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo y la capacidad de carga del río y áreas costeras, rebalsando su cauce e inundando tierras adyacentes. A partir de muchos estudios antecedentes, se estableció estadísticamente que los ríos igualarán o excederán la inundación media anual cada 2,33 años (Leopold *et al.*, 1964).

Generalmente, la recurrencia de una inundación se describe en términos estadísticos (tiempo de retorno) que se establece en 100 años como valor extremo máximo y 25 años como medio, según disponibilidad de datos (Leopold *et al.*, 1964). En la Figura 8.2, se presenta el nivel que alcanzan diferentes inundaciones según su período de retorno de 50 y 100 años, visualizando claramente los diferentes alcances del nivel del agua sobre las planicies de inundación del río. Esta figura expresa además el nivel normal de estiaje del canal, el cual es mucho menor que el alcanzado por una situación extrema de inundación.

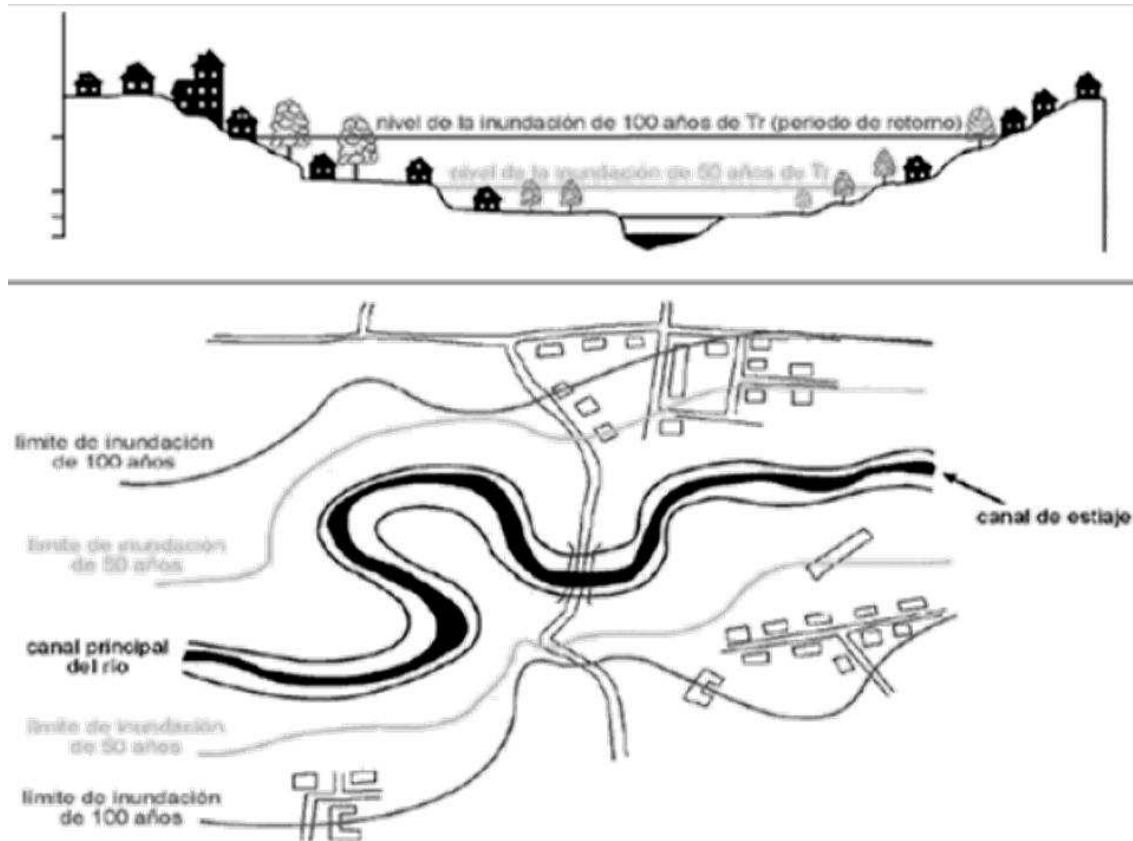


Figura 8.2. Diferentes límites de inundación en un río.

La frecuencia de inundaciones depende del clima, del material de las riberas del río y la pendiente del canal. Los principales factores que pueden generar catástrofes naturales de tipo hidrológico son:

- Exceso de precipitación: Los temporales de lluvias son el origen principal de las inundaciones y en el caso de que el terreno no pueda absorber o almacenar toda el agua que cae, se desliza por la superficie, aumentando la escorrentía y el nivel de los ríos.
- Fusión de nieve: En primavera se funde la nieve acumulada en invierno en las zonas de alta montaña y es cuando los ríos que se alimentan de estas aguas van más crecidos. Si en esa época coinciden fuertes lluvias, lo cual es frecuente, se producen inundaciones.
- Rotura de diques: Cuando se rompe un dique el agua almacenada en el embalse es liberada bruscamente y se forman grandes inundaciones muy peligrosas.
- Actividades humanas: Los efectos de las inundaciones se ven agravados por algunas actividades humanas.

Las actividades humanas sobre la planicie de inundación se pueden atribuir a:

- Urbanización sobre la red fluvial: Es el hecho de moldear artificialmente las colinas y lomas de distintas áreas de las cabeceras de las quebradas y ríos, construyéndose también calles y avenidas sobre cauces de los sistemas fluviales.

- Urbanización de planicies de inundación: Es la ocupación progresiva y ordenada de los cauces y planicies de inundación de las áreas bajas de los ríos, reduciendo de esta forma el cauce natural del río.
- Marginalización de las quebradas en planicies: Es la construcción de viviendas sin planificación alguna en los bordes de las quebradas, que si bien son seguras en tiempos de sequía, en épocas de lluvia la inundación de las zonas invadidas es inminente.
- Marginalización de quebradas en colinas: Es la ocupación anárquica y confusa de las zonas altas de las quebradas, arrastrando las aguas con todo lo que esté a su paso durante la época de lluvias.

La razón principal por lo que el hombre construye en las planicie de inundación es por desconocimiento del efecto catastrófico que puede generar el agua. Este motivo se agrava una vez que se ha construido sobre la planicie de inundación sin considerar o tomar en cuenta los riesgos de cursos torrenciales y/o de tiempo de retorno de las tormentas e inundaciones.

El manejo adecuado de las planicies de inundación se establece cuando hay un equilibrio entre el desarrollo con la preservación, mientras se tiende al uso óptimo mediante:

- La decisión de los tipos y extensiones de los usos apropiados de las planicies, balanceando los beneficios del desarrollo con las pérdidas potenciales causadas por inundación y destrucción de los benéficos valores naturales de las mismas.
- La consideración de los efectos resultantes por las decisiones en torno al uso de las planicies inundables, la protección de riberas y áreas adyacentes.
- La identificación, selección y evaluación del costo de los medios menos dañinos de encausar eficientemente las decisiones que afectan a las planicies inundables.
- La coordinación de esfuerzos y distribución equitativa compartiendo los costos entre todas las partes afectadas, tendiendo a mayor aporte de aquellos quienes más se benefician financieramente del uso de las planicies inundables.

Por ello es tan importante el ordenamiento territorial, debido a que su implementación se basa en la generación de alternativas para el manejo sustentable en toda la cuenca hidrográfica, adoptando medidas a partir del análisis participativo y espacio - temporal de las necesidades del hombre y del ambiente. El valor de un recurso agrícola, ganadero, forestal, recreativo, estará dado en atención a su contexto de asociación, considerándose como recurso tanto la totalidad del recurso como sus partes constitutivas, naturales y culturales deduciendo entonces que en la evaluación del territorio se estimará también el entorno natural de emplazamiento, el cual es soporte de la concepción, creación y significado del recurso

La perspectiva de la política hídrica integral se logra considerando que “...*la sabiduría en el manejo de nuestras aguas se logrará a través de armonizar los aspectos sociales, económicos y ambientales que la identifican*”....

GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

CAPÍTULO 9

IMPORTANCIA DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)

El agua es un recurso estratégico para el desarrollo de las economías regionales. La asignación del agua disponible en una región debe atender no sólo los requerimientos ambientales y las necesidades básicas del ser humano, sino también elevar su calidad de vida, poniendo el recurso hídrico al servicio del desarrollo y bienestar de la sociedad.

La GIRH es una flexible herramienta que ayuda a afrontar los retos que plantea el agua y a optimizar la contribución de ésta en un proceso de desarrollo sostenible. No se trata de una meta en sí misma. Según la GWP (Global Water Partnership, 2005), un grupo de profesionales y científicos de reconocimiento internacional especializados en distintos aspectos de la gestión de agua, cuyos integrantes proceden de distintas regiones del planeta, la GIRH permite reforzar las estructuras de gestión de aguas al objeto de fomentar una adecuada toma de decisiones en respuesta a unas necesidades y situaciones siempre cambiantes. Pretende evitar la pérdida de vidas, el despilfarro de dinero y el agotamiento de los recursos naturales derivados de un proceso de toma de decisiones que no toma en cuenta las ramificaciones más amplias de las acciones sectoriales. Su fin es garantizar un desarrollo y gestión equitativos del agua y dar respuesta a las distintas necesidades que tienen en este ámbito el colectivo de mujeres y las capas de población más desfavorecidas. Busca asegurar un empleo del agua en pro de los objetivos de desarrollo socioeconómicos de los países, en una manera que no aventure la sostenibilidad de los ecosistemas esenciales ni ponga en peligro la capacidad de las generaciones futuras a la hora de satisfacer sus demandas de agua.

El enfoque de GIRH fomenta el desarrollo y gestión coordinados de los recursos de agua, tierra y otros asociados al objeto de optimizar de un modo equitativo los beneficios socioeconómicos resultantes sin menoscabo de la sostenibilidad de los ecosistemas esenciales. Ello implica una mayor coordinación en el desarrollo y gestión de: tierras y agua, aguas superficiales y subterráneas, cuencas fluviales y entornos costeros y marinos adyacentes, e intereses río arriba y río abajo. Pero la GIRH no se limita a la gestión de recursos físicos, sino que se implica también en la reforma de los sistemas humanos con el fin de habilitar a la población –hombres y mujeres por igual– para que los beneficios derivados de dichos recursos reviertan en ellos (GWP, 2005). En la definición de políticas y planificación, la adopción de un enfoque de GIRH requiere que:

- Las políticas y prioridades consideren la repercusión sobre los recursos hídricos, incluyendo la relación mutua existente entre las políticas macroeconómicas y el desarrollo, gestión y empleo del agua,
- Se efectúe una integración intersectorial en el desarrollo de políticas,
- Las partes interesadas puedan implicarse en la planificación y gestión del agua, garantizando en especial la participación de mujeres y colectivos de pocos recursos.
- Las decisiones relacionadas con el agua adoptadas a nivel local o en la cuenca hidrográfica estén en la línea o, por lo menos, no choquen con la consecución de objetivos nacionales más amplios,

- La planificación y estrategias en el ámbito hidrológico se integren en objetivos sociales, económicos y ambientales más amplios.

Según GWP (2005) en la práctica, ello implica otorgar al agua el lugar que le corresponde en la agenda política nacional, crear una mayor “concienciación sobre el agua” entre los responsables de diseñar las políticas en el ámbito de la economía y en los sectores relacionados con el agua, poner en pie canales de comunicación más eficaces y un proceso de toma de decisiones consensuado entre los organismos gubernamentales, organizaciones, grupos de intereses y colectivos civiles y estimular a la población a superar las definiciones sectoriales tradicionales.

En todas las declaraciones de políticas hídricas se menciona, en un orden indistinto, que las mismas deben satisfacer objetivos sociales, ambientales y económicos; sin explicitar mayormente cómo se pueden alcanzar estos tres objetivos que son usualmente conflictivos entre sí, sobre todo en el corto plazo. La carencia de estrategias para lograr estos objetivos es precisamente una de las mayores razones por las cuales normalmente las declaraciones de política quedan simplemente como un enunciado de buenas intenciones. De hecho hoy en día prima lo económico sobre lo social y ambiental. La falta de compromiso de los actores comprometidos para alcanzar simultáneamente las tres metas explica por que hay tantas personas adeptas al concepto de desarrollo sustentable pero muy pocas dispuestas a sacrificar algo de su estilo de vida para alcanzarlo.

El desarrollo sustentable no se refiere a una meta tangible ni cuantificable a ser alcanzada en determinado plazo y momento. Se refiere más bien a la posibilidad de mantener un equilibrio entre factores que implican un cierto nivel de desarrollo del ser humano, nivel que es siempre transitorio, en evolución y, al menos en teoría, debería ser siempre conducente a mejorar la calidad de vida de los seres humanos. El llamado desarrollo sustentable es, en consecuencia, la resultante de un conjunto de decisiones y procesos que deben llevar a cabo generaciones de seres humanos, dentro de condiciones siempre cambiantes, con información usualmente insuficiente, sujetas a incertidumbres y con metas poco compartidas por una sociedad y personas en general no muy solidarias. Sólo si el desarrollo sustentable se mantiene en el tiempo se alcanza la sostenibilidad. Cabe resaltar que la sociedad se ha organizado para conducir procesos de gestión a nivel de territorios delimitados para alcanzar sobre todo metas de crecimiento económico y a veces metas sociales pero muy escasamente para manejar territorios delimitados por razones naturales, como es el caso de la gestión del agua a nivel de cuenca. Esto implica que sólo existen algunas bases de gobernabilidad para alcanzar en forma coordinada metas económicas, sociales y ambientales en los territorios actualmente delimitados por razones político—administrativos (límites distritales, provinciales, estatales, regionales o de países), y no para hacerlo a nivel de cuenca u otros territorios delimitados por razones naturales (Dourojeanni, A y A Jouravlev, 1999).

El concepto de desarrollo sustentable y sostenible está además vinculado a categorías o escalas de calidad de vida y a la interacción entre habitantes de uno o más territorios que intercambian recursos o migran de un lugar a otro. El desarrollo sustentable está estrechamente asociado a las demandas que exige cada cultura o estilo de vida, a la globalización de los procesos económicos, sociales y ambientales y a la capacidad negociadora entre regiones o países. El mismo tipo de consumo que se extiende a nivel global ejerce, cada vez más, influencias en el medio social y ambiental de culturas antes muy diferentes que ahora pugnan por imitar lo que consideran más avanzado. Esto se refleja ampliamente en los incrementos de consumo, en cantidad y variedad, de productos por habitante. En resumen, el llamado desarrollo sustentable es la resultante de un conjunto de decisiones y procesos que deben llevarse a cabo por generaciones de seres humanos para su propio bienestar, dentro de condiciones de vida siempre cambiantes y vinculados a intercambios entre territorios. Estas condiciones están dadas por el sistema holístico que conforma el universo dentro del cual el ser humano es una pequeña parte. Por razones de sectorialización, especialización y políticas, las decisiones sobre este sistema complejo se reducen usualmente a tratar separadamente los aspectos económicos,

ambientales y sociales y a referirlo a territorios políticos administrativos con el fin de tener un área “gobernable”. Esta forma fragmentada en que se toman las decisiones atenta contra la adecuada gestión de los ecosistemas y recursos naturales como el agua (Dourojeanni, A y A Jouravlev, 1999).

En el año 2007 el tema propuesto por la FAO para el Día Mundial del Agua fue “Afrontar la escasez de agua”. Jacques Diouf, Director General de la FAO, Organismo de Naciones Unidas encargado de coordinar ese año el evento a nivel mundial, que “el consumo Mundial de Agua ha crecido durante el último siglo a un ritmo dos veces superior al de la población. La escasez de agua afecta a todos los continentes y a más del 40 por ciento de la población de nuestro planeta. Para 2025, unos 1.800 millones de personas vivirán en países o regiones con una drástica falta de agua, y dos tercios de la población mundial podría encontrarse en condiciones de escasez del líquido elemento. Para poder entender realmente la gravedad del problema, primero hay que darse cuenta de la enorme importancia que tiene el agua en nuestra vida diaria y nuestra capacidad de planificar un futuro mejor”.

Si se tiene en cuenta que la agricultura puede tener un impacto considerable en el medio ambiente y en la salud de la población, la gestión inadecuada de la tierra y del agua puede agotar los recursos hídricos, contaminar los sistemas de agua, ser causa de la esterilidad del suelo y de la erosión, además de destruir los ecosistemas naturales. Gran parte del agua extraída se desaprovecha: se pierde como consecuencia de las filtraciones de los canales, derrames, infiltración y evaporación. Aunque parte de esta agua llega de nuevo a los ríos o a los acuíferos subterráneos, las pérdidas excesivas en los sistemas de riego afectan su rendimiento, contribuyen a la extracción excesiva de agua y suelen intensificar las repercusiones ambientales negativas que tiene el regadío.

Según Jacques Diouf, en la FAO se admite “que el sector agrícola debe tomar las riendas para afrontar la escasez de agua, encontrando maneras más efectivas para conservar el agua de lluvia y regar las tierras agrícolas. Nadie pone en duda que producir alimentos suficientes es fundamental en la lucha contra el hambre y para mejorar las condiciones de vida en todos los continentes. Pero la agricultura abarca cerca del 70 por ciento de todo el consumo de agua dulce y hasta un 95 por ciento en algunos países en desarrollo. Para hacer frente a la escasez, incluso cuando aumenta la demanda de alimentos, se tienen que apoyar iniciativas para producir más comida con proporcionalmente menos agua. De nuevo, esto significa proteger los cursos de agua, conservar la salud de los bosques y mejorar la forma en que se riegan los cultivos y se cría el ganado”.

Dada la complejidad que presenta el manejo de las aguas, este manejo se podrá realizar armonizando aspectos sociales, económicos y ambientales. En los últimos años la comunidad hídrica argentina tomó conciencia del serio deterioro de la gestión de recursos hídricos, dándole la motivación para corregir el rumbo actual del manejo de las aguas. Desde un principio se coincidió en que el primer paso en esa dirección es la creación de bases jurídicas sólidas que sustenten una gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos. Con tal fin las provincias autoconvocan a los sectores vinculados con el aprovechamiento, gestión y protección de sus recursos hídricos buscando establecer la visión que “qué es el agua para nosotros”, y al mismo tiempo señale la forma de utilizarla como “motor de nuestro desarrollo sustentable”. La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación desarrolló un documento a partir de las contribuciones hechas por cada una de las provincias argentinas, de consultas con expertos en las áreas de planeamiento y gestión de los recursos hídricos y del aporte de organizaciones y foros nacionales e internacionales en la materia. En el año 2003 se estableció un Acuerdo Federal del Agua cuyo propósito fue “brindar lineamientos y mecanismos que permitan la integración de los aspectos técnicos, sociales, económicos, legales, institucionales y ambientales del agua, en una gestión moderna de los recursos hídricos. El enunciado de estos lineamientos de política (Principios Rectores) por parte de la comunidad hídrica del país servirá para guiar a los legisladores responsables de traducir nuestra visión del recurso hídrico en una legislación marco coherente y efectivo, que sustente las raíces históricas y los valores de cada provincia. También, para guiar a nuestros administradores a crear organizaciones y programas de acción adecuados. La adopción de estos principios rectores por parte de todas las Provincias y la

Nación, a la luz de un federalismo concertado, permitirá avanzar hacia un desarrollo armónico del recurso hídrico, disminuyendo los posibles conflictos derivados de su uso. La materialización de estos principios en acciones sustentables y eficientes requiere del apoyo participativo de la comunidad hídrica en su totalidad y de un férreo compromiso del sector político, en el entendimiento que del manejo inteligente de las aguas depende la vida y la prosperidad de nuestro país.

PRINCIPIOS RECTORES DE LA POLÍTICA HÍDRICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

Los Principios Rectores de la Política Hídrica de la República Argentina se redactaron a partir de un documento aprobado en el "Encuentro Nacional de Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina", Ciudad de Buenos Aires, 17 al 19 de Diciembre de 2002, en el cual consideraron los siguientes aspectos, según la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación:

EL AGUA Y SU CICLO

1. El agua es un recurso renovable escaso y vulnerable. El agua es un elemento insustituible para el sostenimiento de la vida humana y el resto de los seres vivos, siendo al mismo tiempo un insumo imprescindible en innumerables procesos productivos. Su escasez se manifiesta gradualmente a medida que aumentan las demandas y conflictos por su uso. Su carácter de vulnerable se manifiesta en la creciente degradación de su calidad, lo cual amenaza la propia existencia de la vida.

2. El agua tiene un único origen. Toda el agua que utilizamos, ya sea que provenga de una fuente atmosférica, superficial o subterránea, debe ser tratada como parte de un único recurso, reconociéndose así la unicidad del ciclo hidrológico. La conectividad hidrológica que generalmente existe entre las distintas fuentes de agua hace que las extracciones y/o contaminación en una de ellas repercutan en la disponibilidad de la otra. De allí se desprende la necesidad que el Estado ejerza controles sobre la totalidad de las fuentes de agua, dictando y haciendo cumplir la normativa para el aprovechamiento y protección de las diversas fuentes de agua, como una sola fuente de suministro.

EL AGUA Y EL AMBIENTE

3. Articulación de la gestión hídrica con la gestión ambiental. La preservación de un recurso natural tan esencial como el agua es un deber irrenunciable de los Estados y de la sociedad en pleno. La gestión de los recursos hídricos y las cuestiones ambientales están tan altamente relacionadas que no cabe admitir administraciones estancas entre ambos sectores. De ello se desprende la necesidad de otorgarle al manejo de los recursos hídricos un enfoque integrador y global, coherente con la política de protección ambiental, promoviendo la gestión conjunta de la cantidad y calidad del agua. Ello se logra mediante la actualización de las normativas, más una sólida coordinación intersectorial y acuerdos institucionales que fortalezcan la articulación de la gestión hídrica con la gestión ambiental, actuando en el marco constitucional vigente.

4. Articulación de la gestión hídrica con la gestión territorial. Las múltiples actividades que se desarrollan en una cuenca (agricultura, ganadería, explotación forestal, minería, urbanización, industria) afectan de una u otra forma sus recursos hídricos. De ello se desprende la necesidad que el sector hídrico participe de la planificación del uso del suelo en las cuencas (gestión territorial), influenciando desde sus inicios las decisiones sobre el uso del territorio, e

imponiendo medidas mitigatorias y restricciones al uso del suelo que pudieran conducir a impactos inaceptables en los recursos hídricos.

5. Calidad de las aguas. Mantener y mejorar la aptitud de uso de las aguas constituye la meta de la gestión hídrica más valorada por la sociedad. La autoridad nacional debe fijar consensuadamente con las autoridades provinciales los presupuestos mínimos de protección ambiental en materia hídrica. Tales presupuestos deben ser complementados por las provincias a los efectos de asegurar una adecuada protección de la calidad hídrica en cada contexto local.

EL AGUA Y LA SOCIEDAD

9. Responsabilidades indelegables del Estado. La formulación de la política hídrica, la evaluación del recurso, la administración, su planificación y asignación equitativa de derechos y recursos, el dictado de normativas y muy especialmente la preservación y el control son responsabilidades indelegables del Estado. Se requiere para ello contar con lineamientos claros para el desarrollo y protección del recurso hídrico y marcos regulatorios y de control adecuados.

10. Uso equitativo del agua. La promoción por parte del Estado del principio de equidad en el uso del agua se manifiesta a través de: (i) asegurar el acceso a los servicios básicos de agua potable y saneamiento a toda la población urbana y rural del país; (ii) asignar recursos hídricos a proyectos de interés social, (iii) promocionar el aprovechamiento del agua en todos sus potenciales usos - usos múltiples del agua - buscando siempre alcanzar el deseado equilibrio entre los aspectos social, económico y ambiental que el agua posee.

11. El agua como factor de riesgo. En ocasiones el agua se transforma en factor de riesgo por la interacción que ejerce con las actividades de las personas, pudiendo ocasionar pérdida de vidas humanas y serios daños a los sistemas económicos, sociales y ambientales. La notable variabilidad espacial y temporal de la oferta hídrica de nuestro país nos exige aprender a convivir con las restricciones que el medio natural nos impone, y al mismo tiempo, desarrollar la normativa, los planes de contingencia y la infraestructura que permita prevenir y mitigar los impactos negativos creados por situaciones hídricas tales como la escasez, los excesos y las fallas de la infraestructura.

EL AGUA Y LA GESTIÓN

12. Gestión descentralizada y participativa. Cada Estado Provincial es responsable del planeamiento y gestión de sus propios recursos hídricos compartidos. La descentralización de funciones debe alcanzar el nivel regional y local, involucrando a los usuarios del agua (organizaciones de usuarios) en el manejo mismo del recurso. Al mismo se fomenta la participación efectiva de toda la sociedad para la definición de los objetivos de la planificación hídrica, en el proceso de toma de decisiones y en el control de la gestión.

13. Gestión integrada del recurso hídrico. La gran diversidad de factores ambientales, sociales y económicos que afectan o son afectados por el manejo del agua avalan la importancia de establecer una gestión integrada del recurso hídrico (en contraposición al manejo sectorizado y descoordinado). Ello requiere por un lado un cambio de paradigma; partiéndose del tradicional modelo de desarrollo de la oferta hacia la necesaria gestión integrada del recurso, mediante la cual se actúa simultáneamente sobre la oferta, la demanda y la tecnología relacionada con el aprovechamiento del agua. Pro otro lado, la gestión hídrica debe estar fuertemente asociada a la gestión y protección de los demás recursos naturales y ecosistemas en un marco de desarrollo sustentable.

14. Usos múltiples del agua y sus prioridades. Excepto el agua para consumo humano básico - cuyas demandas se juzgan prioritarias sobre todo otro uso - el resto de las demandas serán satisfechas conforme al orden de prelación establecidos por las legislaciones provinciales serán satisfechas a partir de encontrar un balance adecuado en la distribución del recurso. La creciente competencia por el uso del agua de una cuenca exige que los posibles usos competitivos se evalúen sobre la base de sus aspectos sociales, económicos y ambientales -

medidos a partir de una planificación integrada que establezca las prioridades en orden al interés público - y no simplemente por resultar beneficioso para un usuario en particular.

15. Unidad de planificación. Dado que el movimiento de las aguas no reconoce fronteras político - administrativas sino leyes físicas, las cuencas hidrográficas o los acuíferos constituyen la unidad territorial más apta para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos. La consideración de la totalidad de las ofertas y demandas de agua en la región hidrográfica bajo consideración permite detectar las mejores oportunidades para su uso, lográndose al mismo tiempo anticipar conflictos y minimizar impactos negativos a terceros o al ambiente.

16. Aguas interjurisdiccionales. Para cuencas hidrográficas de carácter Interjurisdiccional, se recomienda la conformación de organizaciones de cuenca donde concensuar la distribución y el manejo coordinado de las aguas interjurisdiccionales. A solicitud de las partes le cabe al Estado Nacional la misión conciliadora y mediadora a fin de compatibilizar los genuinos intereses de las provincias bajo el marco de estos Principios Rectores.

17. Externalidades por el uso o manejo del agua. La gestión integrada de los recursos hídricos debe propender al control de externalidades negativas, explicitando los costos ambientales y perjuicios a terceros que pueda traer aparejado un determinado manejo o asignación del recurso.

--El siguiente principio queda supeditado a futura revisión--

18. Medidas no-estructurales El manejo del agua es el de los conflictos. La gestión integrada del recurso hídrico requiere la adopción de una adecuada combinación de las medidas y acciones de tecnología física (obras hidráulicas, equipos, etc.), de tecnología biológica (adaptación de cultivos, desarrollo de variedades resistentes a extremos hídricos, cambio de cultivos, etc.) y de tecnologías sociales y organizativas (leyes, normas, zonificación de riesgos, ordenamiento territorial, organización de usuarios, etc.) para evitar y solucionar los conflictos que se generen por el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos.

EL AGUA Y LAS INSTITUCIONES

19. Autoridad única del agua. Propender a la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos de cada provincia en una única administración provincial del agua, responsable de llevar adelante su misión en el más amplio marco de aprovechamiento y protección del recurso. Dicha autoridad tiene la responsabilidad de articular la planificación hídrica con los demás sectores de gobierno que planifican el uso del territorio y el desarrollo socio-económico provincial. La autoridad del agua debe disponer de la necesaria autarquía institucional y financiera para garantizar un adecuado cumplimiento de sus misiones, siendo además autoridad de aplicación de la ley.

20. Organizaciones de cuenca. Dada la conveniencia de institucionalizar la cuenca como una unidad de gestión, se promueve la formación de "organizaciones de cuenca" abocadas a la gestión coordinada de los recursos hídricos dentro de los límites de la cuenca (intra e interjurisdiccionales).

21. Organizaciones de usuarios. Siguiendo el principio de centralización normativa y descentralización operativa, se propicia la participación de los usuarios del agua en determinados aspectos de la gestión hídrica. Por ello, las administraciones hídricas provinciales fomentarán la creación y fortalecimiento de asociaciones organizadas de usuarios del agua en los cuales delegar gradualmente responsabilidades de operación, mantenimiento y administración de la infraestructura hídrica a su cargo. A los efectos de garantizar los fines de estas organizaciones, las mismas deben regirse por marcos regulatorios adecuados, y disponer de la necesaria capacidad técnica y autonomía operativa y económica.

22. Roles del Estado Nacional. El Estado Nacional, en ejercicio de las facultades delegadas constitucionalmente promocionará el desarrollo hídrico y la adecuada gestión y preservación que cada Estado Provincial efectúe en su jurisdicción, apoyando la investigación científica en la formación de capacidades para mejorar el conocimiento, uso y administración de los recursos hídricos. En particular, proveerá al bienestar de todas las provincias mediante la asistencia y colaboración técnica, financiera y económica a los Estados Provinciales en la concreción que las mismas procuren de sus objetivos de calidad y eficiencia en salvaguarda de sus recursos hídricos. Para tales efectos implementará los requerimientos que las provincias efectúen a través de las instituciones que se den en el marco de acuerdos federales.

--El siguiente principio queda supeditado a futura revisión--

23. Gestión hídrica con países vecinos. Cuando el Estado Nacional, a través del Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, ejerza sus competencias en la materia de las Relaciones Internacionales en lo referente a los recursos hídricos compartidos con países vecinos, incluyendo la negociación y suscripción de acuerdos, tratados o cualquier otro tipo de acto jurídico en la materia se requerirá la conformidad expresa de las provincias titulares del dominio originario de dicho recursos natural.

La o las provincias titulares de dicho dominio originario elevarán al Poder Ejecutivo una terna vinculante de candidatos de entre sus autoridades de agua para ejercer la representación en los organismos internacionales creados al efecto.

24. Continuidad de la política y gestión hídrica. Dado los largos plazos que se requieren para concretar los objetivos de una política hídrica, es vital dar continuidad a la gestión surgida de un trabajo de planificación consensuado, trascendiendo por sobre los períodos de gobierno. La concreción de los objetivos de una política hídrica a largo plazo requiere de autoridades hídricas dotadas del mayor grado de descentralización administrativa y presupuestaria posible, actuando como autoridad de aplicación de la ley. Al mismo tiempo, es esencial garantizar una alta calidad institucional, con cuadros profesionales de carrera en todos sus niveles, creando las condiciones que permitan atraer y retener en las organizaciones públicas personal con las capacidades necesarias para llevar adelante el proceso de cambio que se propicia.

--El siguiente principio queda supeditado a futura revisión--

24. bis Consejo Hídrico Federal. Manifiestar la conveniencia y necesidad de que entre las Provincias y la Nación se dé una instancia federal con injerencia en todos los aspectos de carácter global, estratégico e Interjurisdiccional en materia de recursos hídricos, mediante la conformación del Consejo Hídrico Federal.

EL AGUA Y LA LEY

25. El agua como bien de dominio público. Cada Estado Provincial, en representación de sus habitantes, es titular del dominio público del agua superficial y subterránea que yace y escurre en su jurisdicción, incluido el lecho que encauza las aguas superficiales con el alcance dado en el Código Civil. Los particulares sólo pueden acceder al derecho del uso de las aguas públicas, no a su propiedad. Asimismo, la sociedad a través de sus autoridades hídricas ofrece el agua en concesión bajo la condición que su uso resulte beneficioso en términos del interés público.

26. Asignación de derechos de uso del agua. Los Estados provinciales condicionan la asignación de derechos de uso del agua a los usos establecidos por las planificaciones hídricas provinciales, y por un período de tiempo apropiado al uso al que se la destine. Se busca así asegurar el aprovechamiento óptimo del recurso (usos con el más alto valor social, económico y ambiental posible) a través de periódicas evaluaciones de las concesiones asignadas. La necesidad de satisfacer crecientes demandas de agua requiere contar con instrumentos de gestión que permitan corregir ineficiencias en el uso del recurso (ej.: medición volumétrica,

recuperación y reuso del agua) como así también la adopción de mecanismos de reasignación del recurso para un uso más óptimo.

CÓDIGO DE AGUA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES.

En el año 1998, el Senado y la Cámara de Diputados de la Provincia de Buenos Aires, sancionaron con fuerza de Ley el Código de agua que estableció el régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico de la Provincia de Buenos Aires. La Autoridad del Agua se constituye a partir de lo establecido en la ley 12.257, o Código de Agua, como entidad de aplicación de las funciones encomendadas al Poder Ejecutivo Bonaerense. Es un ente autárquico de derecho público y naturaleza transdisciplinaria y cuya organización y funcionamiento se dispone sobre la base de la descentralización operativa y financiera.

La estructura del mismo se representa, según www.ada.gba.gov.ar, en la Figura 9.1.



Figura 9.1. Estructura administrativa de la Autoridad del Agua.

Las atribuciones y funciones de la Autoridad del Agua son las de asistir al Poder Ejecutivo en las siguientes funciones:

- Formular la política del agua.
- Decretar reservas que prohíban o limiten usos y la constitución de derechos individuales sobre agua de dominio público.
- Establecer preferencias y prerrogativas para el uso del agua, privilegiando el abastecimiento de agua potable; alentando criterios de reutilización de agua.
- Fijar periódicamente por regiones y por categorías de uso, el canon y las contribuciones.
- Determinar la dotación de agua a acordar a cada categoría o tipo de uso y a cada región.
- Suspender el suministro de agua para uno o más usos en casos que lo ameriten.

- Imponer restricciones y limitaciones al dominio privado.
- Otorgar los derechos y cumplir todas las funciones que el Código le encomienda.
- Supervisar y vigilar las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación del agua.
- Promover programas de educación formal e informal sobre el uso racional del agua.
- Coordinar un espacio interinstitucional con los órganos de la Administración Provincial competentes en materia de agua.
- Dar cumplimiento a la Planificación Hidrológica para satisfacer las demandas de agua.
- Equilibrar y compatibilizar el desarrollo regional y sectorial.
- Incrementar la disponibilidad del recurso y proteger su calidad
- Establecer zonas de reserva.
- Aplicar defensa contra las inundaciones y sequías.
- Deberá confeccionar cartas de riesgo hídrico de las zonas que pueden ser afectadas por inundaciones.
- Deberá prohibir el uso recreativo y el abastecimiento doméstico o el urbano de determinadas aguas en salvaguarda de la salud pública.

El marco jurídico de la Autoridad del Agua está dado por la normativa nacional a través de la Constitución Nacional (art. 41), el Código civil (art. 2340 inc.3; art. 2641), la Ley de Bosques Protectores (Ley 13273) y el Tratado del Río de La Plata y su frente marítimo (Ley 20645). La Normativa Provincial está dada por el artículo 28 de la Constitución Provincial y las siguientes leyes:

- Ley 5.262 (Derogada por Ley 12.257)
- Ley 5.376
- Ley 5.965 y decretos reglamentarios (Decreto 2009 y 3970): Ley de protección a las fuentes de provisión y a los cursos y cuerpos receptores de agua y a la atmósfera
- Ley 6.021: Ley de Obras Públicas
- Ley 6.253
- Ley 7.837 (Derogada por Ley 12.257)
- Ley 7.948 y modificatoria Texto actualizado del decreto ley 7.948/72 – Autarquía de la corporación del fomento del valle bonaerense del Río Colorado – Con las modificaciones de los Decretos Leyes 9.541/80, 9.548/80, 9.835/82 y Ley 12.257.
- Decreto Ley 9.297/79: Nuevas normas para el uso de los espejos de agua destinados para fondeadero de embarcaciones
- Decreto Ley 10.081/83: Código Rural
- Ley 10.106 y modificatorias: Régimen general en materia hidráulica. Texto actualizado con las modificaciones de las Leyes 10.385, 10.988 y Decreto 2.307/99.
- Ley 10.170: Creación de la comisión para el desarrollo de la zona deprimida del Salado (CODESA)

- Ley 11.347: Tratamiento, manipuleo, transporte y disposición final de residuos patogénicos.
- Ley 11.720: Generación, manipulación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de residuos especiales.
- Ley 11.820 y modificatorias: Marco Regulatorio para la Prestación de los Servicios Públicos de Provisión de Agua Potable y Desagües Cloacales en la Provincia de Buenos Aires, y las Condiciones Particulares de Regulación para la Concesión de los Servicios Sanitarios de jurisdicción Provincial. Texto actualizado con las modificaciones introducidas por la Ley 12.292.
- Ley 11.964: Demarcación de la línea de ribera
- Ley 12.257: Código de Aguas
- Decreto 3803/93: CORFO Delta
- Decreto 266/02: Autoridad del Agua: Misiones y Funciones
- Decreto 3511/07: Reglamentario del Código de Aguas

El texto completo del Código de Aguas se encuentra en la página <http://www.ada.gba.gov.ar/>

BIBLIOGRAFÍA

- Bernex, N. 2006. Agua y ecosistemas de los diferentes enfoques de gestión a una apuesta para el bien común. Grupo de diálogo y desarrollo sostenible. Piura.
- Bonell, M. y D.A. Gilmour. 1978. The development of overland flow in a tropical rainforest catchment. *Journal of Hydrology* 39. 365-382.
- Bonell, M. y J. Balek- 1993. Recent scientific developments and research needs in hydrological processes of the humid tropics. In: Bonell, M., Hufschmidt, M.M. and Gladwell, J.S. ed. *Hydrology and Water Management In the Humid Tropics. Hydrological Research Issues and Strategies for Water Manageme*
- Bonorino, L. 1988. Caracterización química de la lluvia del sudoeste bonaerense. Seminario de Hidrología de Grandes Llanuras. Buenos Aires.
- Bormann, F.H. y G.E. Likens. 1967. Nutrient cycling. *Science* 155: 424-429.
- Bruno J., Celini, N., Cardenas, P., Gaspari, F., Oroná, C., Lanfredi, C., Tossi, J., Mura, M., Lenton, M. y I. Ohde. 1994. Evaluación Torrencial de Santo Tomás de la Sierra. Actas del 2º Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Mérida, Venezuela.
- Bruno, J. 2000. Manejo de Cuencas Hidrográficas, Análisis Conceptual. Magister Scientiae en Manejo de Cuencas Hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.
- Bustamante, E., 1984. Hidrología. Conceptos de hidrología de superficie. Modelos matemáticos deterministas. Centro de investigaciones hídricas de la región semiárida (CIHRSA), Argentina. 336 p.
- Calder, I. R. 1990. *Evaporation in the Uplands*. J. Wiley, New York. 148 p.
- Calder, I. R. 1992. Hydrologic effects of land-use change. In: *Handbook of Hydrology*, Editor D. Maidment. Mc Graw-Hill, Estados Unidos.
- Censo Nacional de Población y Vivienda. 1991. Serie B INDEC. Secretaría de Planificación. Provincia de Buenos Aires. 219 p
- Clark, C. O. 1943. Storage and the unit hydrograph. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 9: 1333-1360.
- CNA. 1988. INDEC. Secretaría de Planificación. Provincia de Buenos Aires. 153 p.
- CSIRO. 1997. Management of soil nutrient and water in tropical plantation forests. Ed. E.K.Sadanandan, Nambiaran Alan G. Brown. Canberra. Australia. 571 pp.
- Chow V. T. 1993. Hidráulica de los canales abiertos. Editorial Diana. México. 633 p.
- Chow, V. T., Maidment, D.R. y L. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill. Colombia. 583 pp.
- Custodio, E. y M. R. Llamas. 1976. Hidrogeología subterránea. Ed. Omega. Barcelona.
- Chuvieco, E. 2000. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones RIALP, S. A. Madrid. 568 p.
- Di Leo, C. y J. E. Bruno. 1997. Régimen Pluviométrico de la Provincia de Buenos Aires. II Congreso Chileno de Ingeniería Agrícola, CIACH. Chile.
- Dirección Provincial de Catastro. 1990. Mapas catastrales del Partido de Tornquist. Dirección de Geodesia. Argentina.

- Dourojeanni, A. 1990. Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable (Aplicado a microrregiones y cuencas). Documento 89/05/Rev.1. Serie de ensayos. 452 p.
- Dourojeanni, A y A Jouravlev, 1999. CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos.
- Dourojeanni, A. 2000. Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable. Contribución para mejorar la toma de decisiones conducentes al desarrollo sostenible en la región. Dir.Div.Rec. Naturales e Infraestructura. Serie, Manual 10, de la División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile. Web.
- Dunne, I. 1978. Field studies of hillslope flow processes. In: Kirkby, M.J. ed. Hillslope Hydrology. J. Wiley, New York. 227-293.
- Dymas, J. 1974. Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires. Escala: 1:50.000. Zona de Bahía Blanca y Norpatagónica. Inédito.
- Eastman, J. R. 2006. Idrisi Andes Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University, USA.
- Einstein H. A. y H. W. Shen. 1964. A study of meandering in straight alluvial channels. 5239-5247 pp. Journal of Geophysical Research 69.
- Ellies, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile. Acta Geológica Hispánica 35(3-4): 279-284.
- Erskine, W. D., A. Mahmoudzadeh, A., Browning C.M. and C. Myers. 2002 Sediment yields and soil loss rates from different land uses on Triassic shales in western Sydney, NSW. Australian Journal of Soil Research 41(1): 127 – 140.
- FAO. 2007. Entrevista al Dr. J. Diouf.
<http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2007/1000521/index.html>
- Farmer, D., Sivapalan, M. y Jothityangkoon. 2003. Climate, soil, and vegetation controls upon the variability of water balance in temperate and semiarid landscapes: Downward approach to water balance analysis". En: Water Resources Research. Vol. 39, N° 2. 1-21.
- Fernández P. C., Maza J. A. y L. A. Fornero. 1984. Modelo Hidrológico Hymo 10. INCyTH. Mendoza. 94 p.
- Fidalgo, F., De Francesco F. O. y R. Pascual. 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino. 103:138. Bahía Blanca.
- Frangi. J. 1975. Sinopsis de las comunidades vegetales y el medio de las Sierras de Tandil, Provincia de Bs. As. Sociedad Argentina de Botánica XVI.
- Frangi, J. y O. Bottino. 1995. Comunidades vegetales de la Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata, Tomo 71(1), 93-133.
- García Nájera, J. M. 1962. Principios de Hidráulica Torrencial. Ed. Min. Agric. Madrid. Ed. 349 p.
- Gaspari F. J. y J. E. Bruno. 1997. Medidas aplicadas para la recuperación ambiental en la cuenca del Arroyo Challhuaco degradada por incendios forestales Segundo Congreso Argentino y Latinoamericano. El Dorado. Misiones. 13-15.
- Gaspari, F. J. 2002. Ordenamiento territorial en cuencas serranas. Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.). Ediciones Cooperativas. 116 p.
- Gaspari, F. J. 2002 b. Problemáticas en cuencas hidrográficas. Primera Jornada de la Universidad y la Comunidad. Expo Universidad. La Plata. Version digital.
- Gaspari, F. J. y M. G. Leonart. 2005. Evaluación de tratamientos de recuperación de áreas degradadas por incendios en cuencas de montaña. Tercer Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Corrientes, Argentina. Soporte electrónico.

- Gaspari, F. J., Bruno J., Rickfelder R. M., Hauri B. A., Leonart M, Ohde Cornely I., Oroná C. y N.Cellini. 2006. Manejo Integral de las Cuencas Hidrográficas Serranas del Partido de Tornquist. Estudio de Prefactibilidad. Ediciones Universitarias de La Plata. 135 p.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E. y R. M. Marlats. 2007. "Relación precipitación – escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo aplicada a una cuenca modal del sistema serrano de la ventana. Argentina. Revista Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Tomo 39 N° 1, 21-28.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G. E. y M. I. Delgado. 2008. Determinación espacio-temporal del índice de agresividad de precipitaciones en el Sistema Serrano de Ventania. Argentina. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 49(1) 2008, 57-66
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. y G. E. Senisterra. 2009. Estimation of soil erosionability in the stream basin of Pillahuinco Grande, Province of Buenos Aires, Argentina. Cien. Inv. Agr. 35(1):43-52. Chile
- Giller, P. y B. Malmqvist. 1.998. The Biology of Streams and Rivers. Oxford University Press. 282 p.
- Gray, D.M., 1961. Synthetic unit hydrographs for small watersheds. J. Hyd. Div., Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 87, N° HY4, pp. 33-54.
- Gregersen H.M., Brooks K.N., Dixon J.A. y L.S. Hamilton. 1988. "Pautas para la evaluación económica de proyectos de ordenación de cuencas". Guía FAO Conservación Nro. 16 -FAO-SIDA. Roma. 148 p.
- GWP. 2005. Estimulando el cambio: Un manual para el desarrollo de estrategias de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y de optimización del agua. Comité Técnico. Ministerio de Asuntos Exteriores de Noruega. 52 pp.
- Hamilton, L. S. y P. N. King. 1983. Tropical Forested Watersheds. Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions. Westview Press. Boulder. Colorado. 168 p.
- Hardjono, H.W. 1980. Influence of a permanent vegetation cover on streamflow. In: Proceedings of the Seminar on Watershed Management, Development and Hydrology, Surakarta, Indonesia. 280-297 (in Indonesian).
- Harrington, H. 1946. Carta Geológica - Económica de la República Argentina. Sierra de la Ventana - Provincia de Buenos Aires. Hojas: 33 -34 m. Esc. 1:200.000.
- Harrington, H. 1947. Explicación de las cartas geológicas 33 m (Sierra de Cura Malal) y 34 m (Sierra de la Ventana). Prov. Bs.As. Dirección de Minería y Geología. Vol. 61. Buenos Aires.
- Henaos, J. 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás. Centro de Enseñanza descolarizada, Bogotá. 399 p.
- Hoffman, J., A. Gómez y J. Nuñez. 1987. Fluctuaciones de las precipitaciones en Argentina en lo que va del Siglo. II Congreso Interamericano de Meteorología.
- Huber, A. y D. López. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don). Valdivia, Chile. Revista Bosque, Fac. de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Vol. 14 (2): 11-18.
- Imagen satelital Landsat 5 y 7. Falso color compuesto TM 226/86.
- Instituto Geográfico Militar. (I.G.M.). 1970. Cartas Topográficas 3760-29-2 (Sierras de Tandil), 3760-23-4 (Tandil), 3760-24-3 (Iraola), 3760-30-2 (Fulton). Esc 1:50.000.
- INTA Castelar. 1989. Descripción de Cartas de Suelo de la Provincia de Buenos Aires. Cap.4.1: 43-55. Escala. 1:500.000.
- Irurtia, C., Cruzate, G. y F. Gaspari. 2.007. Guía de divulgación técnica. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica. INTA-UNLP. 25pp.

- Jarvis, P. G. and J. B. Stewart. 1979. Evaporation of water from plantation forest. In: Ford, E.D., Malcolm, D.C. and Atteson, J. ed. *The Ecology of Even-aged Forest Plantations*. Institute of Terrestrial Ecology, Penicuik, U.K. 327-349.
- Keidel, J. 1916. La geología de las sierras australes de la Provincia de Buenos Aires y sus relaciones con las montañas del Cabo y de los Andes. *Anales de la Dirección Nacional de Geología. y Minería*. IX, 3. Buenos Aires.
- Kirkby, M. 1994. "Erosión de suelos". Uteha, Noriega editores. 375 pp. México.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. y J.P. Miller. 1964 *Fluvial Processes in Geomorphology* (San Francisco, California: W.H. Freeman. Disponible en web.
- Likens, G. E., Bormann, F. H., Pierce, R. S., Eaton, J.S. y N. M. Johnson. 1977. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer, New York. 146 p.
- Linsley, R., Kohler, M. y J. Pahulus. 1993. Mc Graw Hill. México. 385 p.
- Liniger H. y R. Weingartner. 2008. Montañas y recursos hídricos. Documento FAO. Italia. <http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s08.htm>
- López Cadenas del Llano, F. 1998. Restauración hidrológico forestal y control de la erosión. *Ingeniería Ambiental*. Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España. 945 p.
- Lores, R., Ulibarrena, J.U., Schoëder, C., Kozarik, J.M., Bruno, J.E. y A. Nowisk. 1979. Suelos, Control del Escurrimiento y de la Sedimentación en un Área demostrativa de Tornquist -Prov. de Buenos Aires- Publicado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - (INTA) Colección Científica - Tomo XVIII. 243 p.
- Lu, H. 2001. Prediction of sheet and rill erosion over the Australian Continent, incorporating monthly soil loss distribution. CSIRO. Land and Water. Technical Report. 34 p.
- Lufafa A., Tenywa M.M., Isabirye M., Majaliwa M.J.G. y P.L.Woomer. 2003. Prediction of soil erosion in Lake Victoria basin catchment using GIS-based Universal Soil Loss model. *Agricultural Systems*. 883 -894
- Llamas, J. 1993. *Hidrología general: Principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España. 635 p
- MacLaren, J. 1996. Environmental effects of planted forest in New Zealand. *FRI Bulletin*. 180 p.
- Mármol, L. A. 2006. *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes*. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. 287 p.
- Martínez de Azarga Paredes, A. 2006. *Métodos de los coeficientes de escorrentía*. www.oasificacion.com
- Martínez Fernández, J., Ceballos Barbancho A. y M. A. Luengo Ugidos. 2001. La sequía edáfica en la cuenca del Duero. *Ecosistemas*. Revista de Ecología y Medio Ambiente. Año X N° 3. Departamento de Geografía de la Universidad de Salamanca. España.
- Mati, B. M. y R. P. C. Morgan. 2000. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *JAG* volume 2 Issue 1.
- Meyer L. D. y W.H.Wischmeier. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. 754-758 p. *Transactions of the A.S.A.E*. Michigan.
- Mintegui, J. A. 1988. Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud del declive en un terreno. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. pp: 2229-2245. Madrid
- Mintegui Aguirre, J. A. y F. López Unzu. 1990. *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.

- Minteguí Aguirre, J. A., Robredo Sánchez J., García Viñas, J. I. y C. López Leiva. 2006. Introducción a la Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas Hidrográficas. *Ecología*, N° 20: 389-414. Ed. Publicaciones del O. A. Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Muñoz Cárpena, R. y A. Ritter Rodríguez. 2005. *Hidrología Agroforestal*. 348 pp. Gobierno de Canarias. Ediciones Mundi Prensa
- Novoa, P. 1998. Estimación de la evapotranspiración actual en bosques: teoría. *Bosque* 19(1): 111-121.
- Onstad C. A. y G. R. Foster. 1975. Erosion modeling on a watershed. 288-292. *Transactions of the A.S.A.E. Michigan*.
- Orsolini, H.E., Zimmermann, E.D. y P. BASILE. 2000. *Hidrología. Procesos y Métodos*. UNR Editora, 319 p. Rosario.
- Ortiz Vera, O. 2004. Evaluación hidrológica. *Revista Hidrored* 2-7 p .Perú.
- Prego, A. 1988. Erosión actual de la República Argentina, conclusiones y recomendaciones. *Prosa el deterioro del ambiente en la Argentina*. Pag. 187-190.
- Rábade Blanco, J. M. 2006. La ordenación agrohidrológica de cuencas como herramienta en la planificación de la lucha contra la desertificación y el despoblamiento del medio rural www.sidym2006.com/imagenes/pdf/ponencias/17_se.pdf
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A, McCool, D.K. y D.C.Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (R.U.S.L.E.). USDA. *Agricultural Handbook N°703*. USA. 384 p.
- Robert C. y L. Wainger. 1990 “No Accounting for Nature: How Conventional Economics Distorts the Real Value of Things”. *The Washington Post*, Washington, D.C. Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable
- Rojas, A. y A. Conde. 1985. Estimación del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo para el centro-este de la República Argentina. *Ciencia del Suelo*, Vol. 3:1-2.
- Ruggiero, R. y H. Conti. 1988. Síntesis climática. Public. FECIC 25-45.
- Sala, J. M., González, N. y E. Kruse. 1983. Generalización hidrológica de la Provincia de Bs.As. Seminario de Hidrología de Grandes Llanuras. UNESCO. CONAPHI - Vol.II. 973-1010. Olavarría.
- Sampurno Bruijnzeel, L.A.. 1997. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Editors: E. K. Sadanandan Nambiar and Alan G. Brown. CSIRO Canberra Australia. 571p.
- Sánchez San Román, F. J. 2004. *Hidrología e Hidrogeología*. Universidad de Salamanca. España. En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>)
- Smith, R. E. and D. F. Scott. 1992. The effects of afforestation on low flows In various regions of South Africa. *Water SA* 18: 185-194.
- Snyder, F. F., 1938. Synthetic unit – graphs. *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 19: 447 - 454.
- Soil Conservation Service, 1972. *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U. S. Dept. Of Agriculture, disponible en U. S. Government Printing Office, Washington D. C.
- SSRH. Dirección Nacional de Políticas, Coordinación y Desarrollo Hídrico, Área Coordinación de Cuencas -SSRH. *Coordinación de Cuencas Hídricas: Un Desafío Permanente*. Documento preliminar. 2002.
- Suárez V., L. M. 1993. Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Venezuela.

- Teruggi, M & J. Kilmurray. 1961. Tandilia. Relatorio de la Geología de la Provincia de Buenos Aires, VI Congreso. Geológico. Argentino. 55-77.
- Tricart, J.L. 1973. Geomorfología de la pampa deprimida. INTA. Colección Científica XII. 202 p. Buenos Aires
- Urciuolo, A., Iturraspe, R., Rosanigo, B., Parson, A., Moyano, E. y M. Villarreal. 2007. Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes IX. Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. - Trelew – Chubut, Argentina
- Vargas, R., Francke Campaña, S., Tokugawa, K. y M. Makita. 1998. Manual de control de erosión. Chile, CONAF, JICA. 66 p.
- Véneré, M., Clause, A., Dalponte, D., Rinaldi, P., Cazenave, G., Varni, M., Vives, L. y E. Usunoff. 2004. Simulación de inundaciones en llanuras. Aplicación a la Cuenca del Arroyo Santa Catalina, Azul. Mecánica Computacional. Vol. XXIII G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky (Eds.) Bariloche, Argentina.
- Vich, A. I. J. 1989. Erosión hídrica: Estimación y medición de pérdidas de suelo. Curso Latinoamericano sobre detección y control de la desertización. Ed. F.A. Roig. CRICYTME. Buenos Aires.
- Ward, R.C. y M. Robinson. 1990. Principles of Hydrology. McGraw Hill, London. 365 p.
- Williams J.R.. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. 965-974 pp. Water resources bulletin. American resources association. Vol.11, N° 5.
- Wischmeier W.H. y D.D.Smith. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. AGU 39: 285-291.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Unites States Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook N°537. Washington. USA. Pp. 51.
- Yrigoyen, M. 1975. Geología del subsuelo y plataforma continental. VI Congreso Geológico Argentino. 140-168. Buenos Aires.
- Zimmermann, E. 2002. Estrategias para la calibración de un modelo hidrológico superficial y subterráneo de alto nivel de detalle. In: XXXII IAH & VI ALHSUD Congress.

AGRADECIMIENTOS

- Comisión Nacional de Actividades Espaciales de la República Argentina (C.O.N.A.E.).
- Centro de Información Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.), Comando Regiones Aéreas de la Fuerza Aérea Argentina, por el acceso a la información pluviográfica de la Estación Meteorológica en Coronel Pringles.
- A la Diseñadora Gráfica Silvina Gaspari.

PAGINAS WEB RECOMENDADAS

<http://www.ausma.uncoma.edu.ar/academica/materias>
<http://geografia.laguia2000.com/>
<http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s08.htm>
http://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/CI61R/1/material_alumnos/objeto/12880
http://www.uach.cl/externos/epicforce/pdf/guias%20y%20manuales/varios/vargas_r_et_al_1998_manual_control_erosion.pdf
<http://www.satimagingcorp.es/gallery-quickbird.html>
<http://ggt.conae.gov.ar/catalogo/index.htm>
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
<http://www.landsat.org/>
<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>
<http://www.clarklabs.org/>
<http://www.uc.pt/cienterra/lic/DisciplinasGeologia/>
<http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea65s/ch13.htm>
<http://www.oas.org/usde/Spanish/publicaciones1.htmv>
<http://www.fomento.es>

GLOSARIOS DISPONIBLES EN INTERNET

http://www.inforiesgos.es/es/info_interes/glosario/
<http://ing.unne.edu.ar/pub/TEMA%20VII.pdf>
<http://web.usal.es/javisan/hidro>
<http://www.thermolab.com.ar/>
<http://ing.univaq.it>
<http://ocwus.us.es/>
<http://www.ott-hydrometry.de>
<http://www.dnh.gub.uy>

<http://www.hec.usace.army.mil>

<https://www.u-cursos.cl>

<http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/>

<http://www.usgs.gov>

<http://www.inta.gov.ar/suelos/index.htm>

<http://www.ing.unp.edu.ar/wicc2007>

<http://www.ada.gba.gov.ar/>

<http://www.fomento.es>

ÍNDICE

MARCO CONCEPTUAL DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	1
<i>DEFINICIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA</i>	<i>1</i>
<i>PARTICULARIDADES DE LAS CUENCAS DE MONTAÑA Y DE LLANURA.....</i>	<i>5</i>
<i>PARTICULARIDADES DE LAS CUENCAS RURALES Y URBANAS</i>	<i>8</i>
<i>CONCEPCIÓN DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS</i>	<i>10</i>
<i>RESEÑA HISTÓRICA DEL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS</i>	<i>11</i>
<i>ANTECEDENTES LOCALES DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....</i>	<i>11</i>
<i>LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ARGENTINA.....</i>	<i>13</i>
<i>VISIÓN Y PERSPECTIVAS DEL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS</i>	<i>14</i>
<i>PROCEDIMIENTOS DE GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE.....</i>	<i>17</i>
<i>LOS PROCESOS DE DECISIÓN</i>	<i>17</i>
EL SISTEMA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	31
<i>EL COMPLEJO FÍSICO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA</i>	<i>31</i>
<i>COMPORTAMIENTO DEL AGUA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA</i>	<i>31</i>
<i>PARÁMETROS DE FORMA.....</i>	<i>36</i>
<i>PARÁMETROS DE RELIEVE.....</i>	<i>39</i>
<i>PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA</i>	<i>46</i>
<i>RELACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA</i>	<i>49</i>
ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA.	50
CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE	50
<i>CICLO HIDROLÓGICO.....</i>	<i>50</i>
<i>SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE UNA CUENCA ANTE UNA LLUVIA.....</i>	<i>57</i>
<i>DISPOSICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DURANTE UNA TORMENTA.....</i>	<i>58</i>
<i>GENERALIDADES DEL BALANCE HIDROLÓGICO</i>	<i>58</i>
<i>HIDROLOGÍA FORESTAL</i>	<i>60</i>
ESTIMACIÓN DE CAUDAL LÍQUIDO.....	66
<i>ESCURRIMIENTO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA</i>	<i>66</i>
<i>FACTORES QUE AFECTAN EL ESCURRIMIENTO DE UNA CUENCA</i>	<i>67</i>
<i>MODELOS PARA DETERMINAR EL ESCURRIMIENTO.....</i>	<i>69</i>
<i>CONCEPTO DE HIDROGRAMA.....</i>	<i>72</i>
<i>ELEMENTOS DE UN HIDROGRAMA</i>	<i>74</i>
<i>HIDROGRAMA DE UNA CRECIDA.....</i>	<i>77</i>
<i>ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS.....</i>	<i>79</i>
<i>MODELO GENERAL DE UN SISTEMA HIDROLÓGICO</i>	<i>82</i>

SISTEMA LINEAL EN TIEMPO CONTÍNUO	84
FUNCIÓN RESPUESTA DE IMPULSO	85
SISTEMA LINEAL EN TIEMPO DISCRETO	87
FUNCIÓN RESPUESTA DE PULSO DISCRETO	88
HIDROGRAMA UNITARIO	91
POSTULADOS BÁSICOS DEL HIDROGRAMA UNITARIO	93
CONCEPTO DE DURACIÓN UNITARIA (tu)	95
OBTENCIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO	97
APLICACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO	100
HIDROGRAMA EN S	102
HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO	105
HIDROGRAMA SINTÉTICO DE SNYDER	105
HIDROGRAMA ADIMENSIONAL DEL SERVICIO CONSERVACIÓN SUELOS (S.C.S.)	109
MÉTODO DEL S.C.S. PARA LAS ABSTRACCIONES	111
ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE ESCURRIMIENTO POR EL NC	118
COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	124
MÉTODOS DE CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	126
METODOLOGÍAS BÁSICAS PARA DETERMINAR EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL .	128
MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA	130
CLASIFICACIÓN DE MODELOS	130
SIMULACIÓN HIDROLÓGICA	131
MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	132
ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	138
TORRENTA DE DISEÑO	139
MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN / ESCURRIMIENTO	141
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN. ECUACIONES DE CÁLCULO	142
DETERMINACIÓN DEL PERFIL TRANSVERSAL AL CAUCE	144
COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING	145
AFORO	147
CURVAS ALTURA-CAUDAL	152
TRÁNSITO DE CAUDALES. MÉTODO DEL TIEMPO DE RETRASO	155
SIMULACIÓN HIDROLÓGICA POR PROGRAMAS INFORMÁTICOS	156
HYMO 10	156
HEC-HMS 2.1.1	156
ESTIMACIÓN DE CAUDAL SÓLIDO	159
EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL	159
EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL Y EN PROFUNDIDAD	160
FACTORES FÍSICOS DETERMINANTES DE LA EROSIÓN HÍDRICA	161
FORMAS DE EROSIÓN	162
EROSIÓN EN SUPERFICIE	162
MOVIMIENTOS EN MASA	163
1. Movimientos lentos	163

2. Movimientos rápidos.....	164
3. Deslizamientos.....	164
4. Hundimientos.....	165
MODELOS DE EVALUACIÓN. FÓRMULAS EMPÍRICAS.....	168
MODELO U.S.L.E.....	168
FACTOR ÍNDICE DE EROSIÓN PLUVIAL O EROSIONABILIDAD DEL AGUACERO (R).....	168
FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (K).....	170
FACTOR TOPOGRÁFICO (LS).....	171
FACTOR DE ORDENACIÓN DE CULTIVOS (C).....	176
FACTOR DE CONTROL DE EROSIÓN MEDIANTE PRÁCTICAS DE CULTIVO. (P).....	179
CLASIFICACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO.....	179
MODELO M.U.S.L.E.....	182
MODELO R.U.S.L.E.....	183
MÉTODO DE FOURNIER.....	186
MÉTODOS DE DJOROVIC.....	187
MODELOS DE EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELOS EN CANALES DE ESCURRIMIENTO.....	188
RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO FORESTAL.....	190
APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	193
CARTOGRAFÍA.....	193
SISTEMAS DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA.....	193
ESCALA.....	196
TIPOS DE CARTOGRAFÍA.....	197
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICAS (S.I.G.).....	198
COMPONENTES DE UN S.I.G.....	199
TIPO DE DATOS DE UN S.I.G.....	200
S.I.G. VECTORIAL.....	201
S.I.G. RASTER.....	202
SISTEMAS ORIENTADOS A OBJETOS.....	204
MÉTODOS PARA INTRODUCIR DATOS GEOGRÁFICOS A UN S.I.G.....	205
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS).....	205
TELEDETECCIÓN.....	205
ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA.....	206
IMÁGENES SATELITALES.....	208
COLOR.....	208
RESOLUCIÓN.....	209
DISTORSIÓN Y CORRECCIÓN DE LAS IMÁGENES.....	210
CONTRASTE.....	210
TÉCNICA DE FILTRADO.....	211
INTERPRETACIÓN VISUAL - TRATAMIENTO DIGITAL.....	212
INTRODUCCIÓN A LOS SATÉLITES Y SENSORES DE USO MÁS FRECUENTE EN EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	213

LANDSAT	213
ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer).....	214
IKONOS	215
QUICKBIRD	215
SAC-C	215
SPOT	216
RADAR.....	217
IRS (Indian Remote Sensing Satellite).....	217
NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)	217
OPERACIONES CON IMÁGENES.....	218
COMPOSICIONES EN COLOR	218
CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES	220
CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	220
CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA	221
ÍNDICES DE VEGETACIÓN	221
• RATIO	222
• N.D.V.I.: Índice normalizado de vegetación.....	222
OTROS ÍNDICES DE VEGETACIÓN	226
PROCESAMIENTO DE CAPAS TEMÁTICAS	228
EL FENÓMENO DEL GEODINAMISMO TORRENCIAL.	230
DINÁMICA DE UN SISTEMA HIDROGRÁFICO	230
ESTABILIDAD DE LADERAS.....	230
ORÍGEN DEL CAUDAL SÓLIDO.....	232
EL FENÓMENO TORRENCIAL.....	233
RÉGIMEN TORRENCIAL.....	233
CLASIFICACIÓN DE LOS TORRENTES.....	235
CONTROL DE LA ACTIVIDAD TORRENCIAL.....	236
TIPOS DE DIQUES PARA CORRECCIÓN DE TORRENTES.....	248
ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DIQUE DE CORRECCIÓN DE TORRENTES.....	253
RETENCIÓN DEL MATERIAL SÓLIDO.....	256
FORMACIÓN DEL CONO DE DEYECCIÓN Y DEL CANAL DE DESAGÜE	258
IMPORTANCIA DE LA SEGUNDA FASE.....	261
DISEÑO DE DIQUES DE CORRECCIÓN DE TORRENTES	262
METODOLOGÍA BÁSICA DE DISEÑO DE DIQUES	262
PARTES CONSTITUTIVAS DE UN DIQUE.....	263
ESTABILIDAD DE UN DIQUE.....	265
EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LOS DIQUES.....	267
DIMENSIONAMIENTO DE UN DIQUE TORRENCIAL	268
1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE EMPLAZAMIENTO DEL DIQUE.....	269
2. DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE DE COMPENSACIÓN	270
3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA OBRA.....	277
PROPÓSITO DE LA CORRECCIÓN DE TORRENTES	284
ORDENACIÓN AGROHIDROLÓGICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	286
ORDENACIÓN AGROHIDROLÓGICA Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL	287
ORDENAMIENTO TERRITORIAL	288

PLAN DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	290
FUNCIÓN DE UN PROGRAMA DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	294
GESTIÓN DE CATÁSTROFES NATURALES	295
GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	298
IMPORTANCIA DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)	298
PRINCIPIOS RECTORES DE LA POLÍTICA HÍDRICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA ..	301
CÓDIGO DE AGUA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES	305
BIBLIOGRAFÍA	308
AGRADECIMIENTOS	314
PAGINAS WEB RECOMENDADAS	315
GLOSARIOS DISPONIBLES EN INTERNET	315
ÍNDICE	317



2010

diseño gráfico silvina gaspar

MANUAL DE MANEJO
INTEGRAL DE
CUENCAS
HIDROLÓGICAS