

LA CUENCA COMO UNIDAD NATURAL DE ORDENACIÓN TERRITORIAL *

Ivonne Aránguiz.

Resumen

Se presenta la cuenca como la unidad natural de ordenación del territorio donde se conjugan los procesos geomorfológicos del sustrato con los sistemogénicos de la cobertura biótica. Se analiza la cuenca hidrográfica como un territorio delimitado por la propia naturaleza, expresados como los lindes de escurrimiento de las aguas que conducen hacia un mismo cauce. Se establece la relación entre la cuenca como resultante de la ordenación ecológica del ecosistema con el predio y municipio, que resultan de la organización administrativa sobrepuesta e integrada a la cuenca. Luego se analizan los catorce tipos de cuencas superficiales y los tipos espaciales de drenaje. En la tercera parte se presenta un análisis de la morfología de la cuenca desde la perspectiva de la forma, del relieve y de la red hidrográfica. Luego se analiza lo relativo al suelo y al clima de la cuenca. En el último acápite se presenta lo relativo a la gestión de la cuenca.

Palabras claves: ordenación territorial, gestión, cuenca, predio, municipio.

CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	483
CUENCA, PREDIO Y MUNICIPIO.....	484
CLASIFICACIÓN DE CUENCAS.....	487
MORFOLOGÍA DE LA CUENCA.....	489
CONCEPTOS.....	490
PARÁMETROS DE RELIEVE.....	490
PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA.....	491
EL SUELO.....	492
CONCEPTOS.....	492
EL CLIMA.....	493
CONCEPTOS.....	493
DATOS DISPONIBLES.....	494
PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL.....	494
BALANCES HÍDRICOS.....	494
GESTIÓN.....	495
BIBLIOGRAFÍA.....	496

INTRODUCCIÓN

En los estudios o proyectos de ordenación territorial uno de los mayores problemas es delimitar la unidad ecológica con la cual se ha de trabajar. Esto debe ser resuelto antes de comenzar con el estudio detallado de cada uno de los elementos que componen la unidad de trabajo, que puede ser el predio o el municipio cuando se trata de estructuras administrativas del territorio; o cuando se trata de estructuras ecológicas o naturales, la unidad puede ser la cuenca.

La cuenca hidrográfica constituye el área de alimentación de los ríos (Larrousse, 1979) y se define como el territorio delimitado por la propia naturaleza, esencialmente por los lindes de las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales que convergen hacia un mismo cauce (Duorojeanni, 1995).

La comarca es la unidad que corresponde al ámbito territorial donde se estructuran las relaciones básicas de la actividad económica, social e histórica comunes, y que tienen como finalidad hacer efectivos principios

de eficacia, de descentralización y de participación en la prestación de los servicios públicos (ley 6/1987 sobre la organización comarcal de Cataluña).

La comarca, por lo tanto, incorpora a la cuenca como unidad territorial integrada, con los actores sociales. La comarca catalana coincide con lo que en Francia se denomina *petite region*, *pays* o *contrée*, con relación a su organización territorial (Durán, 1997).

Se requiere establecer un centro de referencia y origen desde el cual sea posible relacionar la complejidad ecosistémica. Este nivel se denomina ecosistema-origen. El ecosistema es el centro de la ecología; es el concepto más relevante con relación a los problemas del hombre y del medio (Odum, 1972).

Desde que se enunció la doctrina del holismo, los conceptos parciales de clima, suelo, vegetación y comunidad, entre otros, dejaron de tener el valor primitivo que se les asignaba con un criterio analítico. Para que expresen su valor real, deben ser considerados con criterio sintetizador o de ecosistemas (Fosberg, 1961). Los problemas de los recursos naturales pueden ser planteados y resueltos en su imagen ecosistémica. Esta imagen debe representar el fenómeno tal como se presenta en la naturaleza. Una vez logrado el objetivo es necesario ejecutar la solución, lo cual implica regresar al fenómeno.

La gestión de cuenca es una de las bases fundamentales para lograr el desarrollo sustentable. Se asocia fuertemente a propuestas de descentralización, regionalización y, sobre todo, a establecer los nuevos papeles que le corresponden a actores locales y comunales. Sólo quienes conozcan su entorno sabrán hasta dónde puede ser éste intervenido, sin causar daños que lleven a un colapso irreversible (Duorojeanni, 1993).

Durante el año 1960 se inician los inventarios, evaluaciones y diagnóstico de los recursos naturales en casi todos los países de América Latina. Se crearon oficinas de evaluación de recursos naturales, las cuales

* Aránguiz, I. 2002. La cuenca como unidad natural de ordenación territorial. En: Gastó, J., P. Rodrigo e I. Aránguiz. Ordenación Territorial, Desarrollo de Predios y Comunas Rurales. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

funcionaron sobre la base de donaciones y estímulos exteriores. Conforme a éstos fueron disminuyendo, estas oficinas fueron desapareciendo, aunque dejaron una importante cantidad de información que se utiliza hasta hoy.

Una actividad que debe ser reforzada es la gestión de los recursos hídricos en el ámbito de la cuenca hidrográfica. Si se concentraran los esfuerzos para incorporar la dimensión ambiental, los cuales se encuentran hoy dispersos, se podría mejorar la calidad del agua en el ámbito de la cuenca, con lo cual se controlaría o reduciría un 50% de los actuales problemas ambientales.

La cuenca hidrográfica es un territorio delimitado por la propia naturaleza, esencialmente por los lindes de las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales que convergen hacia el mismo cauce. La cuenca, sus recursos naturales y sus habitantes, poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales, que les confieren características que son particulares a cada una (Cano y López, 1976).

Físicamente, representa a un territorio definido, a una fuente natural de captación y concentración de agua superficial y por lo tanto tiene connotación esencialmente volumétrica e hidrológica. Al mismo tiempo, la cuenca y el agua captada por la misma, es una fuente de vida para el hombre, aunque también de riesgo cuando ocurren fenómenos de la naturaleza extremos como sequías, inundaciones, o el agua es contaminada.

En grandes cuencas con descargas de agua importante y con amplios valles relativamente planos, el eje de los ríos constituye también una zona de articulación entre sus habitantes, sobre todo por el uso del cauce del río para navegación, transporte y comunicación.

El territorio de las cuencas facilita la relación entre sus habitantes, independientemente de que si éstos se agrupan dentro de dicho territorio en comunas delimitadas por razones político-administrativo, debido a su dependencia común a un sistema hídrico compartido, a los caminos y vías de acceso y al hecho que deben enfrentar peligros comunes. Debido a esta interdependencia, existen sistemas de conciliación de intereses entre los diferentes actores que dependen de una misma cuenca y del agua que producen conflictos entre ellos.

Las cuencas hidrográficas facilitan la percepción del efecto negativo de las acciones que el hombre realiza sobre su entorno, sobre todo porque se refleja en la contaminación del agua. Esto es claramente indicado en las bases de la creación de Agencias de Cuencas de Francia, que sostienen que el medio acuático es una entidad que alberga y sostiene todo un mundo animal y vegetal, sus aguas y sus riberas conforman un edificio biológico particular. La intervención no pensada sobre uno solo de estos elementos rompe este equilibrio

precario y determina un empobrecimiento general del medio natural. Por lo anterior, sostienen que la gestión armónica de los recursos hídricos requiere:

- Admitir, antes que todo, que una cuenca hidrográfica o hidrogeológica constituye una unidad territorial.
- Reconocer que considerar y preservar esta unidad es una condición esencial para la satisfacción óptima de la demanda de agua de diferentes escenarios.
- Reconocer la necesidad de definir objetivos específicos y apropiados a cada ámbito o territorio específico dentro de cada cuenca; y de ejecutar las obras y acciones necesarias para alcanzar tales objetivos.
- Aceptar que todos los usuarios tienen un legítimo derecho sobre el agua y, en consecuencia, admitir que cada uno de ellos tiene, en forma equivalente, limitaciones para su propio uso.

La cuenca es, además, una unidad natural que sirve de base como territorio para articular procesos de gestión que tienden al desarrollo sustentable. Este último es función del crecimiento económico, la sustentabilidad ambiental y la equidad. Los procesos de gestión integrada de cuencas, por definición, deben por lo menos lograr alcanzar metas de aprovechamiento de los recursos de la cuenca (crecimiento económico) y de manejo de los recursos, con el fin de preservarlos, conservarlos o protegerlos (sustentabilidad ambiental). La equidad se alcanzará en la medida que los sistemas de gestión sean participativos y democráticos.

La cuenca constituye una unidad ecológica y geomorfológica de ordenación territorial natural del territorio, donde intervienen los procesos naturales de génesis del ecosistema, que conduce finalmente hacia el clímax. El proceso geomorfológico es el más lento y el de mayor jerarquía del sistema el cual concluye en darle la forma al paisaje y ordenar el movimiento del sustrato desde las partes más altas hacia las laderas y depresiones. El agua se organiza en la cuenca de acuerdo con las leyes de la gravedad y los movimientos simultáneos de sólidos y líquidos, generando en un paisaje ecotipos definidos que constituyen el escenario ideal para la evolución de la biocenosis. Esta cobertura vegetal y animal se organiza en el espacio como consecuencia de las características del sustrato geomorfológico hasta alcanzar el estado de clímax.

CUENCA, PREDIO Y MUNICIPIO

La biogeoestructura corresponde al recurso natural, donde se conjugan los componentes abióticos del sustrato y atmósfera en un solo sistema al integrarse con los componentes bióticos de la fitocenosis y la zooocenosis. Corresponde al componente natural de los ecosistema-origen de la biosfera terráquea.

La materia abiótica se organiza en niveles de progresi-

va complejidad. Las mezclas de componentes sólidos, líquidos o gaseosos, se ordenan en estratas que presentan atributos diferentes que las sustancias originales. Por ejemplo, los suelos tienen atributos definidos que son diferentes de los atributos propios de cada uno de sus componentes en forma individual.

Existe un mayor nivel de complejidad que es la cuenca. En ella las materias primarias se organizan dando lugar a sistemas de diversa complejidad. Así (Figura 1 y 2):

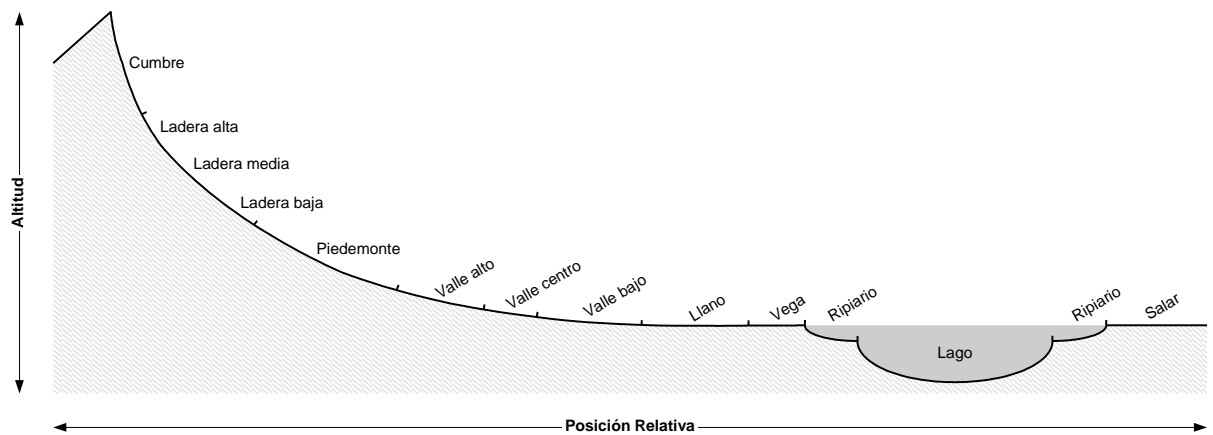


Figura 1. Esquema generalizado de la proyección vertical de una cuenca. Los atributos más relevantes se caracterizan de acuerdo con la posición relativa de la cuenca (Gastó y Gallardo, 1985)

La unidad espacial natural de biogeoestructura es la cuenca, donde se integran sólidos-líquidos y, gaseosos, formando unidades definidas de ocupación del espacio. El conjunto de cuencas constituye una región.

La biocenosis es un producto de la interacción entre ecotopo y organismos. El proceso de génesis de la fitocenosis y zoocenosis concluye por generar arquitecturas fito y zoocenósicas diferentes, de acuerdo con su posición en la cuenca.

En cuencas con cierto grado de madurez avanzada, la ordenación de los recursos, hábitat, fitocenosis y zoocenosis conduce a un modelo generalizado de arquitectura espacial, con sus respectivos componentes y conexiones.

La vegetación debe corresponder a la posición relativa dentro de la cuenca. El uso que se le dé a la tierra, el tipo de aldeas y la organización socioestructural que presente, debe estar de acuerdo con las características del medio.

La organización administrativa de la cuenca estará dada por el o los predios y las comunas que la componen (Figura 3). La socioestructura (dada por la organización social) interactúa con la biogeoestructura propia del sector donde se localiza el predio. La tecnoestructura interactúa con ambas. El entorno y los sistemas incidentes corresponden a sus conexiones con el medio y sistemas externos. La estructura y organización del predio debe, por lo tanto, estar circunscrita

- Los sólidos se organizan en una geofoma diferente que la natural, lo cual corresponde a la fisiografía del terreno o geofoma, que incluye los niveles inferiores de complejidad.
- Los líquidos se organizan dando lugar a la hidroforma.
- Las masas gaseosas se organizan fisiográficamente dando lugar a la aeroforma.

dentro de los grados de libertad de la biogeoestructura, lo cual incluye tanto sus atributos intrínsecos como su posición espacial. Si se trata de una gran cuenca, numerosos predios o comunas pueden ubicarse dentro de ésta, los cuales presentan los atributos propios de la posición espacial donde se localizan. En este caso debe conjugarse lo ecológico con lo administrativo.

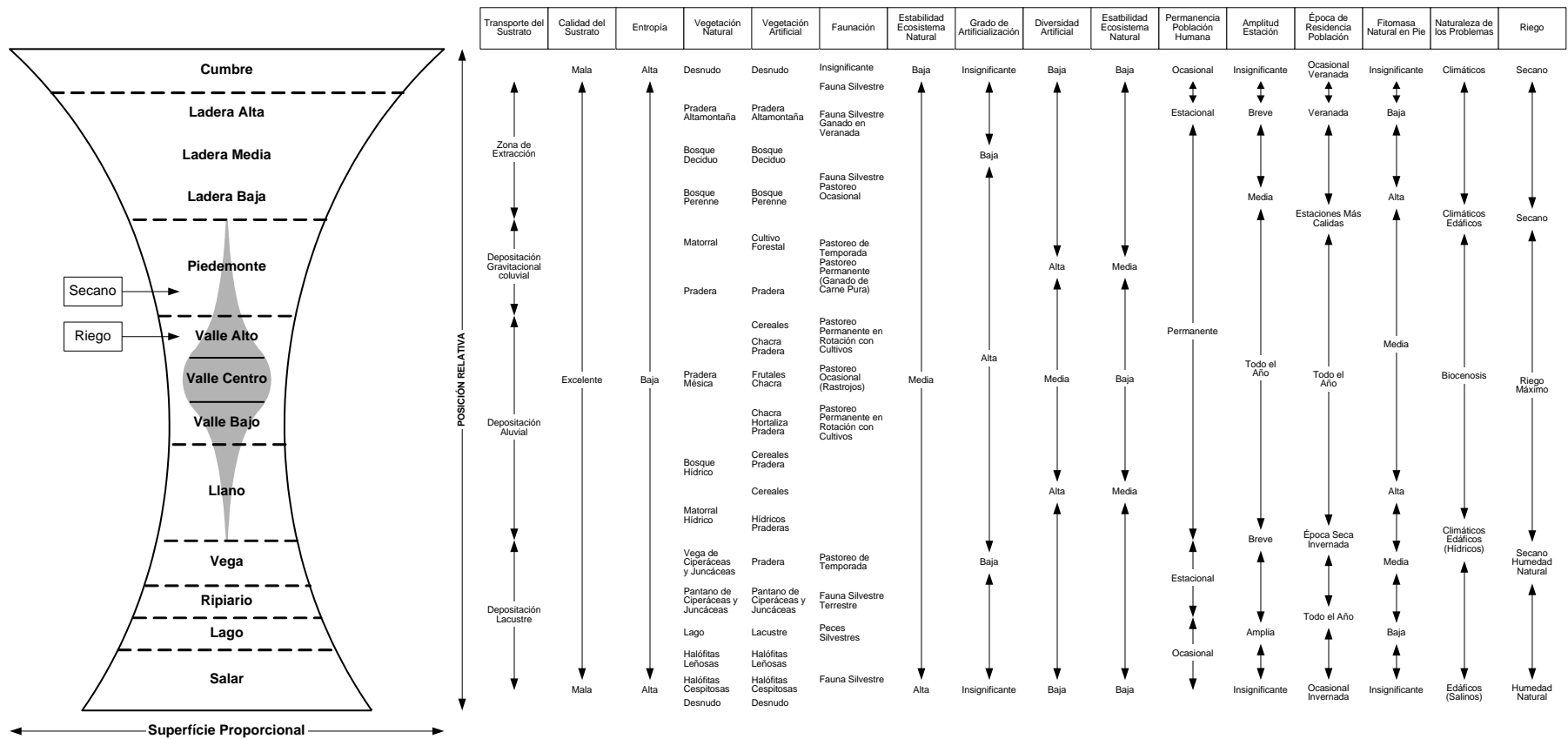


Figura 2. Esquemas generalizados de la proyección horizontal de una cuenca. Los atributos más relevantes se caracterizan de acuerdo con la posición relativa de la cuenca (Gastó y Gallardo, 1985)

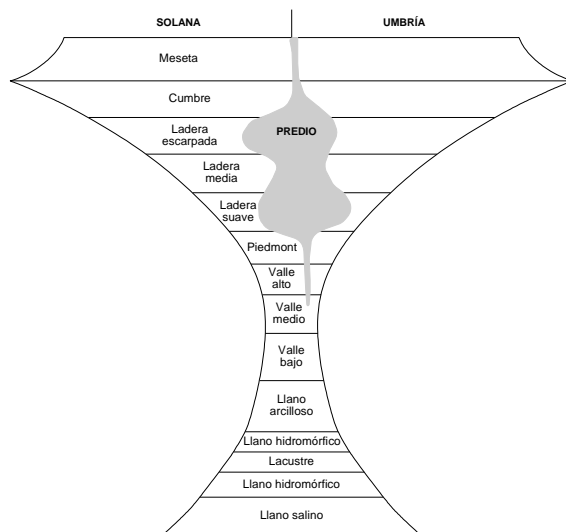


Figura 3. Esquema generalizado de la proyección horizontal de una cuenca, donde se indica la posición relativa ocupada por los predios Carquindaño y Yerba Loca de la V región (Gastó, Contreras, Cosio y Demanet, 1986)

CLASIFICACIÓN DE CUENCAS

La clasificación de cuencas se basa en la densidad de corrientes, textura y forma, factores todos ellos deducibles por fotointerpretación a escala 1:20.000. Se distinguen en ella 14 tipos de cuencas superficiales y tres tipos espaciales de drenaje interno.

CUENCAS SUPERFICIALES

Cuencas de Textura Fina

Son aquellas en las que el espaciamiento medio entre tributarios y corrientes de primer orden es menor a 0,6 cm en la fotografía aérea. Cuencas de este tipo, reflejan elevados niveles de escorrentía superficial, roca madre impermeable y suelos de baja permeabilidad (Figura 4).

Cuencas de Textura Media

Son aquellas en las que el espaciamiento medio entre corrientes de primer orden oscila entre 0,6 y 5 cm. La escorrentía es media, la textura es intermedia y la permeabilidad también (Figura 4).

Cuencas de Textura Gruesa

La separación entre corrientes de primer orden es superior a 5 cm. La escorrentía superficial es menor, la roca es más resistente, aunque más permeable; y los suelos tienen elevada permeabilidad (Figura 4).

Cuencas Dendríticas

Es el patrón que más frecuentemente se presenta y se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos. Su presencia indica suelos homogéneos y se presenta en zonas de rocas sedimentarias blandas, todas volcánicas, depósitos glaciares y antiguas llanuras costeras (Figura 4).

Cuencas Pinnadas

Son cuencas dendríticas modificadas e indican un elevado contenido de limo en el suelo. Son típicas de zonas de loess o llanuras aluviales de textura fina. El drenaje tiene la forma de nerviación de ciertas hojas, en el que los tributarios se juntan formando ángulos casi rectos que se van agudizando aguas arriba (Figura 4).

Cuencas de Drenaje Rectangular

Es otra variable del drenaje dendrítico. Los tributarios suelen juntarse con las corrientes principales en ángulos casi rectos y dan lugar a formas rectangulares controladas por las fracturas y las juntas de las rocas. Cuanto más claro es el patrón rectangular, más fina será la cubierta del suelo. Suelen presentarse sobre pizarras metamórficas, esquistos y gneis; en areniscas resistentes si el clima es árido, o en areniscas de poco suelo en clima h (Figura 4).

Cuencas de Drenaje Angulado

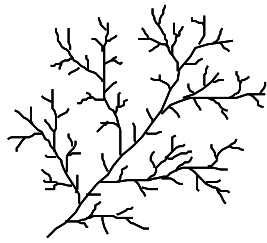
Es una variante más del drenaje dendrítico en la que las fallas, fracturas y sistemas de unión han modificado su forma clásica. Aguas arriba son comunes las curvas fuertes, formando ángulos grandes, ya que los tributarios suelen estar muy controlados por las rocas. El tipo y la dirección de los ángulos pueden reflejar un tipo específico de roca. Por ejemplo, las areniscas tienen tendencia a formar uniones paralelas, mientras que las calidades dan lugar a uniones muy agudas (Figura 4).

Cuencas de Drenaje Enrejado

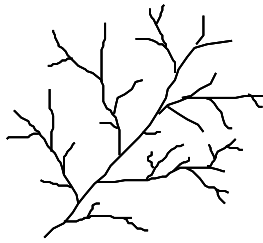
Presentan tributarios paralelos y pequeños arroyos también paralelos que se juntan en ángulos rectos. Refleja más la estructura de la roca madre que el tipo de roca; y usualmente indica rocas sedimentarias plegadas o intercaladas en las cuales las corrientes principales siguen las uniones de las capas (Figura 4).

Cuencas de Drenaje Barbado

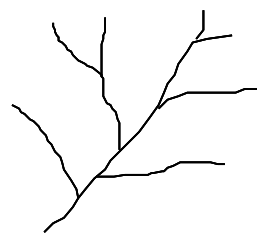
Se presentan cuando otras formas de drenaje se han visto modificadas por alabeos o cambios topográficos. El resultado indica un elevado grado de roturas tectónicas (Figura 4).



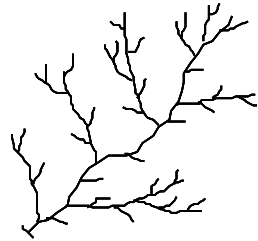
Cuenca de textura fina



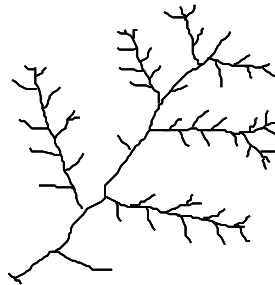
Cuenca de textura media



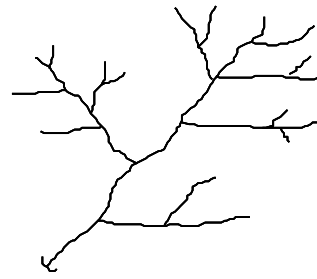
Cuenca de textura gruesa



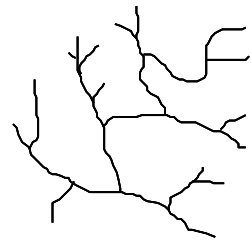
Cuencas dendríticas



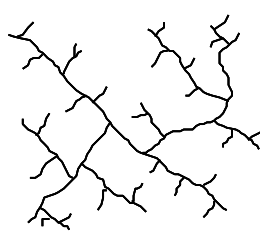
Cuencas pinnadas



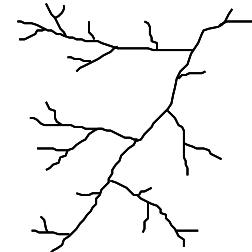
Cuencas de drenaje rectangular



Cuenca de drenaje angulado



Cuenca de drenaje enrejado



Cuenca de estructura barbada

Figura 4. Clasificación de los tipos de cuencas (MOPT, 1992)

Cuencas de Drenaje Desordenado

Son sistemas de drenaje no integrado, resultantes de formas de suelo relativamente jóvenes con topografía llana o suave y elevada capa freática. En las depresiones existen zonas pantanosas, marjales, lagunas. Suelen presentarse en llanuras jóvenes, al final de morrenas y en llanuras aluviales (Figura 5).

Cuencas de Drenaje Paralelo

Se presentan en zonas homogéneas, de pendientes uniformes y suaves en las cuales las corrientes principales reflejan fallas o fracturas. Los tributarios suelen unirse formando ángulos generalmente iguales. Son típicas de llanuras costeras y de grandes afloramientos basálticos (Figura 5).

Cuencas de Drenaje Radial o Centrípeto

Esta forma de drenaje se caracteriza por una red circular con canales paralelos procedentes de un punto elevado. Suele existir una corriente colectora principal que circula alrededor de la base de la elevación topográfica. Los volcanes y cerros aislados suelen presentar este tipo de drenaje (Figura 5).

Cuencas de Drenaje Anular

Es similar, pero en este caso las uniones de la roca madre o las fracturas hacen que los tributarios sean paralelos. Se presentan estos tipos de cuencas en cerros graníticos o sedimentarios (Figura 5).

Cuencas de Drenaje Centrípeto

Es una variante del sistema radial en la que el drenaje se dirige hacia un punto central. Suele reflejar una depresión o el fin de un anticlinal o sinclinal erosionado (Figura 5).

CUENCAS CON DRENAJE INTERNO

La falta de un sistema integrado de drenaje es significativa también para la identificación del territorio y de las características geomorfológicas. Usualmente está asociado a materiales granulares de alta permeabilidad, sobre rocas porosas o solubles que dan lugar a fuertes drenajes subterráneos, calizas, corales, dunas y colinas costeras (Figura 5).

Termokarst

Suelen presentarse en sedimentos mal drenados de grado fino o sobre material orgánico de regiones de permafrost. El hielo provoca roturas y da lugar a formas poligonales, a veces hexagonales, que crean depresiones y acumulaciones de agua (Figura 5).

Cuencas de Drenaje Trenzado

Se desarrollan muy localmente y no suelen servir como forma de clasificación. Los canales que constituyen el sistema son inestables y reflejan materiales gruesos (Figura 5).

Pequeñas formas del terreno con cuencas insuficientes pueden no desarrollar una forma de drenaje. Entre ellas se pueden citar las dunas de arena y zonas glaciares, entre otros.

DRENAJE ARTIFICIAL

En climas húmedos de topografía llana pueden encontrarse estructuras de drenaje artificial, en un intento de bajar el nivel de la capa freática. No se debe confundir con acequias de riego de zonas áridas o semiáridas (Figura 5).

CUENCAS SIN DRENAJE

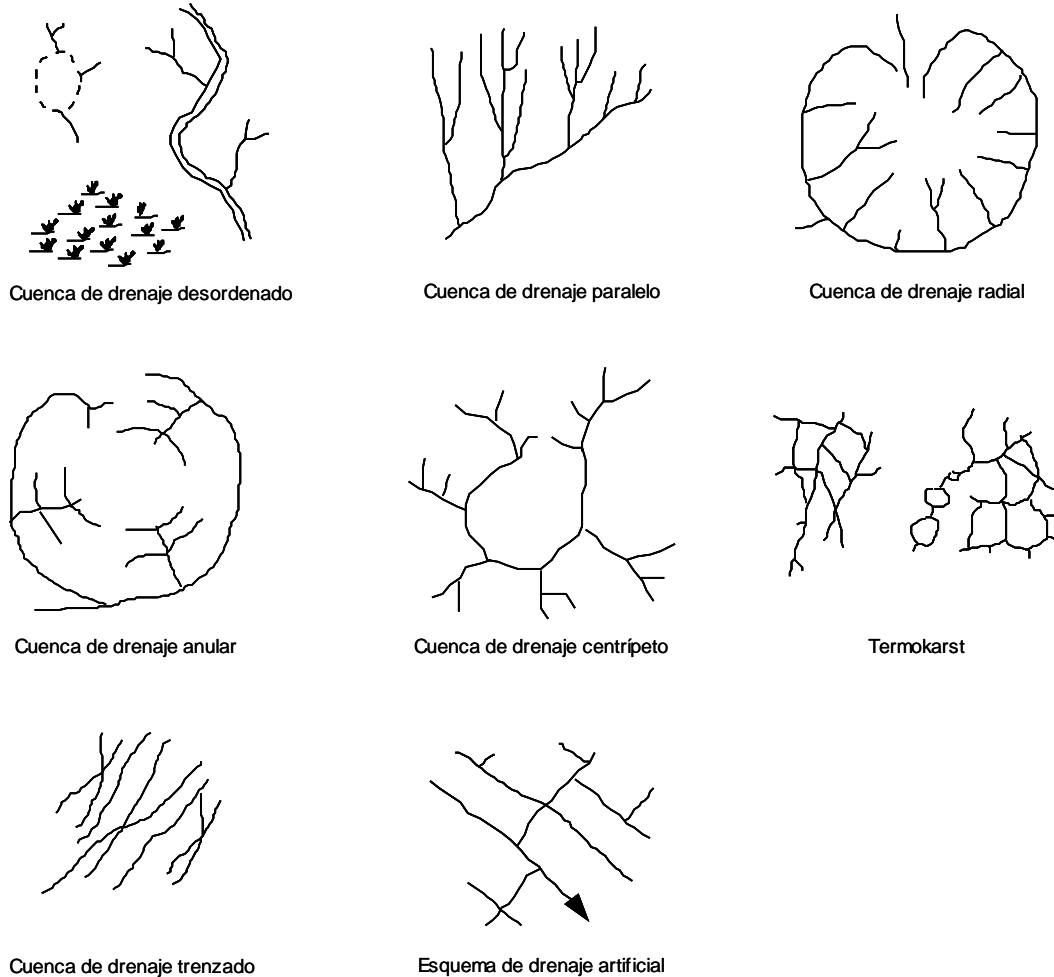


Figura 5. Clasificación de los tipos de cuencas, continuación (MOPT, 1992)

MORFOLOGÍA DE LA CUENCA

Se denomina cuenca vertiente, o cuenca drenaje de un cauce, en una sección dada de su curso, a la superficie de terreno limitada por el contorno a partir del cual la precipitación caída drena por esa sección. Si el suelo fuese impermeable es evidente que la cuenca estaría definida topográficamente por la línea divisoria.

El funcionamiento de la cuenca se asemeja al de un

colector que recibe la precipitación, pluvial y nival y, la convierte en escurrimiento. Esta transformación se hace con pérdidas de agua, función de las condiciones climatológicas y de las características físicas de la cuenca. Desde el punto de vista hidrológico, no sólo interesa el volumen de los escurrimientos (balance hídrico), sino también su reparto en el tiempo (hidrograma), función también de esas condiciones y características.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, la cuen-

ca vertiente puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo y por la cobertura vegetal.

CONCEPTOS

La morfología queda definida por tres parámetros:

- Parámetro de forma;
- Parámetro de relieve;
- Parámetros relativos a la red hidrográfica.

PARÁMETROS DE FORMA

La forma de una cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación dada. Así, en una cuenca de forma alargada, el agua discurre, en general, por un solo cauce principal, mientras que en otra de forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por lo que la duración del escurrimiento es superior.

Los índices más empleados para representar esta característica son el coeficiente de Gravelius y, el rectángulo equivalente.

COEFICIENTE DE GRAVELIUS

Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de otra teórica circular, de la misma superficie. Su expresión es la siguiente:

$$C_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi \times A}}$$

donde:

- C_g: coeficiente de Gravelius;
- P: perímetro de la cuenca (en km);
- A: superficie de la cuenca (en km²).

El valor que toma esta expresión es siempre mayor que la unidad y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, estableciéndose la siguiente clasificación:

C _g	Forma
1,00 – 1,25	Redonda
1,25 – 1,50	Ovalada
1,50 – 1,75	Oblonga

RECTÁNGULO EQUIVALENTE

Roche supone que el escurrimiento en una cuenca dada es aproximadamente el mismo en condiciones climatológicas idénticas, que sobre un rectángulo de la misma superficie, teniendo el mismo coeficiente de Gravelius y la misma repartición hipsométrica y, suponiendo que la distribución del suelo, de vegetación y de densidad de drenaje, son respetadas en las diferentes áreas comprendidas entre curvas de nivel. Es una transformación puramente geométrica de la cuenca en un rectángulo del mismo perímetro, convirtiéndose la curva de nivel en rectas paralelas a los lados menores,

siendo éstos la primera y la última curva de nivel. Dicha transformación toma las siguientes expresiones:

$$L = \frac{C_g \sqrt{A}}{1,12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{C_g} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{C_g \sqrt{A}}{1,12} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{C_g} \right)^2} \right)$$

donde, en unidades homogéneas:

- L: altura del rectángulo;
- l: base del rectángulo;
- C_g: coeficiente de Gravelius;
- A: superficie de la cuenca.

PARÁMETROS DE RELIEVE

La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente. A una mayor pendiente corresponderá una mayor duración de concentración de aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Los parámetros más utilizados son los siguientes:

CURVA HIPSOMÉTRICA

Es frecuente definir el relieve por la curva hipsométrica de la cuenca, que representa gráficamente cotas de terreno en función de las superficies correspondientes. Para realizarlo se lleva, a escalas convenientes, la altitud dada en las ordenadas y la superficie de la cuenca, para la cual cada punto tiene de cota al menos igual a esa altitud, en proyección horizontal a las abscisas. Esta última se obtiene planimetrando la superficie correspondiente al área definida en la cuenca entre la curva de nivel, cuya cota se ha definido en las ordenadas y, los límites de la cuenca por encima de la cota citada; verificándose esta operación para todos los intervalos seleccionados en las ordenadas.

La curva hipsométrica permite caracterizar el relieve. Una pendiente fuerte en el origen hacia cotas inferiores indica llanuras o penillanuras; si la pendiente es muy fuerte hay peligro de inundación. Una pendiente muy débil en esa parte revela un valle esponjado. Una pendiente fuerte hacia la parte media, indica una meseta.

ALTURA MEDIA

Se calcula como el cociente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie, es decir:

$$h = \frac{V}{A}$$

donde:

- h: altura media (m);
- V: volumen de la cuenca (m³);
- A: superficie de la cuenca (m²).

La altura media es tanto mayor cuanto más se eleva el relieve por encima de la altitud mínima y tanto menor cuanto menores variaciones de altitud presente el relieve.

PENDIENTE MEDIA

Es otro parámetro que define al relieve. Se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante.

Se expresa como:

$$J = 100 \times \frac{\sum L_i \times E}{A}$$

donde:

- J: pendiente media de la cuenca (%);
- $\sum L_i$: suma de las longitudes de las curvas de nivel (km);
- E: equidistancia entre las curvas de nivel (km);
- A: superficie de la cuenca (km²).

PARÁMETROS DE RELIEVE EN RELACIÓN CON LA EROSIÓN

Es evidente el carácter determinante que toma el relieve en el fenómeno erosivo. Los índices más utilizados que se destacan son:

Coefficiente de Masividad

Se representa por $tg\alpha$ y fue establecido por Martonne(año); su expresión es la siguiente:

$$tg\alpha = \frac{h}{A}$$

donde:

- h: altura media de la cuenca (m);
- A: superficie de la cuenca (km²).

Este coeficiente permite diferenciar netamente cuencas de igual altura media y relieve distintos, aun cuando no es suficiente para caracterizar la proclividad de la erosión de una cuenca, pues da valores iguales en el caso de cuencas diferenciadas, como por ejemplo, cuando la altura media y superficie aumenten proporcionalmente.

Coefficiente Orográfico

Se define como:

$$CO = \bar{h} \, tg\alpha$$

donde:

- \bar{h} : altura media de la cuenca (m);
- $tg\alpha$: coeficiente de masividad.

Este índice combina los dos parámetros del relieve que actúa en los procesos erosivos: la altura media, sobre la energía potencial del agua; y la inclinación característica de las laderas de la cuenca, sobre la energía cinética del flujo de la escorrentía superficial.

PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA

Se denomina red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos de la cuenca.

La red hidrográfica superficial se analiza a través de:

DENSIDAD DE DRENAJE

Se define, para una cuenca dada, como la longitud media de curso por unidad de superficie, mediante la expresión:

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

donde:

- D: densidad de drenaje (km⁻¹);
- $\sum L_i$: suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca (km);
- A: superficie 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 de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

En efecto, al ser la densidad de drenaje más 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 de escurrimiento es mayor; por lo tanto, los hidrogramas, en principio, tendrán un tiempo de concentración corto.

PENDIENTE MEDIA DE CAUCE

Se calcula mediante la expresión:

$$j = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \times 100$$

donde:

- j: pendiente media del cauce (%);
- H_{\max} : altitud máxima del cauce (m);
- H_{\min} : altitud mínima del cauce (m);

L: longitud del cauce (m).

ALEJAMIENTO MEDIO

Es un coeficiente que relaciona el curso de agua más largo con la superficie de la cuenca. Se expresa de la siguiente manera:

$$a = \frac{L}{\sqrt{A}}$$

donde:

- a: alejamiento medio,
- L: longitud del curso de agua más largo (km);
- A: superficie de la cuenca (km²).

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Como se ha visto anteriormente, a igualdad del resto de los factores, la morfología de una cuenca, determina su funcionamiento desde el punto de vista de los escurrimientos. Un concepto fundamental en el análisis de estos escurrimientos es el "tiempo de concentración", que se define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca, determinándose mediante las fórmulas experimentales:

Giandotti

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{(0,8\sqrt{H})}$$

siempre que $L/3600 \geq t_c \geq L/3600 \times 1'5$

Ventura-Heras

$$t_c = a \frac{S^{0,5}}{i}$$

donde $0'05 \leq a \leq 0'5$

Passini

$$t_c = \frac{a(SL)^{1/3}}{i^{0,5}}$$

donde $0'04 \leq a \leq 0'13$

siendo:

- t_c: tiempo de concentración (en horas);
- S: área de la cuenca (km²);
- L: longitud del cauce principal (km);
- I: pendiente del cauce principal;
- H: elevación media de la cuenca sobre la sección de estudio (m).

Las fórmulas más utilizadas actualmente en España son:

Californiana (Kirpich)

$$t_c = \left(\frac{0,870L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Dirección General de Carreteras (modificada del U.S. Corps of Engineers)

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

donde:

- t_c: tiempo de concentración (en horas);
- L: longitud (en km) del cauce principal de la cuenca;
- H: diferencia de nivel, (en metros), entre la salida de la cuenca y el punto hidráulicamente más alejado;
- J: pendiente media del cauce principal (J=H/L)

EL SUELO

CONCEPTOS

El papel del suelo en la cubierta vegetal es evidente, por lo que es necesario su conocimiento tanto para establecer un mejor aprovechamiento como para evitar deterioros irreversibles de la misma, o la aparición de fenómenos perjudiciales derivados de su inadecuado uso; y que toda ordenación agrohidrológica trata de evitar o corregir.

Las propiedades del suelo pueden diferenciarse en características y cualidades. Una característica del suelo es un atributo de éste que puede medirse o estimarse (textura, estructura y contenido en materia orgánica, entre otros). Una cualidad es un atributo complejo del suelo, que actúa de una forma diferencial sobre la adaptabilidad del suelo para una clase concreta de empleo o sobre su vulnerabilidad ante aquél (erosionabilidad, hidromorfía y productividad, entre otros).

PARÁMETROS DEL SUELO EN RELACIÓN CON LA EROSIÓN HÍDRICA

Independientemente de la intervención del relieve y de los usos del suelo en el proceso de erosión del suelo, éste tiene unas constantes que le hacen presentar una mayor o menor susceptibilidad a ser erosionado. Se trata de definir cuáles son esas constantes o índices de erosionabilidad que, en función de sus características físicas o químicas, permiten calificar el suelo como erosionable o resistente a la erosión.

La textura, estructura, permeabilidad y dispersión han sido las características físicas en las que se han centrado preferentemente los estudios. Según éstos, los índices más representativos son los siguientes:

Índice de Bennet

Este índice se denomina también relación de sílice a alúmina más óxido de hierro; su expresión es:

$$E = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Si $E > 2$, el suelo es resistente a la erosión.

Índice de Bouyoucos

También se denomina relación de arcilla y se expresa como:

$$A = \frac{\% (\text{arena} + \text{limo})}{\% (\text{arcilla})} = \frac{100 - \% (\text{arcilla})}{\% (\text{arcilla})}$$

El suelo es tanto más erosionable cuanto mayor es A.

Coefficiente de Dispersión

Fue establecido por Middleton y su formulación es:

$$C_d = \frac{\% (\text{limo} + \text{arcilla})}{\% (\text{limo} + \text{arcilla})} \times 100$$

El limo y la arcilla del numerador corresponden a partículas inferiores a 0,05 mm, obtenidas al dispersar la muestra con agua pura (sin utilizar dispersante). Para la determinación del denominador, se utiliza como dispersante hidróxido sódico.

En cuanto a su interpretación, la formación de agregados estables ante el agua está en razón inversa con los valores de este índice.

Las investigaciones realizadas por Middleton permiten hacer la siguiente clasificación:

$C_d > 15$: suelos fácilmente erosionables.

$C_d < 15$: suelos no erosionables.

Relación Coloides a Equivalente de Humedad

Fue definido por Middleton como

$$C_r = \frac{\% \text{ de coloide}}{\text{equivalente de humedad}}$$

La existencia de coloides favorece la formación de agregados estables ante el agua; y contribuye a que el suelo posea una mayor capacidad de almacenamiento de humedad. Ambas circunstancias son contrarias a que se produzcan erosiones.

El equivalente de humedad refleja la dificultad que tiene el suelo para desprenderse del agua absorbida, influyendo así, en el poder de infiltración y, por consiguiente, en la existencia de escorrentía superficial.

La interpretación de este índice es la siguiente:

$C_r > 1,5$: suelo difícilmente erosionable

$C_r < 1,5$: suelo erosionable

Coefficiente de Erosión

También fue definido por Middleton; su expresión es:

$$C_e = \frac{C_d}{C_r}$$

Este coeficiente, al conjugar los resultados de los índices anteriores, se considera más significativo que aquéllos, sus valores indicativos son:

$C_e > 10$: suelo fácilmente erosionable

$C_e < 10$: suelo resistente a la erosión

Coefficiente Superficie-Agregación

Se fundamenta en la hipótesis de Anderson, según la cual la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado, está en razón directa de la superficie comprendida por las partículas no capacitadas para unirse, partículas más gruesas que el limo; y, en razón inversa de la calidad de limos y arcillas para formar agregados estables ante el agua. El coeficiente se define como:

$$C_s = \frac{S}{A}$$

donde:

S: superficie específica (en cm^2/gr) de las partículas cuyo diámetro está comprendido entre 0,05 mm y 2 mm.

A: porcentaje de limo más arcilla existente en el suelo dispersado, menos el porcentaje de la misma fracción en el suelo no dispersado. De acuerdo con la definición dada para el coeficiente de dispersión C_d , existe la relación $A=1-C_d$

Un análisis de los conceptos que han servido de base para definir este índice, permite deducir que sus valores y la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado, crecen y decrecen en el mismo sentido. Por consiguiente, el empleo de dicho índice es muy útil para establecer una graduación de suelos en cuanto a la resistencia relativa que oponen a ser erosionados.

EL CLIMA

CONCEPTOS

Según la fórmula más ampliamente aceptada, el clima de una localidad queda definido por las estadísticas a largo plazo de los caracteres que describen el tiempo de esa localidad, como la temperatura, humedad, viento y precipitación, entre otros, siendo el tiempo el estado de la atmósfera en un lugar y momento determinado.

Así pues, el clima de una región resulta del conjunto de condiciones atmosféricas que se presentan típicamente en ella a lo largo de los años.

La importancia del clima es tan elevada y alcanza a tantos aspectos de la vida humana, que su consideración resulta imprescindible en los estudios del medio físico que abarquen zonas con sus distintos climas, como es el caso de las ordenaciones agrohidrológicas.

Por otra parte, el clima determina en alto grado el tipo de suelo y de vegetación, e influye por lo tanto en la utilización de la tierra. También se encuentra íntimamente relacionado con la topografía.

De manera general, el clima afecta a la actividad física y material del hombre y a las actuaciones que éste desarrolla, pudiendo estas actividades, en algunos casos concretos, modificar el clima.

DATOS DISPONIBLES

El estudio climático de una cuenca se efectúa a partir de los datos pluviométricos y termométricos recogidos en estaciones meteorológicas representativas. Las estaciones meteorológicas pueden ser: pluviométricas, termométricas y termoplumiométricas o completas. De los datos que proporcionen, los más utilizados en este tipo de proyectos son los siguientes:

Datos pluviométricos:

- precipitaciones totales mensuales,
- precipitaciones máximas en 24 horas mensuales;
- días de lluvia mensuales;
- días de nieve mensuales.

Datos termométricos:

- temperaturas medias mensuales;
- media de las temperaturas máximas;
- media de las temperaturas mínimas;
- temperaturas máximas absolutas;
- temperaturas mínimas absolutas.

En principio se seleccionarán el mayor número posible de estaciones, tanto dentro como en los alrededores de la cuenca, tratando de representar toda la variedad de situaciones existentes en la zona, tanto en latitudes como en exposiciones. De esa primera selección se descartarán las estaciones cuya serie de años sea muy corta (lo ideal es contar con series de 30 años, aunque lo normal es considerar aceptable una estación si tiene al menos 10 años continuados); y aquellas que sean tan incompletas que no dispongan de los datos suficientes, para completarlas por algunos de los procedimientos estadísticos existentes. El resto se completarán siguiendo dichos procedimientos.

En muchos casos, sobre todo en las partes altas de la cuenca, no se dispone de estaciones, debiendo recurrirse entonces, a la construcción de una o varias estaciones ficticias, basándose en los datos de las existentes y mediante la aplicación de las gradientes calculadas

entre ellas. Estas estaciones ficticias sólo tienen cierta fiabilidad en cuanto a los valores medios mensuales, es decir, en cuanto a temperaturas y precipitaciones medias mensuales, puesto que los valores extremos tienen una mayor dependencia de condiciones muy particulares de cada emplazamiento y su obtención a través de gradientes puede dar lugar a graves errores.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

Completadas las series de precipitaciones mensuales con algunos de los métodos indicados anteriormente, se procede al cálculo de la precipitación media anual para las distintas estaciones seleccionadas, confeccionándose, asimismo un mapa de líneas de isoyetas, a una escala apropiada que puede ser 1:200.000

BALANCES HÍDRICOS

A partir de los datos meteorológicos disponibles y para cada una de las situaciones de las cuencas, se calculan los balances hídricos, para diferentes hipótesis de capacidad de campo del suelo. El proceso de cálculo que se sigue, suele ser el propuesto por Thornthwaite y Matter. Los elementos que intervienen en dicho cálculo y que es preciso determinar son los siguientes:

- Capacidad de almacenamiento de agua en las zonas susceptibles de evapotranspiración, que dependerá de la profundidad del sistema radical y de la textura del suelo.
- Temperaturas medias mensuales (T): obtenidas a partir de mediciones directas.
- Evapotranspiración potencial (ETP): determinada por alguno de los métodos existentes (Thornthwaite, Blaney-Criddle y Penman, entre otros).
- Pluviometría media mensual (P): obtenida a partir de registros en las zonas.
- Pérdidas o adiciones potenciales de la humedad del suelo (P-ETP): los valores positivos corresponden a adiciones potenciales y los negativos a pérdidas potenciales, ambos relativos al contenido de humedad en el suelo. Los meses con valores positivos constituyen el período húmedo y aquellos con valores negativos, el período seco.
- Pérdida potencial acumulada (ppa): para cada mes se obtiene como suma de las pérdidas potenciales existentes en dicho mes y los anteriores.
- Agua almacenada en el suelo (ST): es la cantidad de agua capilar contenida por el suelo, que depende de la capacidad de campo y de las pérdidas potenciales acumuladas.
- Cambios de la humedad acumulada en el suelo (Δ ST): se obtiene, para cada mes, por la diferencia

entre la humedad que contiene al final del mismo y la de su inmediato anterior.

- Evapotranspiración real (ETR): para los meses en que las precipitaciones superan a la evapotranspiración potencial; su valor es igual al de ésta. Para los meses en que la evapotranspiración potencial supera a las precipitaciones, su valor es igual al de éstas, más las pérdidas de agua almacenadas en el suelo.

$$ETR = P + (\Delta ST) \quad \text{en el período seco}$$

$$ETR = ETP \quad \text{en el período húmedo}$$

- Déficit de humedad (D): es igual a la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la real.

$$D = ETP - ETR$$

- Exceso de humedad (S): su valor es la diferencia $P - (ETP + ST)$. Sólo tiene existencia en los meses en que $P - ETP$ sea positivo y el suelo alcance su capacidad de campo, pues en caso contrario la diferencia pasa a engrosar el contenido en humedad del suelo.
- Escorrentía total (R): se considera que la escorrentía de cada mes es igual al 50% de la suma de la aportación mensual, más lo que queda de los meses anteriores.

$$R = \frac{R + S}{2}$$

- Detención de la humedad (DT): comprende la totalidad del agua existente en el suelo, igual a la almacenada (ST), más el exceso de humedad (S) y más el remanente del mes anterior (R_{e-1}), menos la escorrentía del mes considerado (R).

$$DT = ST + S + R_{e-1} - R$$

GESTIÓN

Las acciones coordinadas que el hombre realiza, considerando su efecto en un sistema natural formado por una cuenca y, la dinámica de dicho sistema, tienen diferentes connotaciones. La coordinación de acciones, según Duorojeanni, han sido catalogadas como acciones de gestión a nivel de cuenca o gestión de cuenca. Estas actividades de gestión tienen diferentes objetivos, por lo cual reciben diferentes nombres. Los objetivos más conocidos son:

- Desarrollo de cuencas, desarrollo integrado de cuencas.
- Manejo de cuencas, ordenación de cuencas.
- Desarrollo de recursos hídricos, administración del agua.
- Protección de cuenca, recuperación de cuenca.

Los fines perseguidos mediante la acción genérica, que se refiere a términos como ordenar, preservar, proteger, recuperar, aprovechar, conservar, sobre el territorio o sobre los recursos: captar agua y suministrarla, evitar la erosión del suelo, recuperar niveles de calidad de agua, alcanzar determinados niveles de rendimiento de producción forestal u otro. Las acciones específicas para lograr lo anterior, construir un embalse, capacitar a campesinos, otorgar créditos (Cuadro 1).

Los usuarios del agua potable, la sociedad, los campesinos de menores recursos, los habitantes de un poblado y, en general, los actores a los cuales se dirigen los objetivos de las acciones coordinadas, constituyen el público objetivo.

Las acepciones e interpretaciones con que se enfoca el tema de gestión a nivel de cuenca hidrográfica, pueden ser clasificadas en dos grupos de factores:

- las etapas en el proceso de gestión de cuencas.
- la cantidad de elementos y recursos considerados en el proceso de gestión.

Las etapas en el proceso de gestión de cuenca se dividen en:

1. **Previa** (1): estudio, formulación de planes y proyectos
2. **Intermedia** (2): etapa de inversión para la habilitación de la cuenca con fines de aprovechamiento y manejo de sus recursos naturales con fines de desarrollo del hombre. Esto se relaciona con términos en inglés como *development*, *river basin development*, *water resources development*, por lo que se han traducido como desarrollo de cuenca o desarrollo de recursos hídricos o hidráulicos.
3. **Permanente** (3): etapa de operación y mantenimiento de las obras construidas y, manejo y conservación de los recursos y de elementos naturales. Se asocia con términos como *management*, que puede tener hasta cuatro acepciones: gestión, administración, ordenación y manejo. En general, se traduce *water resources management* como administración de recursos hídricos y *watershed management* como manejo de cuencas.

La cantidad de elementos y recursos naturales que son considerados en el proceso de gestión en una cuenca.

PRIMER GRUPO (a): todos los elementos, recursos (a-b-c) e infraestructura construida por el hombre para habilitar la cuenca a sus necesidades de vida.

SEGUNDO GRUPO (b): todos los elementos y recursos naturales presentes en una cuenca.

TERCER GRUPO (c): solo el aprovechamiento y manejo del agua o de los recursos hídricos.

Cuadro 1. Clasificación de acciones de gestión en cuencas hidrográficas

Etapas de gestión	Objetivos de gestión en cuencas		
	Para el aprovechamiento y manejo integrado	Para aprovechar y manejar todos los recursos naturales	Para aprovechar y manejar sólo el agua
	(a)	(b)	(c)
(1) Etapa "Previa"	Estudios, planes, proyectos		
(2) Etapa "Intermedia" (Inversión)	"River Basin Development" (Desarrollo de cuencas)	"Natural Resources Development" (Desarrollo o aprovechamiento de recursos naturales)	"Water Resources Development" (Desarrollo o aprovechamiento de recursos hídricos)
(3) Etapa "Permanente" (Operación y mantenimiento, manejo y conservación)	"Environmental Management" (Gestión ambiental)	"Natural Resources Management" (Gestión/manejo de recursos naturales)	"Water Resources Management" (Gestión/administración del agua)
	"Watershed Management" (Manejo/ordenación de cuencas)		

Fuente: Duorojeanni, 1994.

BIBLIOGRAFÍA

- CANO, G. y J. LÓPEZ. 1976. Las cuencas hídricas como unidades óptimas para la planificación y administración de los recursos hídricos: participación de los usuarios en tales actividades. Cincuentenario de la Creación de las Confederaciones de Cuencas en España. Zaragoza, España.
- DUOROJEANNI, A. 1994. Políticas públicas para el desarrollo sustentable: la gestión integrada de cuencas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Recursos Naturales y Energía. Santiago, Chile. 221 p.
- DURÁN, D. 1997. Comarcalización rural y análisis territorial. Tesis Magíster Asentamientos Humanos y Medio Ambiente. Instituto Estudios Urbanos. Fac. Arquitectura y Bellas Artes. P. Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- FOSBERG, F. R. 1961. A classification of Vegetation for general purposes. *Trop. Ecol.*, 2: 1–28.
- GARCÍA-PELAYO y R. GROSS. 1979. Larrouse. Ediciones Larrouse. Buenos Aires, Argentina. 1664 p.
- GASTÓ, J., D. CONTRERAS, F. COSIO y R. DEMANET. 1986. Bases y planteamientos resolutivos. En: Contreras, D., J. Gastó y F. Cosio. (Ed) Ecosistemas pastorales de la zona mediterránea árida de Chile. Tomo I Estudio de las comunidades agrícolas de Carquindaño y Yerba Loca del secano costero de la Región de Coquimbo. CONICYT-UNESCO. Montevideo, Uruguay. 475 p.
- GASTÓ, J. y S. GALLARDO. 1985. Ecosistema terrestre. En: SOLER, F. 1985. Medio Ambiente en Chile. Centro de Investigación y planificación del medio ambiente (CIPMA). Ediciones Universidad Católica de Chile. 412 p.
- ODUM, H.T. 1972. Environment, power and society. Willey-Interscience. Nueva York, Estado Unidos.
- TRAGSA. 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Mundi-prensa. Madrid, España. 901 p.