

Contribuciones al manejo de cuencas hidrográficas

Herramientas y procedimientos básicos

Fernanda Julia Gaspari, María Isabel Delgado
y Lucía de Antuено

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES


edulp
EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

CONTRIBUCIONES AL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

HERRAMIENTAS Y PROCEDIMIENTOS BÁSICOS

Fernanda Julia Gaspari
María Isabel Delgado
Lucía de Antuño

Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



Si hay magia en este planeta, está contenida en el agua.

Loran Eirsly

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	8
Concepción de cuenca hidrográfica	8
<i>Fernanda Julia Gaspari</i>	8
Definición de cuenca hidrográfica	8
Clasificación de cuencas hidrográficas	11
Componentes físicos y biológicos	17
Referencias	18
CAPÍTULO 2	20
Elementos de hidrología	20
<i>Fernanda Julia Gaspari</i>	20
Comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica	20
Ciclo hidrológico	21
Influencia de la vegetación y uso del suelo	23
Recolección de antecedentes, toma de datos e instrumental.	25
Referencias	28
CAPÍTULO 3	30
Delimitación y morfometría de cuencas	30
<i>Lucía de Antuño</i>	30
Delimitación de una cuenca hidrográfica	30
Morfometría	39
Glosario, de acuerdo con IGN (2021)	52
Referencias	53
CAPÍTULO 4	55
Conceptos de hidrología de superficie	55
<i>Fernanda Julia Gaspari</i>	55
Concepto de hidrograma	55
Componentes y análisis de un hidrograma	57
Formas de resolución de hidrogramas	59
Hidrograma unitario	61
Referencias	67
CAPÍTULO 5	69
Escurrimiento superficial	69
<i>María Isabel Delgado</i>	69
Método del Número de Curva	69
Referencias	79
CAPÍTULO 6	81
Zonificación del escurrimiento superficial	81
<i>Lucía de Antuño</i>	81
Método del Número de Curva con SIG	81
Procedimiento de zonificación del escurrimiento superficial	83

Complemento GeoQ	89
Referencias	97
CAPÍTULO 7	98
Modelización hidrológica	98
<i>Lucía de Antueno</i>	98
Ejemplo de aplicación con HEC-HMS	99
Referencias	117
CAPÍTULO 8	119
Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial	119
<i>María Isabel Delgado</i>	119
La utilización de modelos empíricos	120
El Modelo USLE	121
El modelo MUSLE	130
Referencias	130
CAPÍTULO 9	133
Zonificación de pérdida de suelo	133
<i>María Isabel Delgado</i>	133
Utilización de SIG para el análisis de la pérdida de suelo	133
Referencias	146
CAPÍTULO 10	148
Fenómeno torrencial	148
<i>Fernanda Julia Gaspari</i>	148
Dinámica hídrica por torrentes	148
Cuantificación de la pendiente de compensación	150
Obras de control de torrentes	154
Etapas de funcionamiento del dique de corrección de torrentes	154
Partes constitutivas de un dique	155
Metodología para el diseño de obras de control de torrentes	157
Ejemplo de elaboración del Plano de dimensionamiento de un dique de corrección de torrentes	166
Efectos hidrológicos de los diques de corrección de torrentes	166
Referencias	167
CAPÍTULO 11	168
Restauración hidrológica	168
<i>María Isabel Delgado</i>	168
Medidas de manejo del escurrimiento superficial	168
Referencias	173
CAPÍTULO 12	175
Gestión y legislación de cuencas hidrográficas	175
<i>Fernanda Julia Gaspari</i>	175
Procedimientos de gestión para la toma de decisiones	175
Recomendaciones estratégicas para el MICH	180
Normas vigentes en Argentina	185
Referencias	189

CAPÍTULO 13	191
Ordenamiento territorial	191
<i>Fernanda Julia Gaspari</i>	191
Instrumentos de planificación para el desarrollo sostenible	191
Función de un Plan de Ordenación Territorial para el manejo de cuencas hidrográficas	193
La gestión de cuencas hidrográficas	194
La gestión de cuencas hidrográficas y los servicios ambientales	196
La gestión de cuencas hidrográficas y los ODS	198
Referencias	202
Las autoras	204

INTRODUCCIÓN

El curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas se dicta en el quinto año de la carrera de Ing. Forestal, siendo además una materia optativa para la carrera de Ing. Agronómica. Debido a que esta temática integra conocimientos prácticos y teóricos, la misma permite generar, diseñar, 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 abordaje de los procesos hidrológicos y su incidencia en el ambiente permitirán a los futuros profesionales evaluar la posibilidad del desarrollo regional y la adopción de diferentes metodologías para un ordenamiento territorial. Desde el enfoque propuesto, se concibe al ser humano en el espacio de la cuenca, con los recursos naturales que lo sustentan, como sujeto y al mismo tiempo objeto de estudio a la hora de formular posibles estrategias de intervención.

El manejo de cuencas hidrográficas implica conocer el funcionamiento del ecosistema. Ello significa la necesidad de un proceso de investigación en el cual esté presente, junto a la materialización de acciones para los distintos niveles de proyecto, la integración de disciplinas e instituciones y la transacción entre los actores con un criterio de equidad. Esta propuesta, de concepción holística en el abordaje del territorio, trata de avanzar en el conocimiento no sólo incluyendo las variables físicas y biológicas de funcionamiento del sistema, sino además los distintos usos, valores y necesidades que pudieran entrar en juego a la hora de realizar un manejo sustentable de los recursos.

Este libro, basado en el marco conceptual del Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, permitirá capacitar a estudiantes avanzados para desarrollar, elaborar, implementar e intervenir en la producción de proyectos adecuados a condiciones reales, mediante la simulación hidrológica y el planteo de posibles escenarios futuros de uso del suelo, a partir del procesamiento de datos geoespaciales (aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG)).

Es a partir de este material, que se pretende brindar pautas metodológicas actualizadas, que contribuyan a diagnosticar y elaborar posibles soluciones frente a diversas realidades socioambientales, como así también dentro de un marco legal vigente.

El objetivo principal del libro es proporcionar 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, se pretende incentivar el desarrollo de criterios de intervención profesional para el manejo de cuencas desde una perspectiva crítica, generando un proceso de autoformación en la temática, permitiendo complementar los conocimientos adoptados durante el desarrollo de la carrera de grado, integrando temáticas como por ejemplo edafología, topografía, silvicultura, geomorfología, hidrología, climatología, y manejo de suelos, entre otras.

Estos objetivos están, a su vez, orientados a proporcionar técnicas para el uso de herramientas y softwares actuales, especialmente en relación con el trabajo con SIG y productos satelitales.

CAPÍTULO 1

Concepción de cuenca hidrográfica

Fernanda Julia Gaspari

Definición de cuenca hidrográfica

Los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura de suelo son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Van Lynden y Oldeman, 1997; Gaspari et al., 2019). Estos cambios inciden en la dinámica hídrica superficial.

En este contexto, la cuenca hidrográfica es la unidad natural de tratamiento integrado y ámbito para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, pues abarca todo el complejo biogeomórfico, económico y de relaciones sociales como unidad de planificación y gestión (Gaspari et al., 2009). El uso de los recursos naturales se regula administrativamente separando el territorio por cuencas hidrográficas, y con miras al futuro las cuencas hidrográficas se perfilan como una de las unidades de división funcionales con mucha más coherencia, permitiendo una verdadera integración social y territorial por medio del agua.

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible (Gaspari et al., 2009), siendo la unidad territorial ideal para conocer la dinámica superficial. Por ello es necesario conocer sus límites y la definición de sus características morfológicas, ambientales y de la sociedad que la integra.

Una cuenca hidrográfica es una unidad de paisaje, que ocupa un territorio donde las aguas superficiales circulan hacia arroyos o ríos, los cuales fluyen al mar a través de una red interconectada de cauces o cursos de agua. Para establecer sus límites se deben identificar las divisorias de agua topográficas o *divortium aquarum* (DA) 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 definiendo al canal o río principal, siendo este una línea virtual dibujada sobre las cotas más bajas en un plano que se inicia en las DA en forma de vertientes. Allí se inician los cursos de agua afluentes o tributarios, de menor porte, que se van uniendo con otros afluentes de áreas vecinas hasta conformar y alimentar al río principal, debido a que vierten sus aguas al mismo. Los efluentes o emisarios son cursos de agua que proceden o derivan de la corriente principal; es decir, el agua del río principal acaba siendo distribuida hacia ríos más pequeños o mar, lago o laguna, como se indica en la Figura 1.1. Los cursos efluentes, no están presentes en todas las cuencas hidrográficas y pueden ser naturales o artificiales (más habituales), y particularmente en cuencas de llanura.

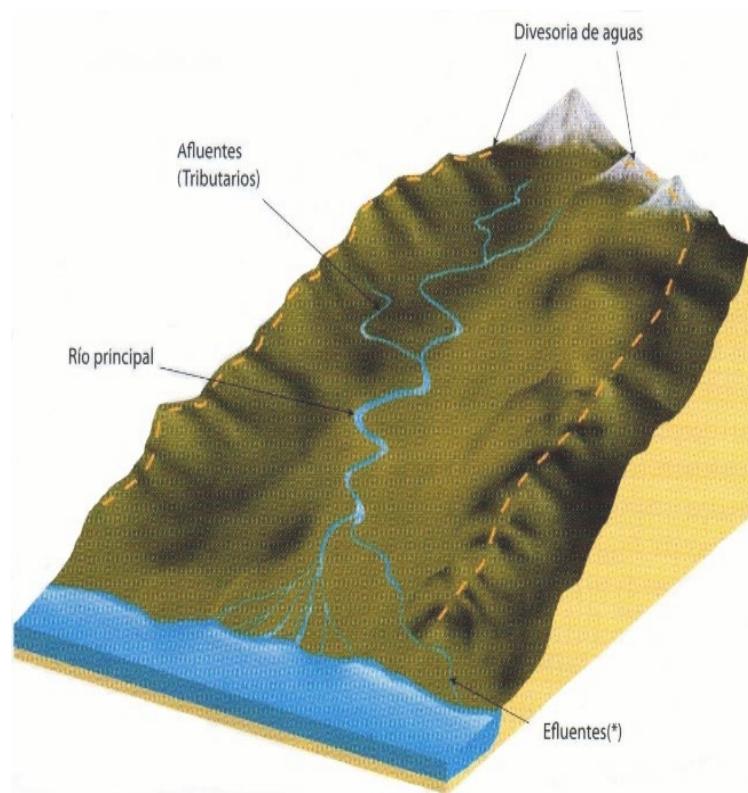


Figura 1.1. Divisorias de aguas en cuencas hidrográficas.

Otros términos importantes que distinguir en un río, según Ordoñez Galvez (2011), se definen como:

- **Cauce**, o también denominado **lecho**, es el conducto descubierto o acequia por donde corren las aguas para riegos u otros usos.
- **Thalweg**, línea que une los puntos de mayor profundidad a lo largo de un curso de agua.
- **Margen derecha**, mirando río abajo, la margen que se encuentra a la derecha.
- **Margen izquierda**, mirando río abajo, la margen que se encuentra a la izquierda.
- **Aguas abajo**, con relación a una sección de un curso de agua, sea principal o afluente; si se sitúa después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
- **Aguas arriba**, es el contrario de la definición anterior.

La Figura 1.2, muestra la delimitación de dos cuencas hidrográficas vecinas por su DA (líneas rojas), indica el área de tierra que colecciona el agua de lluvia (espacio verde), y establece la forma y sentido del sistema de drenaje (flechas rojas), con un río y sus afluentes (en color azul) por el cual la precipitación caída recorre su superficie, y se concentra en un punto de cierre de cuenca, denominado desembocadura, en la parte más baja de la misma.

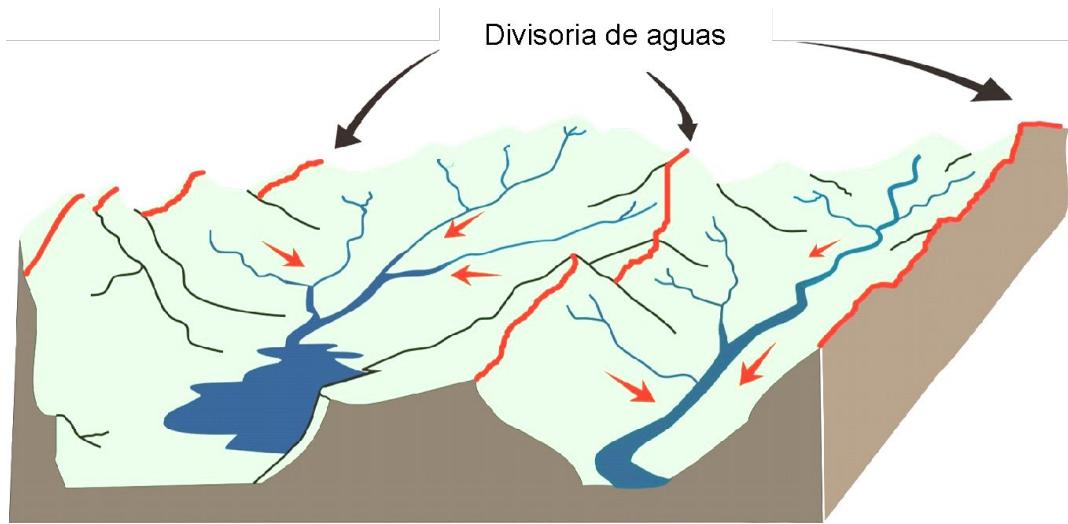
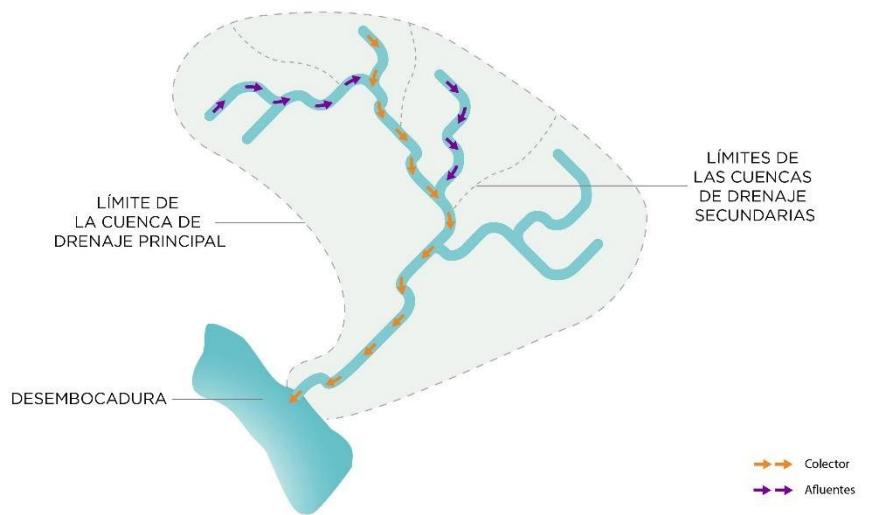


Figura 1.2. Divisorias de aguas en cuencas hidrográficas (líneas rojas). Fuente: Adaptado de Ordoñez Galvez (2011).

Dentro de la misma cuenca pueden existir unidades hidrológicas menores que integran a los cursos de agua afluentes, denominadas cuencas de drenaje secundaria o subcuenca, las cuales forman parte del este sistema de cuenca drenaje, siendo originadas por DA menores y cursos de agua de menor porte (Gaspari et al., 2009). Éstas conforman la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad, a través de una serie secundaria de corrientes, ríos, arroyos y, eventualmente, lagos, hacia un determinado punto de cierre de un curso de agua principal (generalmente un lago o una confluencia de ríos). En la Figura 1.3 se muestra la conformación de unidades de unidades hidrológicas de cuenca y subcuenca, como así también, otras más pequeñas denominadas microcuenca, las cuales permiten un planteo más detallado del análisis geoespacial, ambiental y socioeconómico. La microcuenca es el ámbito lógico para planificar el uso y manejo de los recursos naturales, tendiendo al desarrollo sostenible, contribuyendo en la producción de bienes y servicios ambientales.



IGN - Atlas Nacional Interactivo de Argentina

Figura 1.3. Identificación del límite de una cuenca hidrográfica, subcuenca y microcuenca. Fuente: Conte, Etchepareborda y Marino (2020).

Las cuencas hidrográficas representan unidades hidrológicas que funcionan por gravedad, pues ésta hace correr el agua hacia abajo según el gradiente de pendiente de la ladera. Este proceso genera una energía adicional que imparte un gran dinamismo al ambiente.

El agua de la precipitación que cae en las tierras altas de la cuenca se acumula y circula hacia las partes más bajas permitiendo que se formen y recarguen los recursos de aguas superficiales y subterráneas (capa freática), proporcionando agua disponible a los campos y a los animales agua para beber. Además, la circulación del agua superficial transporta sedimentos y materiales que enriquecen el suelo y también esparcen las semillas de las plantas presentes en los diferentes sitios de la cuenca (Figura 1.4).

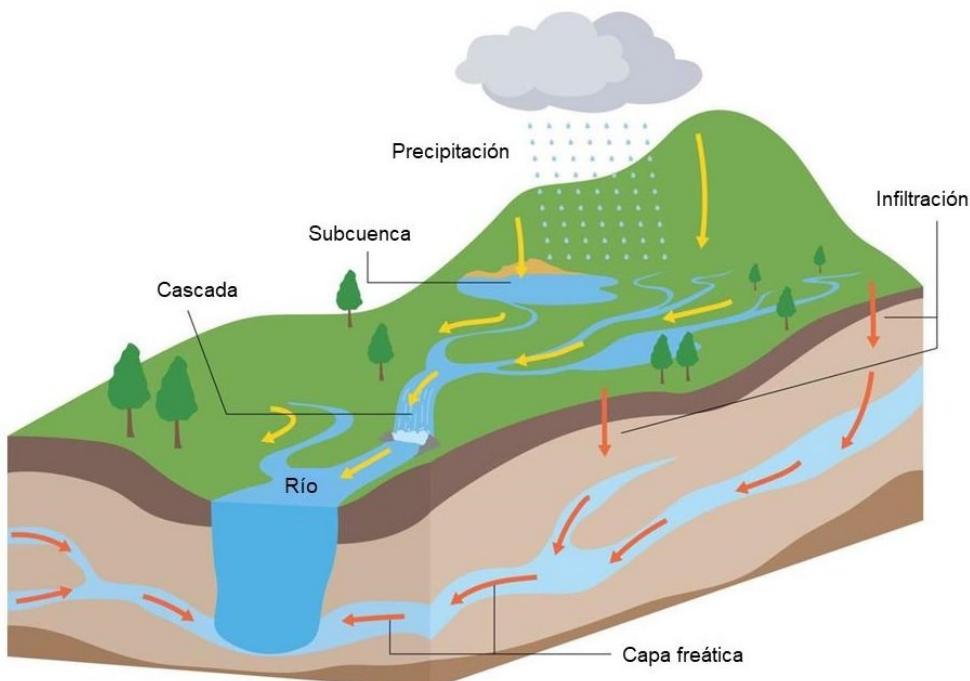


Figura 1.4. Cuenca hidrográfica y subcuenca como sistemas de agua superficial y subterránea.

Fuente: Traducido de <https://es.vecteezy.com/>¹

Es importante mencionar que una **cuenca hidrográfica** se refiere exclusivamente a las aguas superficiales y una **cuenca hidrológica** incluye las aguas subterráneas (acuíferos).

Clasificación de cuencas hidrográficas

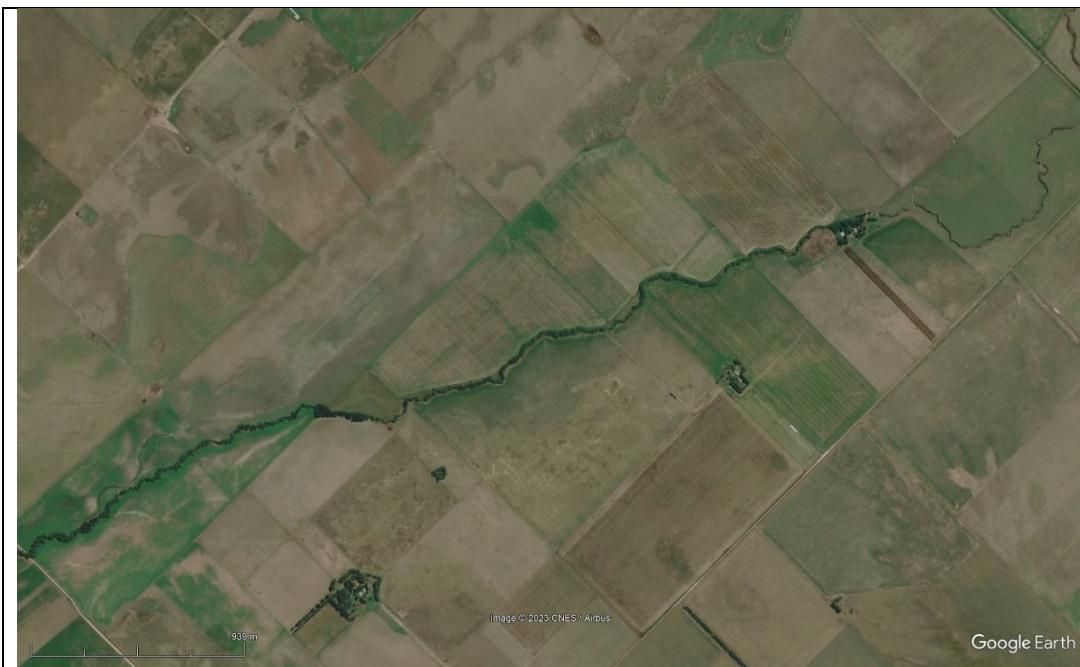
Una cuenca hidrográfica conforma el área de captación hídrica que contribuye a la dinámica del flujo de agua superficial que aporta a un río o quebrada, lago, laguna, humedal, estuario,

¹ <https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/10935317-cuenca-hidrografica-como-sistema-de-cuenca-de-agua-con-arroyos-de-rios-de-montana>

embalse, acuífero, manantial o pantano. Particularmente, sus ríos, según su edad, expresan una interacción, principalmente, entre el tiempo, la geomorfología y el clima, clasificándolos como:

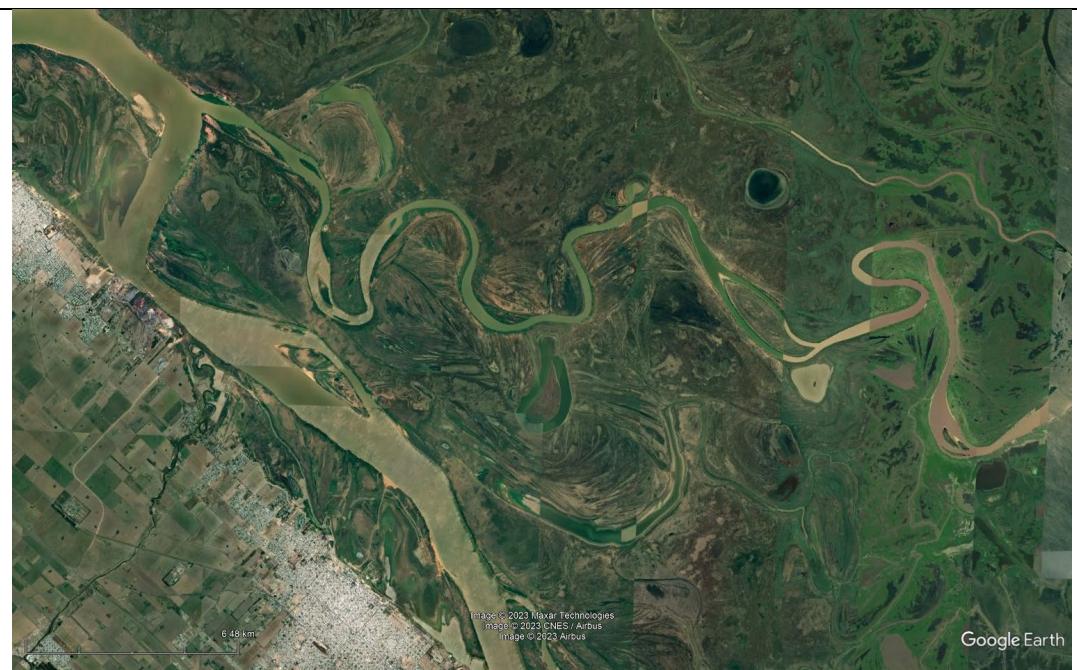
- **Ríos jóvenes:** Son cauces de montaña, irregulares, con altas pendientes y sección transversal tipo V y presentan procesos de degradación.
- **Ríos maduros:** Se encuentran en valles amplios, con pendientes suaves y con erosión del fondo.
- **Ríos viejos:** Presentan anchos de los meandros en valles amplios y planicies de pendientes son muy reducidas.

La dinámica de una cuenca es el reflejo combinado de la geomorfología fluvial, la variabilidad climática y los procesos antropogénicos (Volonté, 2017). Hay que considerar, que la geomorfología fluvial, que se ocupa del estudio de las geoformas que resultan de la acción de los cursos de agua superficiales, expresa el accionar de los ríos que está estrechamente relacionado con su régimen de alimentación. Asimismo, el relieve imprime condiciones de mayor o menor energía cinética que es ocupada por los ríos para la erosión fluvial, el transporte de sedimentos y la depositación de los mismos². Se pueden clasificar en: rectilíneo, meándrico, delta fluvial y/o trenzado o anastomosado (Figura 1.5), existiendo una gran interacción entre las distintas formas a lo largo del curso de agua desde su cabecera hasta su desembocadura, como se muestra a continuación, con ejemplos de imágenes satelitales tomados de Google Earth ®.

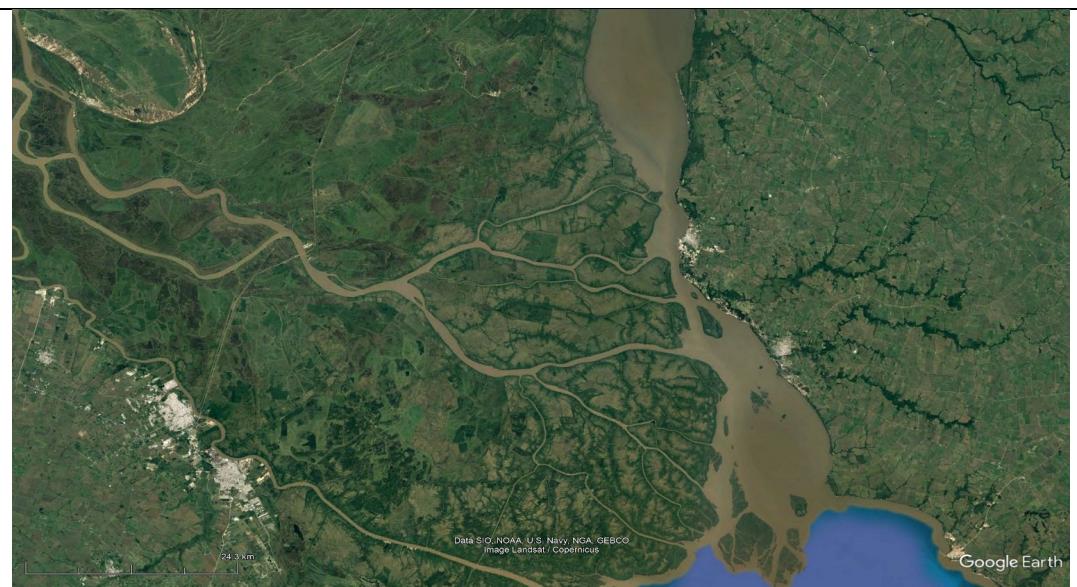


Rectilíneo: Son corrientes inestables que se caracterizan por una sinuosidad baja y un único canal. Presentan caudales de alta energía y gran capacidad erosiva.

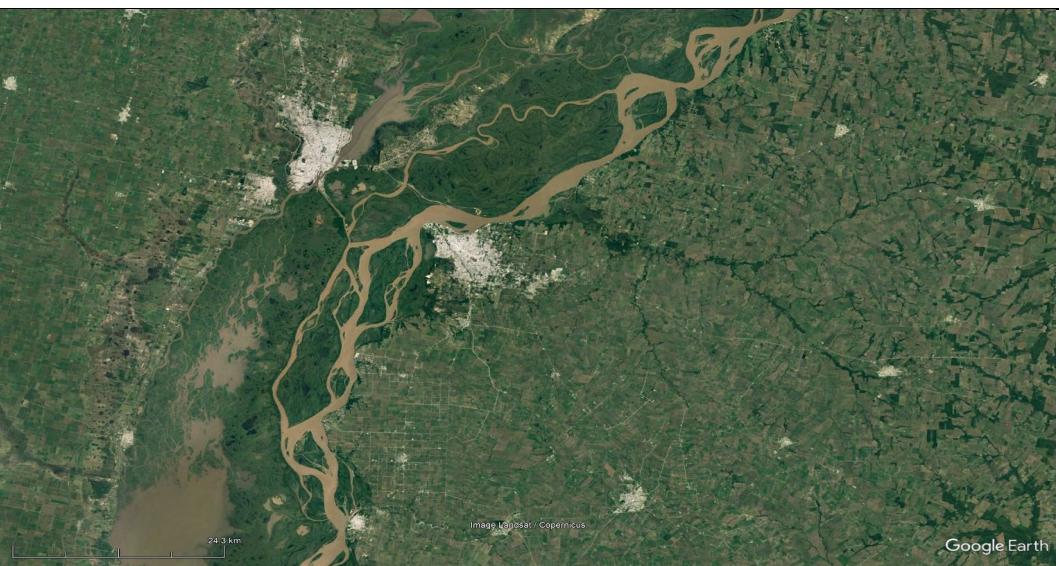
² https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/3.html



Meándrico: Son ríos de alta sinuosidad y un único canal, con formaciones curvas naturales sobre el canal denominadas meandros. Estas corrientes meandriformes presentan diferentes reacciones sobre las dos orillas debido a la distinta velocidad de las aguas, expresando un carácter erosivo (en la parte cóncava de la curva o meandro) y sedimentario (en la orilla convexa).



Delta fluvial: Los ríos que arrastran una gran cantidad de sedimentos y que desembocan en el mar, o en otro río, o tramo del mismo río con pendiente mucho menor. El material depositado forma inicialmente flechas paralelas al flujo que delimitan las márgenes del cauce en el receptor. Posteriormente, el material que se sigue depositando eleva el nivel del fondo y acumula material en las flechas.



Trenzado o Anastomosado: Estas corrientes presentan canales múltiples, con gran capacidad de transporte y sedimentación. Tienen menor energía que las corrientes rectilíneas, por lo que, al encontrarse con obstáculos, tienden a modificar su trayectoria adecuándose al relieve y a los sedimentos en el fondo del cauce, siendo la deposición en el fondo de sedimentos de granulometría heterogénea durante la época de aguas bajas, la principal responsable de la división del cauce en los canales anastomosados, es decir, divididos dentro del propio cauce.

Figura 1.5. Clasificaciones de los cursos de agua según el relieve.

La clasificación de los ríos según su geomorfología se expresa a través de la geometría en planta que adopta la corriente. Los parámetros utilizados para esta clasificación son la sinuosidad y la multiplicidad. Esta última depende de cómo se divide la corriente.

La clasificación de los ríos según su período de actividad puede expresarse como:

- **Perennes:** Estos ríos están formados por cursos de agua localizados en regiones de lluvias abundantes, con escasas fluctuaciones a lo largo del año. Sin embargo, incluso en las áreas donde llueve muy poco pueden existir ríos con caudal permanente si existe una alimentación freática (es decir, de aguas subterráneas) suficiente. La mayoría de los ríos pueden experimentar cambios estacionales y diarios en su caudal, debido a las fluctuaciones de las características de la cobertura vegetal, de las precipitaciones y de otras variaciones del tiempo atmosférico como la nubosidad, insolación, evaporación o más bien, evapotranspiración, etc.
- **Estacionales:** Estos ríos y ramblas son de zonas con clima tipo mediterráneo, en donde hay estaciones muy diferenciadas, con inviernos húmedos y veranos secos o viceversa. Suelen darse más en zonas de montaña que en las zonas de llanura.
- **Transitorios:** Son los ríos de zonas con clima desértico o seco, de caudal que a veces, en los cuales se puede estar sin precipitaciones durante años. Esto es debido a la poca frecuencia de las tormentas en zonas de clima de desierto. Pero cuando existen descargas de tormenta, que muchas veces son torrenciales, los ríos surgen rápidamente y a gran velocidad.
- **Alóctonos:** Son ríos, generalmente de zonas áridas, cuyas aguas proceden de otras regiones más lluviosas.

Desde el punto de vista de la evacuación de las aguas de ecosistemas acuáticos, y la descripción aportada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/cuencas>), hay varios tipos de cuencas que

expresan en la República Argentina, la diversidad del sistema drenaje y su conducción final, como se muestra en la Figura 1.6.



Figura 1.6. Grandes Vertientes de cuencas hidrográficas en la República Argentina.

La clasificación de los ríos según su comportamiento se denomina:

- **Ríos:** Se caracterizan por ser corrientes de agua con variaciones lentas de caudal, cuya pendiente longitudinal (sobre el canal principal) es < 1%. Generalmente presenta lechos de arena, limo y arcilla, predomina el transporte en suspensión. Las crecientes se forman lentamente y son de larga duración (días, meses).
- **Ríos torrentiales:** Suelen encontrarse en zonas de piedemonte, con pendientes suaves y en presencia de depósitos de sedimentos.
- **Torrentes:** Son cursos de agua en zonas de montaña con pendiente longitudinal > 5%, y debido a ello, tienen una respuesta rápida a las lluvias, con crecientes son violentas y de corta duración. El transporte sólido está compuesto principalmente por piedras, cantos rodados, grava y arena.

A lo largo del perfil longitudinal de un río o curso de agua, se pueden distinguir 3 tramos o zonas en una cuenca hidrográfica:

- **Curso alto:** Cercano al nacimiento del río o cabecera de cuenca, en las zonas de montaña con pendiente elevada. En esta zona, las aguas del río tienen un caudal bajo y circulan a alta velocidad, simulando un torrente, por lo que hay una capacidad de erosión y transporte de sedimentos elevada.
- **Curso medio:** Presenta menor pendiente, con predominio del transporte y la acumulación de sedimentos, con más cantidad de caudal y sus aguas van reduciendo la velocidad. En esta zona se pueden encontrar meandros o curvas sobre el canal del río, generando deposiciones de sedimentos. Este tramo es un sitio preferencial para definir la ubicación de diques / embalses, con el fin de controlar el caudal y el transporte y la emisión de sedimentos, para que no provoquen inundaciones.

- **Curso bajo:** En las proximidades a la desembocadura, siendo sitios amplios y planos, con baja velocidad de circulación del agua, provocando deposición de materiales. Por ello, predomina la sedimentación y, al desembocar los ríos pueden formar rías, deltas o estuarios.

Estas zonas, como se muestra en la Figura 1.7, se generan acorde a los cursos de agua y definen la posición de la cuenca.

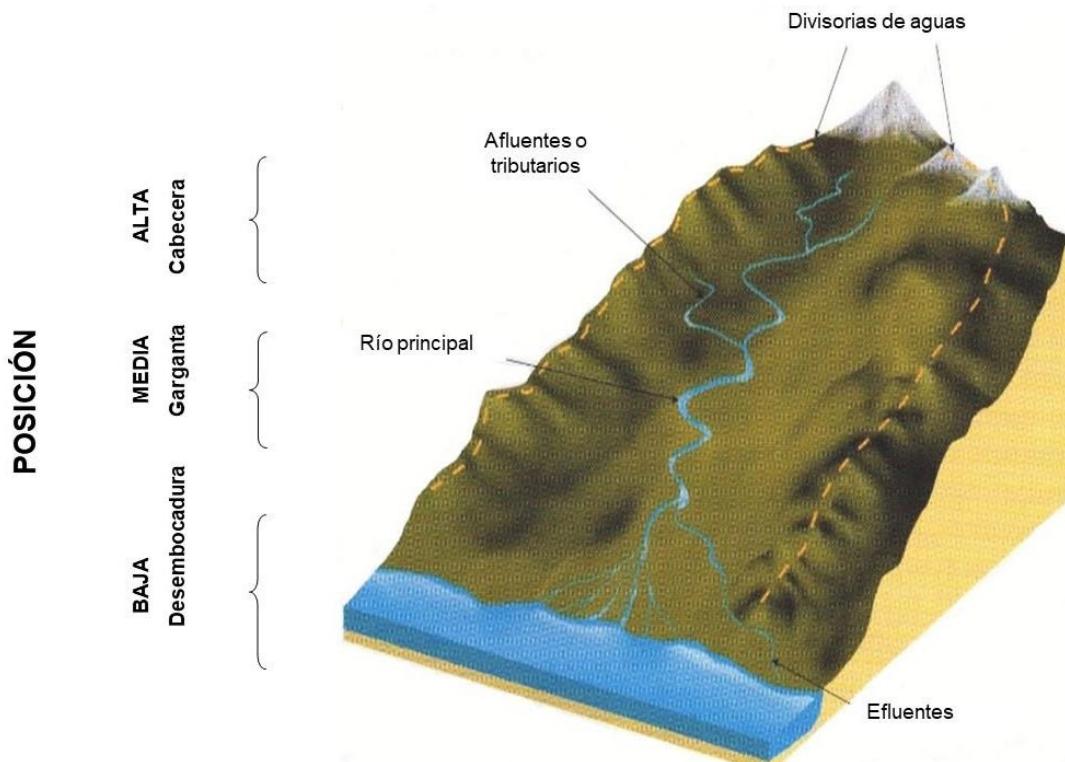


Figura 1.7. Posición de una cuenca hidrográfica como sistema de cuenca de agua.

A partir de la descripción antecedente y de la integración de dichas características particulares y funcionamiento de la cuenca hidrográfica, se puede definir que existe una dinámica hidrológica general (Figura 1.7), cuyos factores de control se diferencian según la distribución geoespacial o posición como hace referencia Gaspari et al. (2009), destacando que interactúan el clima, la geomorfología, el suelo y la cobertura vegetal y uso del suelo. Esta interacción y sus factores se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Factores de control según posición en la cuenca hidrográfica. Fuente: Gaspari et al., 2009.

Posición en la cuenca	Factores de control
CABECERA (Frente montañoso)	CLIMA: precipitación, temperatura, viento
	SUELOS: textura, profundidad
	LITOLOGÍA: carácter de las rocas subyacentes
	TOPOGRAFIA: relación ladera pendiente
	RELIEVE: desnivel, relación divisoria - lechos
	COBERTURA: fisonomía y densidad vegetal
ÁREA MEDIA (Garganta)	USO DEL SUELO: carácter e intensidad
	SUELOS: carácter y constitución

	RELIEVE: relación divisoria - lechos
	TOPOGRAFIA: relación ladera pendiente
DESEMBOCADURA (Tierras bajas)	Relación divisorias - valles
	Relación estacional crecidas – estiaje

Gaspari et al. (2009) mencionan que los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas 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 / cuantificación de los diversos componentes si, ya que difieren los flujos de agua vertical, que 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 y el movimiento horizontal es el de mayor cuantía, mientras que el volumen de agua acumulado en las depresiones de las llanuras sobrepasa a los otros integrantes de la ecuación de balance hídrico, siendo una parte considerable de este volumen de agua el que se evapora o se infiltra. Además, el escurreimiento superficial proveniente de áreas serranas o cabecera de cuenca aumenta la cantidad de agua sobre la llanura alcanzando la cuenca baja y/o desembocadura. El agua que excede la capacidad de almacenamiento de las depresiones se mueve como una lámina, muy lentamente sobre la superficie. En estos casos, la infiltración es generalmente alta, pero debido a la gran duración del estancamiento de estas aguas, puede provocar inundaciones transitorias y/o permanentes.

Componentes físicos y biológicos

A partir de un concepto integrador, la cuenca hidrográfica se define como un sistema de relaciones sociales y económicas, cuya base territorial y ambiental es una red de drenaje superficial que fluye a un mismo río, lago o mar con un territorio que lo comprende.

Según Gaspari et al. (2013) los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca hidrográfica son los elementos:

- biofísicos (atmósfera, clima, suelo y subsuelo, hidrología, flora y fauna);
- antrópicos (socio-económicos-culturales (*infraestructura, tecnología, niveles de calidad de vida, creencias, conocimientos, sistemas de producción, tenencia de tierra, entre otros*), demográficos (*tamaño y distribución de la población*) y jurídico-institucional (*normas que regulan el uso de los recursos naturales, leyes, políticas de desarrollo, tenencia de las tierras, instituciones involucradas*)).

Estos elementos conforman diversos subsistemas: el biofísico, el social, el económico y el demográfico, los cuales interactúan definiendo a la cuenca hidrográfica como un territorio que compone un sistema integral conformando ecosistemas acuáticos continentales.

Los ecosistemas de aguas continentales son recursos naturales fundamentales de la biosfera, debido a que numerosas acciones de desarrollo dependen de ellos y tienen éxito o fracasan según su capacidad funcional o su integridad. Estos, proporcionan servicios ecosistémicos

cruciales que sostienen los medios de vida y desarrollo económico apoyando la biodiversidad. Desafortunadamente, los ecosistemas de aguas continentales se enfrentan a graves presiones acumulativas que afectan su capacidad para proporcionar estos servicios. Estas presiones incluyen la contaminación y la extracción excesiva para usos socioeconómicos, y se ven agravadas por los impactos del cambio climático, el cambio de uso del suelo y proliferación de las especies invasoras (Gaspari y Cipponeri, 2022).

Casco et al. (2005) encontraron en la cuenca del Río Paraguay, que la flora y las geoformas integran el territorio, como, por ejemplo, los albardones están ocupados por tipos de bosques de especies nativas / exóticas, mientras que los bañados y cuerpos de aguas someros están cubiertos por plantas herbáceas, y que las praderas flotantes de vegetación libre crecen en lagos conectados al río, una o más veces en el año. La vegetación acuática del curso principal es muy pobre como consecuencia del flujo del río y las fluctuaciones de nivel del agua.

La interrelación entre la vegetación (nativa o no) y las formas del relieve es muy dinámica, con cambios drásticos en períodos de décadas o aún de pocos años, dependiendo del caudal y de la carga de sólidos transportados. En otro sentido, la vegetación fluvial tiene un importante rol en la fijación de depósitos fluviales y como núcleos de acreción en las barras o para entender la obstrucción de pequeños cursos de agua en la planicie de inundación.

Casco et al. (2005) indican que el estudio de la interrelación entre la vegetación y las formas del relieve proporciona un conocimiento sinóptico de la dinámica del paisaje, como indicador del régimen hidrológico en cada sitio y de los movimientos horizontales del agua que, finalmente son el principal factor que controla la erosión, transporte, acreción y la distribución y abundancia de los organismos. Además, la posición, forma y superficie de cada unidad de paisaje indica una relación con la posición topográfica de cada sitio.

Tal como expresaran Whittaker (1978) y Casco et al. (2005), la complejidad de la topografía y otros factores ambientales espaciales componen el patrón de la vegetación en el que puede esperarse solapamiento de las curvas de distribuciones. Luego de la etapa de colonización del suelo, las posibilidades de la vegetación para resistir sequías e inundaciones extremas son altas, lo que determina la persistencia del patrón de paisaje aun cuando se produzcan condiciones hidrológicas muy contrastadas en un mismo sitio.

La presencia y diversidad de flora en determinado paisaje o cuenca hidrográfica depende de las condiciones del medio físico para permitir o no la germinación / diseminación.

Hay un entorno de probabilidades de configuración del paisaje que está determinado por el banco de semillas remanentes en el suelo, por el aporte de semillas que trae el río y por otros factores de acción local como la formación de barras, en las que se depositan y concentran gran cantidad de semillas por efecto del viento y la dirección del escurreimiento entre otros factores, lo que luego, darán origen a bosques de aliso, de sauce u otro paisaje (Casco et al., 2005).

Referencias

- Casco, S.L., Basterra de Chiozzi, N.I., J.J. Neiff. (2005). La vegetación como indicador de la Geomorfología Fluvial. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Año 6, Nº 1. pp 123-136.

- Conte, A., Etchepareborda, M., Marino, M. (2020). *Argentina económica: Actividad agrícola-ganadera. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina.* <https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=25362ceb139445519f15d54635ba87a8>
- de Antueno, L., Gaspari, F., A. Guzmán Guaraca. (2020). Modelización del efecto del uso del suelo ante un evento pluvial extremo. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal.* UNICEN. Tandil. 2020 Volumen 8 N° 1, ISSN: 2347 – 0941 <http://www.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/659/659>
- Gaspari, F.J., M.Cipponeri. (2022). Formación de gestores de ecosistemas acuáticos continentales. VI Jornadas Interdisciplinarias “Ciclo del Agua en Agroecosistemas” 26 al 24 de noviembre de 2021. Facultad de Ciencias Veterinarias. Buenos Aires. Ed. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Gaspari, F.; Bruno, J.; Rickfelder, R.; Hauri, B.; Cornelly,I.; Oroná, C., M. Leonart. (2006). *Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas Serranas del Partido de Tornquist.* Estudio de Prefactibilidad.135 p.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A., S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Primera Edición.* La Plata. 321 p.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A. y S Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas.* Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3. Actualización constante on line SEDICI.
- Gaspari, F.J.; de Antueno, L.; Guzmán Guaraca, A.; Senisterra, G.; Montealegre Medina, F.A. y A. R. Díaz Gómez. (2019) Modelización hidrológica en la cuenca alta del Arroyo Sauce Chico, Buenos Aires, Argentina. I Congreso Latinoamericano y V Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas 2019 (CMCH-2019). 29 al 30 de Octubre 2019. Ciudad de México, México. http://remexcu.org/cmch-2019/images/docs/Programa_CMCH-2019_V5.pdf
- Montealegre Medina, F.A.; Gaspari, F.J. y M.I.Delgado. (2019). Análisis multitemporal de zonas inundables en el NO bonaerense. Argentina. Congreso Virtual: Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales. “Pensando alternativas para el abordaje ambiental”. ISSN: 978-99905-809-7-6. 16 al 20 de Septiembre de 2019. La Paz, Bolivia. <http://congresos.cebem.org/>
- Ordoñez Galvez, J.J. (2011). ¿Qué es cuenca hidrológica? Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Cartilla Técnica GWP Lima. Perú. 44 pp. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Van Lynden, G.W.J. y L.R. Oldeman. (1997). *The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia.* International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Volonté. A. (2017). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas: cuenca del arroyo San Bernardo, sistema de Ventania, Argentina.* Tesis doctoral. UNS. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3453>
- Whittaker, R.H. (1978). *Ordination of Plant Communities.* W. Junk bv Publishers. The Hague, Boston. 388p.

CAPÍTULO 2

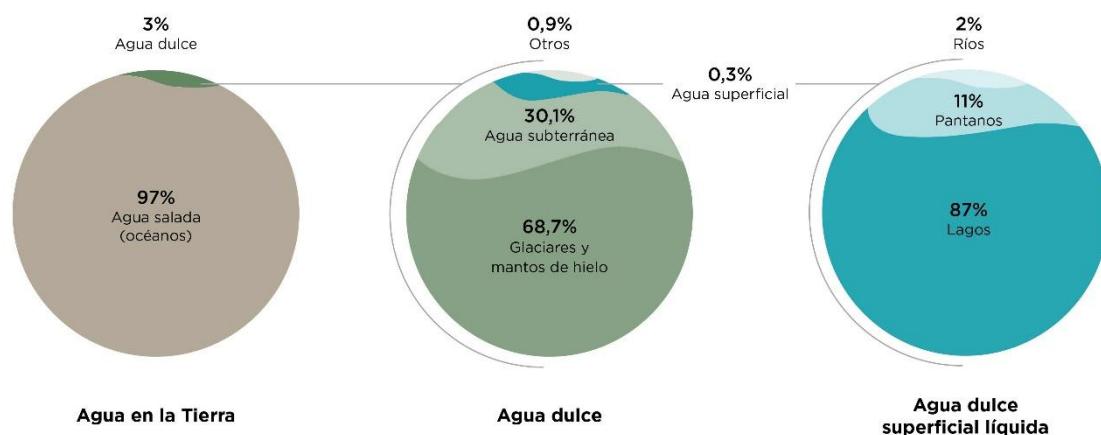
Elementos de hidrología

Fernanda Julia Gaspari

Comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica

La dinámica temporal y espacial de una cuenca hidrográfica es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación, al igual que está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Gaspari et al., 2009; Montealegre Medina et al., 2019). El conocimiento particular del movimiento del agua en una cuenca permite organizar, ordenar y planificar la misma.

Para estudiar esta dinámica es imprescindible conocer que el agua es una sustancia única y es la que más abunda en la Tierra. Según FAO, el 97% es salada y solo el 3% es agua dulce, retenida en glaciares el 68,7%, como aguas subterráneas el 30,1%, en depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración; y el agua disponible lagos, lagunas, ríos, lluvia, solo el 0,3%. El consumo hídrico humano se distribuye en uso doméstico, agropecuario, industrial, energía, turismo, transporte, salud³. La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1.386 millones de km³, y solo 35 millones de km³ es agua dulce. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva. Se estima que solamente el 0,77% se encuentra como agua dulce accesible al ser humano (Figura 2.1).



Adaptado de: Gleck, P. H., 1996: Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2., pp. 817-823.

IGN - Atlas Nacional Interactivo de Argentina

Figura 2.1. Disponibilidad de agua en el planeta. Fuente: Conte et al. (2020).

³ <https://twitter.com/FAOAmericas/status/1035567836339548168/photo/1>

Si pusiéramos toda el agua que existe en el planeta dentro de una cubeta, el agua dulce que puede ser utilizada por los seres vivos equivaldría a lo que cabe en una cuchara pequeña. Se encuentra en la atmósfera en estado líquido, sólido y gaseoso. Bermúdez ha elaborado una ilustración muy clara donde expresa el porcentaje de agua total y sus relaciones en disponibilidad con el agua dulce, su volumen y la tasa de renovación, como se muestra en la Figura 2.2⁴. La tasa de renovación del agua es la cantidad de agua nueva que entra a un sistema por unidad de tiempo.

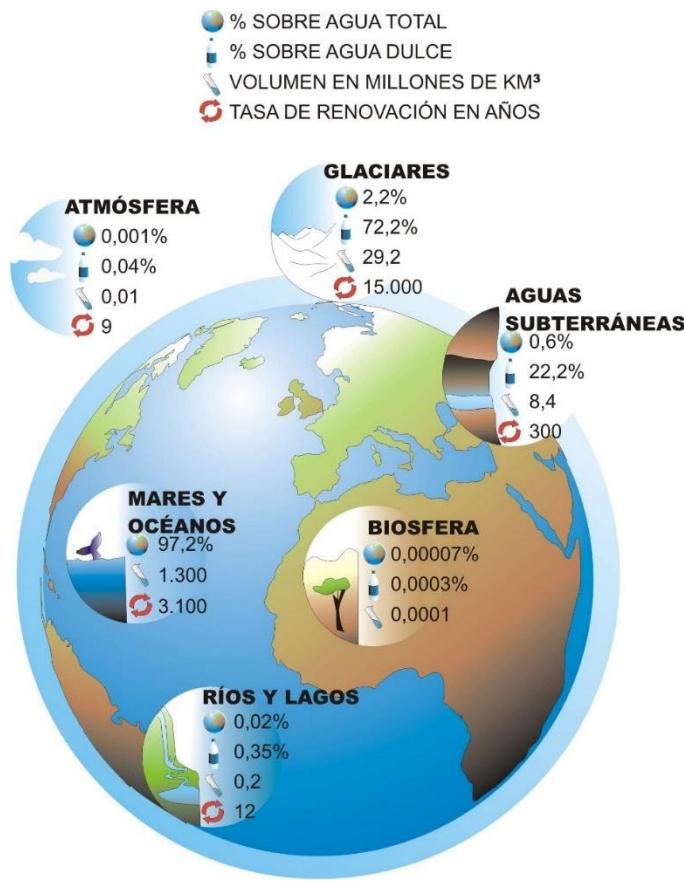


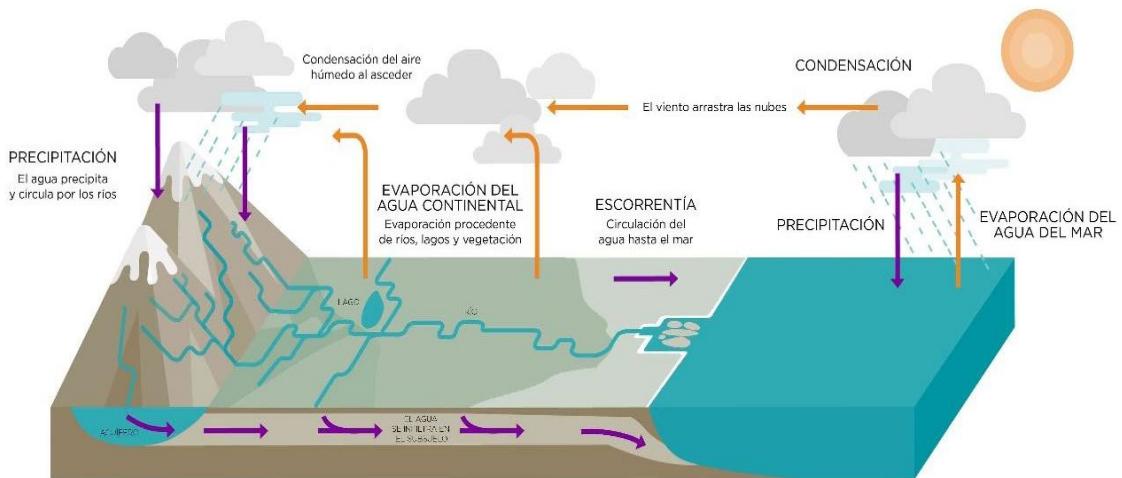
Figura 2.2. Distribución y tasa de renovación del agua en el planeta Tierra. Fuente: Bermúdez (s/año).

Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un modelo conceptual que describe la presencia y el movimiento del agua en la Tierra y sobre ella. El agua de la Tierra está siempre en movimiento y constantemente cambiando de estado, desde líquido, a vapor, a hielo, y viceversa. El ciclo se basa en una entrada principal, la precipitación (P), y salidas de agua como son la evaporación del suelo y de cuerpos de aguas (si estos existieran), la condensación, la transpiración de las plantas o evapotranspiración (Ev), como agua que regresa a la atmósfera; la que ingresa al suelo como infiltración y percolación; y el escurrimiento (E), que se encuentran en movimiento casi continuo

⁴ <https://centroderecursos.educarchile.cl/handle/20.500.12246/18283> - recursostic.educacion.es

en las capas horizontales del suelo (Gaspari et al., 2013; Senisterra, 2014), como se presenta en la Figura 2.3.



IGN - Atlas Nacional Interactivo de Argentina

Figura 2.3. Esquema del ciclo hidrológico. Fuente: Conte, Etchepareborda y Marino (2020).

La energía del sol, junto con factores topográficos y meteorológicos (lluvia, temperatura, viento, radiación solar y humedad), produce el movimiento del agua sobre la superficie del terreno. El **escurrimiento** es el manto de agua que se dirige hacia los cuerpos de agua, y la **evapotranspiración**, es producida entre las plantas y suelo, generando una transformación del agua de estado líquido a gaseoso. El vapor de agua mientras se eleva hacia la atmósfera, pierde calor y se condensa (**condensación**) alrededor de núcleos de condensación transformándose en pequeñas gotas de agua, las cuales se agrupan, formando las nubes, y por su tamaño se precipitan a la tierra en forma de lluvia, granizo o nieve. Durante el proceso de **infiltración**, una parte es retenida por el suelo cuya capacidad de almacenamiento depende de la porosidad del suelo. Una vez saturada la capacidad de almacenamiento, el agua ya no infiltra y se transforma en escurrimiento superficial; otra parte se transforma en flujo subsuperficial y el resto alimenta los acuíferos profundos por **percolación**. El agua que se infiltra y percola también tiene una continuidad horizontal, acompañando / convirtiéndose en escurrimiento subsuperficial y subterráneo, cuyo destino final es un río o el mar. El escurrimiento superficial tiene como destino final un arroyo, río, lago, una laguna o el mar (Senisterra, 2014).

El escurrimiento superficial es una de las variables hidrológicas más importantes en el análisis de la dinámica hídrica y su modelización, considerado como el agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. Su distribución temporal y espacial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Gaspari et al., 2009; de Antuño et al., 2020).

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 o la salida de la cuenca (Gaspari et al., 2013). Los componentes del ciclo son ilustrados

por la ecuación del balance hídrico, que es la ley más importante en Hidrología, pero su cuantificación es compleja, principalmente por la falta de mediciones directas en campo y por la variación espacial de la evapotranspiración, en almacenamiento de aguas en el suelo y subterránea (freática) en una cuenca (Figura 2.4).

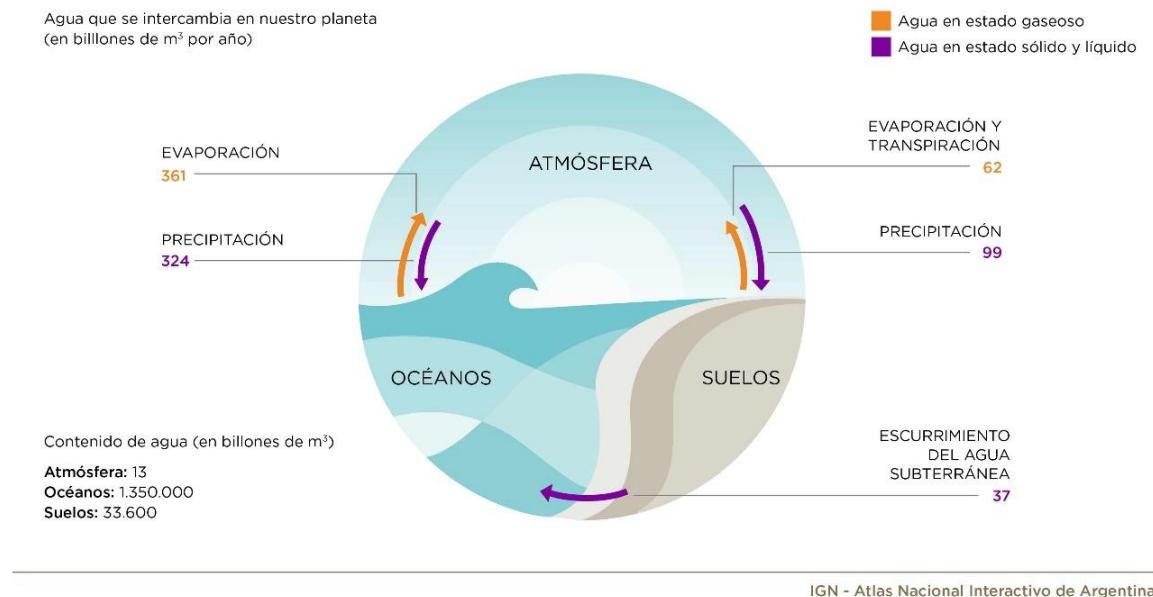


Figura 2.4. Esquema del Balance de agua (billones de m³.año⁻¹). Fuente: Conte, Etchepareborda y Marino (2020).

Por todo ello, el estudio, la caracterización y análisis del ciclo hidrológico genera un diagnóstico básico para todo estudio en una unidad hidrológica, debido a que una cuenca funciona hidrológicamente como un colector que recibe la precipitación y convierte, parte de ésta, en escorrentimiento, infiltración o percolación.

Influencia de la vegetación y uso del suelo

Los cambios en la cobertura de suelo son procesos dinámicos que deben ser estudiados porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Van Lynden y Oldeman, 1997). Estos cambios son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con una influencia muy importante en la dinámica hídrica superficial.

En este contexto, la cuenca hidrográfica es la unidad natural de tratamiento integrado y ámbito para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, pues abarca todo el complejo biogeomórfico, económico y de relaciones sociales como unidad de planificación y gestión del recurso hídrico (Gaspari et al., 2009; Senisterra, 2014).

En relación a los efectos de las actividades agropecuarias y de uso del suelo sobre el ciclo hidrológico, los principales factores que influyen en la reserva y distribución de agua son la precipitación (tipo, duración, cantidad, intensidad y frecuencia), la vegetación que incide en la

cantidad de agua que llega al suelo (tipo, densidad, cobertura, estructura del dosel, entre otros) y el perfil edáfico (textura, estructura, profundidad) que regula el total de agua disponible para la vegetación y para la recirculación dentro del ciclo hidrológico (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Pritchett, 1991; Gaspari et al., 2007; Senisterra, 2014).

Vázquez y Zulaica (2011) y Senisterra (2014) coinciden en que los cambios de cobertura y usos del suelo están relacionados directamente en la generación de escurrimiento superficial y a su vez, tienen una consecuencia directa sobre la erosión de los suelos aumentando la fragilidad de los sistemas ambientales. Por ejemplo, en la zona serrana del sudeste de la provincia de Buenos Aires, la erosión hídrica superficial provoca una decreciente producción agropecuaria, consecuencia del actual manejo del suelo, la pérdida del horizonte superficial y de la disponibilidad de agua superficial y subterránea. En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de esta región, los pastizales pampeanos han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación.

Linsley et al. (1993) y Gaspari et al. (2009) mencionan que la vegetación aumenta la capacidad de infiltración de los suelos retardando el flujo de superficie, dando al agua tiempo adicional para penetrar al suelo, limitando el escurrimiento superficial.

López Cadenas del Llano (1998) refuerza este concepto indicando que la vegetación puede actuar a favor de la estabilidad estructural del suelo, debido al movimiento hídrico que conlleva la evapotranspiración y al efecto mecánico entre las partículas del suelo que ejercen los sistemas radicales.

Es importante considerar que: los cambios en el uso de suelo y la cubierta vegetal, derivados de la expansión y extensión de actividades antrópicas, generan impactos negativos en la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, y contribuyen significativamente en los procesos de cambio climático a nivel regional (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018).

Asimismo, el deterioro de los suelos y la deficiente captación y retención del agua que escurre en los paisajes ondulados conspiran contra la eficiencia en el uso del agua por los cultivos y las pasturas, generando escenarios de sequías temporarias que limitan el potencial productivo, más cuando se producen en períodos fisiológicos críticos. Este estrés hídrico conduce a diferentes niveles de disminución de rendimiento de acuerdo con la intensidad y al momento de ocurrencia (Montico, 2004).

Por otro lado, en los agroecosistemas, además de los problemas relacionados con la cantidad disponible de agua, también se presentan problemas relacionados con la calidad del agua. La contaminación de las fuentes de agua constituye uno de los principales problemas que afrontan los usuarios de los recursos hídricos y supone una amenaza para el mantenimiento de los ecosistemas naturales.

Un cambio en el uso del suelo puede alterar el contenido de nutrientes de las aguas superficiales y subterráneas, más concretamente los niveles de nitrógeno y fósforo (Kiersch, 2002). Las prácticas de uso de la tierra pueden afectar la calidad del agua en forma cuali y cuantitativa, tendiendo este cambio a un proceso de contaminación por excesos o deficiente distribución en el espacio y en el tiempo (Mazzucchelli, 2016).

Recolección de antecedentes, toma de datos e instrumental.

La recopilación de antecedentes conforma una referencia para estudiar y analizar una temática en particular, en la cual influyen los hechos previos sobre los que se pretende investigar. Estos datos antecedentes permiten juzgar, entender, deducir, percibir el ambiente y la cuenca hidrográfica donde se va a trabajar. Es una base de datos que puede estar conformada por la recolección de información de línea base (que puede ser a distintas escalas en el espacio y en el tiempo) del tipo:

- ✓ topográfica proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional y/o información de levantamiento topográfico con instrumental de campo, vehículo aéreo no tripulado (dron), imágenes satelitales.
- ✓ de suelos y de cobertura vegetal que puede ser del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), inventarios, teledetección; considerando también la identificación espacio temporal de los principales usos de suelo mediante imágenes satelitales (índice de NDVI) y su procesamiento en SIG.
- ✓ climáticas del Servicio Meteorológico Nacional, y todas ellas también disponibles en Universidades, Ministerios, con teledetección y/o información de estaciones permanentes o temporales a campo, entre otros.
- ✓ caracterización social, legal e institucional desde material bibliográfico como así también bases de datos digitales nacionales y/o internacionales.

La primera etapa de cualquier análisis geoespacial en una cuenca hidrográfica es una preparación en gabinete y conformar la base de datos geoespacial, donde se trata de localizar y registrar una serie de puntos en el terreno de los que se tomarán sus coordenadas mediante técnicas e instrumental. Posteriormente, según el tipo de información / dato es requerido, se utilizan diferentes equipos para su medición, como se mencionan a lo largo del libro de cátedra.

En el caso de representar el movimiento de agua en superficie, la técnica de la simulación de lluvia básicamente consiste en aplicar una cantidad de lluvia concreta sobre una parcela de límites conocidos, controlando el agua de escorrentía generada durante la experiencia. La diferencia entre el agua aplicada y el agua recogida es el agua absorbida por el suelo y, por lo tanto, simplemente tomando medidas del agua generada por la lluvia a intervalos de tiempo regulares, se obtiene la tasa de escurrimiento – infiltración definiendo los posibles excesos hídricos sobre el terreno.

Este proceso se puede realizar mediante un equipo de simulación de lluvias, en laboratorio (Figura 2.5) o a campo (Figura 2.6), y/o por medio de la construcción de parcelas de escurrimiento a campo (Figura 2.7), las cuales brindan información relevante para calibrar modelos hidrológicos. La creación e instalación de parcelas a campo y/o el equipo de simulación de lluvias en laboratorio, ofrece la posibilidad de obtener datos con repeticiones para un tratamiento particular, otorgándole un sustento estadístico, y además, los tratamientos pueden variar en el tiempo, instalando diferentes coberturas y/o prácticas conservacionistas (Figura 2.6).



Figura 2.5. Simulador de lluvias de laboratorio del Centro de Estudios de la Dinámica Exógena (CEIDE – FCAF-UNLP). Fuente: Elaboración propia.

Irurtia, Eiza y Carfagno (2013) mencionan que, por el marcado interés por el estudio de las propiedades físico-hídricas de los suelos, condujeron al desarrollo de mecanismos e instrumentos que tratan de simular los efectos de la lluvia natural. Entre estos, los simuladores de lluvias a campo han sido usados desde hace tiempo en diferentes países en investigaciones sobre erosión y escurrimiento, a campo y en laboratorio. Éstos son particularmente adecuados para relevamientos de suelos a campo debido a que son livianos y fáciles para transportar, siendo una herramienta sumamente versátil y práctica para realizar estudios de la condición de suelos y proponer estrategias de manejo que tiendan a su conservación.

El simulador de lluvia a campo, que se muestra en la Figura 6 permite realizar una serie de determinaciones de suma importancia para el manejo y la conservación del suelo. Al ser un instrumento transportable de relativamente sencilla operación, permite realizar múltiples repeticiones como así también, la exploración de diferentes situaciones en el terreno debidas al tipo de suelo o manejo, como expresan Irurtia, Eiza y Carfagno (2013). Mencionan además que entre las determinaciones más frecuentes se mencionan: infiltración total de una lluvia (mm); tasa de infiltración final (mm.hora^{-1}) (similar a infiltración básica); escurrimiento total de una lluvia (mm); distribución del escurrimiento durante una lluvia (mm); relación lluvia/escurrimiento; emisión de sedimentos, como pérdida de suelo (Mg.ha^{-1}); Índice de Erosión (IE) (g.KJ^{-1}); sortividad (S); Grado de Cobertura Superficial (COB); e Índice de Rugosidad Superficial (RR).

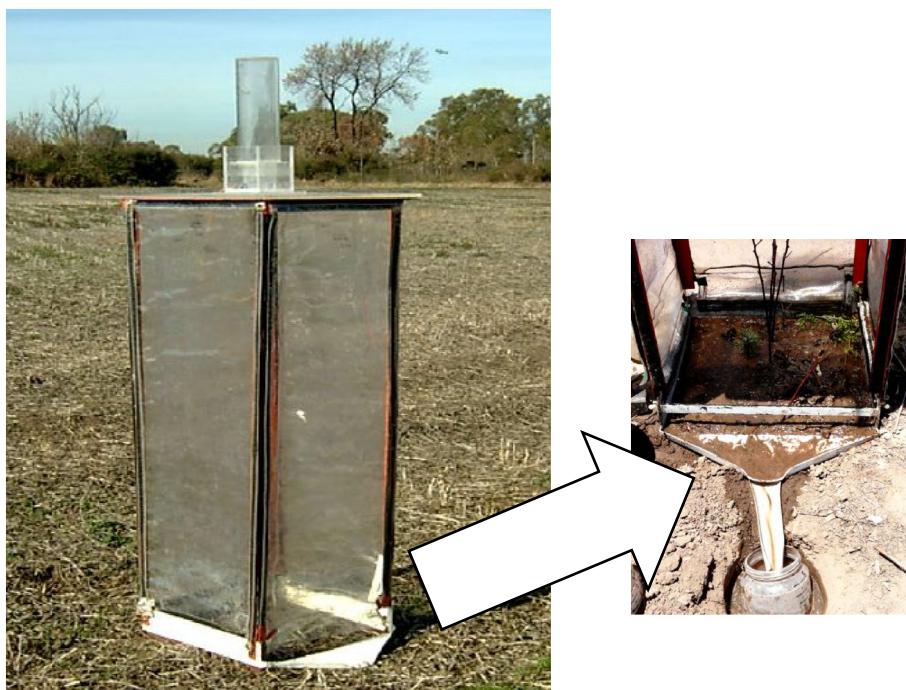


Figura 2.6. Simulador de lluvias y parcela de escurrimiento a campo. Fuente: Irurtia, Eiza y Carfagno (2013).

En el Instituto de Suelos (CIRN INTA) se desarrollaron parcelas móviles de escurrimiento construidas con chapas de zinc, que poseen una superficie de captación de 60 m². Estas dimensiones integran la variabilidad espacial en las propiedades edáficas necesarias para la determinación del escurrimiento superficial. Estas son apropiadas para llevar a cabo estudios de escurrimientos y pérdida de suelo por erosión hídrica a campo ya que permiten realizar las mediciones directamente in situ y ante las condiciones de lluvia natural. Por su bajo costo y sencilla instalación y mantenimiento resultan de factible adopción, lo que permitirá conformar una red de ensayos a lo largo del territorio (Carfagno et al., 2018).

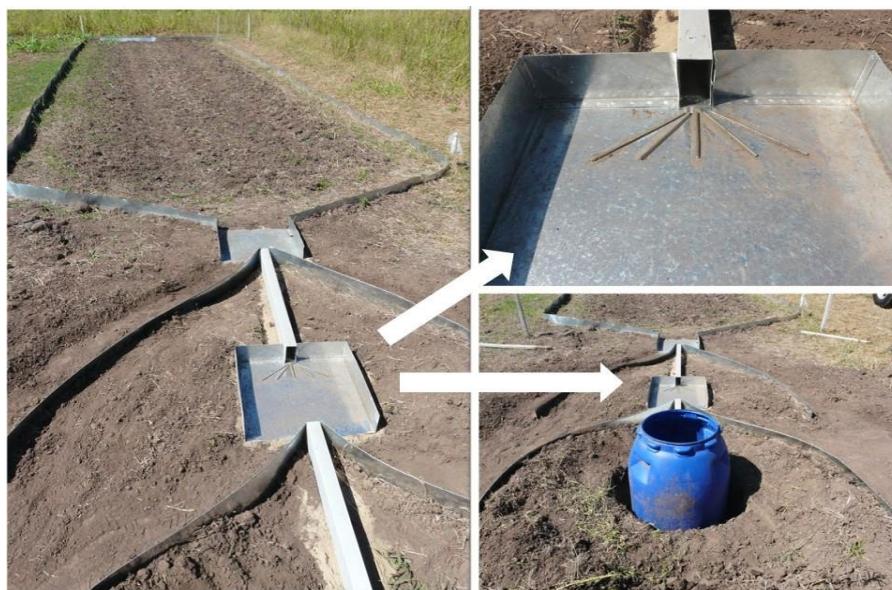


Figura 2.7. Parcela de escurrimiento a campo. Fuente: Carfagno et al., (2018).

Referencias

- Bermúdez, J.A. (s/año). *Ilustración a color que muestra la distribución del agua en el planeta Tierra.* Portal de la Educación Chilena. Chile. Disponible on line. <https://centroderecursos.educarchile.cl/handle/20.500.12246/18283>
- Carfagno, P.F, Eiza, M., Sainz, D., Behrends Kraemer, F. y C.Chagas. (2018). Diseño de parcelas móviles de escurrimiento para estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica. *Ciencia del suelo*, 36 (2), 14-20. Recuperado en 10 de febrero de 2023, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672018000200002&lng=es&tlang=es.
- Conte, A., Etchepareborda, M., y Marino, M. (2020). *Argentina económica: Actividad agrícola-ganadera.* ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina. <https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=25362ceb139445519f15d54635ba87a8>
- de Antueno, L., Gaspari, F. & A. Guzmán Guaraca. (2020). Modelización del efecto del uso del suelo ante un evento pluvial extremo. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal.* UNICEN. Tandil. 2020 Volumen 8 N° 1, ISSN: 2347 – 0941 <http://www.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/659/659>
- 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 de la Facultad de Ciencias Agrarias.* U.N.C. Pág. 21-28 p. Tomo XXXIX. N°1.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A., S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.* Primera Edición. La Plata. 321 p.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A. y S Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas.* Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3.
- Irurtia, C.B.; Eiza, M.J. y P. Carfagno. (2013). El simulador de lluvias portátil: una herramienta aplicable para la conservación de los suelos. JORNADAS ARGENTINAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS. Buenos Aires. 3 pp.
- Kiersch, B. (2002). Relación tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales. *Boletín de tierras y agua.* FAO N°9 pp. 49 - 57 Rome.
- Linsley, R.; Kohler, M. y J. Paulhus. (1993). Hidrología para ingenieros. Segunda edición. Editorial McGraw-Hill. 386 pp.
- López Cadenas del Llano, F. (1998). *Restauración hidrológica forestal y control de la erosión. Ingeniería Ambiental.* Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España. 945 pp.
- Mazzucchelli, M.G. (2016). *Diagnóstico físico-químico y microbiológico del agua superficial del área serrana del arroyo Napaleofú.* Tandil, provincia de Buenos Aires. Tesis de Magister en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. FCAF-UNLP. 149 pp. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/55976>

- Mintegui Aguirre, J. A. y F. López Unzú. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación. I parte.* Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco. 172 pp.
- Montealegre Medina, F.A.; Gaspari, F.J. y M.I.Delgado. (2019). Análisis multitemporal de zonas inundables en el NO bonaerense. Argentina. Congreso Virtual: Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales. “Pensando alternativas para el abordaje ambiental”. ISSN: 978-99905-809-7-6. 16 al 20 de Septiembre de 2019. La Paz, Bolivia. <http://congresos.cebem.org/>
- Montico, S. (2004). Estudios sobre Sociedad, Naturaleza y Desarrollo. *Revista Theomai*. Número extra-1. <http://www.revista-theomai.unq.edu.ar/>
- Ordoñez Galvez, J.J. (2011). ¿Qué es cuenca hidrológica? Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico. *Cartilla Técnica GWP*. Perú. 44 pp. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Pritchett W. L. (1991). *Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento*. Ed, Limusa, S. A. México. DF. 634 p.
- Sahagún-Sánchez, F. J. y H.Reyes-Hernández. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Ciencia UAT*, 12(2), 6-21. Recuperado en 09 de febrero de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582018000100006&lng=es&tlang=es.
- Senisterra, G.E. (2014). *Influencia del cambio de uso del suelo sobre el escurrimiento superficial. Estudio de caso: Cuenca del Arroyo Napaleofú, PBA, Argentina*. Tesis de Magister en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. FCAF-UNLP. 132 pp. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/42165/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Van Lynden, G.W.J. y L.R. Oldeman. (1997). The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Vázquez, P. y L. Zulaica. 2011 Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos geográficos*, Vol 10, N° 2. 242-267. ISSN 1853-9424.

CAPÍTULO 3

Delimitación y morfometría de cuencas

Lucía de Antueno

Delimitación de una cuenca hidrográfica

En general, podemos decir que una cuenca hidrográfica constituye un espacio físico delimitado por la propia naturaleza y principalmente por los límites que imponen las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales convergiendo hacia un mismo punto de desagüe o punto de cierre (Garcés Durán, 2011).

En este contexto, la cuenca hidrográfica es la unidad natural de tratamiento integrado y ámbito para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, pues abarca todo el complejo biogeomórfico, económico y de relaciones sociales como unidad de planificación y gestión (Gaspari et al, 2009). Por esto su delimitación es de fundamental importancia en la gestión del territorio, así como su partición en subcuenca y microcuenca.

La delimitación de una cuenca hidrográfica se realiza por sus divisorias de aguas, la cuales suelen estar muy marcadas en zonas con mayores pendientes y paisajes escarpados, pero son mayormente difusas en llanuras imposibilitando, muchas veces, la delimitación real del espacio.

La definición de un límite de cuenca, desde el punto de vista hidrológico, se considera analizando la topografía del terreno a partir de la divisoria de aguas topográfica, cuyos límites (LC) envuelven el territorio que ocupa el río principal y sus afluentes, hasta su desembocadura. Esta divisoria de agua engloba en un mismo territorio a las vertientes o laderas (desde las cabeceras de cuenca hasta las cercanías del curso de aguas), a la llanura aluvial (rodeando al río y su cauce en todo su recorrido) y al río propiamente dicho hasta su salida en contacto con otro río, lago, laguna o mar. (Gaspari et al., 2016).

Si bien existen numerosas metodologías para la delimitación de cuencas hidrográficas empleando herramientas de SIG, su elección dependerá fundamentalmente del nivel de detalle que se requiera y de la información con la que se cuente.

En este capítulo, se explicará una metodología para determinar cuencas y subcuenca a partir de la topografía, empleando el software QGIS, con las herramientas de GRASS, sin la necesidad de crear un directorio, y con las herramientas de SAGA.

Para la realización de los ejemplos se trabajará la región de la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú (CAAN) definida por once subcuenca y ubicada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, entre los partidos de Tandil, Lobería y Balcarce, perteneciendo ésta, al Sistema Serrano Bonaerense. Abarca una superficie de 344 km². (Senisterra et al., 2014).

Obtención de MDE

Se recomienda emplear los Modelos Digitales de Elevación (MDE) de 30 m de resolución espacial y una precisión vertical de aproximadamente 2 m, provistos por el IGN, modelo MDE-Ar v2.1. En el caso de que el IGN disponga de modelos de mayor precisión en la zona donde se está trabajando, los mismos pueden emplearse siguiendo el mismo procedimiento, pero tal vez se requiera una capacidad de procesamiento mayor, en términos de Hardware.

El modelo MDE-Ar v2.1 combina datos capturados por las misiones satelitales SRTM y ALOS, cubriendo la totalidad del territorio continental nacional, y cuya referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16). Si bien los MDE se encuentran editados con procedimientos de relleno de vacíos, inclusión de datos de lagos, filtrado espacial, enmascarado de límites y filtrado de datos anómalos, brindan información sobre la cota del primer objeto visible, lo que implica considerar la elevación superior de edificios, árboles y otros objetos ubicados por encima del terreno. Además, al tener una resolución espacial de 30 m, cada píxel representa 900 m² mediante un solo valor.

Para acceder a los productos disponibles por el IGN, se puede acceder a la búsqueda interactiva (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Búsqueda>). Habiendo ingresado a la página, se pueden adquirir los modelos digitales de elevación o de terreno en formato *.img. La búsqueda puede realizarse sabiendo con anterioridad el número de la carta topográfica del área de estudio o por provincia, partido y producto, Figura 3.1.

Figura 3.1. Búsqueda de MDE/MDT.

Otra forma es a partir del mapa interactivo (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>), buscando en el mapa por partido dentro de la provincia, Figura 3.2.

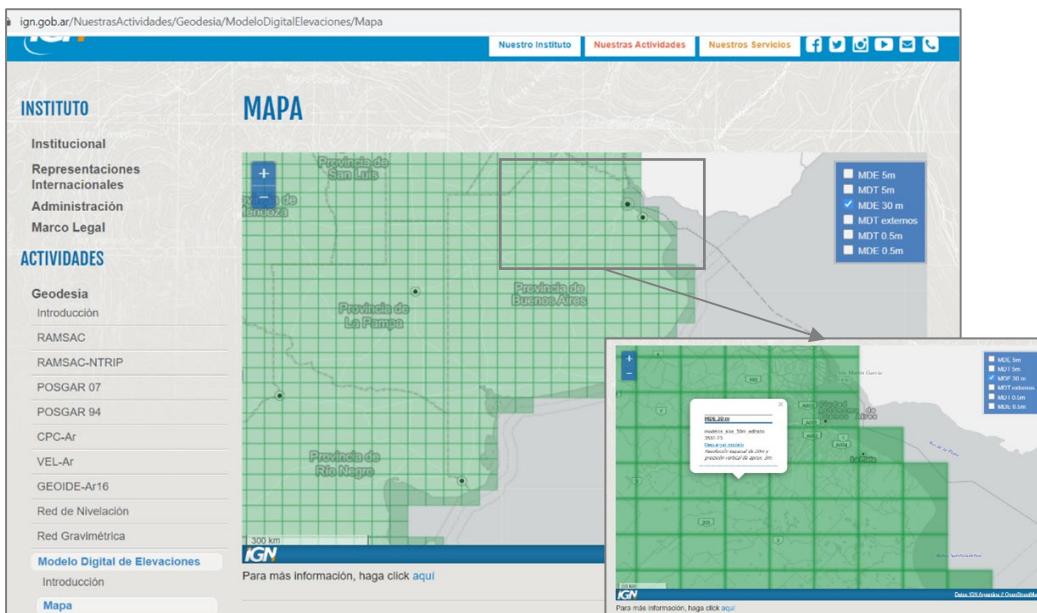


Figura 3.2. Búsqueda de MDE/MDT en la página web del IGN desde el mapa interactivo.

Una vez descargados los MDE descomprimir las carpetas y guardarlas en el directorio de donde se guardarán todos los archivos de SIG que se usarán en la realización del trabajo.

Delimitación de cuencas

En la plataforma QGIS (se recomienda se recomienda la versión 3.26.2 Buenos Aires o superior), se procederá al tratamiento de los MDE formando, en caso de ser necesario, un mosaico que abarque holgadamente la subregión a determinar.

Procedimiento de delimitación

1. Corregir depresiones en el MDE:

En la “Caja de Herramientas de Procesos” buscar y seleccionar el módulo “r.fill.dir” (Figura 3.3). Se abrirá una nueva ventana donde debe cargarse en “Altitud” el MDE recortado, deben definirse los nombres de los archivos de salida para “MDE sin depresiones” y “Direcciones de flujo”. “Ejecutar”.

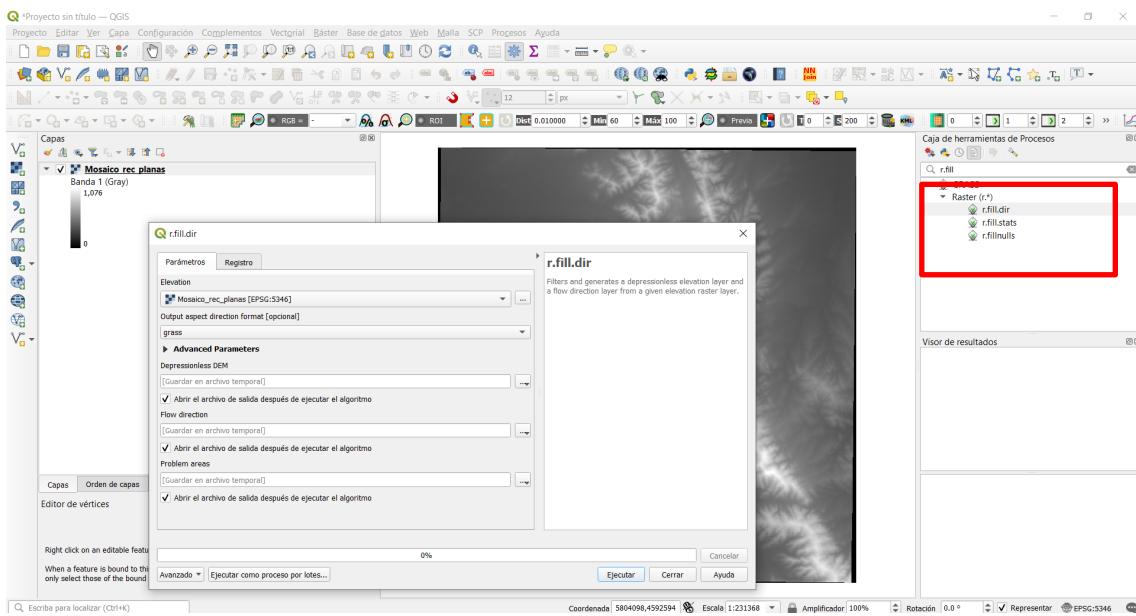


Figura 3.3. Corregir depresiones de la capa ráster con módulo “r.fill.dir”.

2. Marcar los cursos de agua:

Se procede a marcar el MDE con los cursos de agua permanentes, esto se recomienda dependiendo de la calidad del shape con el que contemos. Para ello, en el buscador de la "Caja de Herramientas de Procesos" buscar y seleccionar el módulo “r.carve”. Se abrirá una nueva ventana (Figura 3.4) en la cual deben completarse los campos siguientes:

Altitud: elegir el MDE con las depresiones corregidas.

Capa vectorial que contiene corriente(s): seleccionar el *shape* con los cursos de agua permanentes de la cuenca.

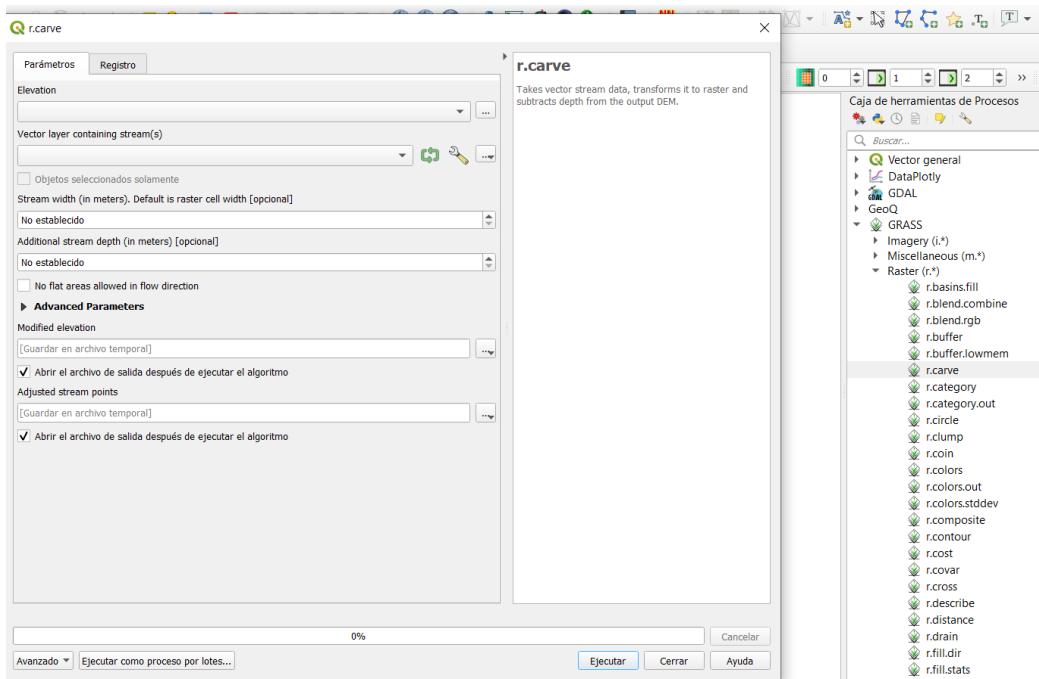


Figura 3.4. Marcar cursos de agua con el módulo “r.carve”.

También pueden seleccionarse los siguientes parámetros opcionales:

Ancho del cauce: se recomienda elegir dos veces el valor del tamaño de la celda (expresado en m).

Profundidad de la corriente (m): debe seleccionarse a criterio del profesional.

Además, es útil tildar “No se permiten áreas planas en la dirección de flujo”.

Luego, “Ejecutar”.

3. En el buscador de la "Caja de Herramientas de Procesos" seleccionar el módulo “r.watershed”, se abrirá una nueva solapa (Figura 3.5) donde se deben completar los siguientes campos:

Altitud: elegir el MDE con las depresiones corregidas y el marcado de los cursos permanentes creado en el punto anterior.

Tamaño mínimo de cuenca exterior (opcional): este valor, expresado en número de celdas, es el tamaño de la subcuenca más pequeña que se va a delimitar, que depende de la extensión total de la cuenca. Puede ser necesario repetir este paso para hallar el valor adecuado. Si conocemos aproximadamente el área de la cuenca a delimitar, se puede calcular la cantidad de píxeles que comprendería la totalidad de la cuenca y elegir un valor algo menor al 1% de esta área, por medio del cociente entre el Área de la cuenca y el Área de cada píxel:

Si el Área de la cuenca es $200 \text{ km}^2 = 20.000 \text{ ha} = 200.000.000 \text{ m}^2$

Y el Área de cada Pixel es aprox. $= 30 \text{ m} \times 30 \text{ m} = 900 \text{ m}^2$

$$\text{Cantidad de pixeles} = \frac{200.000.000 \text{ m}^2}{900 \text{ m}^2} = 222.222,22$$

Por lo tanto, adoptamos como tamaño mínimo de cuenca: 200.000 píxeles

Definir los nombres de archivos de salida para los siguientes archivos ráster:

Número de celdas que drenan a partir de cada celda: es la acumulación de cada celda, por ej. *Flow_Accum*.

Dirección de Drenaje, por ej. *DirDeDrenaje*.

Etiqueta única para cada cuenca hidrográfica, por ejemplo, *CAAN*.

Segmentos de transmisión, por ej. *Segmentos_cursos*

Semicuencas. por ej. *subcuencas*

Luego, “Ejecutar”.

Se crearán los archivos ráster definidos, como los del ejemplo de la CAAN de la Figura 3.6

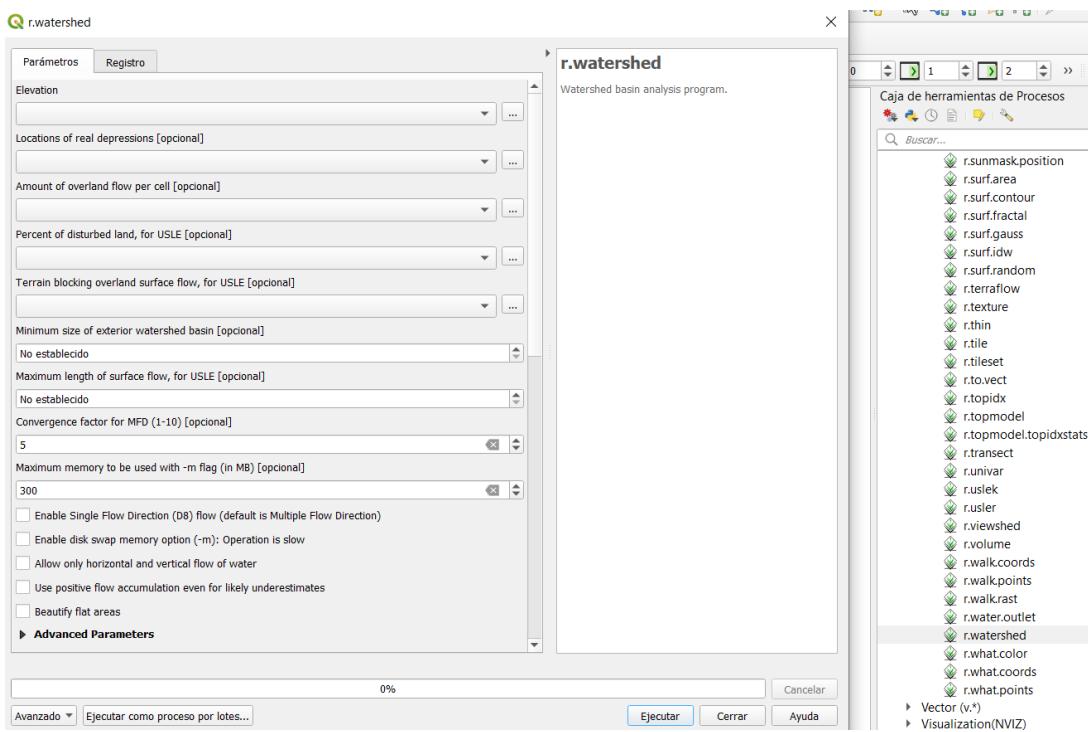


Figura 3.5. Trazado de cuencas con el módulo "r.watershed".

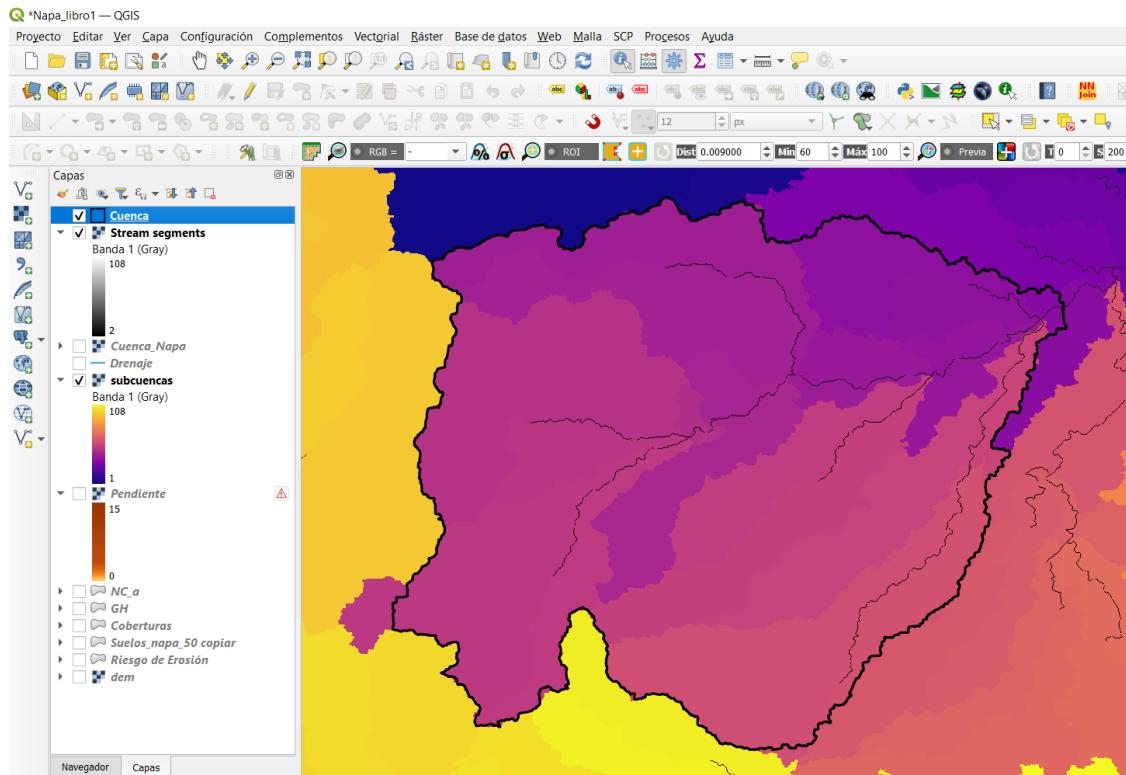


Figura 3.6. Trazado de subcuencas y cursos de la CAAN.

4. Determinar el punto de salida de la cuenca:

En el buscador de la "Caja de Herramientas de Procesos" buscar y seleccionar el módulo "r.water.outlet" para determinar la cuenca a partir de cualquier punto de cierre. Se abrirá una nueva ventana (Figura 3.7) donde deben completarse los siguientes campos:

- Nombre del mapa raster (*Drainage direction raster*): se debe seleccionar la dirección de drenaje, la determinada con "r.watershed".

- Coordenadas del punto de salida (*Coordinate of outlet point*): haciendo clic en el botón con los tres puntos a la derecha, pueden elegirse las coordenadas del punto de salida de la cuenca desde el mapa. Seleccionar un punto que corresponda a un pixel de la capa de segmentos de cursos (*Stream Segmentation*) creada en el punto anterior a partir del módulo “r.whatershed”. Aparecen las coordenadas del punto en la ventana de “r.water.outlet”.
- *Name for output watershed basin map*: nombre del archivo de salida: Cuenca_CAAN

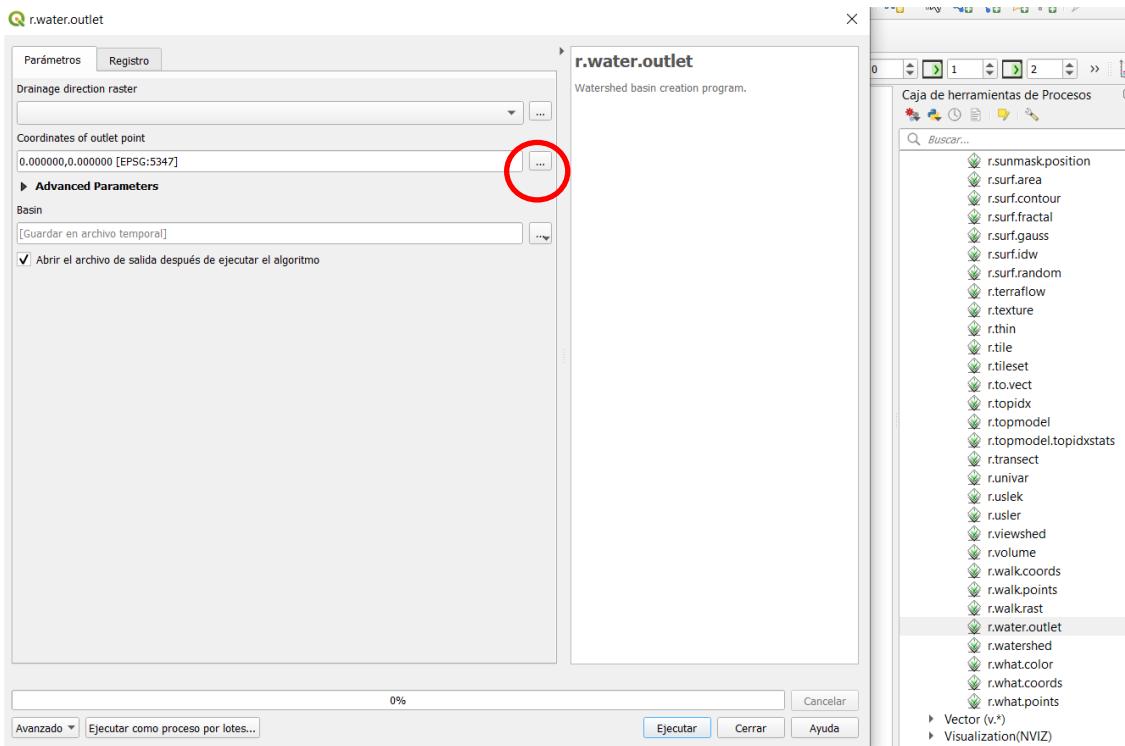


Figura 3.7. Determinar el punto de salida de la cuenca con el módulo "r.water.outlet".

Se generará un nuevo *ráster* con la cuenca delimitada, Figura 3.8.

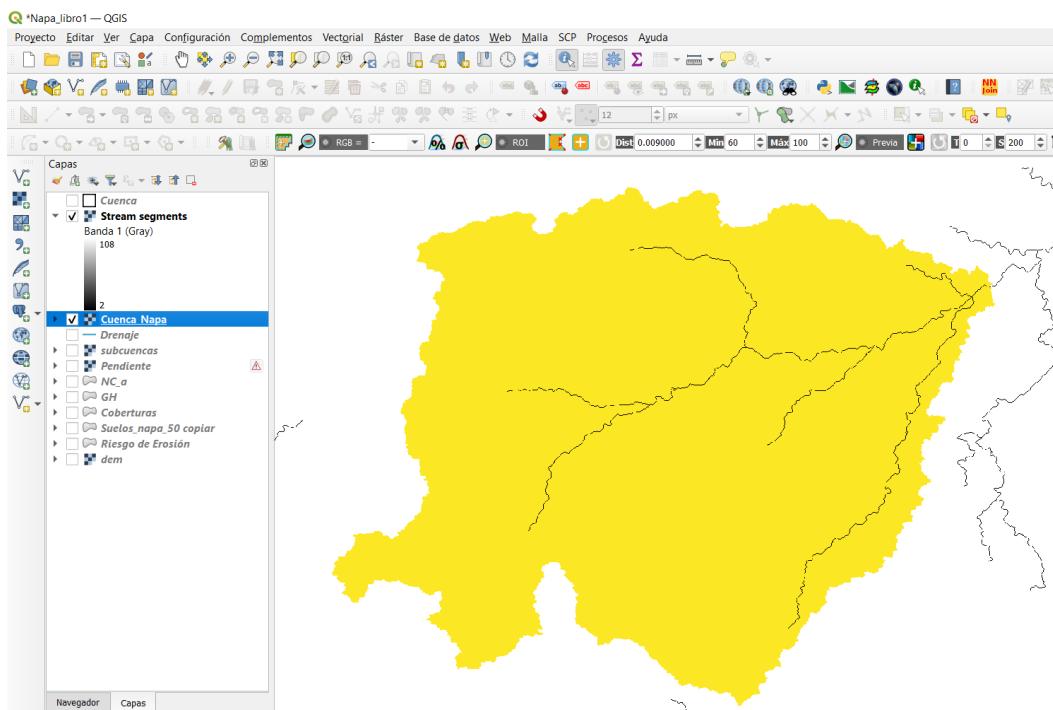


Figura 3.8. Ráster de la CAAN delimitada.

5. Convertir la cuenca, subcuenca y/o cursos a polígonos (en formato vectorial shape):

Para pasar de formato *ráster* a *vectorial*, en el buscador de la Caja de Herramientas de Procesos, seleccionar la herramienta “r.to.vetc”. Desde donde se abrirá la ventana de la Figura 3.9, en la cual se debe completar

- Capa ráster: seleccionar la capa *ráster* que quiere convertirse a formato vectorial.
- El tipo de elemento: punto, línea o polígono
- El nombre de la columna de en la Tabla de atributos del shape que se va a crear.
- Se guarda el archivo en el directorio de trabajo

Finalmente, ejecutar.

También puede emplearse la herramienta “Poligonizar ráster a vectorial” en la solapa *Raster / Conversion*, que abrirá una ventana (Figura 3.10) donde deben completarse los campos siguientes:

- Capa ráster: seleccionar la capa *ráster* que quiere convertirse a formato vectorial.
- Nombre del archivo de salida y ruta de guardado.

Luego, “Ejecutar”. Se obtendrá un shape de la cuenca como la de la Figura 3.11.

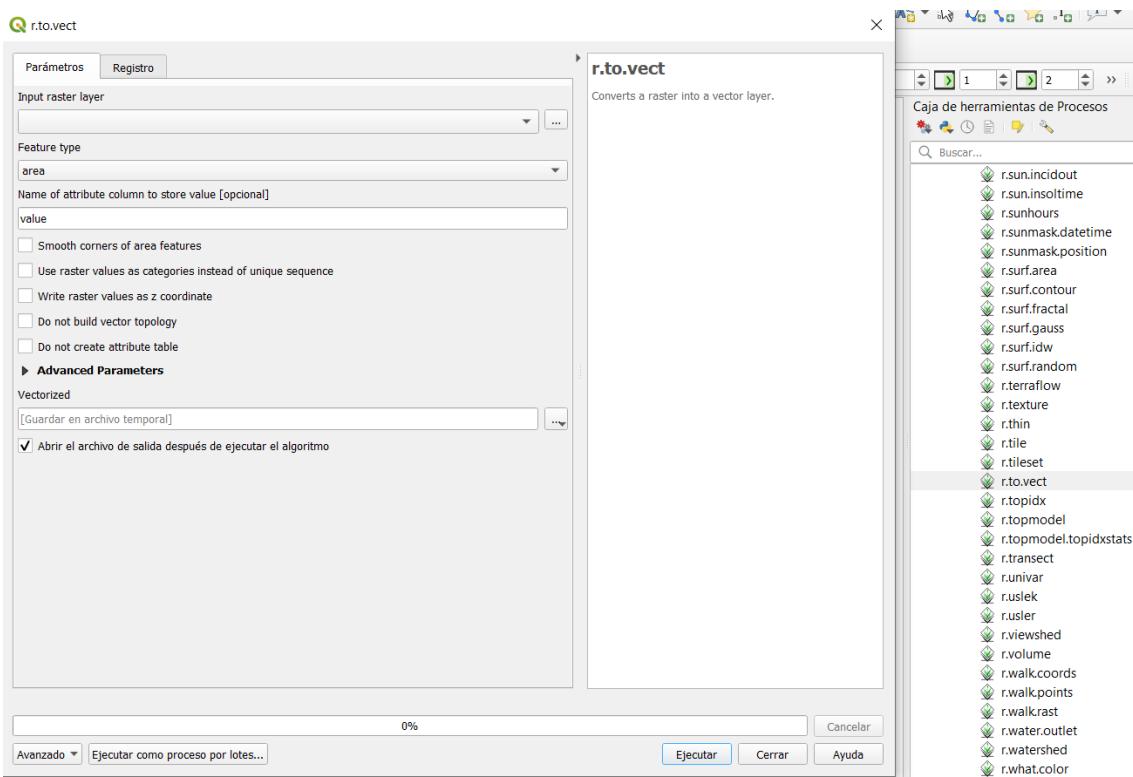


Figura 3.9. Herramienta "r.to.vect" para pasar capa de formato ráster a shapefile.

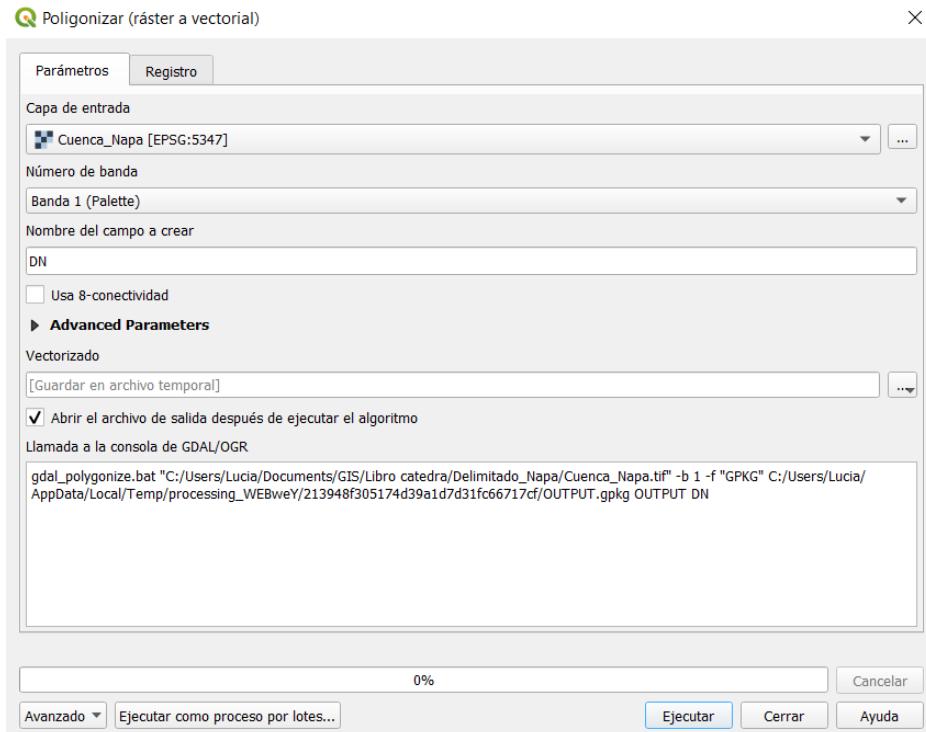


Figura 3.10. Herramienta "Poligonizar" para pasar capa de formato ráster a shapefile.

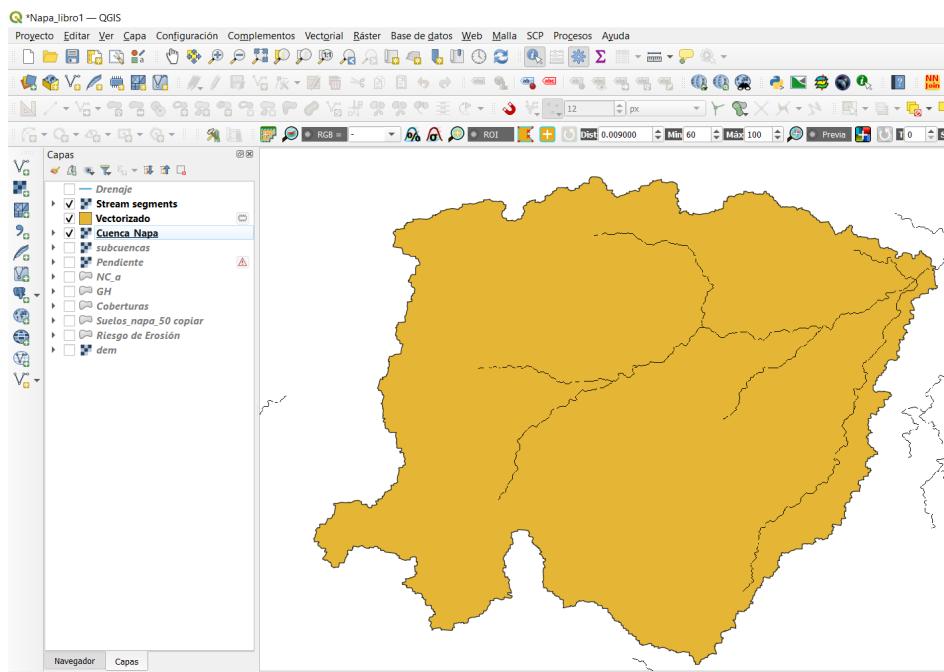


Figura 3.11. Ejemplo de la capa vectorial de la cuenca CAAN delimitada

Morfometría

La caracterización de una cuenca está dirigida fundamentalmente a cuantificar todos los parámetros que describen su estructura física y territorial. La caracterización de una cuenca se inicia con la delimitación de su territorio y continúa con la obtención de “parámetros morfométricos”. (Biblioteca Agroecológica FUNDESYRAM). El estudio morfométrico tiene relevancia porque permite considerar variables de forma, relieve y red de drenaje, que revelan el comportamiento morfodinámico e hidrológico de las cuencas para prevenir percances en casos de excesos de precipitación y ayudar a la planeación del uso sustentable de la misma (Domínguez et al., 2003).

La morfología de una cuenca queda definida por parámetros de forma, de relieve, y relativos a la red hidrográfica o de drenaje, que influyen sobre la dinámica hídrica superficial (Gaspari et al., 2016). El análisis de las características morfológicas y funcionales de una cuenca se basa en establecer y analizar los parámetros morfométricos de forma, de relieve y relativos a la red hidrográfica, mediante el uso de SIG y apoyo en planillas de cálculo, que puede ser enriquecido con un análisis general topográfico de manera de integrar el relieve y el propio trazado de los ríos. Es un concepto fundamental en el análisis de la hidrografía, en especial, en el estudio de las aguas superficiales continentales. Es importante recordar que, desde el punto de vista hidrológico, una cuenca hidrográfica se define como el territorio que ocupa el cauce de un río principal y sus afluentes, cuyos límites son definidos por la topografía del terreno a partir de las divisorias de aguas. El cauce o lecho de un río es el canal natural por el que circulan las aguas generadas dentro de la cuenca hidrográfica.

En un análisis integrador de la superficie de la cuenca con su cauce (laderas), intervienen dos conceptos: perfil transversal y longitudinal. Siendo el perfil transversal el que indicaría el fondo

del cauce y la divisoria topográfica hacia ambos lados, indicando una depresión cóncava con la parte más profunda donde circula el río. Mientras que el perfil longitudinal indica el talweg desde la divisoria de agua de la cuenca hasta su desembocadura. Además, describe la forma en el que éste varía su cota a lo largo de su longitud y recorrido; de tal modo que refleja la pendiente de cada tramo, determinada por las condiciones impuestas por el tramo aguas arriba. La representación gráfica expresa la capacidad erosiva del río por medio de la relación entre la distancia recorrida desde su nacimiento y la altura relativa de cada punto de dicho perfil. Cabe mencionar que el perfil longitudinal y el mapa topográfico son descripciones continuas de la superficie (Gaspari et al., 2012). El perfil transversal se define como un corte perpendicular del cauce del río indicando como límites extremos el inicio de la planicie de inundación de cada lado del cauce (Figura 3.12).

Para trazar los perfiles en Qgis, puede usarse la herramienta que se encuentra en la solapa *Ver / Perfil de elevación*. Se activará un panel que identifica las capas activas en el proyecto. En caso de que el MDE no se vea en el nuevo panel, debe hacer clic con el botón derecho sobre la capa: Propiedades / Elevación y tildar la opción: *Represents elevation Surface*. De las herramientas del panel usar la herramienta *Captura Curve* (para hacer un perfil cualquiera) o *Captura curve from feature* (para hacer un perfil a partir de una línea perteneciente a un shape).

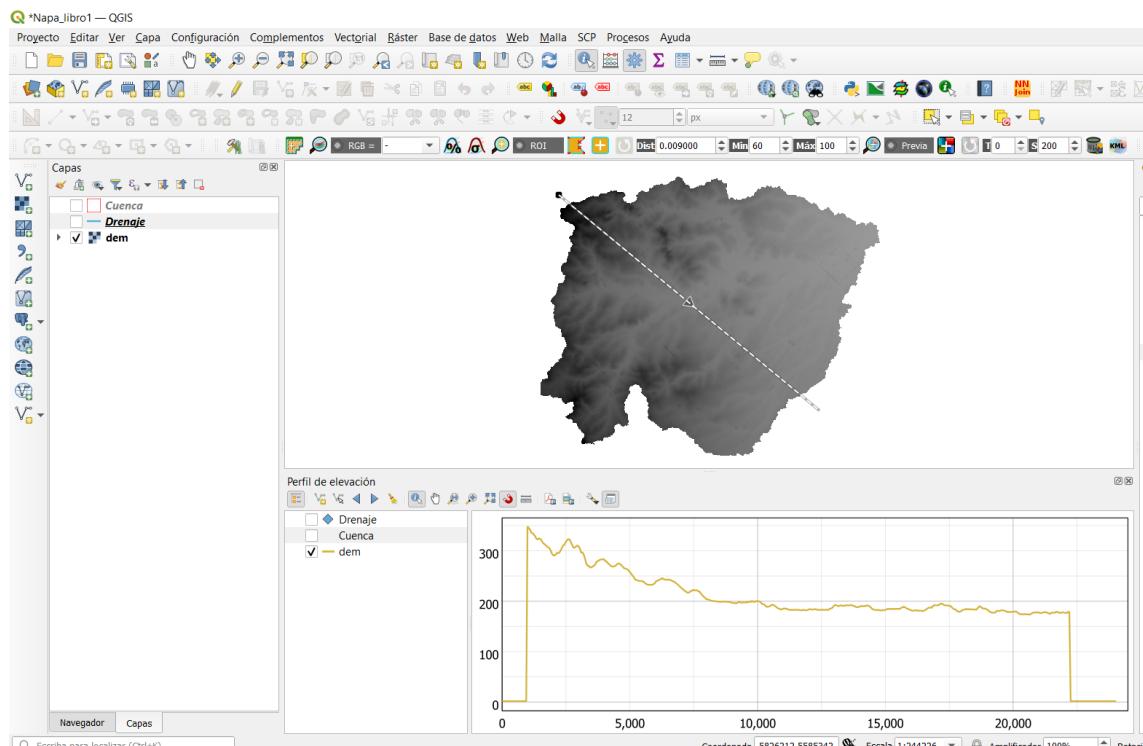
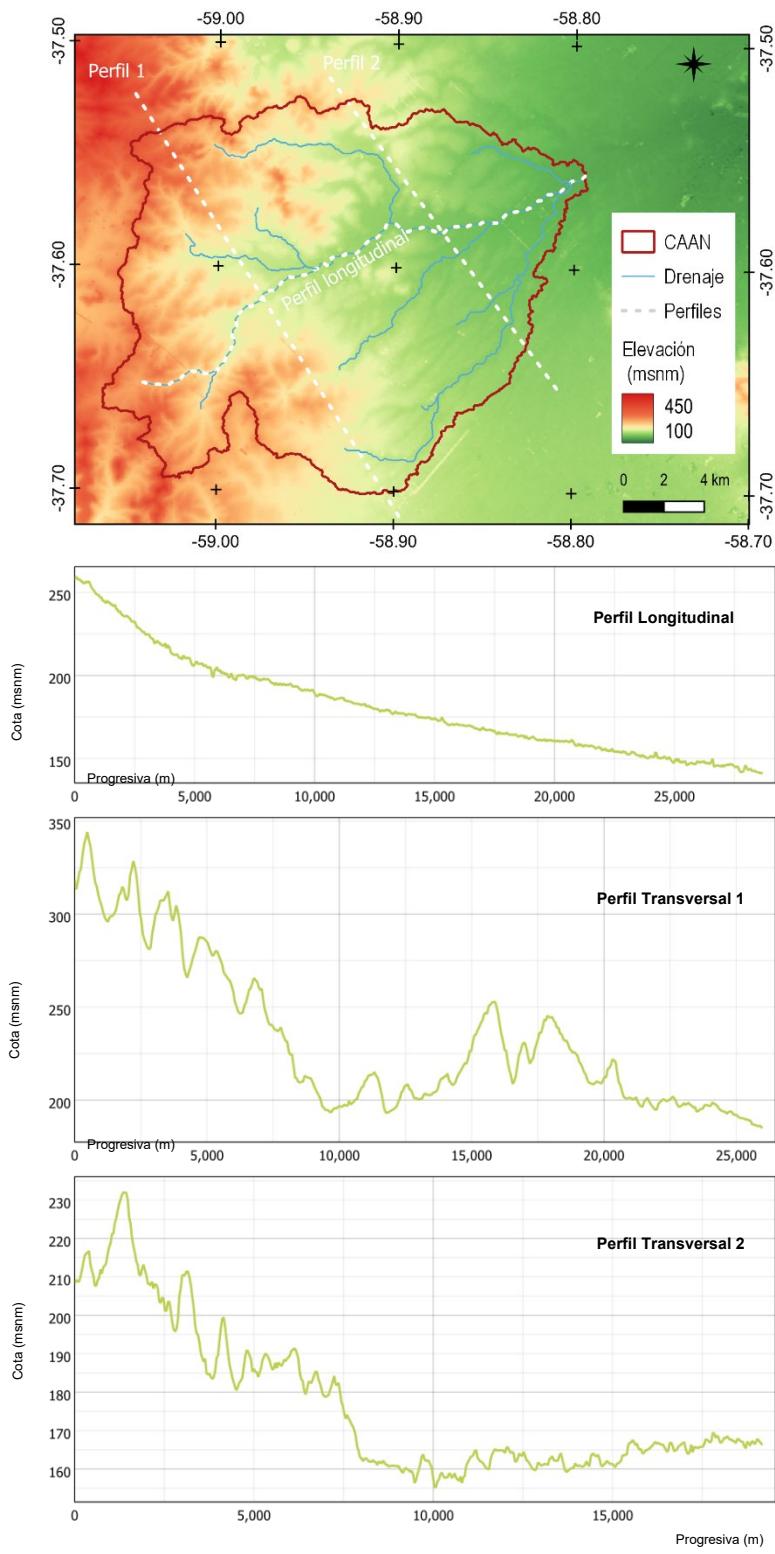


Figura 3.12. Trazado del perfil de elevación

En la Figura 3.13 se presenta el perfil longitudinal del cauce principal y dos transversales (perfils 1 y 2) en la CAAN, indicando la posición de cada uno de ellos y la gráfica que genera la representación de las cotas a través de los perfiles. Además, se marca la ubicación de los cauces (principal y temporarios) que corta cada transecta, sobre el relieve expresado por cada perfil.

**Figura 3.13.** Perfiles transversales y longitudinal, CAAN.

Otros indicadores morfométricos destinados a determinar la influencia de los límites de la cuenca en relación al movimiento y captación del agua de lluvia, se engloban en los parámetros de forma, relieve y de la red de drenaje (López Cadenas del Llano, 1998).

Parámetros de forma

Perímetro (P) (km). Es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas. Se determina desde la tabla de atributos del shape de la cuenca, eligiendo la opción: *Calculada de campos*, buscar en el panel central *Geometría* y luego *\$perimeter*, seleccionarlo y escribir en el cuadro de fórmulas: *\$perimeter/1000* esto nos devolverá el perímetro de todos los polígonos que se encuentren en el shape en metros (Figura 3.14).

Área (A) (km²). Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. Su unidad de medida es el kilómetro cuadrado. Se determina de igual manera que el perímetro, pero seleccionando en el panel central *\$area* y escribiendo en el cuadro de fórmulas: *\$area*0,000001*.

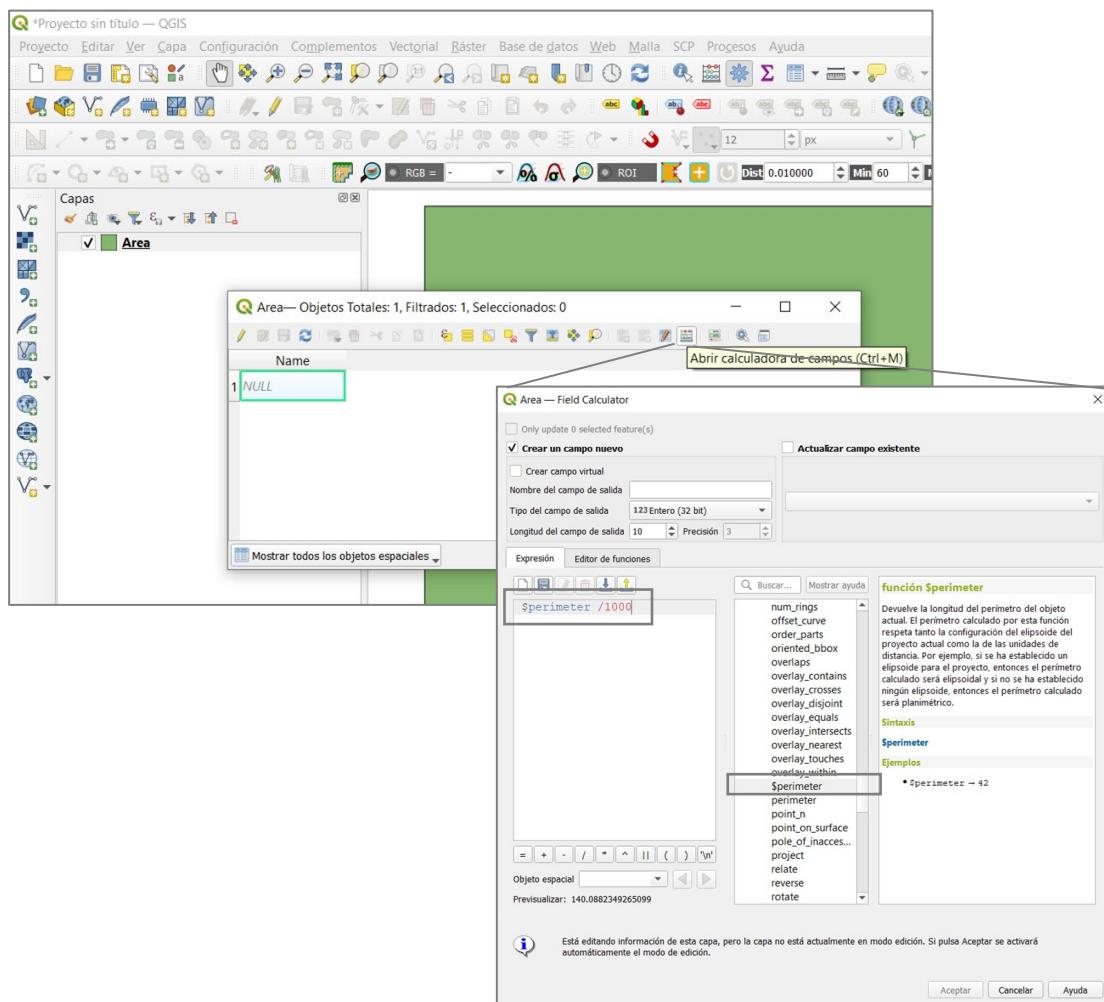


Figura 3.14. Tabla de atributos, calculadora de campos.

Longitud Axial (La) (km). Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca. Se determina en el QGIS midiendo con la regla, ver Figura 3.15.

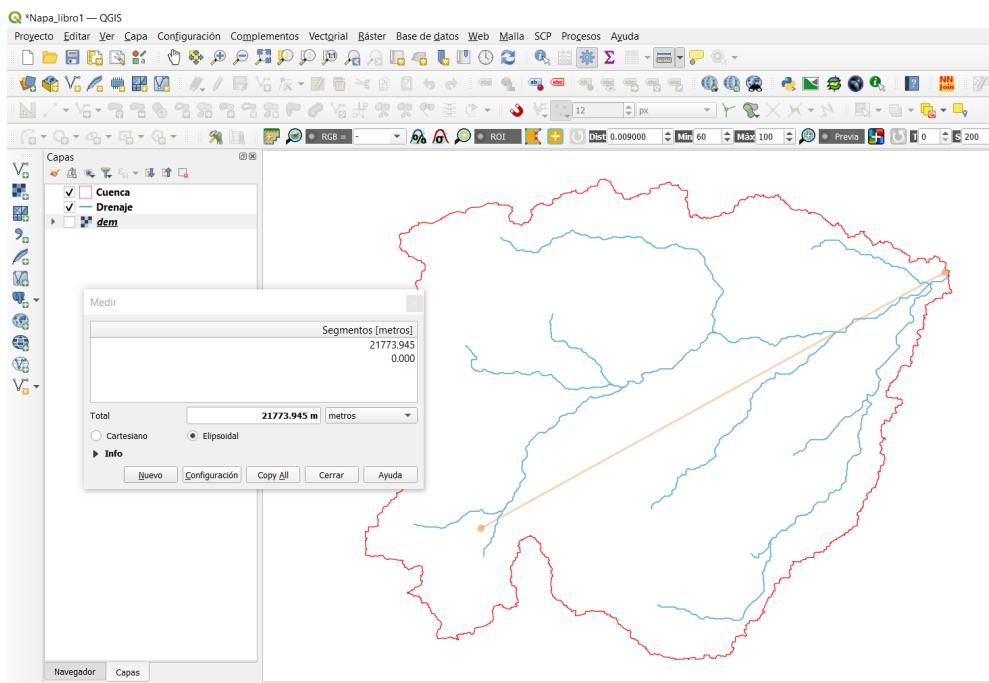


Figura 3.15. Implementación de la herramienta Medir.

Ancho promedio (Ap) (km). Relación entre la superficie de la cuenca con La (Ecuación 3.1.).

$$Ap = A / La$$

Ecuación 3.1.

Factor de forma (IF). Este factor adimensional indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial. Se expresa como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca (Ap) y la longitud axial (La) o longitud del río desde su punto más alto (López Cadenas de Llano, 1998).

Manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Cuando IF es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada. La cuenca con IF bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada, que 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 (Ecuación 3.2). (Gaspari et al., 2013)

$$IF = Ap / La$$

Ecuación 3.2.

Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc). El límite define la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente, teniendo influencia sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987). El Kc es adimensional y 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 explicar el Kc de una 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 (López Cadenas de Llano, 1998). Se expresa como una relación entre P (perímetro (km)) y A (superficie (km^2)), por medio de la Ecuación 3.3.

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

Ecuación 3.3.

El K_c 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: $K_c = 1,00$ representa una cuenca redonda; $1,25$, oval redonda; $1,50$ oblonga; e igual o mayor a $1,75$ 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.

Parámetros de relieve

Curva hipsométrica (CH). La generación de la curva hipsométrica en un área fue sugerida por Langbein (1947), para proporcionar información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. CH representa la distribución del área de acuerdo a su elevación (Gaspari et al., 2009).

La lectura de la CH permite establecer las áreas comprendidas entre diferentes cotas, indicando la relación de la superficie de ocupación según su cota, por ejemplo, analizado la Figura 3.16:

- El 100 % del área de la cuenca está por encima de los 270 msnm.
- El 50 % del área de la cuenca está por encima de los 350 msnm.
- El 30 % del área de la cuenca está por encima de los 390 msnm.
- El 10 % del área de la cuenca está por encima de los 440 msnm.

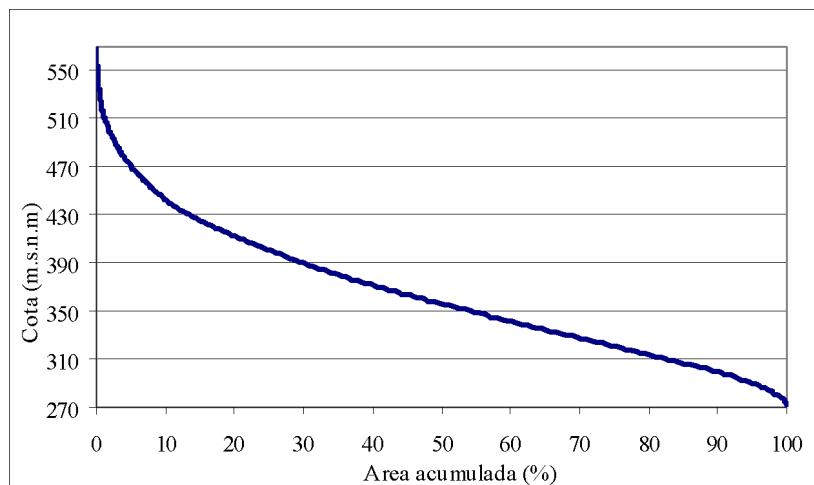


Figura 3.16. Curva hipsométrica. (Gaspari et al, 2009).

La importancia de CH reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos particulares (Racca, 2007).

Curva hipsométrica adimensional (CHA). Expresa el potencial evolutivo de la cuenca hidrográfica, 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) establecido como diferencia entre la cota máxima y la mínima del área analizada, A : Superficie total de la cuenca (ha) y a : Área entre curvas de nivel (ha). Su forma es sigmoidal, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja, como se expresa en la Figura 3.17.

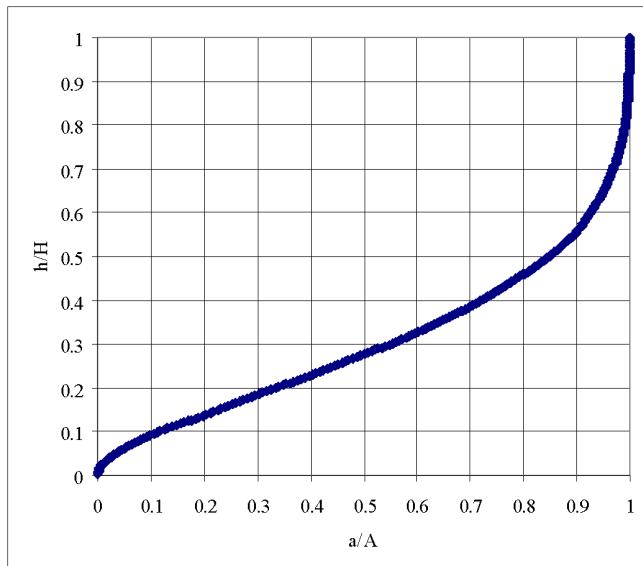


Figura 3.17. Curva Hipsométrica adimensional. (Gaspari et al, 2013).

La Figura 3.18 muestra tres curvas hipsométricas, confeccionadas por Strahler a partir del estudio de numerosas cuencas con potenciales evolutivos distintos (Llamas, 1993). 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. (Gaspari et al. 2013)

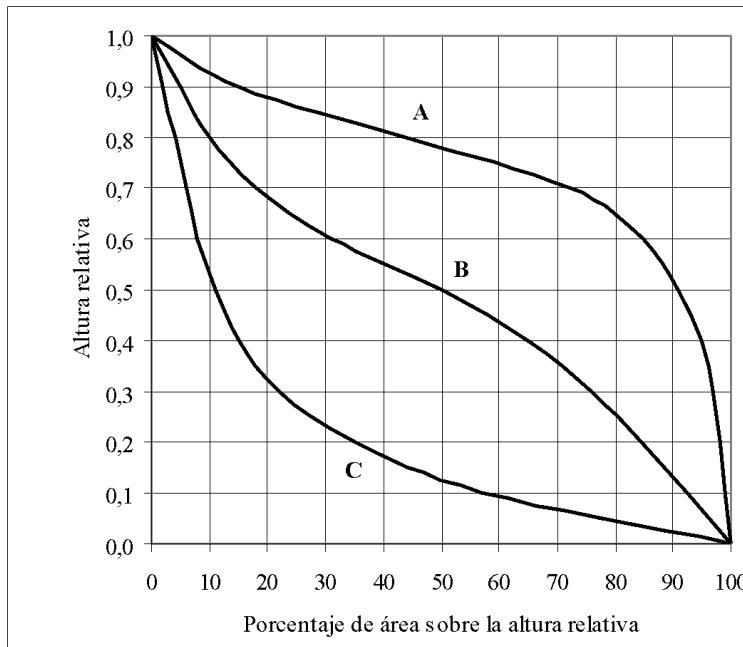


Figura 3.18. CH adimensional características del ciclo de erosión (según Strahler). (Gaspari et al., 2013).

Para la determinación de la CH de una cuenca empleando el QGIS, debemos contar con un MDE y el shape del polígono de la cuenca. Seleccionar la herramienta *Curvas hipsométricas* de la caja de herramientas y seleccionar un paso para las cotas (por ejemplo 10 y usar % en lugar de valores absolutos), como se observa en la Figura 3.19.

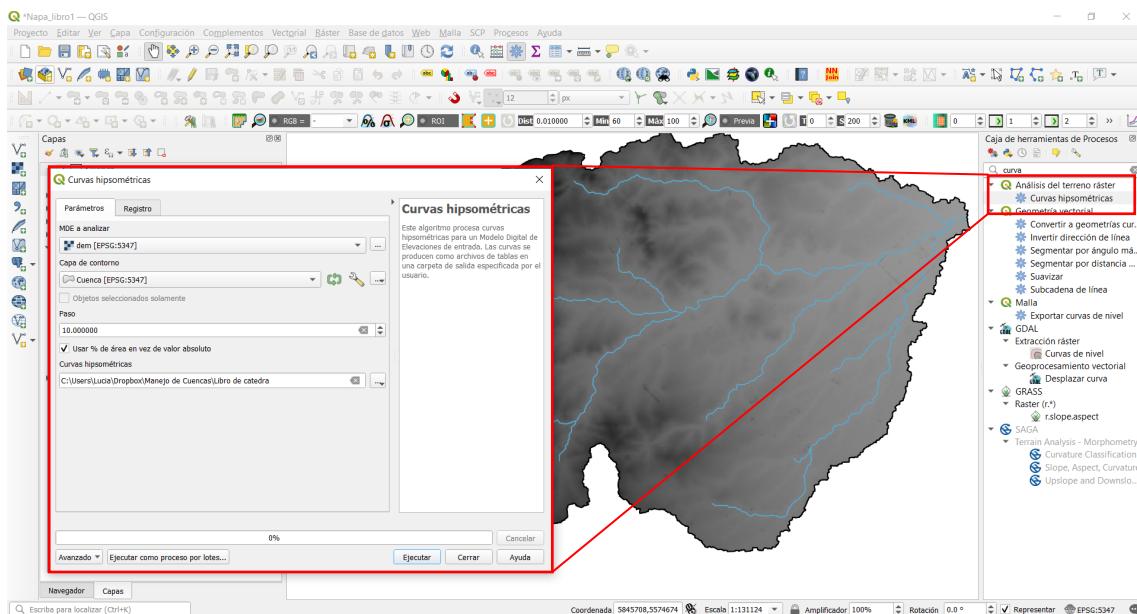


Figura 3.19. Creación de una Curva Hipsométrica.

El archivo de salida es en formato *.CSV, tendrá el nombre *histogram* seguido del nombre del shape de polígonos que usamos de entrada, donde estarán los datos de superficies y cotas necesarios. Finalmente, se les da formato a los valores obtenidos en una planilla de cálculo para realizar el gráfico característico de la CH, como en el ejemplo de la AAN, Figura 3.20. Nota: debe

hacerse una corrección en el porcentaje de área: la mínima altitud se corresponde con el 100% de la superficie de cuenca.

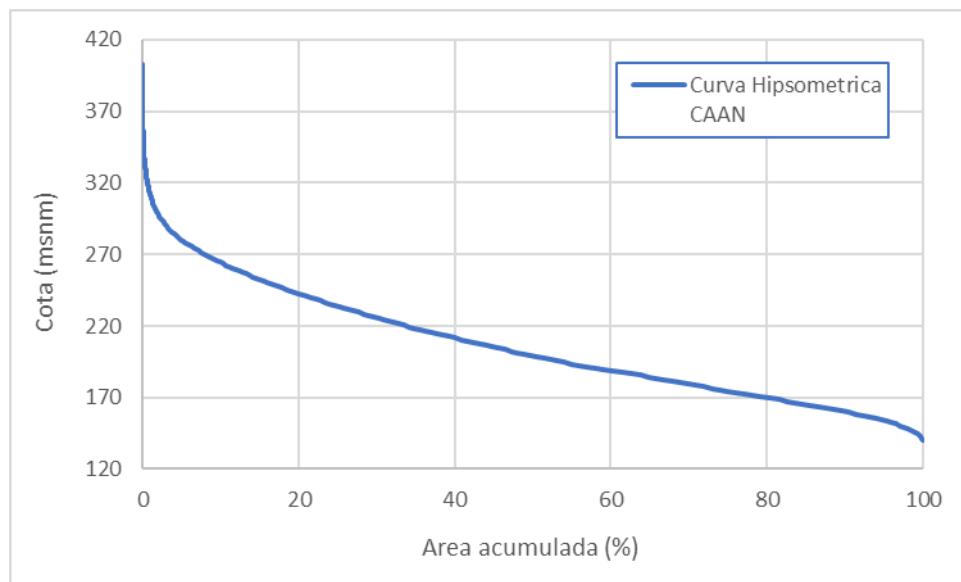


Figura 3.20. Curva Hipsométrica de la CAAN.

Pendiente media de la cuenca (PM). El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, están muy influenciados por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente (López Cadenas de Llano, 1998).

Según la clasificación de López Cadenas de Llano (1998), la pendiente refleja los diferentes tipos de relieve, considerándose muy plano a un relieve menor del 0.5 %; plano a 0.5 a 1 %, de 1 a 3 % suave; de 3 a 12 % presenta lomadas; 12 a 20 % relieve accidentado; 20 a 50% muy fuerte; escarpado cuando se distribuye entre 50 y 75 %, y mayor al 75 % se corresponde a un relieve muy escarpado.

Para determinar la PM debemos contar con el MDE cortado con el límite de la cuenca, en la solapa Ráster, en la opción de Análisis, elegir la herramienta *pendiente*. En la nueva ventana usar escala 1, poner que considere los bordes y que use % o grados, Figura 3.21. Luego, para calcular las estadísticas del nuevo ráster de PM desde la Caja de herramientas de proceso seleccionar la opción *Estadísticas de capa de ráster*, resulta un link URL en el visor de resultados, o haciendo clic derecho sobre la capa en la opción *Propiedades*, luego *Información*.

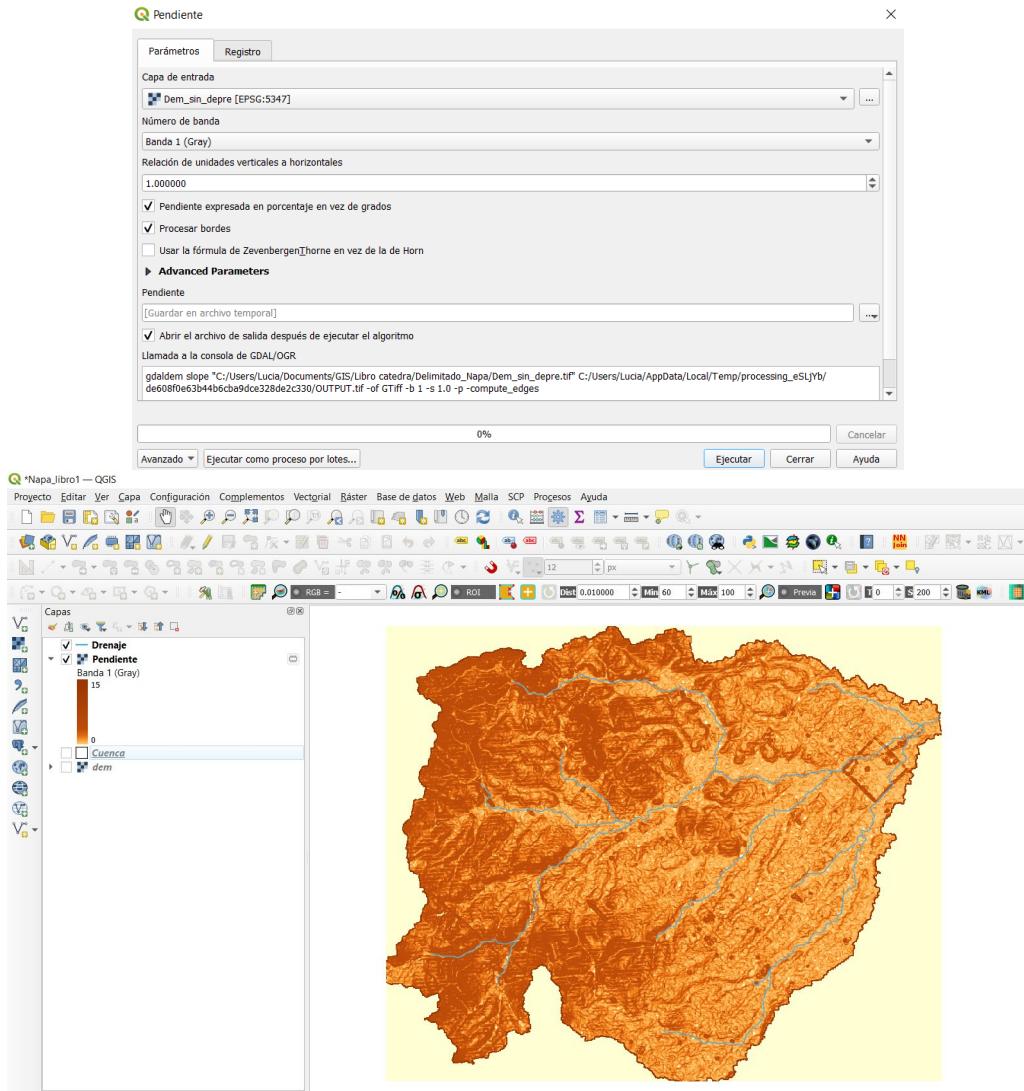


Figura 3.21. Generación del Mapa de pendientes.

Coeficiente de rugosidad (Ra). Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca (H) y su densidad de drenaje (D_d), adimensional (López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari et al., 2009).

Para determinar Ra, debe calcularse primero H , para lo que deben determinarse las cotas máxima y mínima (msnm) a partir del MDE cortado por la cuenca. En la Caja de herramientas de proceso, seleccionar *Estadísticas de capa de ráster*. Resulta un link URL, en el visor de resultados, donde da los datos estadísticos del MDE, Figura 3.22. Luego determinar H , en metros como la diferencia entre la Cota máxima y la mínima.

Finalmente, Ra es el cociente entre H y D_d , determinado en el siguiente paso.

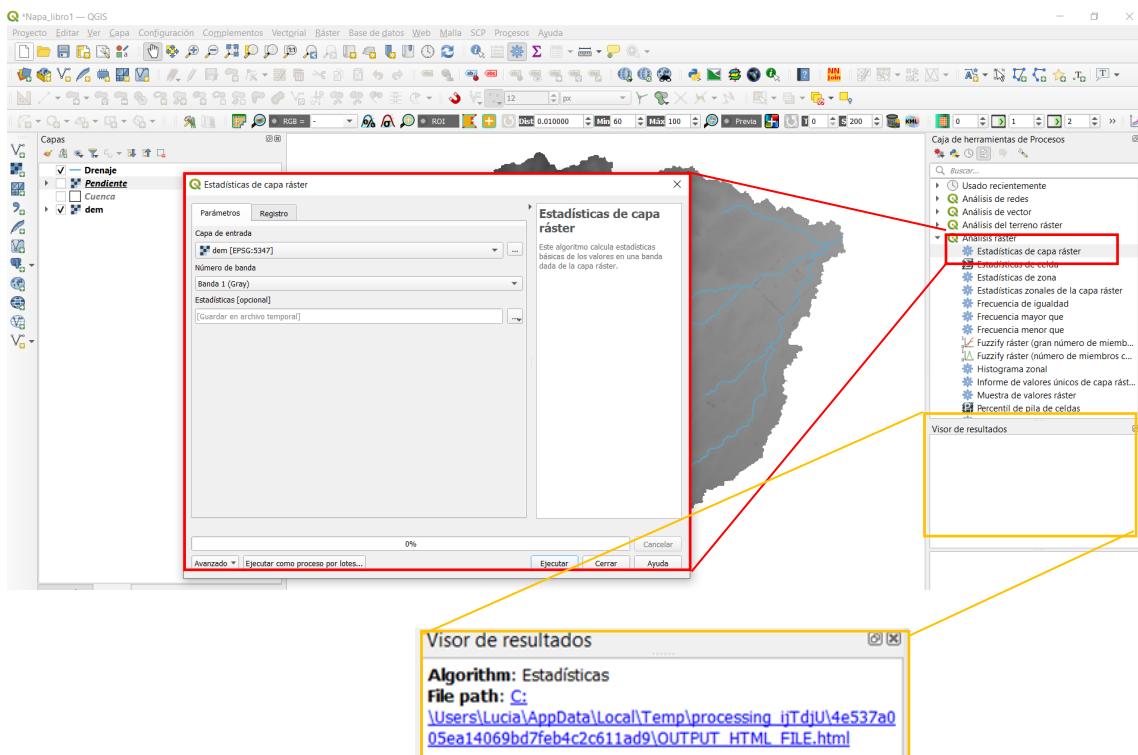


Figura 3.22. Ejecutar la herramienta Estadística de capa ráster.

Altura media. Este factor expresa la altura definida por el volumen de la cuenca en relación a la superficie de la misma, de acuerdo a la Ecuación 3.4.

$$h = V \cdot A^{-1} \quad \text{Ecuación 3.4.}$$

Siendo h : Altura media (m), V : Volumen (m^3) y A : Superficie de la cuenca (m^2).

Parámetros de drenaje

Densidad de drenaje (Dd). Está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998). Dd caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, por medio del grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante (Henao, 1988; López Cadenas de Llano, 1998). Cabe mencionar que se denomina red hidrográfica a la totalidad del drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluye el escurrimiento superficial.

La densidad de drenaje (Dd) fue establecida por Horton según el cociente entre la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca (L_n) y el área total de la cuenca (A) (López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari et al., 2009).

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. En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una menor longitud de ladera, con una mayor velocidad de escurrimiento.

Longitud del cauce principal (Ln)(km). Es la longitud definida con la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que conforman el cauce principal y que drenan por la cuenca. Se determina desde la tabla de atributos del shape de cursos de agua, eligiendo la opción: *Calculada de campos*, crear un nuevo campo, de números decimales, buscar en el panel central *Geometría* y luego *\$length*, seleccionarlo y escribir en el cuadro de fórmulas: *\$length/1000*, esto determinará la longitud de todos los cursos de agua que se encuentren en el shape en kilómetros. Pueden seleccionarse los cursos deseados o todos.

Pendiente media del cauce (J)(%). Se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo (Lcp) (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998). La cota máximas y mínimas del cauce principal pueden obtenerse a partir del MDE, consultando el valor de cada píxel correspondiente (Ecuación 3.5).

$$J (\%) = (\text{cota máx. del cauce} - \text{cota min del cauce principal}) / Lcp \quad \text{Ecuación 3.5.}$$

Tiempo de concentración (Tc) (horas). El tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca (Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009). El tiempo de concentración también depende de la forma de la cuenca (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987). Hay varias ecuaciones empíricas para determinar el Tc, la implementación de una u otra depende de cual se adapte mejor a las características de la cuenca. Kirpich (1940) desarrolló una ecuación empírica, a partir de información de siete cuencas rurales estadounidenses, con canales bien definidos y pendiente pronunciadas (3 a 10 %) (Chow et al., 1994), que depende de la longitud del cauce principal (L, km), y la pendiente media de la cuenca (J, km/km)(Ecuación 3.6).

$$T_c = 0,06628 \cdot \left(\frac{L^{0,77}}{J^{0,385}} \right) \quad \text{Ecuación 3.6.}$$

La Dirección General de Carreteras (España) generó otra Ecuación para establecer el Tc, que se expresa según la Ecuación 3.7..

$$T_c = 0,3 \cdot \left[\left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76} \right] \quad \text{Ecuación 3.7.}$$

Número de Orden de los cursos de agua. Es un número que tiene relación estrecha con la cantidad de ramificaciones de la red de drenaje. El criterio de Schumm, se presenta en la Figura 3.23, y asigna el primer orden 1 a todos los cauces que no tienen tributarios y, en general la unión de dos cauces de igual orden determina o da origen a otro de orden inmediatamente superior, y dos de diferente orden dan origen a otro de igual orden que el de orden mayor, así sucesivamente hasta llegar al orden de la cuenca. El cauce principal tiene el orden más elevado, que es el orden de la cuenca. Por lo tanto, se ordenan y numeran los afluentes desde las nacientes de una cuenca hacia su cierre o desembocadura. 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. (Gaspari et al., 2013).

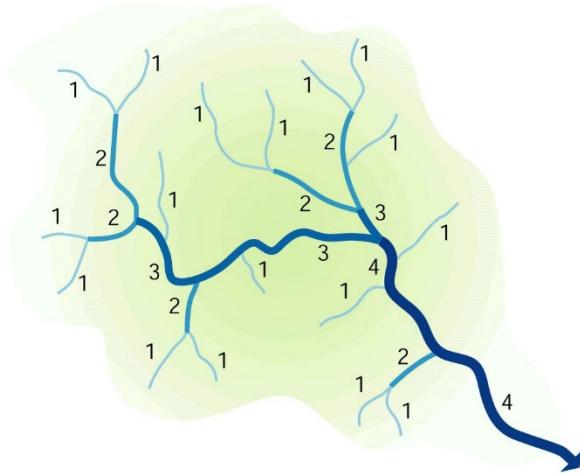


Figura 3.23. Orden de los cursos de agua, según USDA (2007). Fuente: http://www.nrcs.usda.gov/technical/stream_restoration/chap2.html

Para determinar el orden de los cursos de un modo siempre puede emplearse programa SAGA, que se instala junto con Qgis, y puede emplearse solo o como una herramienta. Si el MDE no está corregido, esto puede hacerse como se explicó anteriormente en este capítulo o ir a la caja de herramientas de procesos, en SAGA / *Terrain Analysis - Preprocessing >> Fill Sinks* (Wang Liu) solo es necesario que guarde el MDE corregido (sin depresiones) (Figura 3.24).

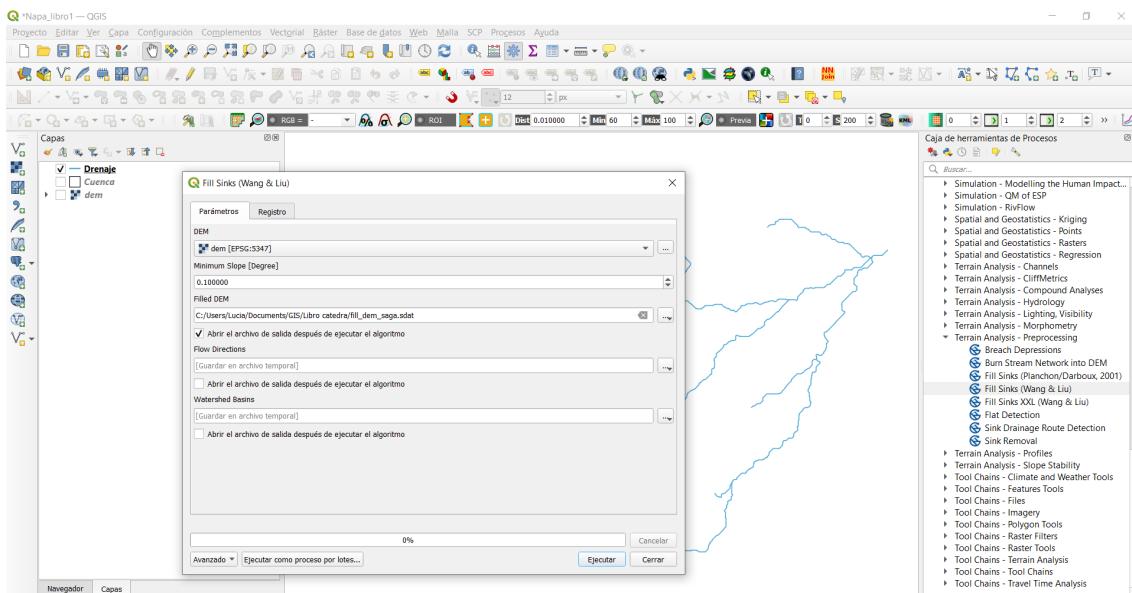


Figura 3.24. Corrección del MDE con herramientas de SAGA

Luego en la caja de herramientas de procesos, en SAGA / *Terrain Analysis - Channels / Channel Network and Drainage Basins* (elegir el MDE corregido en el paso anterior, usar un número según la cantidad de órdenes quiero en mi cuenca, micro cuenca 4 está bien), Figura 3.25. Solo es necesario que se guarde el shape de *Channels*. En la tabla de atributos del shape se encontrará una columna con los órdenes correspondientes de cada cauce, Figura 3.26. Nota: se recomienda guardar el shape de cursos y darle el sistema de referencia del proyecto, es posible que deba editarse el shape, dependiendo de la calidad del MDE original.

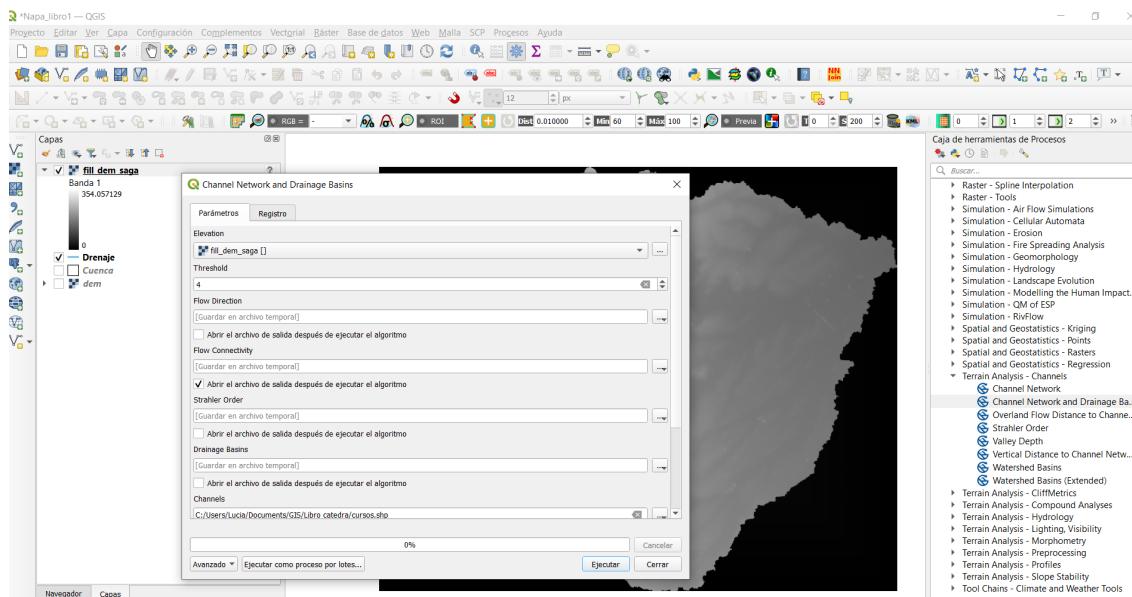


Figura 3.25. Trazado de cursos con herramientas de SAGA

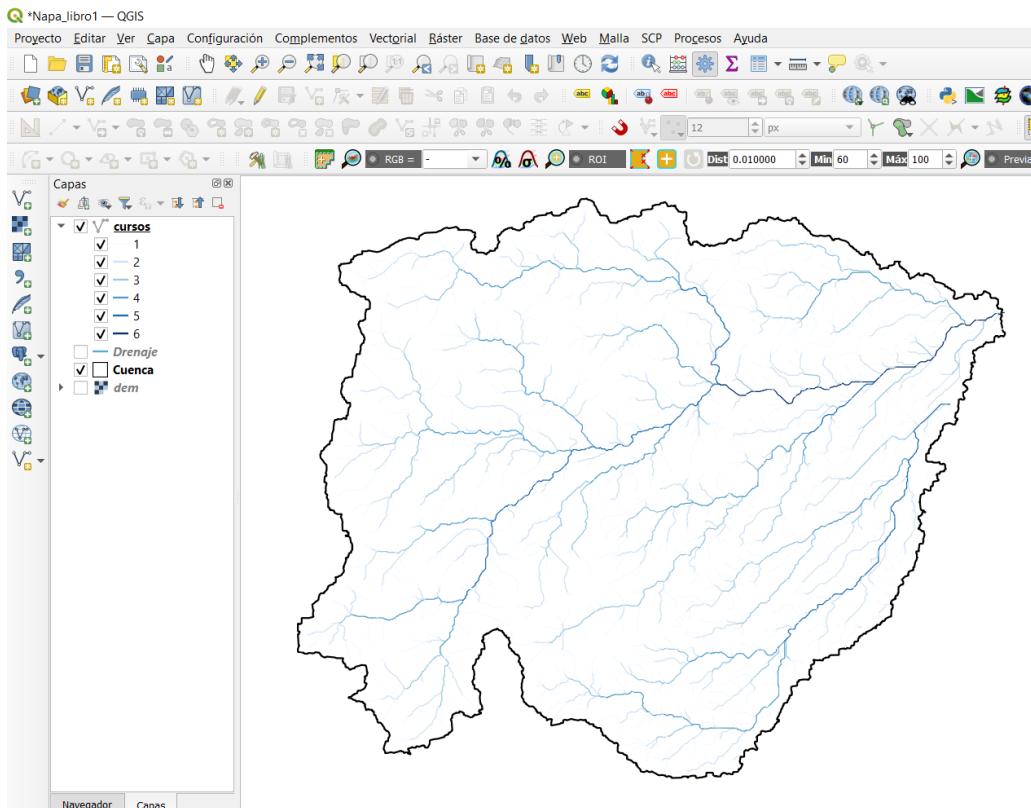


Figura 3.26. Orden de cursos.

Glosario, de acuerdo con IGN (2021)⁵

MDE, Modelo Digital de Elevación, describe la topografía de la superficie terrestre a través de celdas georreferenciadas de tamaño uniforme, a las que se le asigna un valor de altura referido al nivel medio del mar. Las alturas de este modelo representan la superficie de la tierra con todas

⁵ https://www.ign.gob.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_v2.1_30m.pdf

las estructuras antrópicas (tales como edificaciones) y vegetación localizada sobre el terreno. Suele llamarse también por sus siglas en inglés DEM, Digital Elevation Model.

MDT, Modelo Digital de Terreno, es análogo al MDE salvo que en este caso se han filtrado la vegetación, las edificaciones y otros elementos antrópicos ubicados sobre la superficie relevada, por lo que la altura de cada celda representa el suelo desnudo. Conforma una grilla ordenada que se utiliza para representar la superficie topográfica de la Tierra.

SRTM, Shuttle Radar Topography Mission, es un proyecto internacional llevado a cabo en cooperación entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA), el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), la Agenzia Spaziale Italiana (ASI) y la National Geospatial Intelligence Agency (NGA).

ALOS, Advanced Land Observing Satellite "DAICHI", es el satélite utilizado por la agencia de exploración aeroespacial (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) para adquirir las imágenes que dan lugar al procesamiento del mapa digital global 3D "ALOS World 3D – 30m".

Referencias

- Chow, V. T., Maidment, D.R. y L. Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*. Ediciones McGraw-Hill. Colombia.583 pp.
- Domínguez, F.F, A. Gómez y A.F. Gómez. (2003). El análisis morfométrico con sistemas de información geográfica, una herramienta para el manejo de cuencas. Instituto de investigaciones sobre los recursos naturales. Morelia, México.
- Garcés Durán, J. (2011).: Paradigmas del conocimiento y sistemas de gestión de los recursos hídricos: La gestión integrada de cuencas hidrográficas. Universidad de Chile.
- Gaspari F.J., Senisterra G.E., Delgado M.I., Rodríguez Vagaría A.M. y S.I. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Editorial Autores, 1 Ed, La Plata, Argentina. 321 pp.
- Gaspari, F.J.; Rodríguez Vagaría, A.M.; Senisterra, G.E.; Denegri G.A.; Delgado, M.I. y S.I. Besteiro. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del Río Sauce Grande. Revista AUGMDOMUS. *Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente de AUGM*. Asociación de Universidades del Grupo Montevideo. La Plata. Argentina. Vol. 4: 143-158. Disponible en <http://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476/505>.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A., S Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3. Actualización constante on line SEDICI
- Henao, J.E. (1988). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas, Centro de enseñanza desescolarizada*. Universidad Santo Tomás. Bogotá. Colombia. 399 pp.
- IGN (2021). Dirección de Geodesia Instituto Geográfico Nacional. Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina versión 2.1. Disponible en https://www.ign.gob.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_v2.1_30m.pdf.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España: 635 pp.

- Langbein, W.B. (1947). Características topográficas de cuencas de drenaje. Papel de suministro de agua de USGS, 947-C. 157 págs.
- López Cadenas de Llano F., J. A. Mintegui Aguirre. (1987). *Hidrología de superficie*. Editorial Salazar. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid: 222 pp.
- López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 pp.
- Racca, J.M.G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* 77(1-2): 31-38.
- Senisterra, G., Rodríguez Vagaría, A., Gaspari, F., G. Mazzucchelli. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del Arroyo Napaleofú. Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 55 (2) 287-303. Mérida. Venezuela. Disponible en <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/39614>

CAPÍTULO 4

Conceptos de hidrología de superficie

Fernanda Julia Gaspari

Concepto de hidrograma

En el capítulo anterior se describió el ciclo hidrológico, que como mencionan Conte et al. (2020) expresa que una vez que alcanza la superficie de la Tierra, el agua puede tener varios destinos. Una parte escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como **escorrentía**, y se refiere al **caudal** superficial de agua que escurre hacia las zonas deprimidas del relieve. El agua puede provenir de las precipitaciones, manantiales o del deshielo, dependiendo su caudal de características de la superficie y el terreno; entre ellas, la pendiente, el tipo de rocas y la existencia o no de cubierta vegetal sobre el suelo, condiciones que incidirán en la permeabilidad.

El agua también yace por debajo de la superficie porque, en general, la precipitación cae sobre el terreno natural, impregna al suelo, y luego se **infiltbra**, atraída por la fuerza de la gravedad, debido al proceso de **percolación**. Así, a diferentes profundidades del subsuelo, se encuentran formaciones geológicas que pueden contener agua entre los intersticios que existen entre las rocas. Esta se denomina **agua subterránea** y los terrenos que la contienen y la pueden ceder se denominan **acuíferos**. El agua que penetra por los poros de una roca permeable acaba llegando a una zona impermeable que la detiene. La parte permeable se va llenando de agua, dando lugar a la denominada zona de saturación. Por encima de esta, donde el agua va descendiendo, pero en los poros todavía hay aire se llama zona de aireación y el contacto entre las dos, **nivel freático** (Figura 4.1). El estudio de las aguas subterráneas corresponde a la hidrogeología (Conte et al., 2020).



IGN - Atlas Nacional Interactivo de Argentina

Figura 4.1. Distribución del agua subterránea. Fuente: Conte et al. (2020).

En la Figura 4.2 se muestra la distribución del agua subterránea y su relación con el agua superficial, en una sección esquemática de un perfil de un curso de agua, donde se indica el movimiento del agua subterránea de la capa freática con la atmósfera. En la misma se visualiza el contacto y aporte hídrico de un acuífero o capa freática con la superficie del suelo, generando una corriente de agua permanente la cual denomina al **curso efluente**, siendo la cantidad de agua que conforma el flujo base. En el caso de que el nivel hidrostático o capa freática no alcance el nivel del suelo se trata de una corriente o **curso afluente**, es decir un curso de aguas transitorio, siendo su carga principal el agua de escurrimiento superficial, subsuperficial o una lluvia (Gaspari et al., 2013). Estas definiciones son de interés para desarrollar el concepto de hidrograma.

Es importante mencionar que, sobre la capa freática, existe una franja capilar y la zona de aireación del perfil edáfico, donde los poros del suelo contienen aire y agua; y debajo de esta capa, en la zona saturada, los poros están colmados por agua subterránea (Figura 4.2).

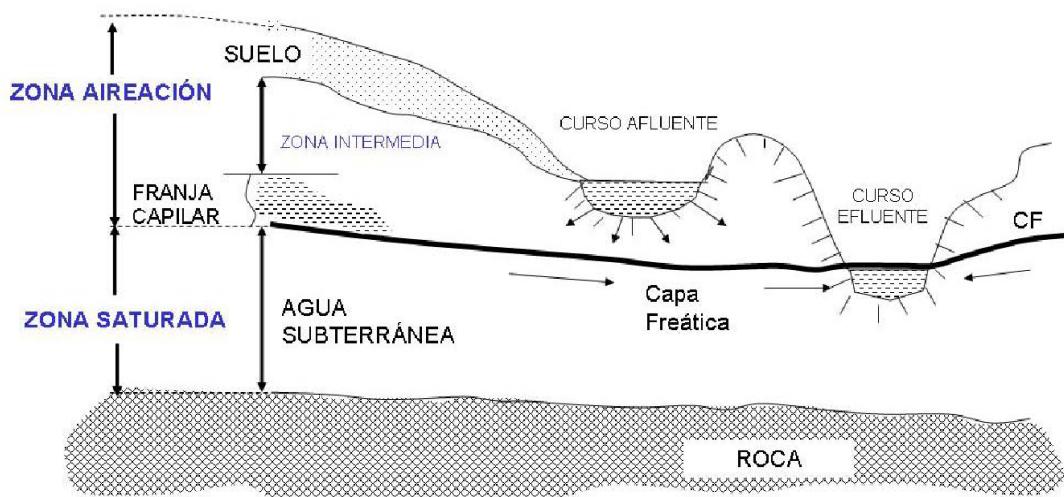


Figura 4.2. Movimiento del agua en profundidad y zonas del suelo en profundidad. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Un hidrograma es la representación gráfica de las descargas instantáneas (Q) de un curso de agua en función del tiempo (t). 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; Gaspari et al., 2013). Chow et al. (1994) consideran que los hidrogramas, o hidrogramas de caudal, 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 con ello, Gaspari et al. (2019) expresan que 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. La función matemática de un hidrograma responde a $Q = f(t)$. Además, Mármol (2006) indica que se puede interpretar a escalas muy diversas, pudiendo ser simples o

compuestos, según exprese la respuesta de una sola tormenta o a una sucesión de las mismas. En la Figura 4.3 se presenta un hidrograma con los elementos que la componen, mostrando la relación entre la precipitación caída en un sitio y la generación del escurrimiento superficial (Gaspari et al., 2009; 2013).

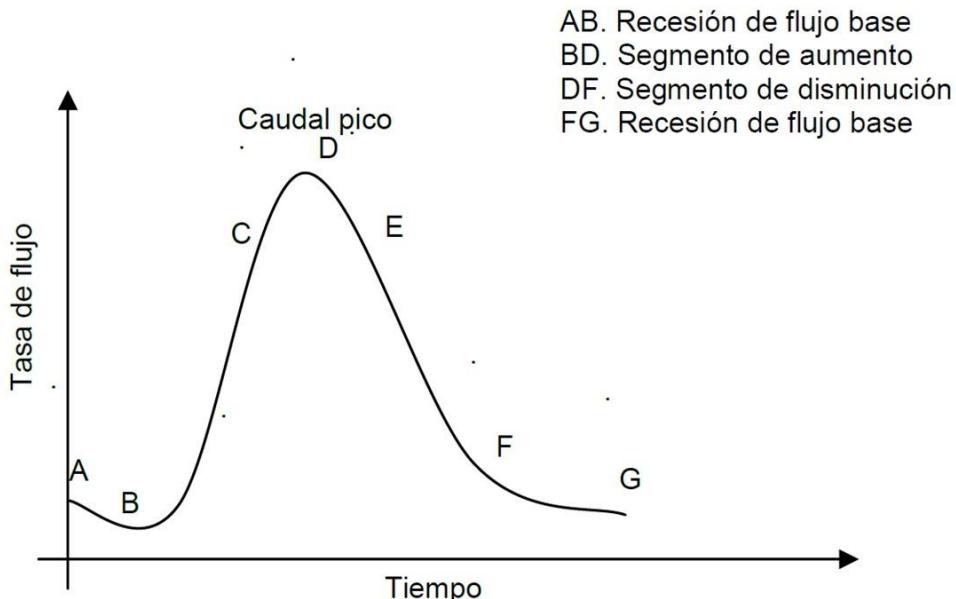


Figura 4.3. Elementos de un hidrograma según Chow et al. (1994). Fuente: Gaspari et al (2013).

La forma del hidrograma depende de la intensidad, duración y distribución de la lluvia que lo produce, y de factores geométricos y geológicos propios del área que contribuye a alimentar el caudal de la corriente.

Componentes y análisis de un hidrograma

Los componentes del hidrograma de la Figura 4.3 expresan una fragmentación en tramos en la representación gráfica, definida por puntos de inflexión. Cada uno de estos puntos y tramos se describen según Gaspari et al. (2013) de la siguiente manera:

- Punto A es el final de la **curva de agotamiento antecedente** a la tormenta representada, que se verifica en la sección de aforos;
- Punto B es el comienzo del ascenso de la curva, que se verifica con un aumento de agua en la sección de aforos;
- Punto C es el punto de inflexión donde pasa la curva de cóncava a convexa;
- Punto D es la punta o **caudal pico** del hidrograma correspondiente al máximo caudal que ha generado el aguacero;
- Punto E es el punto de inflexión de la curva de descenso;
- Punto F comienza la curva de agotamiento y los aportes del caudal Q proceden únicamente del escurrimiento subterráneo.
- ❖ Tramo AB es la **curva de agotamiento antecedente**;

- ❖ 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 caudal;
- ❖ Tramo DF es la **curva de descenso**, en que disminuye el escurrimiento superficial hasta anularse en F;
- ❖ Tramo CE es la cresta del hidrograma.
- ❖ Tramo FG es la **curva de agotamiento** del hidrograma.

El escurrimiento de la curva de agotamiento es el que mantiene el caudal en los períodos que no llueve en la cuenca y puede ser acompañado por agua de manantiales o vertientes y agua subterránea en el caso de cursos efluentes. Es decir que, el punto marcado como G, indica que el agua aforada desde ese momento es el escurrimiento básico, que, si se trata de una cuenca sin almacenamiento superficial, corresponde al escurrimiento subterráneo.

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.

Es importante notar que la nueva curva de agotamiento (Punto F) comienza más alto que el punto A, 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.

Según Sánchez San Román (2004) un hidrograma de crecida puede representarse esquemáticamente con su hietograma, siendo este último un gráfico que permite conocer la precipitación a través del tiempo de la tormenta (Figura 4.4).

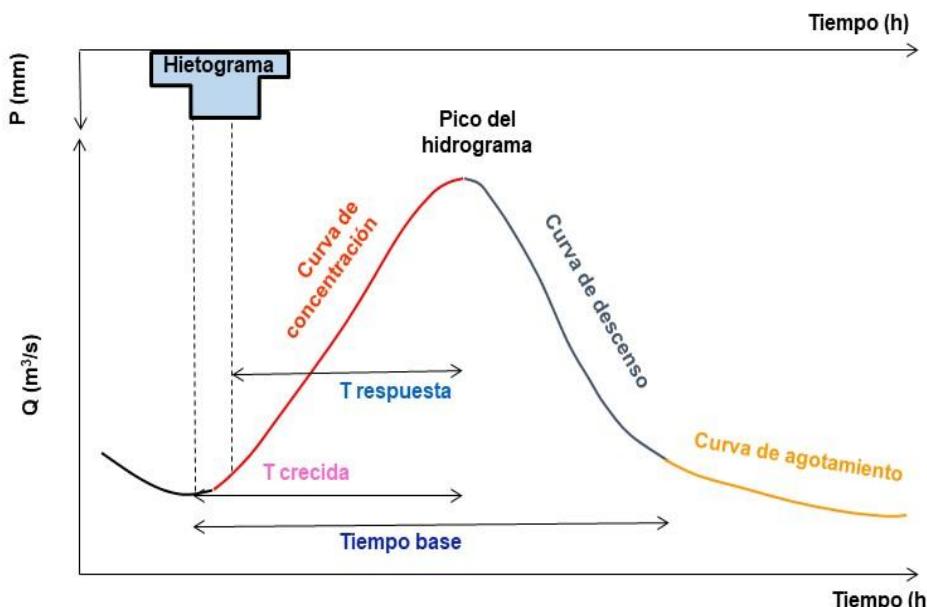


Figura 4.4. Relación entre hietograma e hidrograma de crecida. Fuente: Adaptación de Gaspari et al. (2009).

Observando el hidrograma de la Figura 4.4, se pueden identificar los diferentes momentos que se representan como:

- ❖ Tiempo base, el transcurrido entre el inicio de la crecida y el final de la escorrentía superficial, siendo el momento en que todo el escurrimiento directo provocado por esas precipitaciones ya ha pasado
- ❖ Tiempo de crecida, el transcurrido entre el inicio de la crecida y la punta del hidrograma.
- ❖ Tiempo de respuesta o Tlag, el transcurrido entre el centro de gravedad del hietograma y la punta del hidrograma.

En un hidrograma real las precipitaciones son intermitentes en el tiempo, dispersas e irregulares en el espacio de la cuenca receptora que está siendo aforada, por lo cual el hidrograma aparecerá con un trazado irregular (Gaspari et al, 2009).

Un hietograma puede representarse como un gráfico en columnas secuenciales o sino en línea de forma acumulativa, como una curva de masa de lluvia (Figura 4.5).

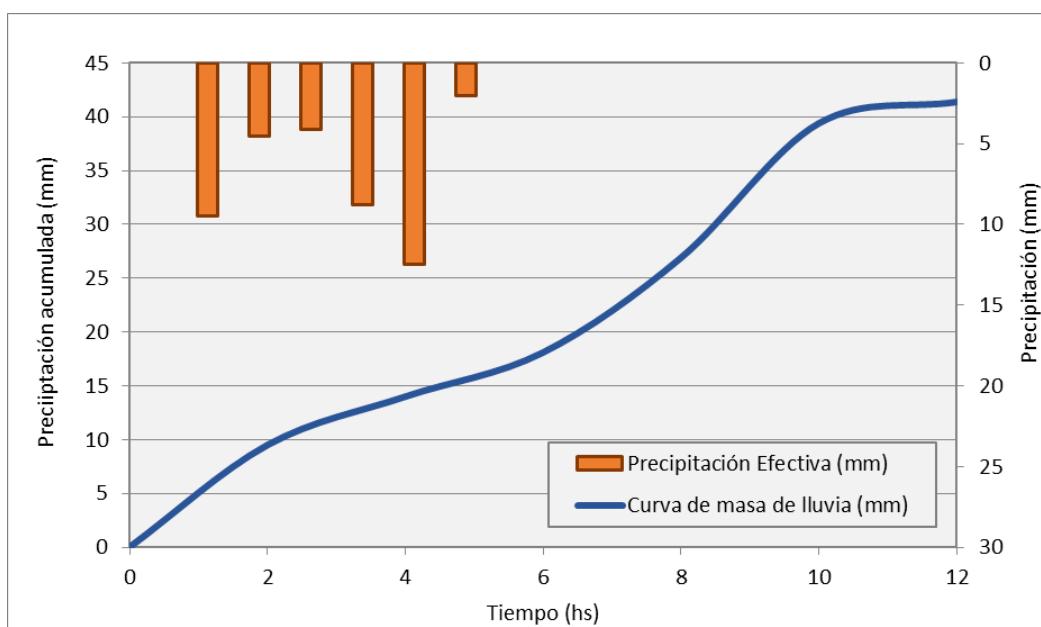


Figura 4.5. Relación entre hietograma e hidrograma de crecida. Gaspari et al. (2009).

Formas de resolución de hidrogramas

El análisis de hidrogramas implica separar el caudal directo, que se generó en una tormenta particular, 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 ello, se consideran tormentas cortas e intensas, separando el volumen de agua que causa el escurrimiento superficial (caudal directo), y por otro lado la correspondiente al caudal base del río originado por escurrimientos lentos provenientes de otras precipitaciones anteriores y/o aguas subterráneas.

Dado que no existe una base real para una distinción entre el escurrimiento directo y el aporte de agua subterránea en el caudal base 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., 1993).

La simulación de hidrogramas de avenidas reales históricas o en tiempo real pueden ser representadas por hidrogramas de avenidas teóricos, que conserven la forma lo más parecida a los casos reales, sin cambiar el caudal pico, la duración y el tiempo de crecida, donde, además, se pueden simular diferentes patrones de comportamiento.

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.

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), como se muestra en la Ecuación 4.1 (Linsley et al., 1993; Orsolini et al., 2000).

$$\frac{ds}{dt} = I(t) \times Q(t)$$

Ecuación 4.1.

Siendo:

S: Cantidad de agua almacenada en un sistema hidrológico.

I: Tasas de flujo de entrada.

Q: Tasas de flujo de salida.

La tasa de flujo de salida o escurrimiento total que pasa por un cauce (Q), está compuesto según la Ecuación 4.2 y se representa en la Figura 6.

$$Q = Qd + Qb$$

Ecuación 4.2.

Donde:

Q = Escurrimiento o caudal total.

Qd = Escurrimiento directo, producido por la precipitación.

Qb = Flujo base, producido por aporte del agua subterránea.

Las características del escurrimiento directo y del flujo base, difieren tanto, que deben tratarse separadamente en los problemas que involucran períodos cortos de tiempo, como es el caso de análisis de tormentas que, si estas son de gran intensidad y duración, producen un aumento significativo en el escurrimiento, lo cual puede provocar déficit en la retención de agua pluvial por las plantas y el suelo, generando excesos como inundaciones o torrentes. Es importante mencionar, que, analizando una misma tormenta en diferentes lugares, depende de las características del ambiente la generación del escurrimiento superficial.

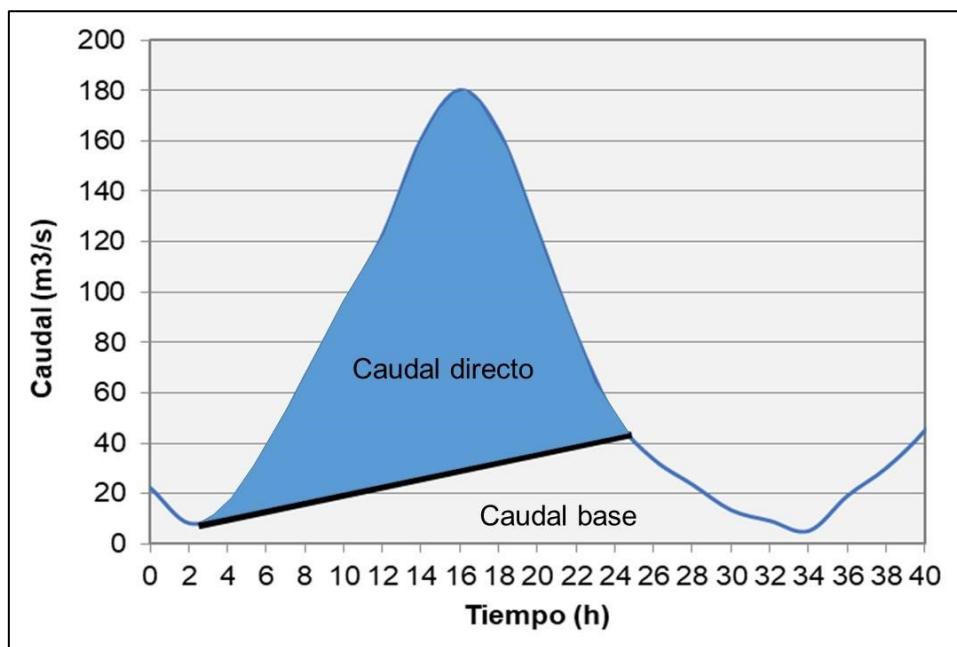


Figura 4.6. Relación entre escurrimiento directo y flujo base. Fuente: Elaboración propia.

Existen varios métodos simplificados y aproximados para la separación del flujo base del escurrimiento directo de un hidrograma, siendo el método del hidrograma unitario, el más conocido y aplicado en cuencas hidrográficas. El mismo es único para cada cuenca y depende de las características fisiográficas de la cuenca (área, forma, pendiente, etc.), considerando que son relativamente constantes en el espacio y en el tiempo, cabe esperar una considerable similitud en la forma de los hidrogramas, correspondientes a precipitaciones de características similares (duración, intensidad, distribución, cantidad de escurrimiento, etc.).

Hidrograma unitario

El hidrograma unitario (HU) muestra el cambio en el caudal, o flujo, por unidad de escorrentía a lo largo del tiempo; en otras palabras, muestra cómo la adición de una unidad de escorrentía influirá en el caudal de un río con el tiempo. El HU es una herramienta útil en el proceso de predecir el impacto de la precipitación sobre el caudal⁶.

El rol de la teoría del hidrograma unitario en el proceso de predicción de crecidas consiste en proporcionar una estimación del caudal fluvial a partir de una cantidad de precipitación. Una vez determinada la cantidad de lluvia o de agua de deshielo que se ha producido o puede producirse, y qué parte de dicha cantidad se transformará en escorrentía, aún queda por determinar el impacto de la escorrentía en el caudal del río con el paso del tiempo. El hidrograma unitario, que forma parte integral de muchos sistemas de modelado hidrológico, nos brinda una forma de estimar dicho impacto¹.

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

⁶ <https://www.comet.ucar.edu/>

las características climáticas, aconsejándose el HU para cuencas no mayores a 5.000 km². (Gaspari et al., 2009)

El HU de una cuenca, es definido como el hidrograma resultante de una precipitación efectiva de 1 mm de altura, distribuida uniformemente en la cuenca, de intensidad constante y de duración unitaria. Esta definición permite aplicar el método del HU, para obtener hidrogramas individuales parciales desplazados en el tiempo. En la Figura 4.7 se presenta una representación de COMET Program. National Weather Service (NWS) de NOAA⁷ que muestra la cobertura uniforme y no uniforme de una tormenta, en el espacio de una cuenca hidrográfica.

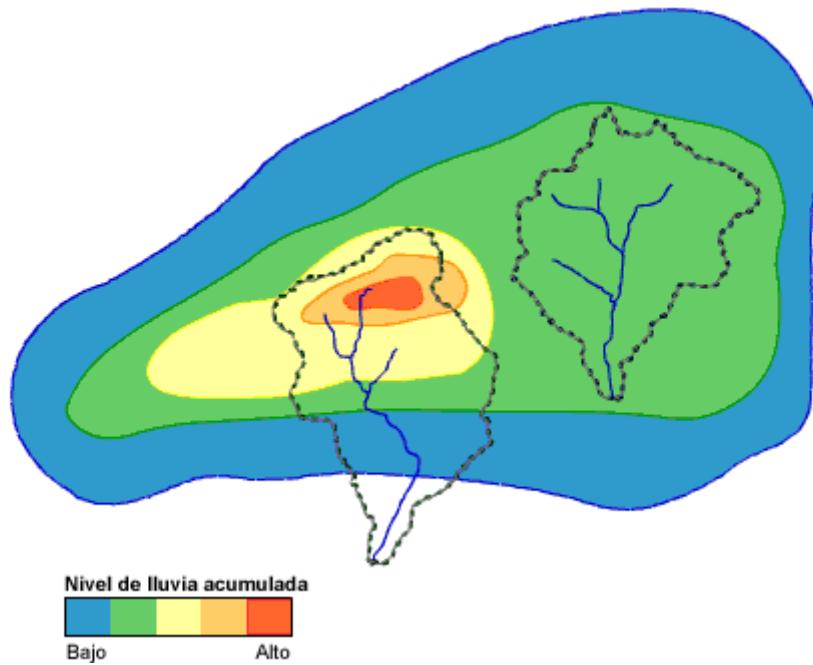


Figura 4.7. Cobertura de una tormenta uniforme (derecha) y no uniforme (izquierda). Fuente: COMET Program ©.

Sherman en 1932 presentó al hidrograma unitario (HU) como una herramienta para estimar la forma del hidrograma resultante de una precipitación, por medio de la definición de un hidrograma elemental. Para ello, establece condiciones ideales como ser: aplicable a un área pequeña e impermeable, donde cae una lluvia de intensidad constante. 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 continua 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.

⁷ <https://www.comet.ucar.edu/>

Esta transformación se define a través del método denominado **deconvolución**, que es la transformación el hidrograma total de escurrimiento directo de la cuenca, para una precipitación dada de duración conocida, en un HU, que según Sherman debería ser de precipitación efectiva de 1 mm, distribución uniforme, intensidad constante y duración unitaria (Gaspari et al., 2013).

En el caso de que se disponga de un HU, la ecuación de **convolución**, según Chow et al. (1988) es la función respuesta de una lluvia, que permite el cálculo de la escorrentía directa (Q_n) dado un exceso de lluvia (P_m) y el hidrograma unitario ($HUn-m+1$) (Ecuación 4.3).

$$Q_n = \Sigma (P_m) x (HUn - m + 1)$$

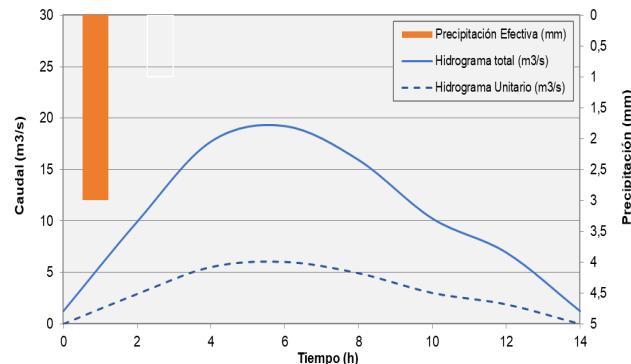
Ecuación 4.3.

A continuación, se presenta un ejemplo práctico de aplicación de la Ecuación 3 del método de convolución de un HU (de 1 mm), de Gaspari et al. (2013), donde se expone, a modo de ejemplo, la generación de un hidrograma aplicando esta metodología.

- ❖ Ejemplo 1: Se muestra la convolución para una **precipitación efectiva de 3 mm** (que es la que realmente genera escurrimiento), a partir de HU con tiempo unitario de 2 horas, considerando un flujo base de 1,2 m³/s (Tabla 4.1 y Figura 4.8).

Tabla 4.1. Hidrograma unitario (HU)

Tiempo (h)	H.U (m ³ /s)	Hidrograma resultante (m ³ /s)
0	0	1,20
2	2,9	9,90
4	5,5	17,70
6	6	19,20
8	4,9	15,90
10	3	10,20
12	1,9	6,90
14	0	1,20

**Figura 4.8. Hidrograma unitario.**

Como se visualiza en la Tabla 4.1 y Figura 4.8, en el caso de una tormenta con una precipitación efectiva, cuya lámina sea mayor a un milímetro, debe utilizarse el principio de proporcionalidad, esto significa que el hidrograma resultante será el hidrograma unitario aumentado (multiplicado) tantas veces como lámina de precipitación efectiva haya ocurrido, es decir aplicación de la convolución a partir del HU, sumando además el flujo base.

- ❖ Ejemplo 2: En el caso de precipitaciones efectivas, cuya duración sea mayor a la unitaria, debe utilizarse el principio de superposición, esto significa que el hidrograma resultante será la suma del hidrograma unitario (hidrogramas parciales) tantas veces como períodos unitarios tenga la precipitación efectiva que haya ocurrido, y desplazados en el tiempo uno o más períodos unitarios, ya que el segundo período de precipitación ocurre una vez terminado el primero y así sucesivamente. Nótese

entonces que existirán tantos hidrograma parciales como períodos de duración unitaria posea la precipitación.

En la Tabla 4.2 y Figura 4.9 se exponen los hidrogramas parciales (HP) y el hidrograma total (HT) resultante para una lámina de precipitación efectiva de 2 mm en cuatro horas, considerando un flujo base de 1,2 m³/s, y el hidrograma unitario expuesto anteriormente.

Tabla 4.2. HP e HT resultante.

Tiempo (h)	HP1 (m ³ /s)	HP2 (m ³ /s)	Hidrograma resultante (m ³ /s)
0	0,0	0,0	1,20
2	2,9	0,0	4,10
4	5,5	2,9	9,60
6	6,0	5,5	12,70
8	4,9	6,0	12,10
10	3,0	4,9	9,10
12	1,9	3,0	6,10
14	1,3	1,9	4,40
16	1,0	1,3	3,50
18	0,8	1,0	3,00
20	0,0	0,8	2,00
22	0,0	0,0	1,20

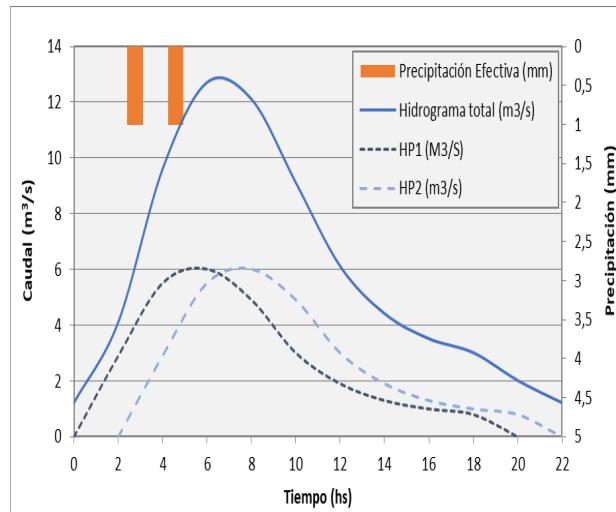


Figura 4.9.

- ❖ Ejemplo 3: Por último y como sucede mayormente en la naturaleza, la precipitación efectiva suele ser mayor a un milímetro y con duración mayor que un tiempo unitario. En este caso el procedimiento consiste en aplicar simultáneamente los principios de proporcionalidad y superposición.

En la Tabla 4.3 y Figura 4.10 se exponen los hidrogramas parciales (HP) y el hidrograma total (HT) resultante para una lámina de precipitación efectiva de 41,4 mm en doce horas, considerando:

- ✓ Flujo Base Constante: 1,2 m³/s.
- ✓ Tiempo unitario: 2 horas.
- ✓ Lluvia efectiva (PE) (mm): 0 - 9,5 - 4,5 - 4,1 - 8,8 - 12,5 - 2.
- ✓ Hidrograma unitario (HU) (m³/s): 0 - 2,9 - 5,5 - 6 - 4,9 - 3 - 1,9 - 1,3 - 1 - 0,8.

Los datos se procesan por medio de una planilla de cálculo que integra la metodología de deconvolución, como se expone en la Tabla 3.

Tabla 4.3. Aplicación práctica de la convolución para la generación de hidrogramas parciales (HP_n) (m^3/s) y el hidrograma total resultante (HT) (m^3/s).

Tiempo (h)	HU (m^3/s)	PE (mm)	HP1 (m^3/s)	HP2 (m^3/s)	HP3 (m^3/s)	HP4 (m^3/s)	HP5 (m^3/s)	HP6 (m^3/s)	Flujo Base (m^3/s)	HT (m^3/s)
0	0	0	0,0						1,2	1,20
2	2,9	9,5	27,6	0,0					1,2	28,75
4	5,5	4,5	52,3	13,1	0,0				1,2	66,50
6	6	4,1	57,0	24,8	11,9	0,0			1,2	94,84
8	4,9	8,8	46,6	27,0	22,6	25,5	0,0		1,2	122,82
10	3	12,5	28,5	22,1	24,6	48,4	36,3	0,0	1,2	161,00
12	1,9	2	18,1	13,5	20,1	52,8	68,8	5,8	1,2	180,19
14	1,3		12,4	8,6	12,3	43,1	75,0	11,0	1,2	163,52
16	1		9,5	5,9	7,8	26,4	61,3	12,0	1,2	123,99
18	0,8		7,6	4,5	5,3	16,7	37,5	9,8	1,2	82,65
20			0,0	3,6	4,1	11,4	23,8	6,0	1,2	50,09
22				0,0	3,3	8,8	16,3	3,8	1,2	33,33
24					0,0	7,0	12,5	2,6	1,2	23,34
26						0,0	10,0	2,0	1,2	13,20
28							0,0	1,6	1,2	2,80
30								0,0	1,2	1,20

La aplicación de esta metodología permitió generar el hidrograma total de una tormenta. Su representación gráfica se presenta según la secuencia de aplicación, en las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.

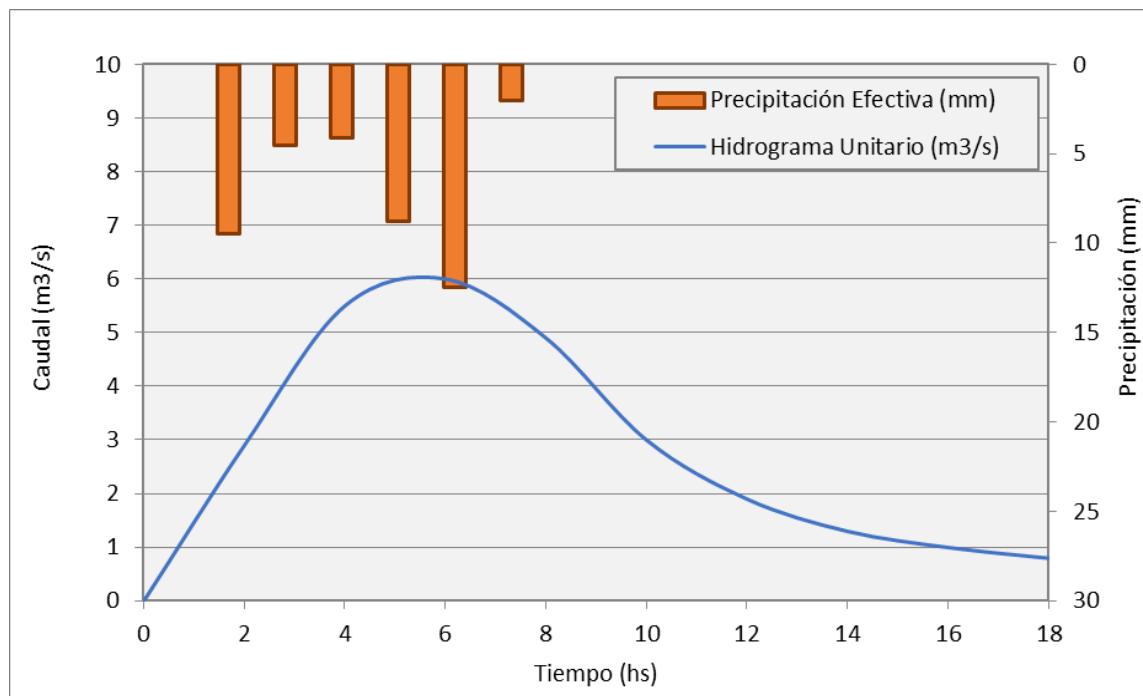


Figura 4.10. Representación gráfica de HU y PE segú Tabla 4.3.

Cada uno de los HP que se genera al multiplicar el HU por cada una de las columnas de la PE (Tabla 3) se presenta en la Figura 4.11. Además, se interpreta la secuencia de los HP, donde

cada uno de ellos se inicia dos horas más tarde del anterior, debido al traslado temporal que provoca el tiempo unitario.

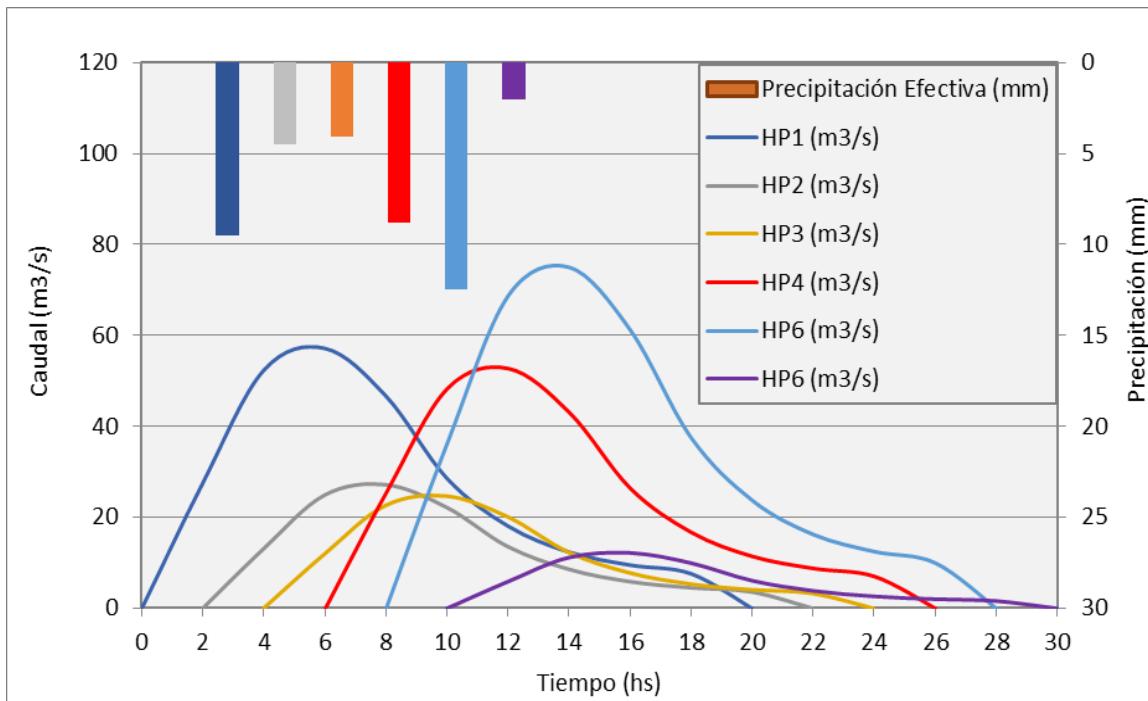


Figura 4.11. Representación gráfica de HP y PE según Tabla 3.

En la Figura 4.12 se presenta la gráfica de la integración de los HP con el HT.

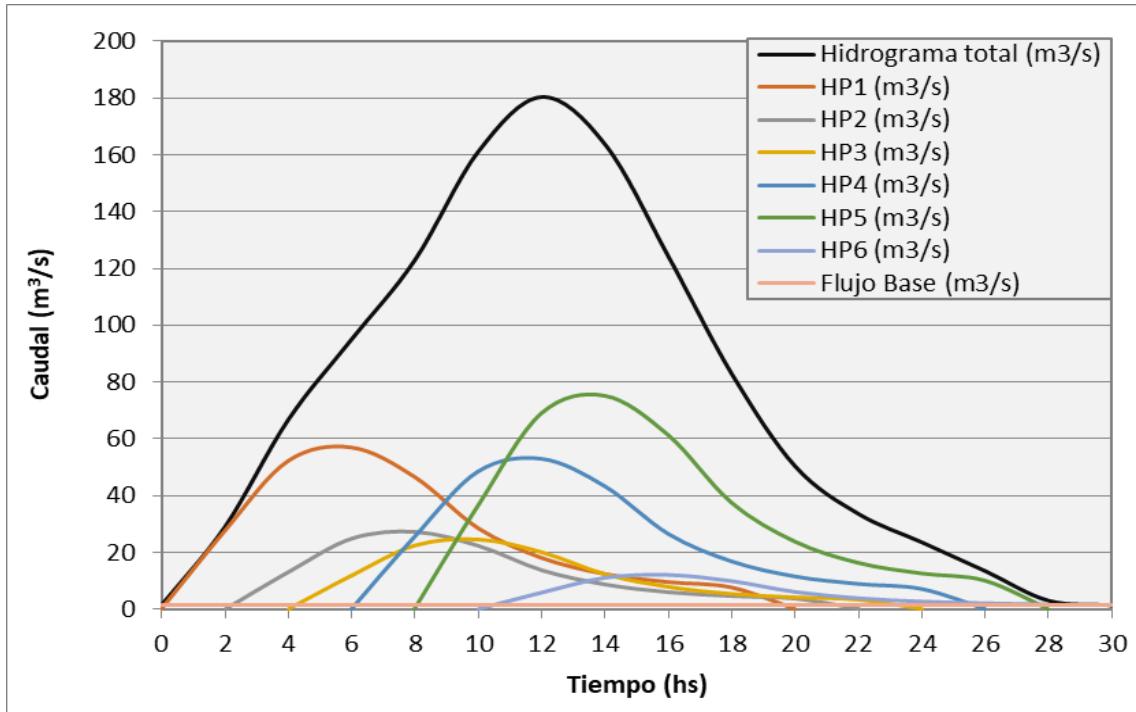


Figura 4.12. Representación gráfica de hidrogramas parciales (HP) y total (HT) según Tabla 3.

En la Figura 4.13 se visualiza el HT y el hietograma, donde se puede interpretar que el pico del HT se ubica temporalmente donde termina de llover.

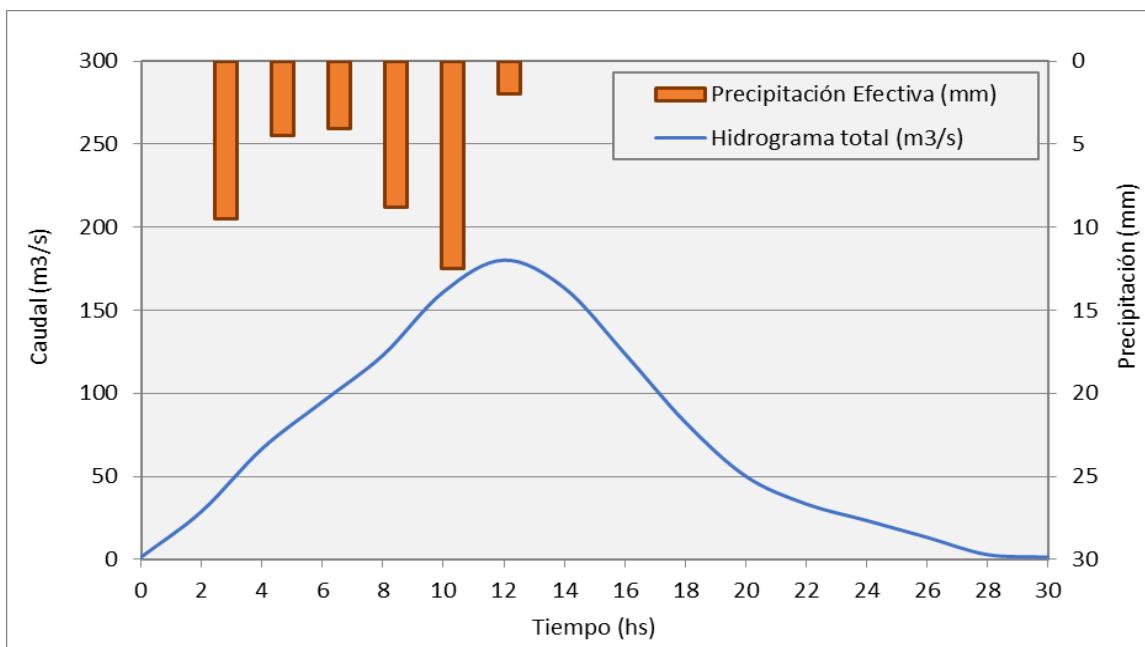


Figura 4.13. Representación gráfica de HT y PE según Tabla 3.

En conclusión, 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 subáreas de la cuenca, modificados por el viaje por la cuenca y el almacenamiento en los cauces (Gaspari et al., 2009).

Recuerde que el hidrograma unitario representa la escorrentía directa. Para que el hidrograma unitario muestre sólo el efecto de la escorrentía, es preciso separar la contribución del caudal base.

Como se menciona en el COMET Program © aunque los hidrogramas unitarios derivados de los datos de lluvia y de aforo de caudales constituyen el método preferido, para muchas cuencas no se cuenta con una cantidad suficiente de datos para derivarlos. En estas zonas se suelen utilizar hidrogramas unitarios sintéticos. Los hidrogramas unitarios sintéticos suelen representar una cuenca hidrográfica sin la información de aforo de caudales adecuada y se generan a partir de la información disponible de numerosas cuencas dotadas de instrumentos de medición.

Referencias

- Bustamante, E. (1984). *Hidrología. Conceptos de hidrología de superficie. Modelos matemáticos deterministas*. Centro de investigaciones hídricas de la región semiárida (CIHRSA), Argentina. 336 pp.
- Conte, A., Etchepareborda, M., y Marino, M. (2020). *Argentina económica: Actividad agrícola-ganadera. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina*. <https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=25362ceb139445519f15d54635ba87a8>
- Chow, V. T., Maidment, D.R. y L. Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*. Ediciones McGraw-Hill. Colombia. 583 pp.

- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A. y S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 p.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A. y S Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3.
- Linsley, R., Kohler, M. y J. Paulhus. (1993). *Hidrología para ingenieros*. Segunda edición. Editorial 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 pp.
- Orsolini, H.E., Zimmermann, E.D. y P. Basile. (2000). *Hidrología. Procesos y Métodos*. UNR Editora, Rosario. Argentina. 319 pp.

CAPÍTULO 5

Escurrimiento superficial

María Isabel Delgado

Método del Número de Curva

Las modificaciones en el uso del suelo pueden incidir en el balance entre el agua superficial y subterránea, alterando el fraccionamiento de la precipitación en evapotranspiración, escurrimiento e infiltración (Foley et al., 2005). A su vez, también podrían generar modificaciones en cuanto al efecto de la lluvia, como por ejemplo a través de un incremento de la erosión del suelo (Woldesenbet et al., 2017). 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 (Gaspari et al, 2009). El escurrimiento 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 escurrimiento derivan de la intensidad de la lluvia. El escurrimiento 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 o cuando la cobertura vegetal deja de interceptar el agua de lluvia por haber colmado su capacidad de retención (abstracciones) (Figura 5.1).

El volumen total del escurrimiento y sus valores máximos están influenciados directa o indirectamente por características climatológicas y biofísicas. Por ejemplo, las coberturas impermeables o semi-impermeables, como las urbanizaciones o áreas de cultivo bajo plástico ejercen un efecto notable sobre el escurrimiento superficial y la infiltración, dependiendo la magnitud de dicho efecto de la distribución espacial de ese tipo de cobertura, así como de la magnitud e intensidad del evento pluvial (Kalantari et al., 2014). De acuerdo con autores como (Pappas et al., 2008; Hibbs and Sharp, 2012), la urbanización tiende a incrementar el escurrimiento y el caudal pico, con el consecuente incremento en la frecuencia de inundaciones, erosión y transporte de contaminantes.

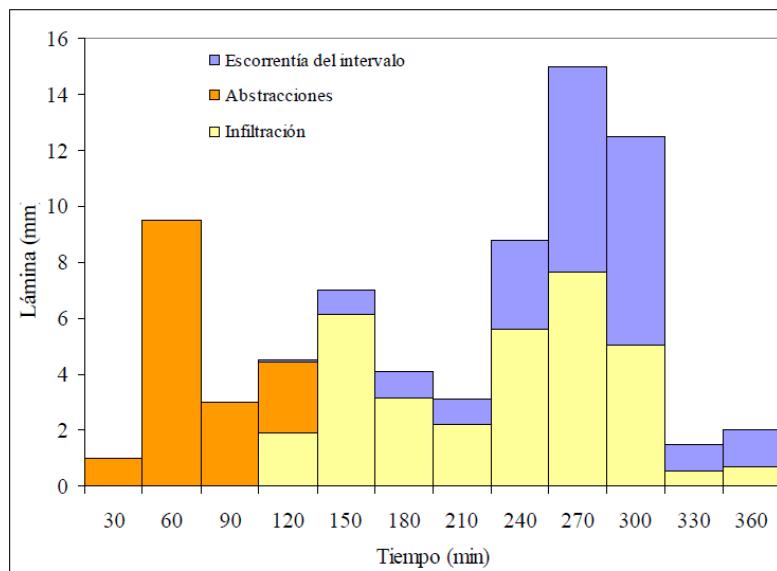


Figura 5.1. Componentes de un hietograma. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Entre los factores más relevantes se encuentran:

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.

La cuantificación del escurrimiento superficial es importante en los procesos de erosión hídrica superficial de los suelos, la cual genera fragilidad en los sistemas ambientales. Es por ello que se han desarrollado diferentes métodos paramétricos que 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 períodos de tiempo suficientemente amplios, siendo desaconsejable su uso con series meteorológicas cortas o incompletas. Cuanto menos factores o parámetros intervienen, más sencilla resulta la ecuación de aplicar, pero ofrece menores garantías (López Cadenas del Llano, 1998). El entendimiento de los posibles efectos del cambio de uso del suelo sobre la hidrología se torna esencial para el manejo de cuencas (Woldesenbet et al., 2017). Cuando comienza a llover, una parte del agua precipitada 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 de la misma, del tipo de suelo y cobertura vegetal y/o uso del suelo.

En aquellos casos en los que no se cuenta con datos de aforos para calcular el escurrimiento, el mismo se debe estimar. El método del Número de Curva (NC) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USDA, 1972) es uno de los métodos más utilizados a nivel mundial para el cálculo del escurrimiento producido por una determinada lluvia (Mishra y Singh, 2004; Gonzalez et al., 2015). Valores altos de correlación entre el escurrimiento estimado y el observado, obtenidos por autores como Nonglait y Tiwari (2016), han servido para validar esta metodología. Por último, en referencia a las posibles variaciones en las estimaciones del NC, Bondelid et al. (1982) concluyen que dichas diferencias pueden atribuirse a diversas causas, como por ejemplo a raíz de errores aleatorios asociados a la propia subjetividad humana y a errores en las bases de datos, entre otros.

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. Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento. El NC se establece para cada complejo suelo-vegetación a partir de sus características particulares de vegetación y textura edáfica (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpene y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari et al., 2013).

El método contempla la clasificación hídrica de los suelos reconociendo cuatro grupos hidrológicos (GH), según su clase textural (Tabla 5.1). Se presenta además la representación gráfica para facilitar la interpretación (Figura 5.2).

Tabla 5.1. Clasificación de los Grupos Hidrológicos.

Grupo Hidrológico	Textura
A	Arenoso; Arenoso-franco; Franco-arenoso
B	Franco-limoso; Franco; Limoso
C	Franco-arcillo-arenoso; Franco-arcillo-limoso; Franco-arcilloso
D	Arcillo-arenoso; Arcillo-limoso; Arcilloso

De acuerdo al National Engineering Handbook Part 630 (USDA, 2009) si la conductividad hidráulica saturada se encuentra disponible (y es confiable), debería utilizarse en forma conjunta con la profundidad de la napa freática para establecer un correcto valor de GH, pero, en ausencia de dicha información, el GH puede establecerse a campo estimando la conductividad hidráulica a través de la observación de las propiedades edáficas, tales como la textura, densidad, estructura y la materia orgánica.

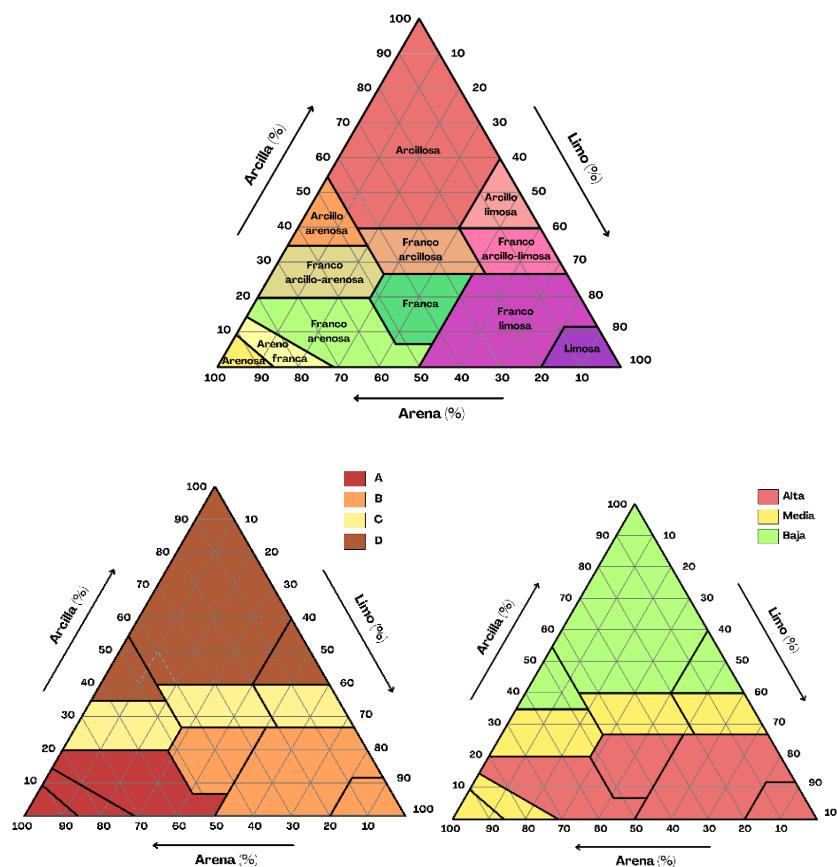


Figura 5.2. Representaciones gráficas para determinación de clases texturales y Grupos Hidrológicos.

Fuente: Gonzalez Fuentes, 2023.

La cobertura vegetal y/o uso del suelo es otro elemento que tiene influencia en el escurrimiento. La utilización de los terrenos ya sea como pastizales, bosques o áreas de cultivo con o sin aplicación de sistemas de siembra en hilera, surcos o en contornos determinan diferentes caudales de escurrimiento, por ende en el NC. Conocido el GH y de la cobertura vegetal que le corresponde al terreno en estudio, se debe tener en cuenta la condición de humedad antecedente en el suelo, es decir el estado de humedad del suelo previo a la precipitación. La misma se define por tres condiciones básicas, considerando el contenido de humedad del suelo, determinadas en base a una lluvia dentro de los 5 a 10 días previos, denominada seca (I) si es menor a 12,5 mm, media (II) si la precipitación fue entre 12,7 – 38,1 mm y húmeda (III), con valores mayores a 38,1 mm. Autores como Mishra y Singh (2003) establecen, de acuerdo a la estación de desarrollo, distintos rangos de precipitación previa para establecer si se trata de la condición I, II o III, de acuerdo a la estación de crecimiento, pero para el desarrollo de la cursada será utilizado sólo el rango general previamente expuesto.

Una vez definida la condición de humedad en la que se encuentra el suelo se puede utilizar la Tabla 5.2, en la cual se expresa el NC correspondiente para la condición I, II y III respectivamente.

Teniendo en cuenta la definición del Grupo Hidrológico, la cobertura vegetal y/o el uso del suelo y que la condición de humedad antecedente considerada como media (II), varios autores elaboraron tablas para la determinación del NC. Por lo tanto, existen otras fuentes de información

a nivel mundial, tales como USDA (2004) y Bossard et al. (2000), pero para los objetivos prácticos de implementación en la cursada de Manejo de cuencas hidrográficas, sólo utilizaremos la Tabla 5.2.

Una vez obtenido el NCp para la cuenca, el escurrimiento se determina con la aplicación de una ecuación empírica. El procedimiento se inicia con la cuantificación de las Pérdidas iniciales (Io) según la Ecuación 5.2, a partir de la retención potencial máxima (S). Para la obtención del valor de S se utiliza el NC, obtenido según Tabla 5.2, y la expresión de la Ecuación 5.3.

$$Io = 0,2 \times S$$

Ecuación 5.2

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

Ecuación 5.3

Finalmente, para establecer el escurrimiento directo generado (Q), se aplica la Ecuación 5.4, la cual depende de la Precipitación total (P) y Pérdidas iniciales (Io).

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

Ecuación 5.4

Una vez aplicado el método del NC para determinar el escurrimiento directo, se puede graficar el hietograma para una lámina de precipitación, dibujando por medio de columnas apiladas la fracción que escurre (Q = Precipitación efectiva), y aquella que no lo hace (Pérdidas = Abstracción + Infiltración). Si además del valor total de la precipitación, se dispone de su distribución temporal de la lluvia, se puede repartir la escorrentía a lo largo del tiempo que dura la precipitación, aplicando para cada intervalo la Ecuación 5.4. Para ello se debe tener en cuenta que el escurrimiento comienza una vez superado el umbral de escorrentía (Io), es decir que los cálculos se realizan a partir del período donde la precipitación acumulada es mayor que Io.

Tener en cuenta que el modelo calcula el escurrimiento para láminas de precipitación total, por lo que los valores de P serán los acumulados hasta el período considerado. La lámina de escurrimiento en cada uno de los períodos será la diferencia entre el escurrimiento total ocurrido hasta dicho período y el ocurrido en el intervalo precedente.

Tabla 5.2. Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III.

Vegetación y/o uso del suelo	Condición II				Condición I				Condición III			
	Grupo hidrológico				Grupo hidrológico				Grupo hidrológico			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Barbecho	77	86	91	94	58	72	81	87	89	93	96	97
Cultivos alineados R P	72	81	88	91	52	64	75	81	86	91	94	96
Cultivos alineados R B	67	78	85	89	46	60	70	77	82	89	93	95
Cultivos alineados C P	70	79	84	88	49	61	69	75	84	90	92	94
Cultivos alineados C B	65	75	82	86	44	56	66	72	81	87	91	93
Cultivos alineados C-T P	66	74	80	82	45	54	63	66	82	87	90	91
Cultivos alineados C-T B	62	71	78	81	41	51	60	64	79	85	89	91
Cultivos no alineados o surcos pequeños R P	65	76	84	88	44	57	69	75	81	88	92	94
Cultivos no alineados o surcos pequeños R B	63	75	83	87	42	56	67	74	80	87	92	94
Cultivos no alineados o surcos pequeños C P	63	74	82	85	42	54	66	70	80	87	91	93
Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84	40	53	64	69	78	86	91	92
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P	61	72	79	82	40	52	61	66	78	86	90	91
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B	59	70	78	81	38	49	60	64	77	84	89	91
Cultivos densos leguminosas R P	66	77	84	88	45	58	69	75	82	89	92	94
Cultivos densos leguminosas R B	58	72	81	85	37	52	64	70	76	86	91	93
Cultivos densos leguminosas C P	64	75	83	85	43	56	67	70	80	87	92	93
Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83	34	48	60	67	74	84	89	92
Cultivos densos leguminosas C-T P	63	73	80	83	42	53	63	67	80	86	90	92
Cultivos densos leguminosas C-T B	51	67	76	80	30	46	57	63	71	82	88	90
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%	48	67	77	83	28	46	58	67	68	82	89	92
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%	35	56	70	77	18	35	49	58	55	75	84	89
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73	15	28	44	53	50	68	81	86
Montes con pastos P	45	66	77	83	26	45	58	67	65	82	89	92
Montes con pastos R	36	60	73	79	19	39	53	61	56	78	86	90
Montes con pastos B	25	55	70	77	12	34	49	58	43	74	84	89
Bosques MP	56	75	86	91	35	56	72	81	75	87	93	96
Bosques P	46	68	78	84	26	47	60	69	66	83	89	92
Bosques R	36	60	70	76	19	39	49	57	56	78	84	88
Bosques B	26	52	63	69	13	31	42	48	45	71	80	84
Bosques MB	15	44	54	61	7	25	33	40	29	64	73	78
Prados permanentes	30	58	71	78	15	37	51	60	50	76	85	89
Pastizal P	68	79	86	89	47	61	72	77	83	90	93	95
Pastizal R	49	69	79	84	29	48	61	69	69	84	90	92
Pastizal B	39	61	74	80	21	40	54	63	60	78	87	90
Pastizal C P	47	67	81	88	27	46	64	75	67	82	91	94
Pastizal C R	25	59	75	83	12	38	56	67	43	77	87	92
Pastizal C B	6	35	70	79	3	18	49	61	13	55	84	90
Residencial baja densidad	54	70	80	85	33	49	63	70	73	84	90	93
Residencial alta densidad	77	85	90	92	58	70	79	83	89	93	95	96
Superficies impermeables	98	98	98	98	95	95	95	95	99	99	99	99
Espejos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	Laboreo sin prácticas de conservación											
C	Curvas de nivel											
C-T	Curvas de nivel y Terrazas abiertas											
MP	Condición de infiltración muy pobres											
P	Condición de infiltración pobres											
M	Condición de infiltración regulares											
B	Condición de infiltración buenas											
MB	Condición de infiltración muy buenas											

El coeficiente de escurrimiento (CE) de una superficie se define como el cociente del caudal que discurre por dicha superficie (Q), en relación con el caudal total precipitado (P) (Ecuación 5.5).

$$CE = Q \div P \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Chow et al. (1994) establecieron valores de coeficientes de escurrimiento para distintos tipos de usos del suelo (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Coeficientes de escurrimiento según diferentes usos del suelo.

Tipos de uso del suelo	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 capacidades de urbanización.	0,70 - 0,95 (sector céntrico)
	0,30 – 0,50 (casas más 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

Ejemplo de aplicación

Con este ejercicio práctico se pretende afianzar el procedimiento de cálculo para la determinación del escurrimiento superficial en la cuenca del arroyo Napaleofú, en Tandil (sudeste bonaerense), para la condición de humedad antecedente media (II), frente a una precipitación determinada.

Los pasos a seguir para desarrollar el ejercicio son los siguientes:

- ✓ Definir el Grupo Hidrológico de acuerdo a las características edáficas
- ✓ Establecer el Número de Curva para cada complejo suelo-vegetación
- ✓ Obtener el valor de NC ponderado a nivel de cuenca
- ✓ Cuantificar las abstracciones y la escorrentía generada por la precipitación utilizada
- ✓ Definir el Coeficiente de Escorrentía
- ✓ Graficar el hietograma expresando los componentes del mismo

Los datos base a utilizar se presentan a continuación:

1) *Precipitación:*

- Duración: 750 minutos
- Intervalo de tiempo: 30 minutos

- Lluvia acumulada: 0,5 - 2,4 - 5,6 - 7,8 - 8,9 - 17,3 - 25, 9 - 31,1 - 45,2 - 50,0 - 52,3 - 54,5 - 58,9 - 65,1 - 68,4 - 73,2 - 78,2 - 80,6 - 82,4 - 83,2 - 85,1 - 87,3 - 88,7 - 92,1 - 92,4

2) *Complejo Suelo-Vegetación:*

Tabla 5.4. Características del complejo suelo-vegetación y superficie de ocupación.

Vegetación	GH	Area (ha)
cultivo no alineado	C	81,95
cultivo no alineado	D	7,83
cultivo no alineado	B	5493,05
suelos pedregosos	C	41,66
suelos pedregosos	D	361,52
suelos pedregosos	B	2293,01
vegas de ríos	C	132,03
vegas de ríos	B	232,32
monte	C	69,34
monte	D	6,25
monte	B	475,54
cultivo denso legumin	C	2686,79
cultivo denso legumin	D	98,99
cultivo denso legumin	B	22118,3 2
cultivo alineado	C	3,64
cultivo alineado	B	263,21

Procedimiento

Se asigna un valor de NC a cada combinación de la Tabla 5.4, utilizando la información provista en la Tabla 5.2 (Tabla 5.5).

Luego, se establece un único valor de NC, ponderado a nivel de cuenca, a partir de la ecuación 5.1. El NC ponderado en este caso es de 71, dicho valor se utiliza a continuación para calcular la Retención potencial máxima (S) y las Abstracciones (lo), aplicando las ecuaciones 5.3 y 5.2, respectivamente. En este caso el valor de S es de 103,74 mm y el de lo es de 20,75 mm.

El siguiente paso consta de elaborar una tabla, como la presentada a continuación (Tabla 5.6). Dicha tabla deberá contar con las siguientes columnas: Tiempo, Precipitación acumulada, Precipitación del intervalo, Abstracciones iniciales, Abstracciones del intervalo, Escorrentía acumulada, Escorrentía del intervalo, Pérdidas del intervalo. Una vez que la precipitación acumulada supere al valor de lo (en este caso 20,75 mm), se deberá calcular la escorrentía generada, aplicando la ecuación 5.4. Las pérdidas del intervalo se calculan a partir de la diferencia entre la precipitación y la escorrentía del intervalo.

Tabla 5.5. Valores de NC asignado para cada complejo suelo-vegetación.

Vegetación	GH	Área (ha)	NC
cultivo no alineado	C	81,95	81
cultivo no alineado	D	7,83	84
cultivo no alineado	B	5493,05	73
suelos pedregosos	C	41,66	86
suelos pedregosos	D	361,52	89
suelos pedregosos	B	2293,01	79
vegas de ríos	C	132,03	77
vegas de ríos	B	232,32	67
monte	C	69,34	70
monte	D	6,25	77
monte	B	475,54	55
cultivo denso legumin	C	2686,79	78
cultivo denso legumin	D	98,99	83
cultivo denso legumin	B	22118,3 2	69
cultivo alineado	C	3,64	82
cultivo alineado	B	263,21	75

Tabla 5.6. Cálculo de la escorrentía y pérdida en el intervalo.

Tiempo (min)	P acum (mm)	P Int (mm)	Io (mm)	Io Int (mm)	Esc. acum (mm)	Esc. Int (mm)	Pérdidas Int (mm)
30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,50
60	2,40	1,90	2,40	1,90	0,00	0,00	1,90
90	5,60	3,20	5,60	3,20	0,00	0,00	3,20
120	7,80	2,20	7,80	2,20	0,00	0,00	2,20
150	8,90	1,10	8,90	1,10	0,00	0,00	1,10
180	17,30	8,40	17,30	8,40	0,00	0,00	8,40
210	25,90	8,60	20,75	3,45	0,24	0,24	8,36
240	31,10	5,20	20,75	0,00	0,94	0,70	4,50
270	45,20	14,10	20,75	0,00	4,66	3,72	10,38
300	50,00	4,80	20,75	0,00	6,43	1,77	3,03
330	52,30	2,30	20,75	0,00	7,36	0,92	1,38
360	54,50	2,20	20,75	0,00	8,28	0,93	1,27
390	58,90	4,40	20,75	0,00	10,26	1,97	2,43
420	65,10	6,20	20,75	0,00	13,28	3,02	3,18
450	68,40	3,30	20,75	0,00	15,00	1,72	1,58
480	73,20	4,80	20,75	0,00	17,61	2,62	2,18
510	78,20	5,00	20,75	0,00	20,48	2,86	2,14
540	80,60	2,40	20,75	0,00	21,90	1,42	0,98
570	82,40	1,80	20,75	0,00	22,98	1,08	0,72
600	83,20	0,80	20,75	0,00	23,47	0,49	0,31
630	85,10	1,90	20,75	0,00	24,63	1,17	0,73
660	87,30	2,20	20,75	0,00	26,01	1,37	0,83
690	88,70	1,40	20,75	0,00	26,89	0,88	0,52
720	92,10	3,40	20,75	0,00	29,07	2,18	1,22
750	92,40	0,30	20,75	0,00	29,27	0,19	0,11

Posteriormente, debe graficarse el hietograma representando la escorrentía y las pérdidas por intervalo (Figura 5.3).

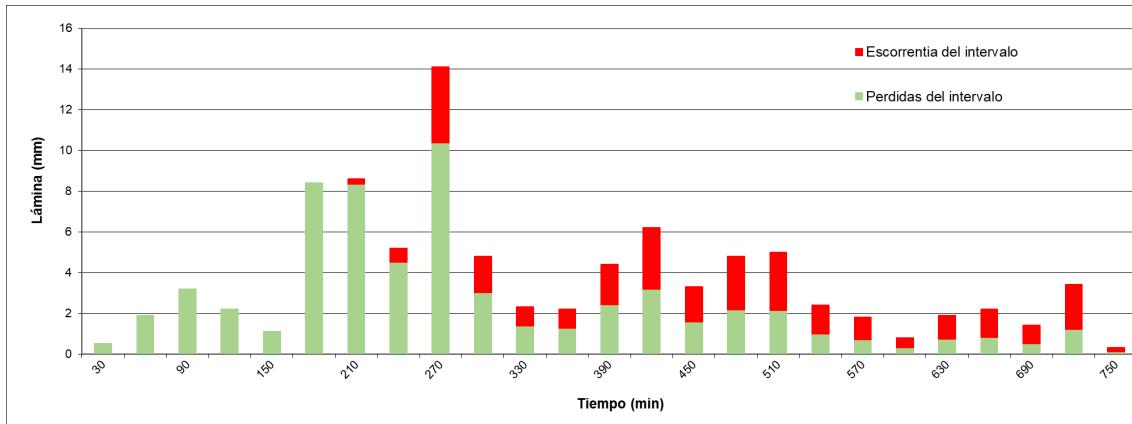


Figura 5.3. Hietograma para la CHA II.

Al repetir el procedimiento para las CHA I y III, se obtendrán los hietogramas presentados en las Figuras 5.4 y 5.5, respectivamente.

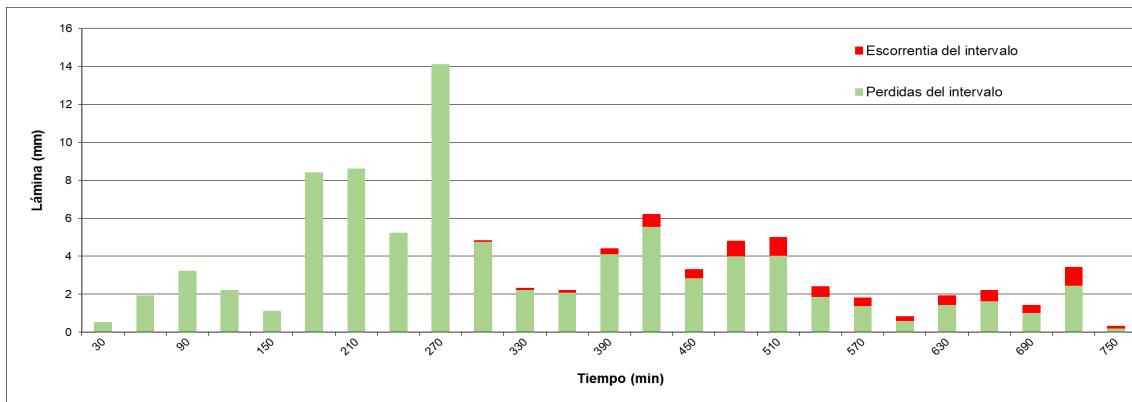


Figura 5.4. Hietograma para la CHA I.

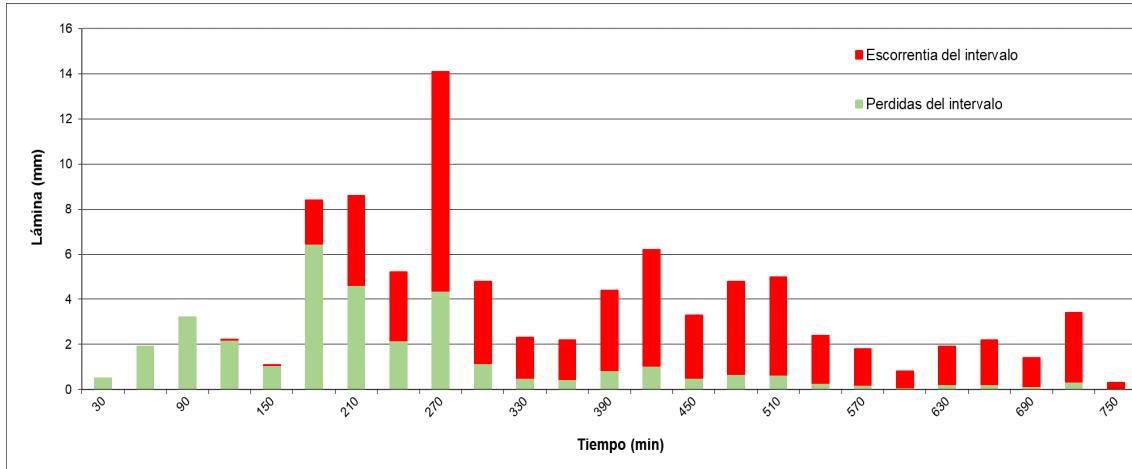


Figura 5.5. Hietograma para la CHA III.

Por último, el cálculo del Coeficiente de Escorrentía (CE), considerando la precipitación total y la escorrentía total, llegando a los resultados expresados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Valores de Coeficiente de Escorrentía para las tres CHA.

CHA	CE
I	0,07
II	0,32
III	0,63

Referencias

- Bondelid, T.R., McCuen, R.H., Jackson, T.J. (1982). *Sensitivity of scs models to curve number variation*. *Water Resour. Bull.* 18 (1), 111–116.
- Bossard, M., Feranec, J., Otahel, J. (2000). CORINE Land Cover Technical Guide: Addendum 2000. Technical Report N 40. European Environment Agency, Copenhagen <https://www.eea.europa.eu/publications/tech40add>
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Ediciones McGraw-Hill. Colombia. 583 pp.
- Foley, J.A., Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574.
- Gaspari F.J., Senisterra G.E., Delgado M.I., Rodríguez Vagaría A.M., Besteiro, S.I. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina. 321pp.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado,I., Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Edulp. Argentina. 188 pp.
- Gonzalez, A., Temimi,M., Khanbilvardi, R. (2015). Adjustment to the curve number (NRCSCN) to account for the vegetation effect on hydrological processes. *Hydrolog. Sci. J.* 60 (4), 591–605. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.898119>.
- Gonzalez Fuentes, E. (2023). Material didáctico para alumnos de grado, elaborado en el marco del curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas, FCAyF-UNLP.
- Hibbs, B.J., Sharp, J.M. (2012). Hydrogeological impacts of urbanization. *Environ. Eng. Geosci.* XVIII (1), 3–24 <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.18.1.3>.
- Kalantari, Z., Lyon, S.W., Folkeson, L., French, H.K., Stolte, J., Jansson, P.E., Sassner, M. (2014). Quantifying the hydrological impact of simulated changes in land use on peak discharge in a small catchment. *Sci. Total Environ.* 466–467, 741–754.
- López Cadenas de Llano F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 pp.
- Mishra, S.K., Singh, V.P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Water Science and Technology Library. Springer-Science – Business Media, B.V. 515 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-0147-1>.

- Muñoz Cárpene, R., Ritter Rodríguez, A. (2005). *Hidrología agroforestal*. Ed. Mundi Prensa, Coeditor Gobierno de Canarias. España. 348 pp.
- Nonglait, T.L., Tiwari, B.K. (2016). Application of SCS-CN method for estimation of runoff in a humid microwatershed. *Int. J. Curr. Agr. Sci. IJCAS*. 6 (10), 121–127.
- Pappas, E.A., Smith, D.R., Huang, C., Shuster,W.R., Bonta, J.V. (2008). Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. *Catena* 72, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.05.001>.
- USDA (United States Department of Agriculture). (1972). *Section 4: Hidrology. National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service, Washington, DC.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2004). *Part 630 hydrology. Chapter 9: Hydrologic soil-cover complexes. National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service, Washington, DC.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2009). *Part 630, chapter 7: Hydrologic soil groups. National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service, Washington, DC.
- Woldesenbet, T.A., Elagib, N.A., Ribbe, L., Heinrich, J. (2017). Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sci. Total Environ.* 575, 724–741.

CAPÍTULO 6

Zonificación del escurrimiento superficial

Lucía de Antueno

Método del Número de Curva con SIG

Un modelo hidrológico que permite transformar la precipitación total en precipitación efectiva (escurrimiento superficial) es el método del número de curva (NC). La estructura y textura del suelo y la cobertura vegetal junto a los registros pluviográficos, conforman los datos básicos para el análisis hidrológico espacio-temporal, en pequeñas cuencas hidrográficas (Kent, 1968).

El método del Número de Curva del Servicio de Conservación del Suelo (SCS-CN) es un modelo empírico empleado para determinar la escorrentía pluvial directa, fue desarrollado en 1954 por el Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA SCS, actualmente Servicio de Conservación de Recursos Naturales NRCS).

Es 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 según el suelo, denominado Número de Curva (NC) (Muñoz Cárpene y Ritter Rodríguez, 2005). 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. Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento. El NC se establece para cada complejo suelo-vegetación a partir de sus características particulares de vegetación y textura edáfica (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpene y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari et al 2009).

El método NC, expresa el escurrimiento directo (P_e) en respuesta ante una precipitación (P). Este modelo asume que un complejo suelo-vegetación y condición de humedad antecedente (humedad media del suelo) homogénea en la cuenca, se comporta de manera similar frente a una tormenta (P). A menor NC, menor es el escurrimiento. Según lo expresado por Kent (1968) el NC estima la abstracción inicial (I_o) de la precipitación, considerada como el 20 % de la máxima retención potencial (S) de cada complejo suelo - vegetación. S se constituye como $254 \times ((100 \times (NC-1)) - 1)$. El exceso de precipitación o escurrimiento superficial (P_e), en función de la precipitación acumulada (P), se establece con la Ecuación 6.1:

$$P_e = (P - I_o)^2 \times (P - I_o + S)^{-1} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Este método determina que el exceso de precipitación (P_e) es nulo hasta el momento en que la lluvia excede la abstracción inicial (I_o) (Gaspari et al., 2016).

La determinación del NC, se inicia con la definición y zonificación del Grupo Hidrológico (GH) a nivel de cuenca hidrográfica, el cual expresa las características geológicas y edáficas,

zonificando suelos según textura, permeabilidad y escurrimiento. El GH se clasifica según: A) mínimo potencial de escurrimiento, con suelos profundos, con predominio de arena y grava; B) suelos mayoritariamente arenosos; C) manifiesta textura franco-arcillosa; D) suelos predominantemente arcillosos, con máximo potencial de escurrimiento. Teniendo en cuenta la definición del GH, y conociendo el tipo de cobertura vegetal y/o el uso del suelo presente en la cuenca, se debe establecer una condición de humedad antecedente para dicho estudio, es decir el estado de humedad del suelo previo a la precipitación. La misma se define por tres condiciones básicas, considerando el contenido de humedad del suelo, determinadas en base a una lluvia dentro de los 5 a 10 días previos, denominada seca (I) si es menor a 12,7 mm, media (II) si la precipitación fue entre 12,7 – 38,1 mm y húmeda (III), con valores mayores a 38,1 mm media (II).

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una valiosa herramienta para la modelización hidrológica, permitiendo realizar operaciones de manera automática (Gaspari et al., 2011). El procesamiento geoespacial con SIG de la metodología descrita de determinación de Pe, se realiza por una tabulación cruzada de la cartografía de cada una de las dos variables que la integran (GH y cobertura vegetal) y por aplicando un Modelo Algebraico Cartográfico que soluciona la ecuación de Pe (Gaspari et al, 2016). Por otro lado, se plantea el empleo de la herramienta GEOQ, complemento de QGIS, para la automatización de estos procesos.

El objetivo del presente capítulo es obtener un mapa que represente el número de curva (NC) para diferentes zonas de una cuenca hidrográfica. Posteriormente, se realizará un procesamiento cartográfico que exprese el potencial erosivo cualitativo, basado en la relación de que, a mayores números de curva y mayores pendientes, éste será mayor. Ambos procesos se describen en el diagrama de la Figura 6.1.

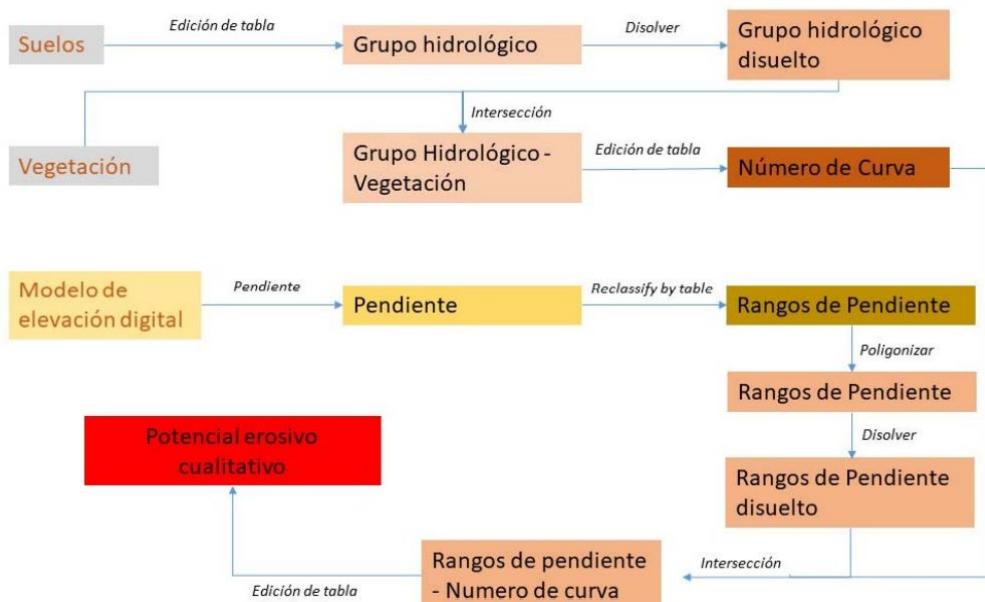


Figura 6.1. Diagrama de procesos para la determinación cualitativa del potencial erosivo, mediante NC y SIG. Fuente: Gaspari et al. (2019).

Procedimiento de zonificación del escurrimiento superficial

Asignación de Grupos Hidrológicos

Para definir los GH en el mapa, se parte del mapa de suelos. Una vez identificados los distintos tipos de suelo y sus características texturales se asignan los GH, según corresponda, al shape de suelos. Esto puede realizarse añadiendo una columna a la base de datos e incorporando cada letra de GH. Abra la tabla de atributos, luego colóquela en modo edición con el ícono *Comutar el modo edición* y añada una nueva columna a través del ícono *Nuevo Campo*. A continuación, coloque un nombre al mismo, el tipo de valor que contendrá, en este caso será “texto” y la longitud de los caracteres (Figura 6.2). Al aceptar, el campo se añadirá a la base de datos.

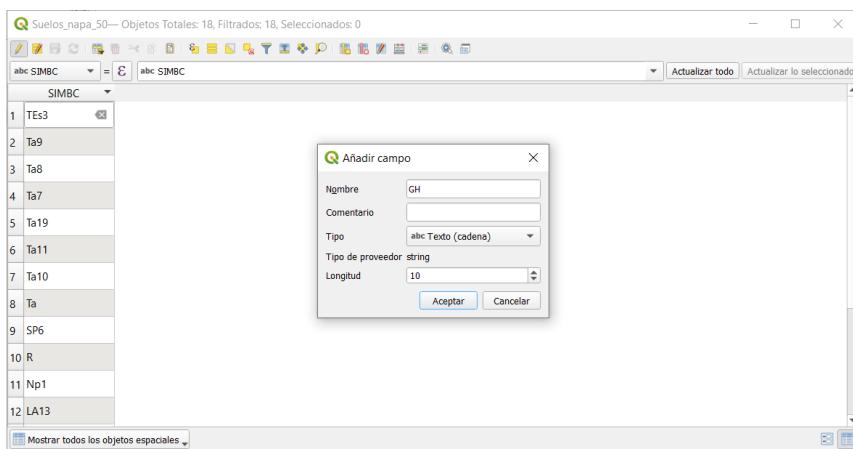


Figura 6.2. Creación de un nuevo campo en la tabla de atributos.

Para completar los atributos tipee el GH que corresponde a cada símbolo (Figura 6.3). Una vez completa quite el modo edición y acepte los cambios.

		GH
7	Ta10	B
8	Ta	C
9	SP6	C
10	R	D
11	Np1	C
12	LA13	B
13	L	D
14	CoLB	C
15	CoAoN	C
16	Az40	C
17	Az12	C
18	Ay13	NULL

Figura 6.3. Asignación de GH a complejos de suelo.

En la Figura 6.4 se observan a la izquierda las unidades cartográficas de los suelos presentes en la cuenca y a la derecha los GH cargados para cada una de ellas. En este último mapa se pueden ver los límites de cada polígono corresponden al mapa de complejos de suelo, esto se debe a que varios complejos de suelo comparten igual tipo de GH.

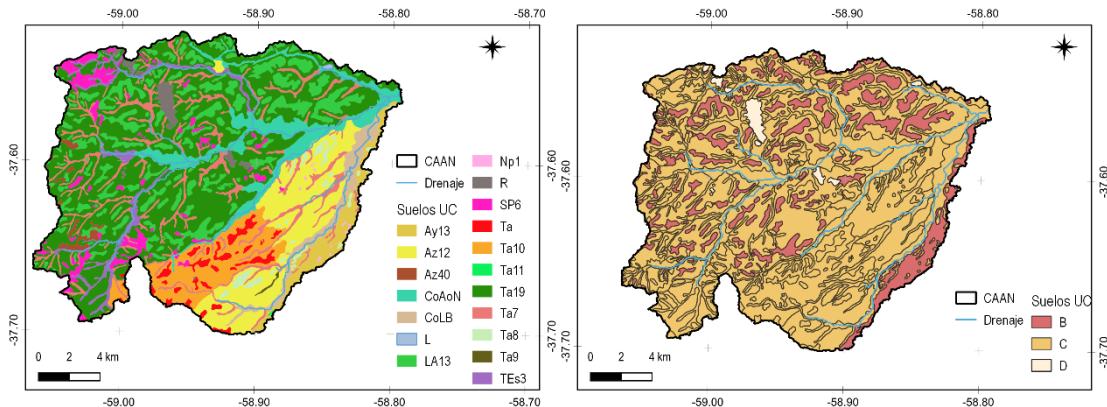


Figura 6.4. Izq.: Unidades cartográficas de suelos. Der: GH. Fuente: datos Anselmino (2022).

Para simplificar la base de datos con el fin de que represente solamente los GH en la cuenca, puede emplearse el comando *Disolver*, ubicado en la *Barra de Menú / Vectorial / Herramientas de Geoprocreso*, Figura 6.5. En *Capa de entrada* se selecciona el archivo a disolver, con el botón de los tres puntos de *Disolver campo(s)* tildamos el/los campo/s que se usarán para disolver, estos permanecerán en la nueva capa. Vuelva a la pantalla anterior, con la flecha azul y coloque un nombre de salida en el campo *Disuelto*. Posteriormente ejecute.

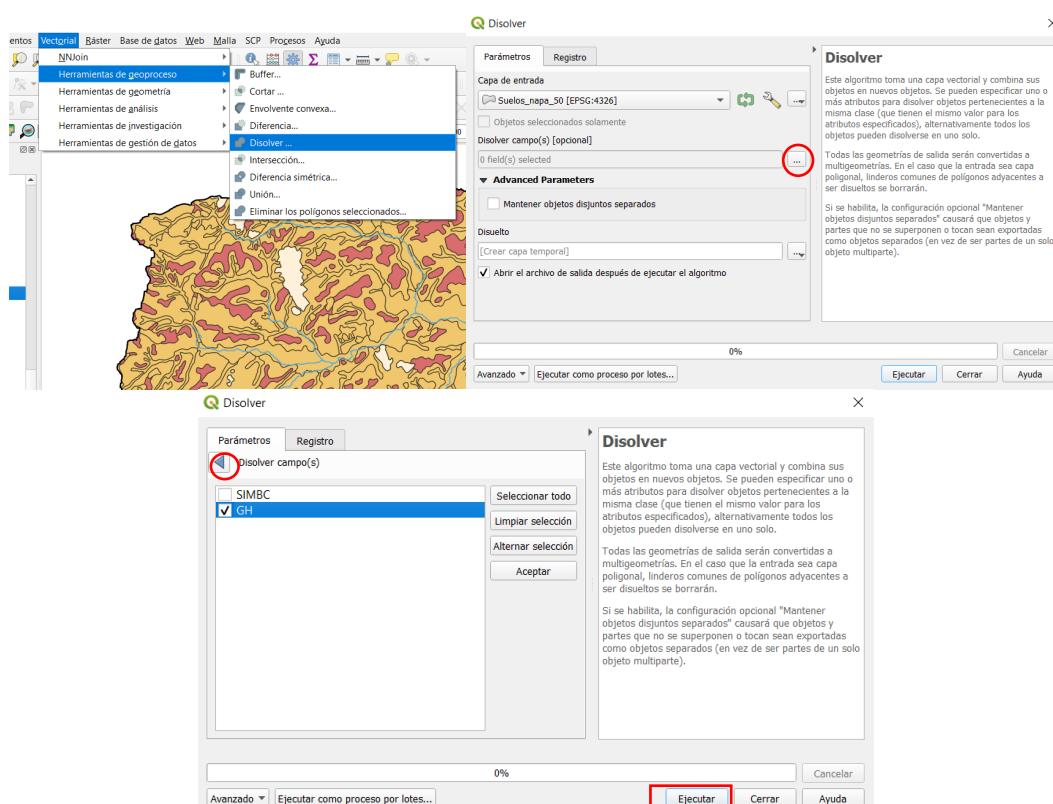


Figura 6.5. Aplicación del comando *Disolver*.

El resultado es un nuevo archivo donde los polígonos con igual GH se han combinado, Figura 6.6. Para finalizar el proceso de limpieza de la base de datos, abra la tabla de atributos, ejecute el modo edición y elimine los campos que no fueron seleccionados en el proceso de disolución, con la herramienta *Borrar campo*.

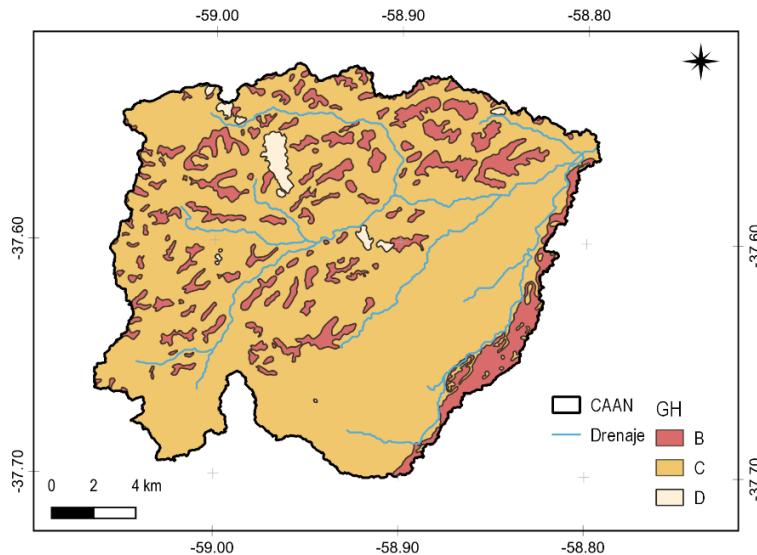


Figura 6.6. Capa de GH disuelto.

Asignación de Números de Curva

Como se mencionó anteriormente, el Número de Curva corresponde a una asociación entre la cobertura vegetal y el Grupo hidrológico. Para obtener una capa que contenga dicha asociación deben interceptarse los polígonos de las capas mencionadas. Para ello utilice el comando *Intersección* ubicado en *Barra de Menú / Vectorial / Herramientas de Geoprocreso*, se desplegará un cuadro donde deberá ingresar las capas a intersectarse (Figura 6.7).

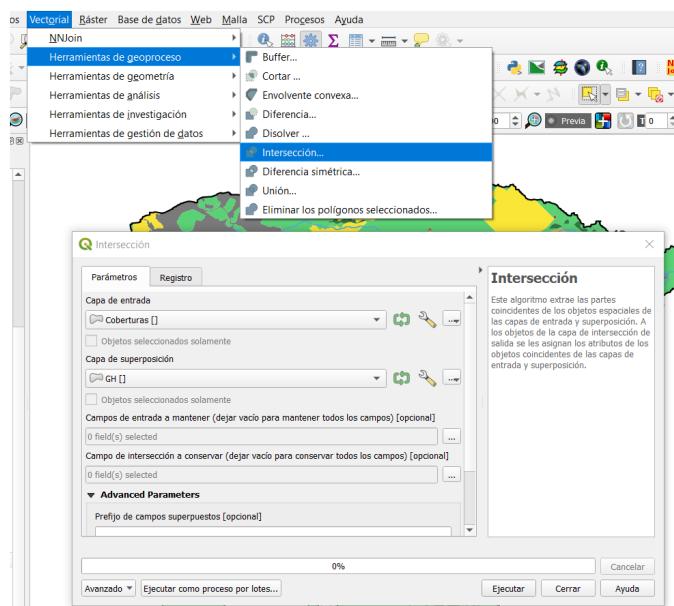


Figura 6.7. Intersección de capas vectoriales.

Una vez obtenida la intersección de los mapas debe definirse un NC para cada combinación entre GH y tipo de cobertura o uso del suelo, luego deben incorporarse estos valores a ese mapa intersectado. Para esto abra la tabla de atributos, colóquela en modo edición, añada una columna de tipo numérico entero y a continuación escriba el valor de NC para cada combinación GH-Vegetación. Una vez guardada la edición obtendrá una capa con una base de datos compuesta por GH, uso y el NC correspondiente a cada asociación (Figura 6.8).

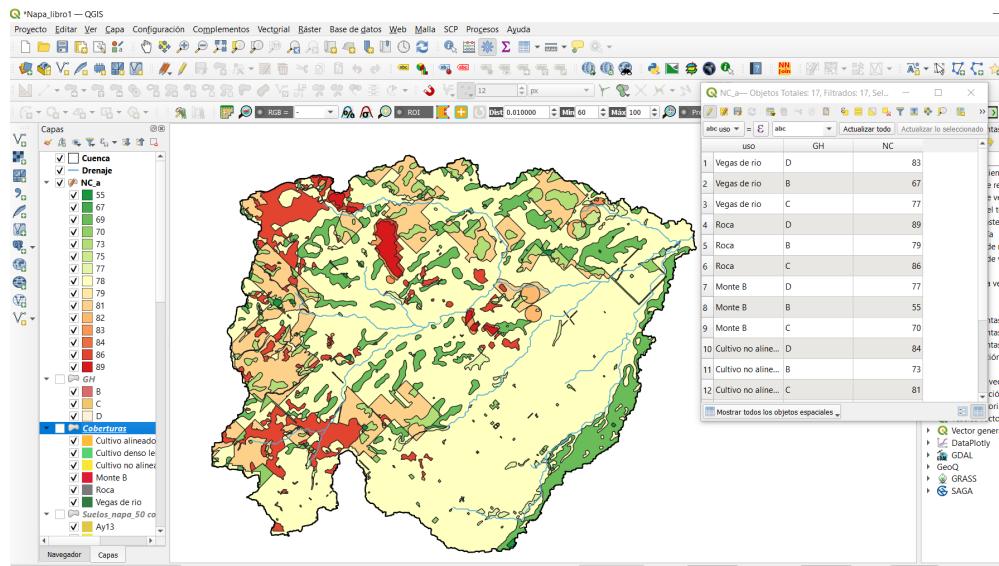


Figura 6.8. Número de curva y base de datos asociada.

Determinación del potencial de erosión cualitativa

El potencial de erosión cualitativo de una cuenca se basa en las características de pendiente del terreno y la capacidad de generar escurrimiento, indicada a través del NC, donde para cada combinación se asigna un potencial de erosión basado en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Riesgo de Erosión en clases según rangos de NC y rangos de pendiente. Referencias: **MB**:

Muy Bajo; **B**: Bajo; **M**: Medio; **A**: Alto; **MA**: Muy alto.

		Rangos de NC			
		<60	60-70	70-80	>80
Pendiente (%)	< 3	MB	MB	MB	B
	3-12	MB	MB	B	M
	12-18	MB	B	M	A
	18-24	B	M	A	MA
	24-30	M	A	A	MA
	>30	A	MA	MA	MA

El mapa de pendientes expresadas en porcentaje se obtiene a partir del modelo de elevación digital del terreno. Para ello siga el procedimiento descrito en el Capítulo 3, Figura 3.21. *Generación del Mapa de pendientes*.

Una vez obtenido el mapa de pendientes, se deben agrupar los valores de pendientes según los rangos establecidos en la Tabla 1. Para ello desde la barra de Menú, despliegue la solapa Ver / Paneles / Caja de herramientas de procesos; en el buscador de herramientas del mismo busque el comando *Reclasificar por tabla*. Coloque como capa de entrada el archivo de pendientes generado anteriormente, haga clic en los tres puntos de *Tabla de Reclasificación*, se desplegará una tabla donde colocará los rangos de clasificación y un nuevo valor que se le asignará a dicho rango (Figura 6.9). El proceso utiliza intervalos abiertos por izquierda, por lo cual deberá colocar en el *mínimo* de la primera clase el valor de -1 y un valor superior al máximo del archivo de entrada en la columna *máximo* de la última clase.

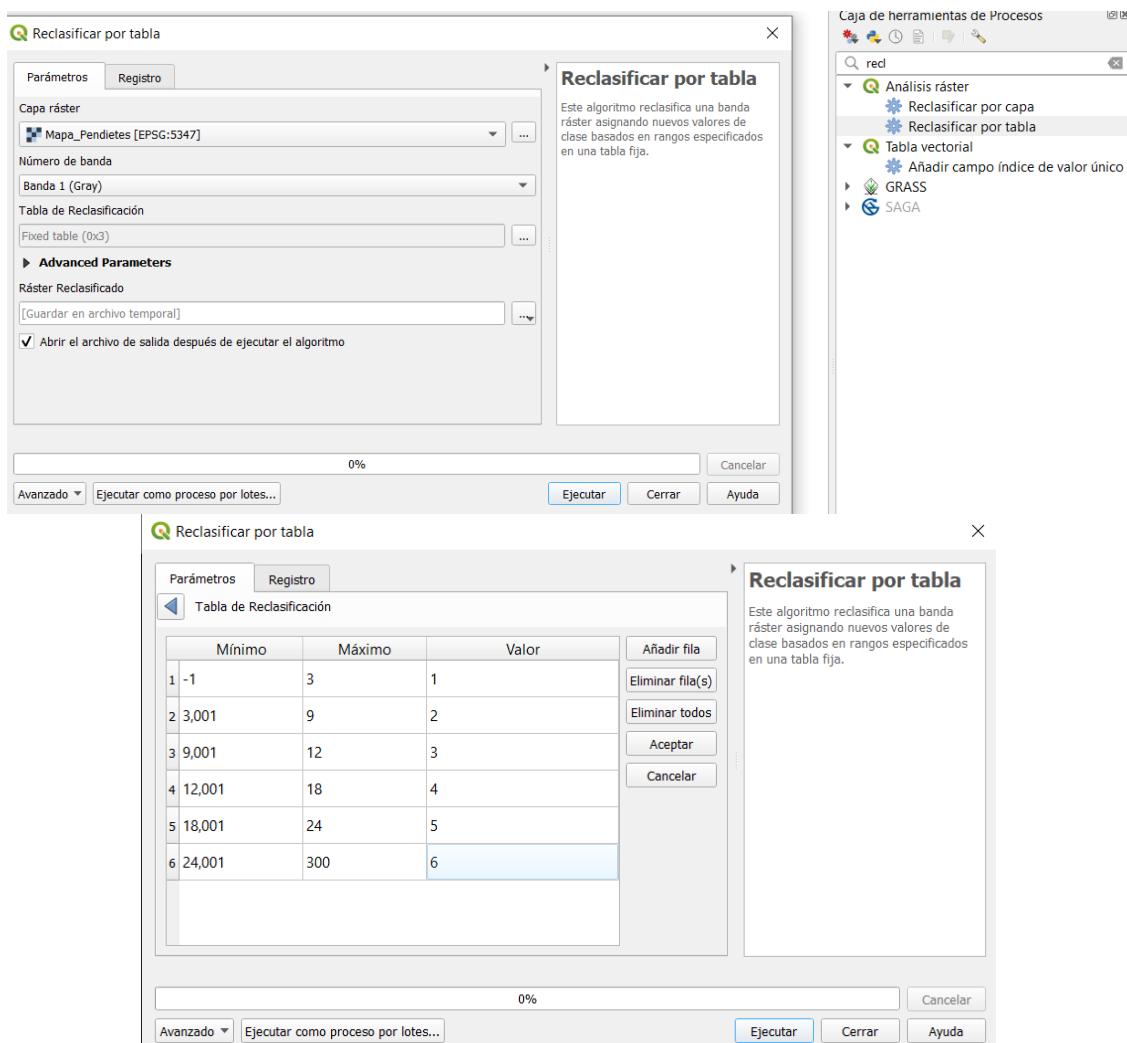


Figura 6.9. Reclasificación de pendiente en rangos.

El proceso devuelve una capa de rangos de pendiente en formato ráster, para poder continuar se debe compatibilizar el formato de esta capa con la de NC, ya sea ambas en formato ráster o en formato vectorial. Procederemos entonces a vectorizar la capa ráster de Rangos de pendientes. Esto puede realizarse mediante el procedimiento descrito en el Capítulo 3, Figura

3.10, o bien Seleccione el comando *Polygonizar (ráster a vectorial)* ubicado en Barra de Menú / Ráster / Conversión. En capa de entrada coloque el archivo rangos de pendiente, un nombre al campo a crear y un nombre al archivo de salida, luego ejecute el proceso (Figura 6.10).

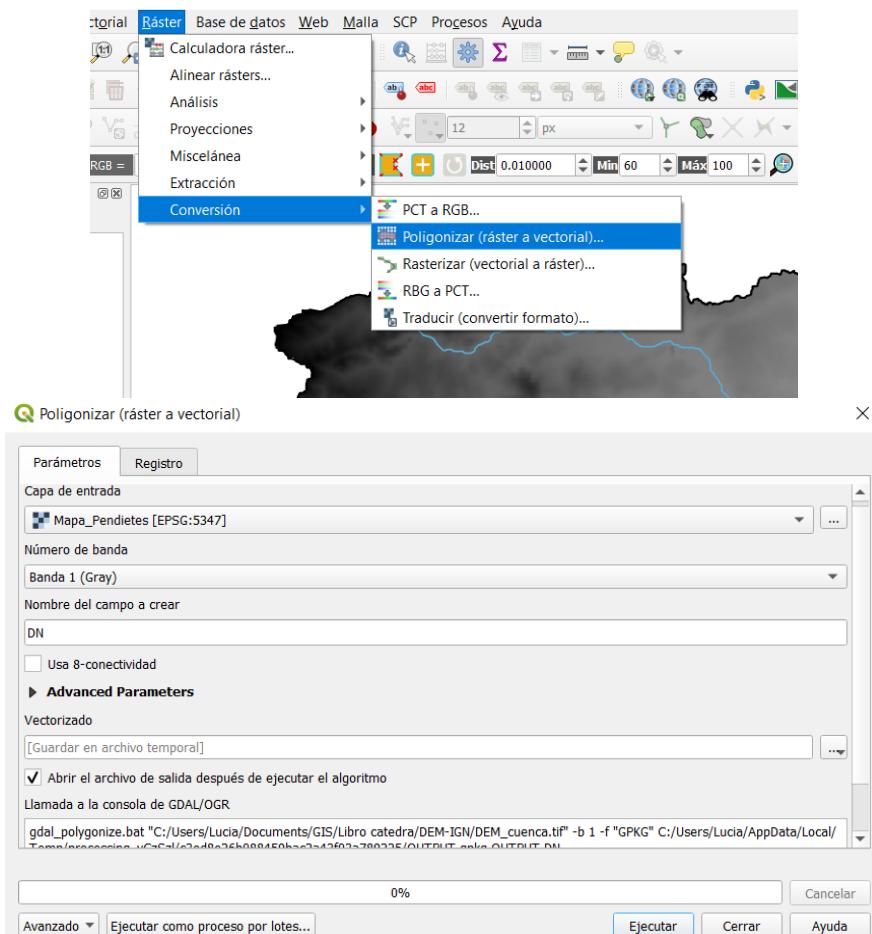


Figura 6.10. Vectorizar el mapa de pendientes.

Notas:

Para que los procesos se realicen en forma más rápida es conveniente trabajar sólo con el área de interés, para ello se procederá a recortar el mapa de pendientes obtenido con la herramienta Cortar ráster por capa de máscara ubicada en Barra de Menú / Ráster / Extracción.

Además, recuerde siempre trabajar con idénticos sistemas de coordenadas y con máscaras que contengan el menor número de elementos en la base de datos, en este caso se usará como máscara el archivo Cuenca, ya que está constituido por un solo polígono.

A pesar que solamente existen 6 clases, la base de datos posee una cantidad de registros grande, esto se debe a que solamente se agruparon los píxeles aledaños que integraban el mismo rango. Para obtener un mapa con 6 registros correspondientes a las 6 clases, utilice el comando Disolver. Si el proceso diera error de geometría, se debe al proceso de vectorización. Para solucionar dicho error, busque en la Caja de herramientas de procesos el comando Corregir Geometrías, cargue el archivo a corregir, coloque un nombre al archivo corregido y ejecute el proceso. Posteriormente, ejecute el proceso de disolver al archivo corregido.

El proceso para obtener el mapa con los rangos de Número de curva, se basa simplemente en la adición de un campo que contenga la clase a la cual pertenece el NC en la base de datos.

Para ello, coloque en edición el archivo de NC, agregue un campo, nómbrelo y especifique sus características de tipo y longitud de caracteres. A continuación, enumere de 1 a 4 según las categorías de NC de las columnas de la Tabla 1. Luego, utilice el comando Disolver tomando la columna de las clases de NC y posteriormente elimine las columnas residuales.

Obtención del mapa de erosión potencial cualitativa

El mapa de erosión potencial cualitativa (Figura 6.11) corresponde al cruzamiento de los rangos de pendiente con los rangos de NC, utilizando el comando Intersección. Para obtener una base de datos sencilla utilice el comando *Disolver* tomando las columnas *Rangos de Pendiente* y *Rangos de número de curva*. Una vez simplificada la base de datos, se asignan las categorías correspondientes al potencial de erosión a través de la edición de la tabla de atributos. Finalmente, usar *Disolver* para lograr una tabla simple con las 5 categorías presentes en la Tabla 6.1.

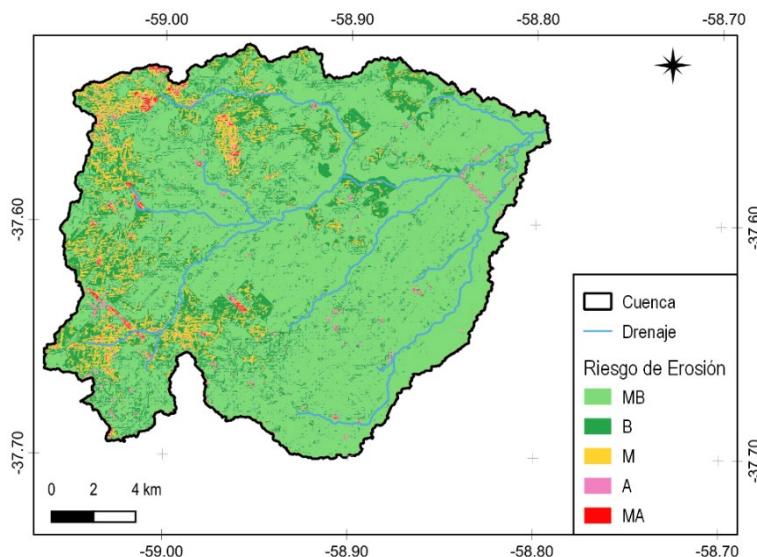


Figura 6.11. Riesgo de Erosión potencial Cualitativa

Complemento GeoQ

El GeoQ es una herramienta de automatización del procesamiento de cálculo de la escorrentía superficial, dentro del entorno QGIS (para versiones 3.18 o superior). Este complemento realiza la implementación de la metodología del Número de Curva (NC). (Montealegre y Gaspari, 2019).

Para poder utilizar la herramienta, en el QGIS instale el complemento denominado GeoQ, desde la barra de herramientas *Complementos/Administrar* e instalar complementos, buscarlo en la barra donde dice *Todos* y oprimir Instalar complemento, Figura 6.12. Hecho lo anterior quedará instalado y se visualizará en la Caja de herramientas de Proceso.

El modelo requiere el dato de la tormenta a modelar en milímetros, dos archivos vectoriales de tipo polígono de la cuenca a estudiar, consiste en shapes de: GH y cobertura y uso del suelo, los cuales deben estar codificados en la tabla de atributos. Además, requiere las tablas de condición de humedad antecedente (CHA).

La codificación, para el caso del GH, se realiza en la tabla de atributos del shape correspondiente y debe estar numerada según los códigos de la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Códigos según GH. Fuente: Montealegre y Gaspari, 2019.

GH	Código
A	1
B	2
C	3
D	4

En cuanto a la información del uso del suelo en el área en estudio, se debe tener una capa de información vectorial relacionada a la vegetación y/o uso del suelo, la cual debe estar codificada según la Tabla 6.3. Esta codificación fue adaptada para el GeoQ según cartografía antecedente de Cobertura del Suelo de la República Argentina (Volante, 2006), Proyecto PNECO 1643 (INTA, 2009) y de las clases de uso definidas de Vegetación y/o uso del suelo según clasificación Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).

Tabla 6.3. Códigos de vegetación y/o uso del suelo Fuente: Montealegre y Gaspari (2019).

Código	Cobertura del Suelo de la República Argentina. Proyecto PNECO 1643. Año 2006-2007 (2009)	Vegetación y/o uso del suelo según clasificación Mintegui Aguirre y López Unzú (1990)
10	Áreas naturales desnudas consolidadas	Barbecho
20	Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Cultivos alineados R P
30	Cultivos de herbáceas graminoides	Cultivos alineados R B
40		Cultivos alineados C P
50		Cultivos alineados C B
60		Cultivos alineados C-T P
70		Cultivos alineados C-T B
80		Cultivos no alineados o surcos pequeños R P
90	Cultivos de herbáceas (no determinado)	Cultivos no alineados o surcos pequeños R B
100		Cultivos no alineados o surcos pequeños C P
110		Cultivos no alineados o surcos pequeños C B
120		Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P
130		Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B
140		Cultivos densos leguminosas R P
150	Cultivos de herbáceas no graminoides	Cultivos densos leguminosas R B
160		Cultivos densos leguminosas C P
170		Cultivos densos leguminosas C B
180		Cultivos densos leguminosas C-T P
190		Cultivos densos leguminosas C-T B
200		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%
210		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%

Código	Cobertura del Suelo de la República Argentina. Proyecto PNECO 1643. Año 2006-2007 (2009)	Vegetación y/o uso del suelo según clasificación Mintegui Aguirre y López Unzú (1990)
220		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%
230	Arbustal abierto	Montes con pastos P
240	Arbustal disperso	Montes con pastos R
250	Arbustal cerrado	Montes con pastos B
260	Bosques abiertos en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Bosques MP
270	Bosques abiertos	Bosques P
280	Bosques abiertos, con arbustos	Bosques R
290	Bosques cerrados en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Bosques B
300	Bosques cerrados	Bosques MB
310	Áreas terrestres cultivadas y/o manejadas	Prados permanentes
320	Pastizal abierto (herbáceas gramínoideas)	Pastizal P
330	Pastizal disperso	Pastizal R
340	Pastizal cerrado (herbáceas gramínoideas)	Pastizal B
350		Pastizal C P
360		Pastizal C R
370		Pastizal C B
380	Áreas urbanas de baja densidad	Residencial baja densidad
390	Áreas urbanas densamente pobladas	Residencial alta densidad
400	Rocas, fragmentos	Superficies impermeables
410	Cuerpos de agua en movimiento - cañadas	Espejos de agua - humedales
	Cuerpos de agua estacionario - bañado	
	Nieve o hielo	
420	Árboles dispersos en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	
430	Arbustal cerrado a abierto en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	
440	Áreas urbanas de densidad media	
450	Áreas urbanas dispersas - semiurbanas	
460	Áreas urbanas vegetadas	
470	Cultivos de arbustos bajo riego	
480	Cultivos de arbustos en secano	
490	Cultivos de especies arbóreas (no determinado)	
500	Cultivos de especies arbóreas bajo riego	
510	Cultivos de especies arbóreas en secano	
520	Dunas / desiertos naturales	
530	Salares (GH D - áreas/rocas impermeables)	
540	Salinas (GH D - áreas/rocas impermeables)	
550	Suelos pedregosos	
560	Superficies artificiales y áreas asociadas. Superficies construidas (no determinado) - Distritos urbanos comerciales	
570	Superficies no construidas	
580	Vegas de ríos en condiciones óptimas	

Referencias: R Laboreo sin prácticas de conservación; C Curvas de nivel; C-T Curvas de nivel y Terrazas abiertas; MP Condición de infiltración muy pobre; P Condición de infiltración pobre; M Condición de infiltración mala; B Condición de infiltración buena; MB Condición de infiltración muy buena.

Como insumos adicionales, el GeoQ viene con las tablas de consulta que contienen los valores de NC en función del tipo de CHA. Para esto se dispone de 3 archivos en formato CSV (valores separados por comas), con el NC para cada CHA. Estos valores están estandarizados para el modelo GeoQ y permiten que el usuario pueda seleccionar la CHA que va a procesar. Estas tablas están disponibles en el repositorio del complemento, ubicado en la herramienta

Administrar e instalar complementos. También contiene archivos de simbología QML, los cuales serán empleados de forma automática por el modelo para la representación final de mapas de coeficientes de escorrentía (CE), infiltración (CF) y abstracciones iniciales (CI0). Estos archivos se denominan con las iniciales anteriormente descritas. Si estos archivos no están en la ruta descrita, el modelo arroja las capas de los coeficientes sin simbología.

Una vez descargado el complemento, ingresar a la página web del mismo Figura 6.12, (<https://github.com/fabalmon/GeoQ>), donde encontraremos el manual y los insumos adicionales ya descritos en un archivo denominado *GeoQ.zip*. Estos insumos deben ser descomprimidos y guardados en una carpeta en el equipo de cómputo, denominada C:\GeoQ.

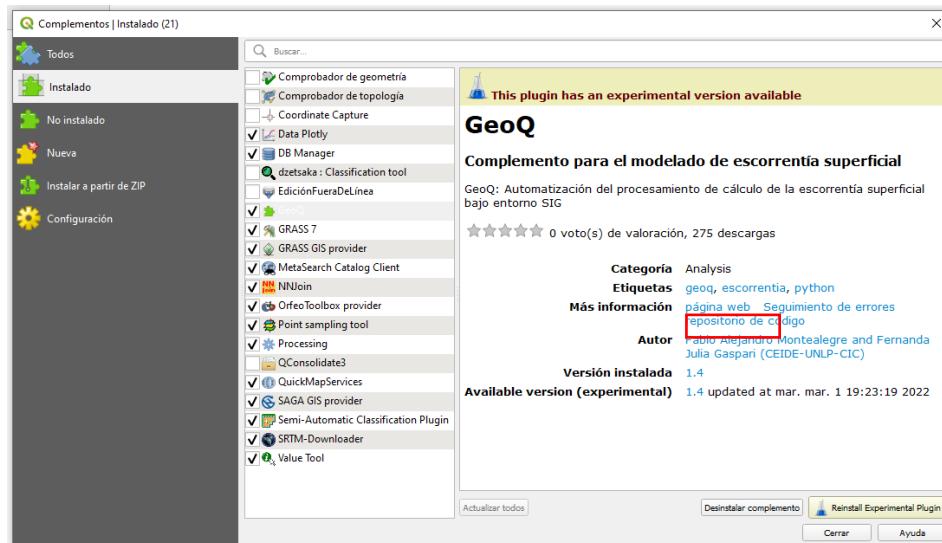


Figura 6.12. Instalar complemento GeoQ.

Luego, en un nuevo proyecto de QGIS, se deben cargar las tablas de consulta, desde el *Administrador de fuente de datos* en la sección de *Texto delimitado*, como se muestra en la Figura 6.13. Tildando la opción *CSV (valores separados por coma)* y *Ninguna geometría*.

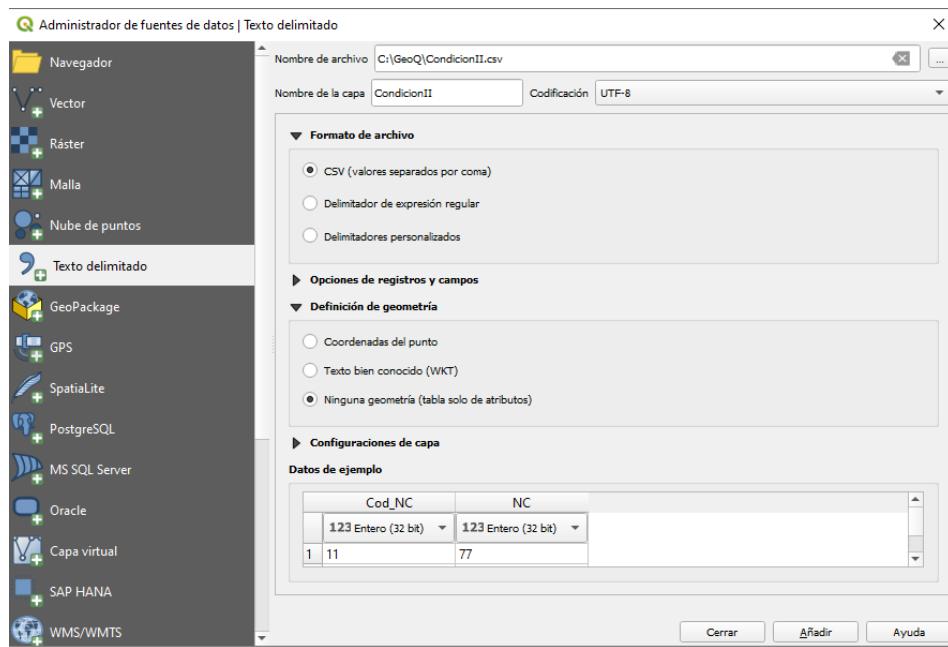


Figura 6.13 Carga de tablas de consulta al proyecto de QGis.

En cuanto a los archivos vectoriales, la capa referida a la información de GH para la zona de estudio, los códigos asignados a cada grupo hidrológico en sus atributos, se deben incorporar con una columna nueva del archivo shape, denominada “Cod_Sue” e incluir los códigos de cada GH como se expresar en la Tabla 6.2. Por ejemplo, se muestra en la Figura 6.14 el mapa de códigos de GH de la CAAN.

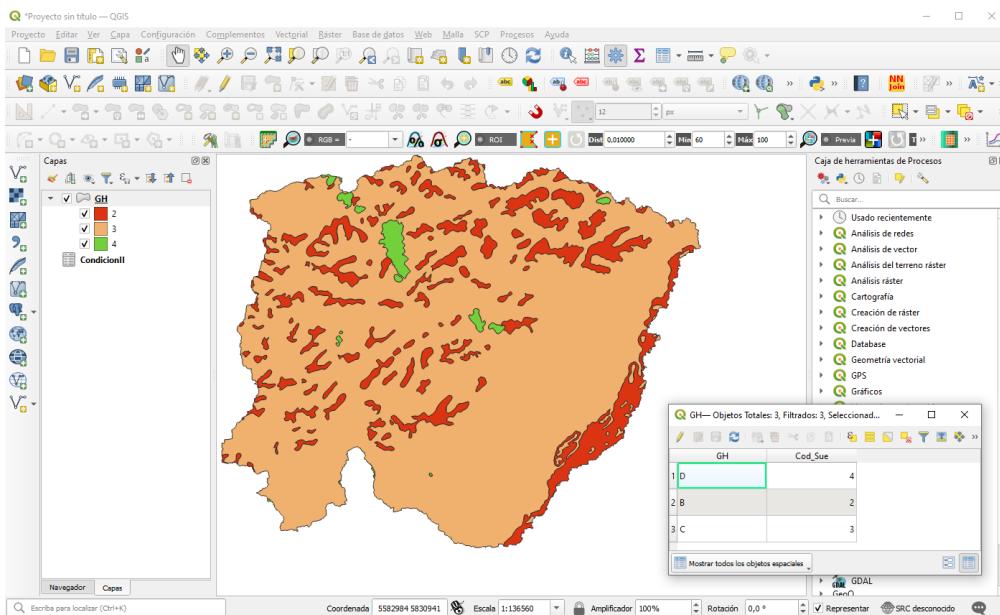


Figura 6.14 Ejemplo mapa de códigos de GH para la CAAN. Fuente: datos Anselmino (2022).

La capa de vegetación y/o uso del suelo debe estar codificado según las categorías estandarizadas expresadas en la Tabla 6.3, por medio de una columna en el archivo shape denominada “Cod_Veg” la cual consignará los códigos correspondientes a cada cobertura. Se exemplifica en la Figura 4 con el código de cobertura del suelo de la CAAN.

Nota: Las capas de coberturas y de GH deben estar recortadas previamente con la zona de estudio.

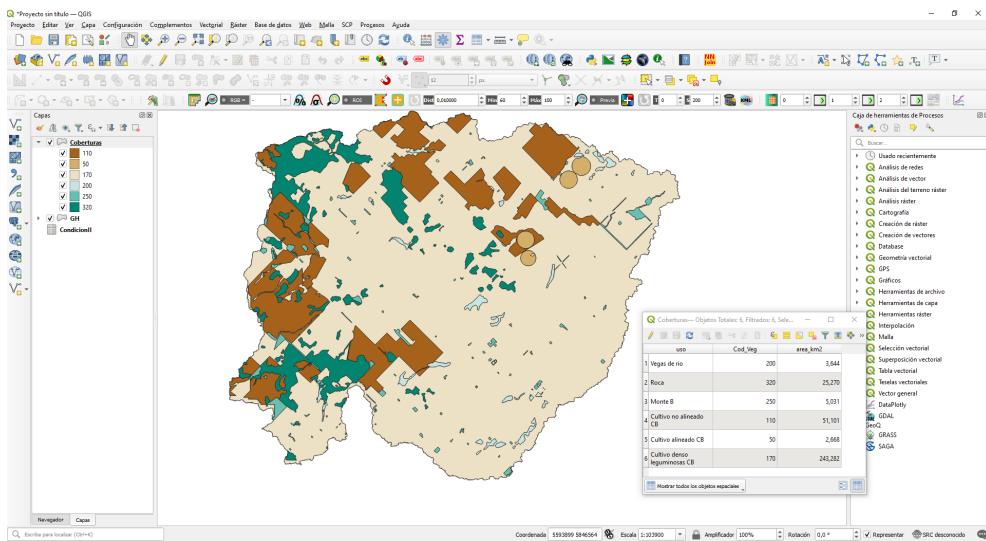


Figura 6.15. Ejemplo mapa códigos de coberturas para la CAAN. Fuente: datos Anselmino (2022).

Ejecución del Modelo

En el panel de *Caja de herramientas de Procesos* ejecutar el complemento GeoQ (Figura 6.16). Al desplegarse la herramienta se deben ingresar los insumos estandarizados previamente y seguir los siguientes pasos (Montealegre y Gaspari, 2019):

1. PP (mm): Ingresar un valor de precipitación en mm.
2. Suelos: Seleccionar el archivo vectorial correspondiente a GH codificado.
3. Vegetación: Seleccionar el archivo correspondiente a coberturas y uso del suelo codificado.
4. Condición de Humedad: Seleccionar la tabla de consulta de CHA, según los requerimientos del usuario. Debe estar previamente cargada en el proyecto.
5. GeoQ: es el nombre del resultado final del modelo. Es posible dejar en blanco esta casilla, y, de ser así, se creará una capa temporal. De lo contrario, se puede guardar el archivo en el equipo.
6. CF: es el mapa de CF que se cargará al proyecto con su respectiva simbología (*Solo si el archivo de simbología está guardado en C:\GeoQ*). Si se deja en blanco esta casilla generará una capa temporal, pero sin nombre, por lo cual se aconseja guardar este resultado como archivo en el equipo con el nombre CF.
7. CE: Corresponde al mapa de CE. Seguir las instrucciones del paso 6 y nombrar el archivo CE.
8. Clo: Corresponde al mapa de Clo. Seguir las instrucciones del paso 6 y nombrar el archivo Clo.
9. Ejecutar: las capas de resultado se cargarán automáticamente en el proyecto.

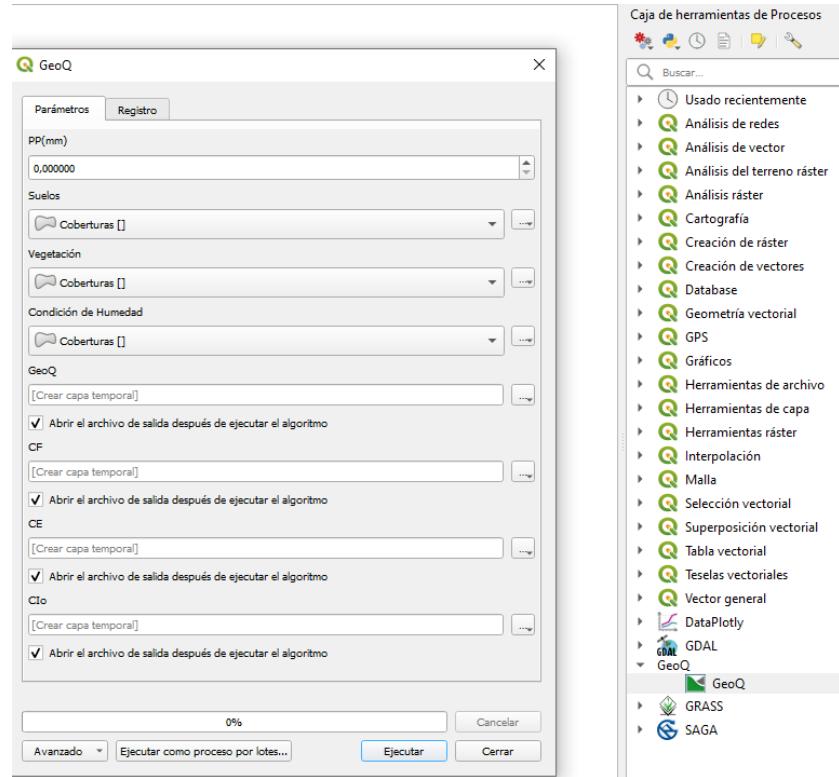


Figura 6.16. Ejecución del modelo GeoQ.

Obtención de resultados

El modelo arroja un resultado general, en una capa denominada GeoQ (Figura 6.17), donde sus datos y atributos son el producto de los cruces y geoprocessos de los insumos de entrada. Esta capa no posee ninguna simbología. En sus atributos se encuentran los NC y los valores de retención potencial máxima S, Abstracciones iniciales I₀, escorrentía Q, infiltración F, en milímetros, y los coeficientes porcentuales de Cl₀, CE, CF. Todos ellos pueden ser representados cartográficamente si así se requiere. (Montealegre y Gaspari, 2019).

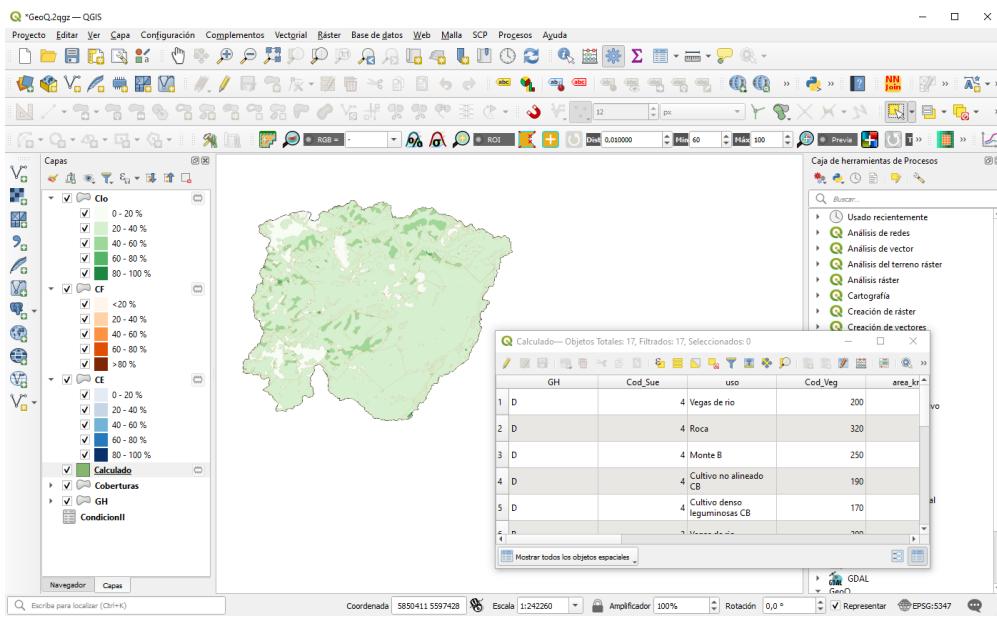
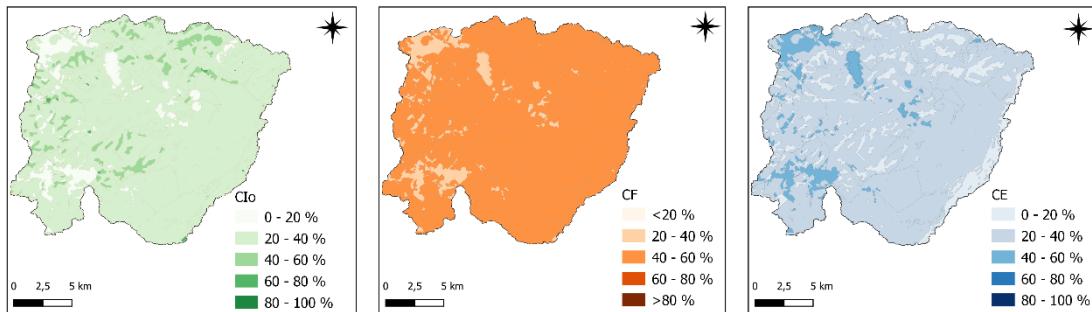


Figura 6.17. Resultados del modelo GeoQ.

De igual forma, el modelo genera 3 capas adicionales, las cuales corresponden a los coeficientes CF , CE , Clo ; cada una con sus respectivos valores y su simbología. En la Figura 6.18, se exponen dichos resultados, para una CHA II, para la CAAN.

Figura 6.18. CE (der), CF (centro) y Clo (izquierda).

Como se puede apreciar, la sistematización de procesos geoespaciales del GeoQ, permite agilizar y estandarizar procesos, manipular y analizar información vectorial, generando la zonificación de componentes hidrológicos, como apoyo SIG en proyectos de planificación territorial. La utilización de esta herramienta proporciona la posibilidad de determinar, cuantificar y zonificar la escorrentía para una tormenta según las CHA I, II y III sobre una cuenca hidrográfica, como así también la infiltración y las abstracciones iniciales según el NC.

Referencias

- Anselmino, C. B. (2023). *Transformación del territorio e influencia en los servicios hidrológicos ecosistémicos en la cuenca alta del arroyo Napaleofú, Tandil*. Trabajo final de carrera. FCAF, UNLP. p.61.
- Chow, V. T., Maidment, D.R., L. Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*. Ediciones McGraw-Hill. Colombia.583 pp.
- Gaspari F.J., Senisterra G.E., Delgado M.I., Rodríguez Vagaría A.M., S.I.Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina. 321pp.
- Gaspari F.J., Rodríguez Vagaría A.M., F.A. Montealegre Medina. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas: herramientas de sistemas de información geográfica*. 1a ed . La Plata: Universidad Nacional de La Plata; Editorial EDULP. 121 p. ISBN 978-950-34-1833-8
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A. y S Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3. Actualización constante on line SEDICI
- Gaspari, F.J.; Senisterra, G.E.; Rodríguez Vagaría, A.; Delgado, M.I. y S. Besteiro. (2011). Simulación espacio – temporal del escurrimiento directo en la cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. ASAGAI. Vol 27. ISSN 1851-7838.
- Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, MI, Denegrí, G.A.; Rodríguez Vagaría, A. y R. Díaz Gómez. (2016). *Valoración de servicios ambientales para el ordenamiento agrohidrológico en cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 137 p. La Plata. Argentina. SEDICI. ISBN 978-950-34-1324-1. Versión digital. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52722>
- Kent, K.M. (1968). *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds*. U.S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. SCS-TP 149. USA. 63pp
- López Cadenas de Llano F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 pp.
- Mintegui Aguirre, J. A., López Unzú, F. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. In Departamento de Agricultura y Pesca (Ed.), Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco.
- Montealegre Medina F. A, Gaspari F. J. (2022). *GeoQ: Automatización del procesamiento de cálculo de la escorrentía superficial bajo entorno S.I.G. en QGis 3.18®*. p15. Disponible en <https://github.com/fabalmon/GeoQ>.
- Muñoz Cárpene R. & A.Ritter Rodríguez. (2005). *Hidrología agroforestal*. Ed. Mundi Prensa, Coeditor Gobierno de Canarias. España. 348 pp.
- Volante J. et al. (2006). Cartografía: *Ocupación de las tierras y uso actual de los suelos (2007) a escala exploratoria (E 1:500.000), mediante el sistema de clasificación de ocupación de tierras “Land Cover Classification System - LCCS”, (Di Gregorio et al., 1998)*.

CAPÍTULO 7

Modelización hidrológica

Lucía de Antueno

Un modelo hidrológico es una representación simplificada del ciclo del agua que utiliza conceptos y aproximaciones de los procesos reales del sistema hidrológico. A través de comparaciones entre representaciones de la realidad y escenarios alternativos que podamos generar en un modelo hidrológico, se puede producir estimaciones cuantitativas de los beneficios hídricos de distintos cursos de acción (o inacción) en la infraestructura natural. La modelación hidrológica, en sí misma, debe ser vista como una herramienta útil pero también incierta, su uso inteligente en la toma de decisiones exige transparentar las fuentes de error, analizar en forma crítica los resultados obtenidos y reconocer la probabilidad de que los valores reales se encuentren fuera del intervalo de confianza obtenido con la modelación. (Ochoa-Tocachi et al., 2022).

Debido a las limitaciones en las técnicas de medición de fenómenos del mundo real, modelos de simulación 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 (Urciuolo et al., 2007). En zonas escasas de datos, muchas veces existe un interés en usar la modelación hidrológica para estimar los impactos de un curso de acción – y los modelos pueden agregar valor en estos casos. Sin embargo, los modelos mismos son más confiables cuando usan datos observados en el sistema que trata de representar –o territorios muy similares. Aun cuando avanzamos con la aplicación de modelos para tomar decisiones en el corto plazo, debemos buscar la manera de invertir en el monitoreo de datos eco-hidrometeorológicos para mejorar nuestra capacidad de análisis y gestión en el mediano y largo plazo. (Ochoa-Tocachi et al., 2022).

El centro de Ingeniería Hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, diseñó el programa de computación Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS), este provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y también tránsito de caudales entre otros. El HEC-HMS es un programa libre de acceso gratuito que está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas. Incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico, como infiltración de eventos, hidrogramas unitarios y enrutamiento hidrológico. Además, incluye los procedimientos necesarios para la simulación continua, incluida la contabilidad de la evapotranspiración, el deshielo y la humedad del suelo (Scharffenberg et al., 2016).

El programa presenta un entorno de trabajo integrado con utilidades de ingreso de datos, motor de cómputo y herramientas de informes de resultados. Una interfaz gráfica de usuario permite un movimiento fluido entre las diferentes partes del programa. (Scharffenberg et al., 2016).

Ejemplo de aplicación con HEC-HMS

A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación de un modelo hidrológico desarrollado para la CAAN. El modelo tiene por objetivo cuantificar el escurrimiento superficial que se desarrollará durante un evento de precipitación de 7 horas de duración.

La metodología para la modelización hidrológica aplicada para este ejemplo se realizará con el programa HEC-HMS versión 4.2.1.

El modelo cuenta con una interfaz gráfica que facilita al usuario todas las operaciones necesarias para realizar una simulación hidrológica. Para el comienzo del proceso de modelado cree un nuevo proyecto en File/New o con el primer ícono de la barra de herramientas, guárde lo en una ruta conocida en el disco C, dejar el sistema métrico que se encuentra por defecto seleccionado. En la Figura 7.1 se detallan los componentes de la interfaz gráfica.

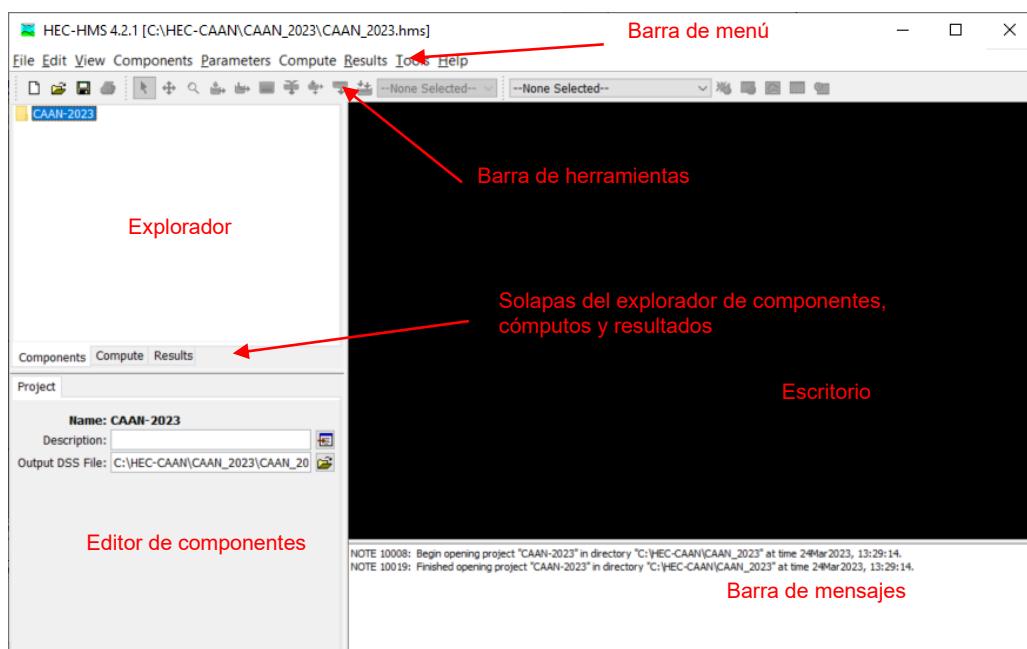


Figura 7.1. Componentes de la interfaz gráfica.

Procedimiento

I. Creación de un modelo de cuenca

1. Lo recomendable es establecer al inicio los métodos de cálculo que se emplearán en cada proceso de cálculo. En la barra de menú haga clic en *Tools / Program settings* y seleccione la solapa *Defaults* eligiendo las opciones que se presentan en la Figura 7.2.

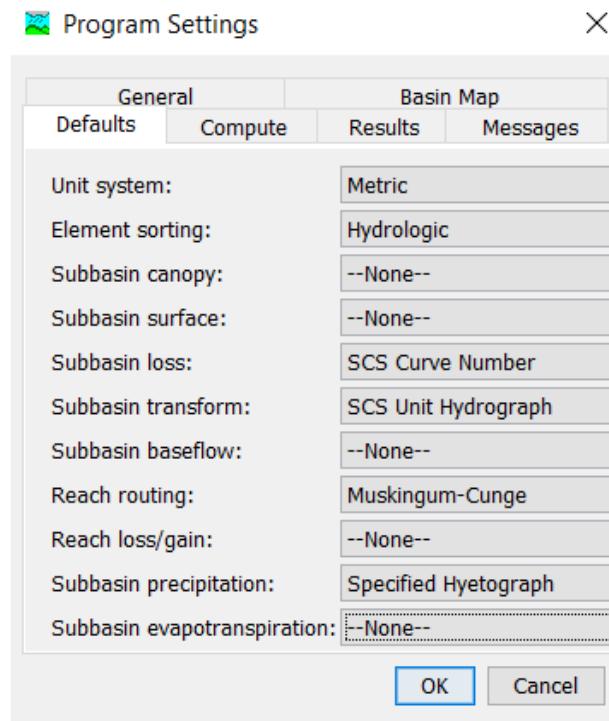


Figura 7.2. Asignación de los métodos de cálculo.

2. Cree un modelo de cuenca, para ello en la barra de menú haga clic en *Components / Basin Model Manager*. Se abrirá un cuadro de diálogo, haga clic en *New*, luego el nombre de su modelo de cuenca, es opcional agregar una descripción del mismo (Figura 7.3).

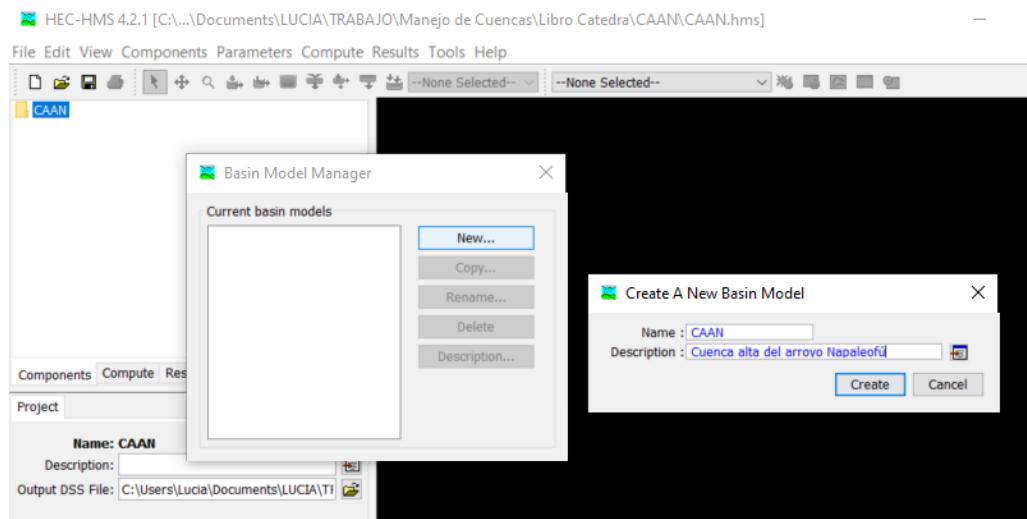


Figura 7.3. Creación del modelo de cuenca.

3. De modo opcional, una vez creado el modelo de cuenca, pueden cargarse mapas de referencia con el fin de facilitar la creación de elementos del modelo de cuencas. Para ello haga clic en el explorador y en la barra de menú seleccione, *View / Background maps*, haga clic en *Add...* y seleccione los archivos *drenaje.shp*, repita el proceso y seleccione *cuenca.shp* (Figura 7.4).

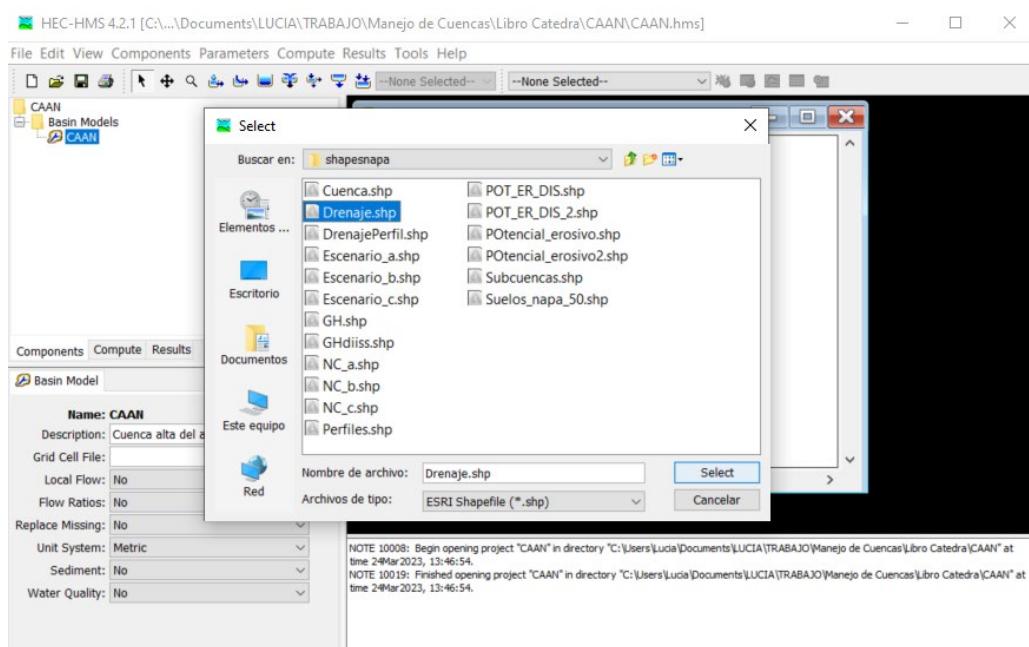


Figura 7.4 Adición de mapas de referencia.

Una vez incorporados los archivos, se visualizarán los mapas cargados (Figura 7.5).

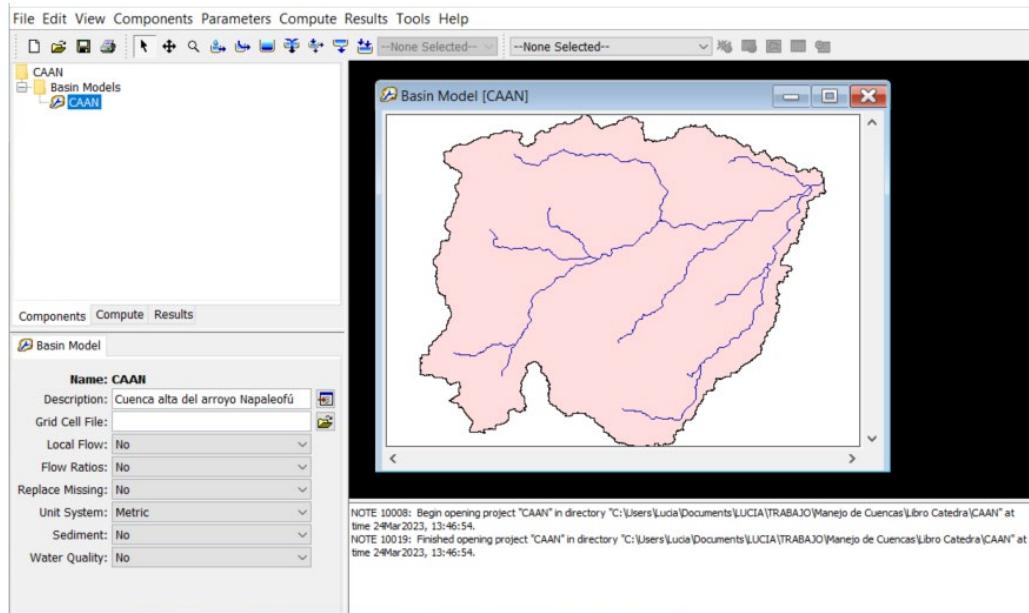


Figura 7.5. Visualización de mapas de referencia en el escritorio de HEC HMS.

4. A continuación, se crearán los elementos, que en nuestro caso 5 subcuenca (subbasin), 2 río (reach), 2 uniones (junction) y una salida (sink). Para la creación de dichos elementos utilice la barra de creación de elementos ubicada en la barra de herramientas (Figura 7.6).



- Agregar una subcuenca (*subbasin*) al mapa de la cuenca**
- Agregar un río (*reach*) al mapa de la cuenca.**
- Agregar un reservorio (*reservoir*) al mapa de la cuenca**
- Agregar una unión (*junction*) al mapa de la cuenca**
- Agregar un desvío (*diversion*) al mapa de la cuenca**
- Agregar una fuente de agua (*source*) al mapa de la cuenca**
- Agregar una salida (*sink*) al mapa de la cuenca**

Figura 7.6. Barra de creación de elementos. Fuente: Scharffenberg et al. (2016).

Haga clic sobre el icono del elemento a crear y luego clic sobre el escritorio, nombre el elemento. Reitere la operación para cada uno de los elementos que desee crear (Figura 7.7).

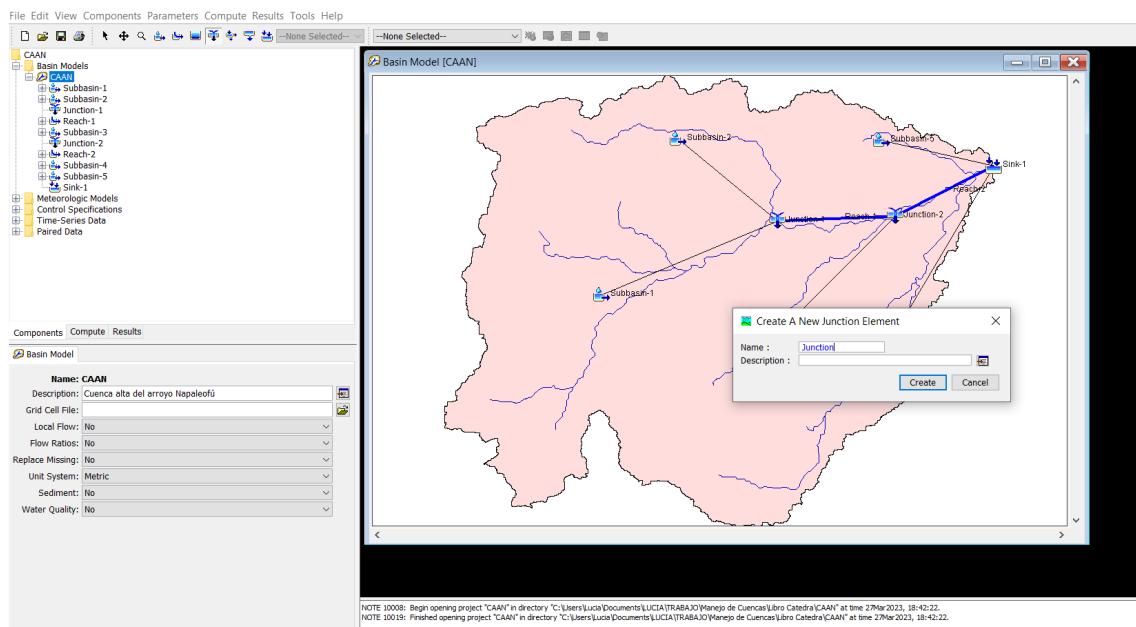


Figura 7.7. Creación de todos los elementos del modelo de cuenca.

4. Una vez creados los elementos del modelo de cuenca, debe editarlos a fin de darles sus características propias. Los elementos pueden ser editados de a uno, con el editor de componentes, o también desde la barra de menú asignar parámetros, a partir de un listado de elementos. A continuación, se detalla esta última opción.

Para asignar las áreas de las subcuencas haga clic en la barra de menú: *Parameters / Subbasin Area*. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignan las áreas de las subcuencas (Figura 7.8).

The dialog box has a title bar 'Subbasin Area [CAAN]'. At the top left is a dropdown 'Show Elements: All Elements'. At the top right is a dropdown 'Sorting: Hydrologic'. Below the table are two buttons: 'Apply' (highlighted in blue) and 'Close'.

Subbasin	Area (KM2)
Subbasin-1	123.2
Subbasin-2	60.3
Subbasin-3	46.6
Subbasin-4	75
Subbasin-5	25.2

Figura 7.8. Asignación de áreas de subcuencas.

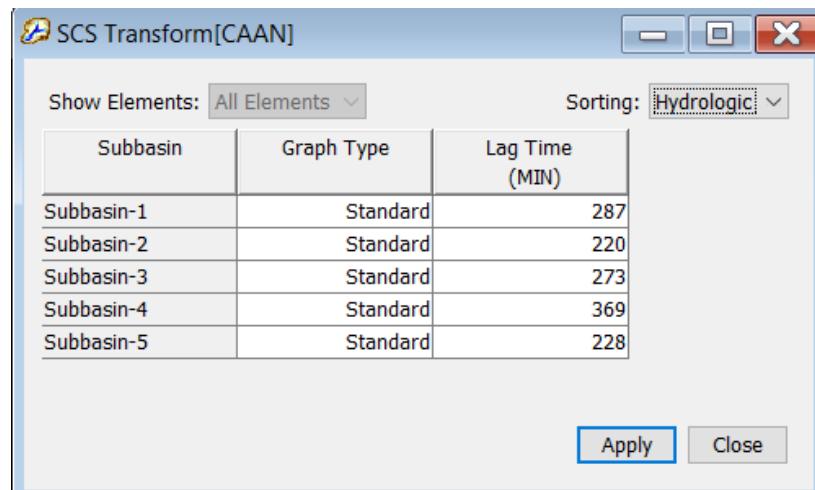
Para asignar los parámetros del método de transformación de lluvia – escorrentía, en este caso se aplicará el método del NC, haga clic en la barra de menú: *Parameters / Loss / SCS Curve Number*. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignan los números de curva de cada subcuenca. El cuadro de diálogo consta de 3 columnas para editar, la primera es la abstracción inicial, (si se deja vacía, HEC HMS la calcula como 0,2.S). La segunda es el NC ponderado para la subcuenca y la tercera corresponde al porcentaje de área impermeable presente en la cuenca (Figura 7.9). En el caso de existir dicha área, no debe ser incluida en el cálculo de ponderación, ya que se estaría ponderando dos veces en el cálculo.

The dialog box has a title bar 'Curve Number Loss [CAAN]'. At the top left is a dropdown 'Show Elements: All Elements'. At the top right is a dropdown 'Sorting: Hydrologic'. Below the table are two buttons: 'Apply' (highlighted in blue) and 'Close'.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
Subbasin-1		79	0.0
Subbasin-2		78	0.0
Subbasin-3		77	0.0
Subbasin-4		76.5	0.0
Subbasin-5		76	0.0

Figura 7.9. Asignación de Números de curva a las subcuencas.

Para asignar parámetros para el método de transformación de la escorrentía en hidrograma, en este caso se usará el del Hidrograma Unitario, haga clic en la barra de menú: *Parameters / Transform / SCS Unit Hydrograph*. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignan los valores de tiempo de retraso (Lag Time = Tlag) de cada subcuenca (Figura 7.10). Recordar de que el Tlag = 0,6 . Tc.



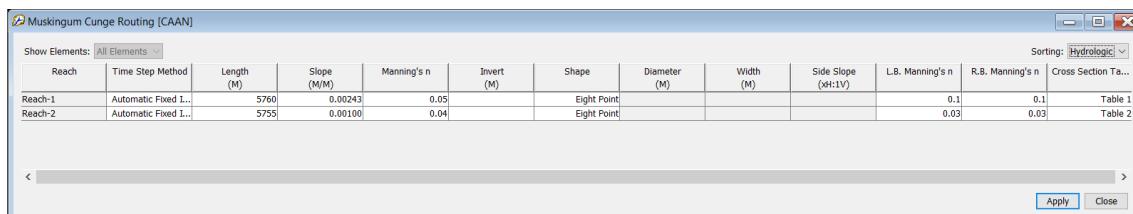
The dialog box has a title bar "SCS Transform[CAAN]" with standard window controls. Below it, there are two dropdown menus: "Show Elements: All Elements" and "Sorting: Hydrologic". A table lists five subbasins with their graph type and lag time in minutes:

Subbasin	Graph Type	Lag Time (MIN)
Subbasin-1	Standard	287
Subbasin-2	Standard	220
Subbasin-3	Standard	273
Subbasin-4	Standard	369
Subbasin-5	Standard	228

At the bottom are "Apply" and "Close" buttons.

Figura 7.10. Asignación de tiempos de retraso a las subcuencas.

Para asignar el método de traslado de caudales por el cauce a cada río modelado haga clic en la barra de menú: *Parameters / Routing / Muskingum Cunge*. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignan los valores de largo del cauce, pendiente, número de Manning del lecho y selección de tipo de conducto de los ríos. En el ejemplo de aplicación se utilizará el *Eighth Point* (Figura 7.11).



The dialog box has a title bar "Muskingum Cunge Routing [CAAN]" with standard window controls. Below it, there are two dropdown menus: "Show Elements: All Elements" and "Sorting: Hydrologic". A table lists two reaches with various parameters:

Reach	Time Step Method	Length (M)	Slope (M/M)	Manning's n	Invert (M)	Shape	Diameter (M)	Width (M)	Side Slope (xH:1V)	L.B. Manning's n	R.B. Manning's n	Cross Section Ta...
Reach-1	Automatic Fixed 1...	5760	0.00243	0.05		Eight Point				0.1	0.1	Table 1
Reach-2	Automatic Fixed 1...	5755	0.00100	0.04		Eight Point				0.03	0.03	Table 2

At the bottom are "Apply" and "Close" buttons.

Figura 7.11. Asignación de las características del cauce.

5. Conexión de los elementos: Consiste en asignarle a los elementos el sentido de flujo del agua, es decir hacia qué elemento circula el agua desde un elemento determinado. Para poder asignar esta conexión, haga clic en el explorador sobre el elemento a conectar. En el editor de componentes, seleccione del menú desplegable, ubicado a la derecha de *Downstream*, el elemento hacia el cual debe erogar el elemento seleccionado (Figura 7.12). Repita el proceso para todos los elementos.

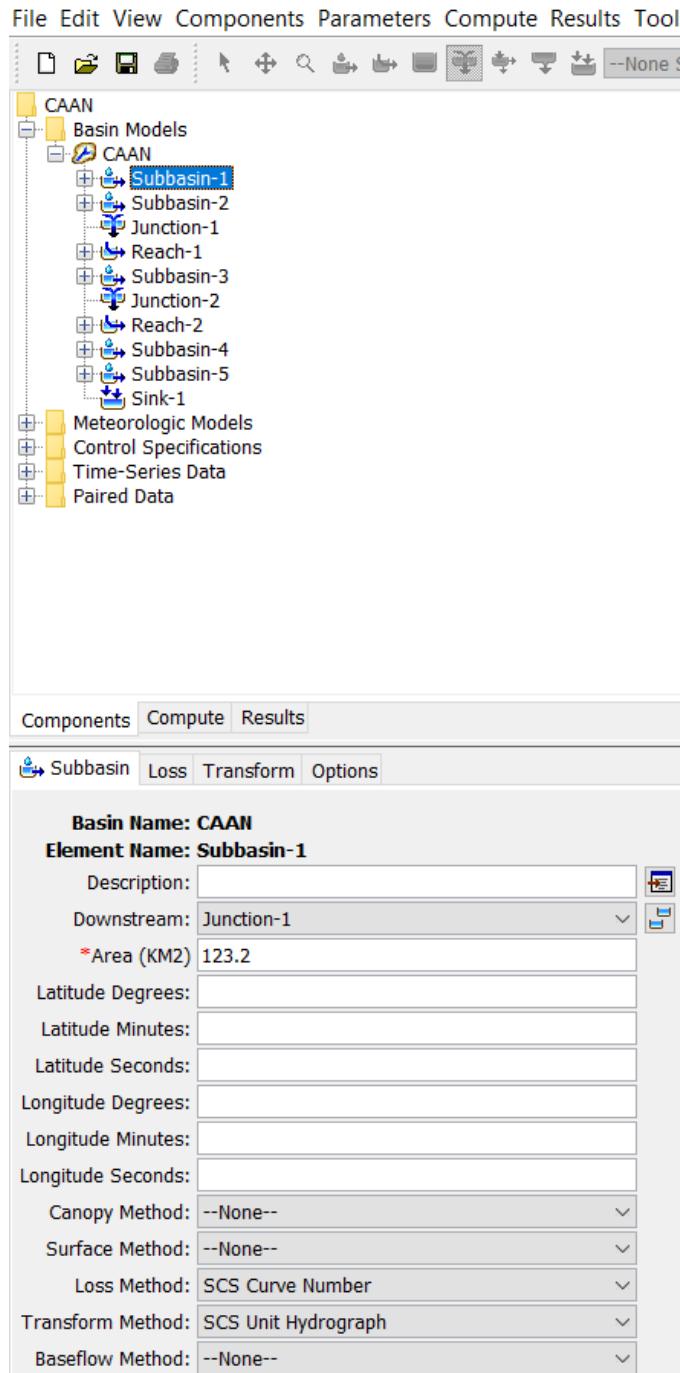


Figura 7.12. Conexión de elementos.

6. Para definición de las secciones (cortes transversales o perfiles) de los ríos, en la barra de menú haga clic en *Components / Paired Data Manager*. Aparecerá un cuadro de diálogo con un menú desplegable, seleccione *Cross Sections* y haga clic en *New...* asigne un nombre a la tabla (Figura 7.13). Repita la operación para la sección del otro río.

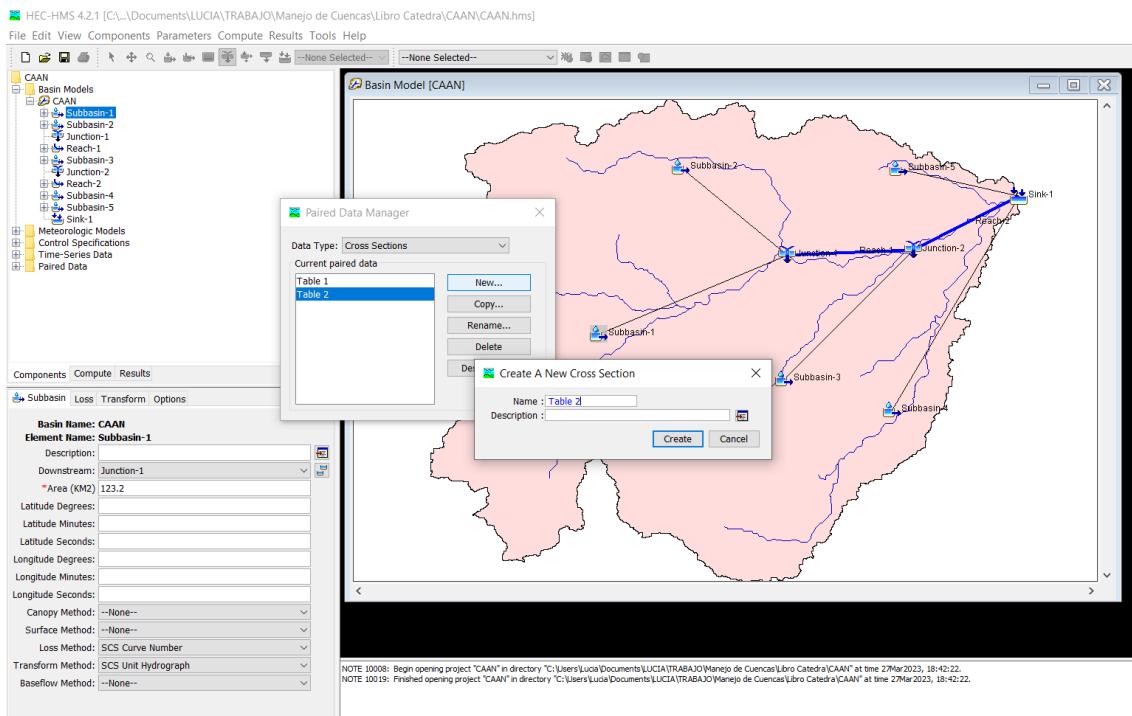


Figura 7.13 Creación de una tabla de perfil transversal al cauce.

Luego, deben editarse las secciones creadas: en el explorador abra la carpeta *Paired Data / Cross Sections*, allí estarán las tablas creadas anteriormente. Para cada tabla, en el editor de componentes, seleccione la solapa *Table* y complete las columnas con los valores distancia – elevación (*Station (M)*, *Elevation (M)* respectivamente) (Figura 7.14). Podrá visualizar el perfil en la solapa *Graph* del editor de componentes. Es importante recordar que los datos de elevación deben ser incorporados como cota sobre el nivel del mar.

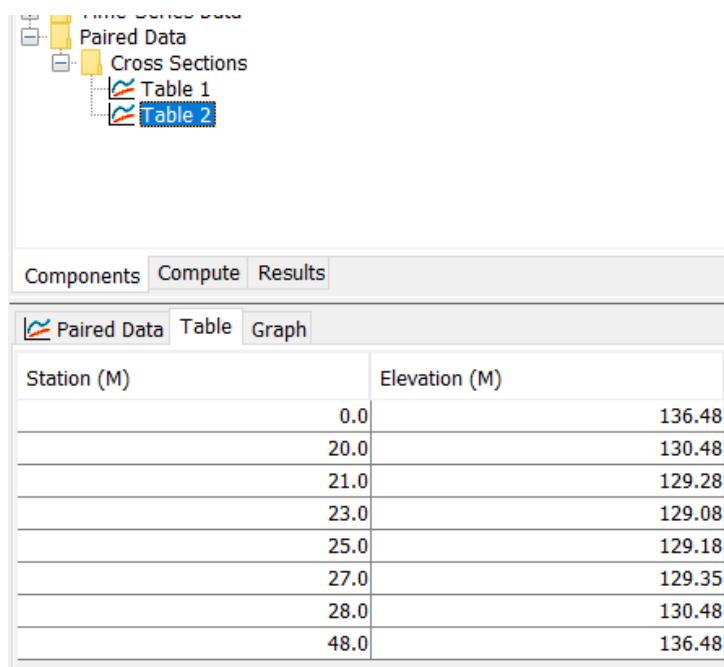


Figura 7.14. Asignación de valores de distancia – elevación del perfil.

Para asignar las tablas creadas a los ríos correspondientes, seleccione en el explorador dicho elemento, en el editor de elementos seleccione la solapa *Routing*, y en el ítem *Cross section* aparecerá un menú desplegable en el cual deberá seleccionar la tabla correspondiente al perfil de dicho cauce (Figura 7.15).

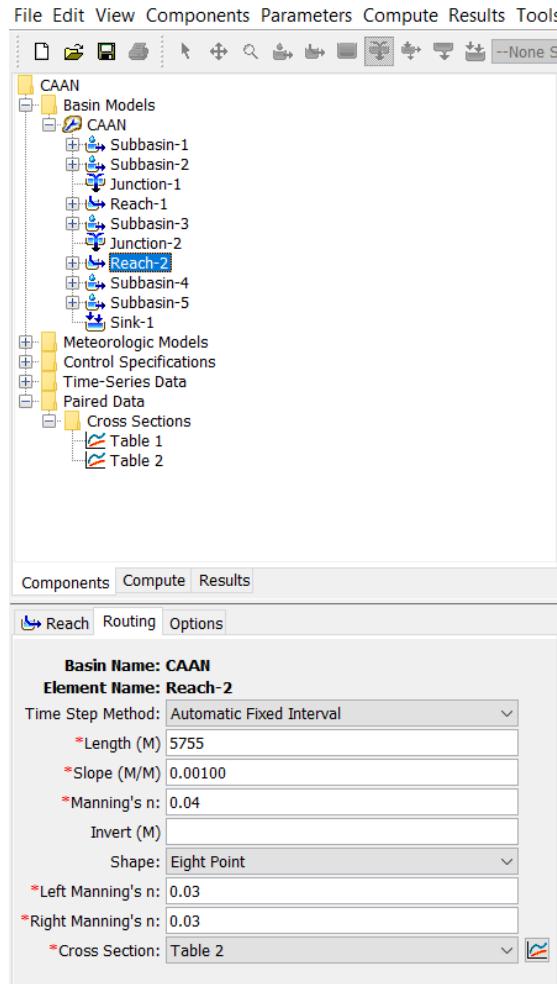


Figura 7.15. Asignación de números de Manning y del perfil transversal al río.

II. Creación de un modelo meteorológico

1. Para crear un modelo meteorológico, en la barra de menú, haga clic en *Components / Meteorologic Model Manager*. Se abrirá un cuadro de diálogo, haga clic en *New...* y nombre su modelo meteorológico (Figura 7.16).

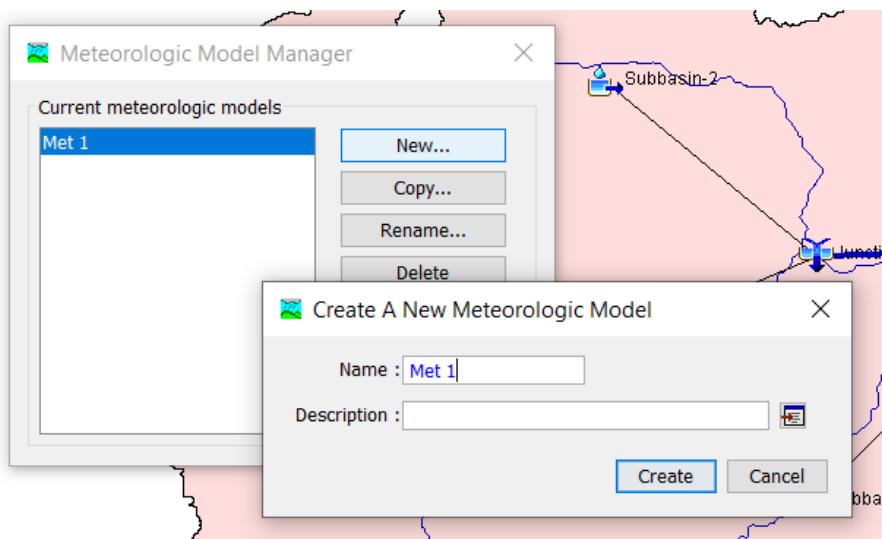


Figura 7.16. Creación de un modelo meteorológico.

2. Crear una tormenta para asociar al modelo meteorológico creado. Para crear una tormenta, en la barra de menú haga clic en *Components / Time-Series Data Manage*. Se abrirá un cuadro de diálogo con un menú desplegable, seleccione *Precipitation Gages* y haga clic en *New...* de nombre a la tormenta, repita el proceso para crear nuevas tormentas (Figura 7.17).

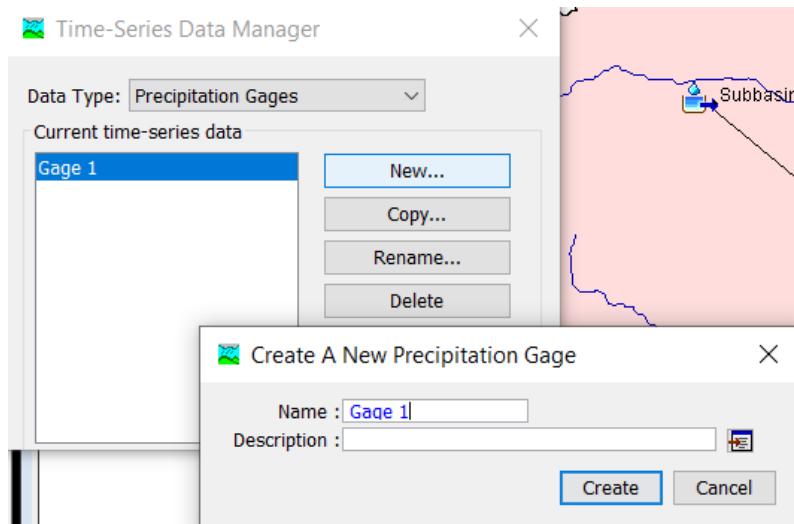


Figura 7.17. Creación de una tormenta.

3. Para asignar valores de precipitación a las tormentas creadas con anterioridad, en el explorador abra la carpeta *Time-Series Data / Pecipitation Gages* y haga doble clic sobre la tormenta a editar (aparecerá una fecha de inicio y fin de la tormenta por defecto) y luego selecciónela. En el editor de elementos seleccione la solapa *Time-Series Gage*, seleccione el tipo de unidades y el intervalo de tiempo a través de los menús desplegables. En este ejemplo de aplicación, se utilizará una curva de masa de lluvia, cuya unidad será *Cumulative millimeters* y el intervalo será de 30 minutos (Figura 7.18).

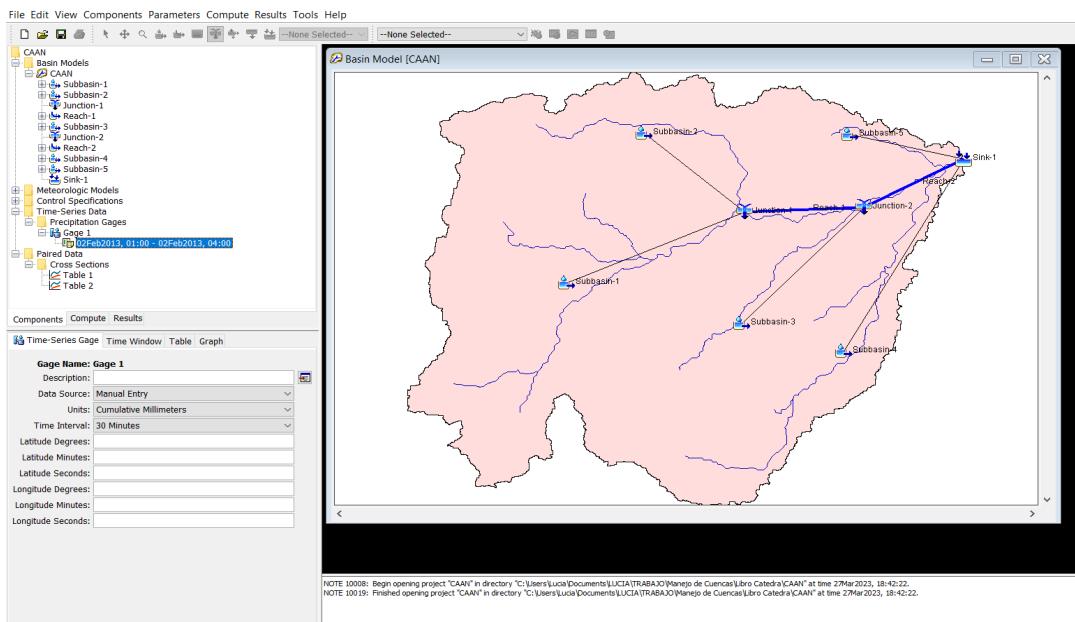


Figura 7.18. Asignación de día y hora de comienzo y fin de la precipitación.

Luego, en la solapa *Time Windows* asigne los datos de día y hora de comienzo (*Start Date*, *Start Time*) y fin (*End Date*, *End Time*) de la precipitación. En la solapa *Table* complete los valores de precipitación acumulada. Podrá visualizar el perfil en la solapa *Graph* del editor de componentes (Figura 7.19). Repita el proceso para cada una de las precipitaciones creadas con anterioridad.

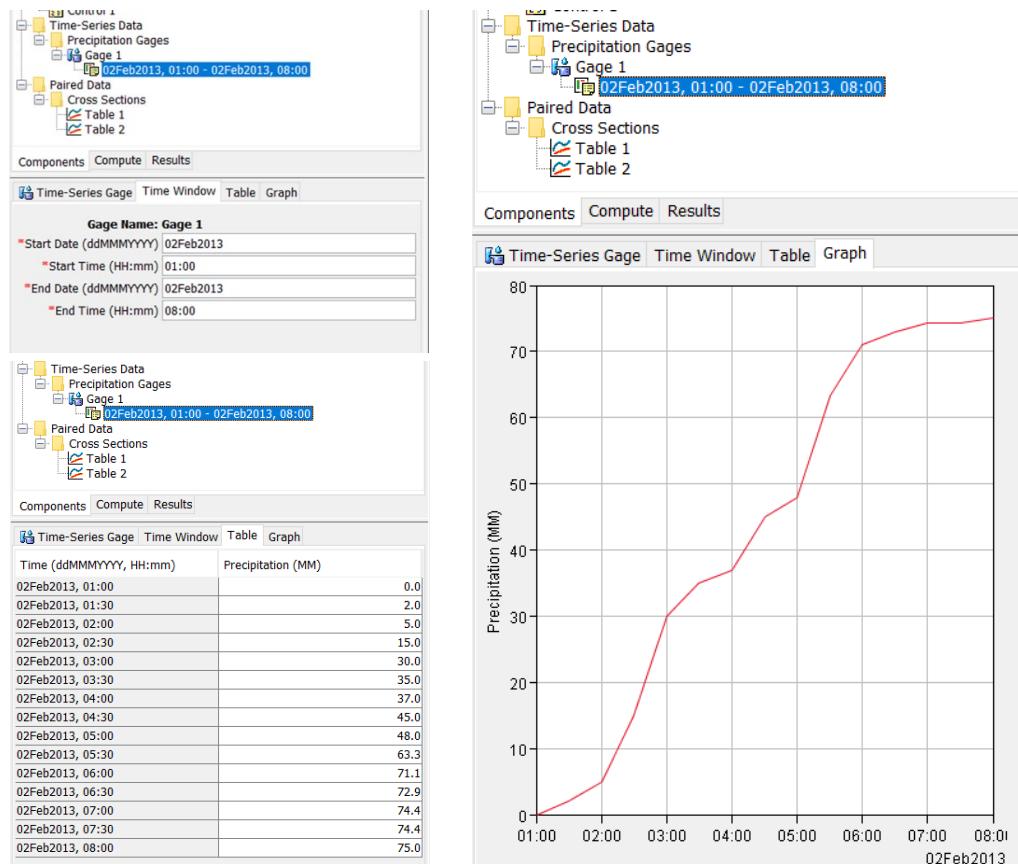


Figura 7.19. Asignación de las características de la tormenta.

4. En el explorador seleccione dentro de la carpeta *Meteorologic Models* el modelo meteorológico creado, dentro del editor de elementos seleccione la solapa *Basins* y del menú desplegable elija la opción *Yes* para incluir las subcuenas (Figura 7.20).

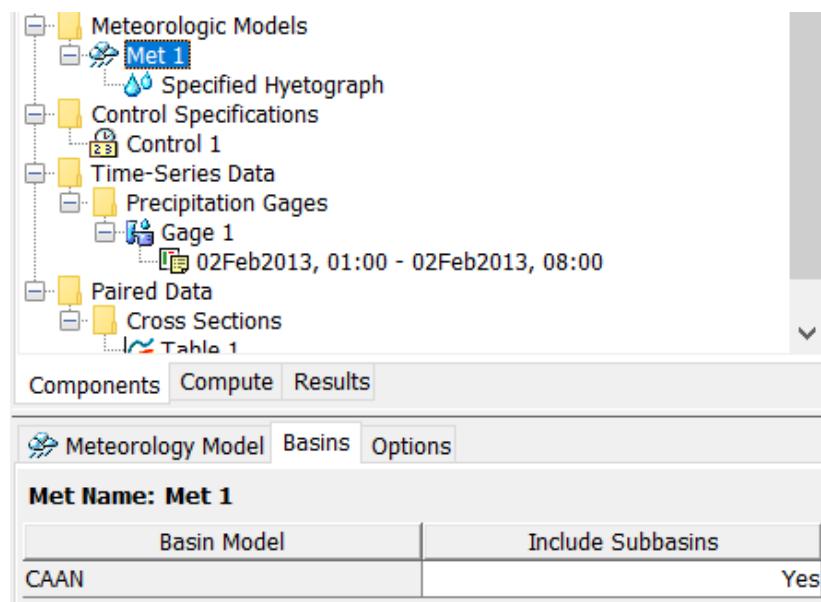


Figura 7.20. Inclusión de subcuenas al modelo meteorológico.

5. Haga doble clic en el modelo meteorológico creado y seleccione *Specified Hyetograph*. En el editor de elemento asigne, a través del menú desplegable, la tormenta que corresponda a cada subcuenca (Figura 7.21).

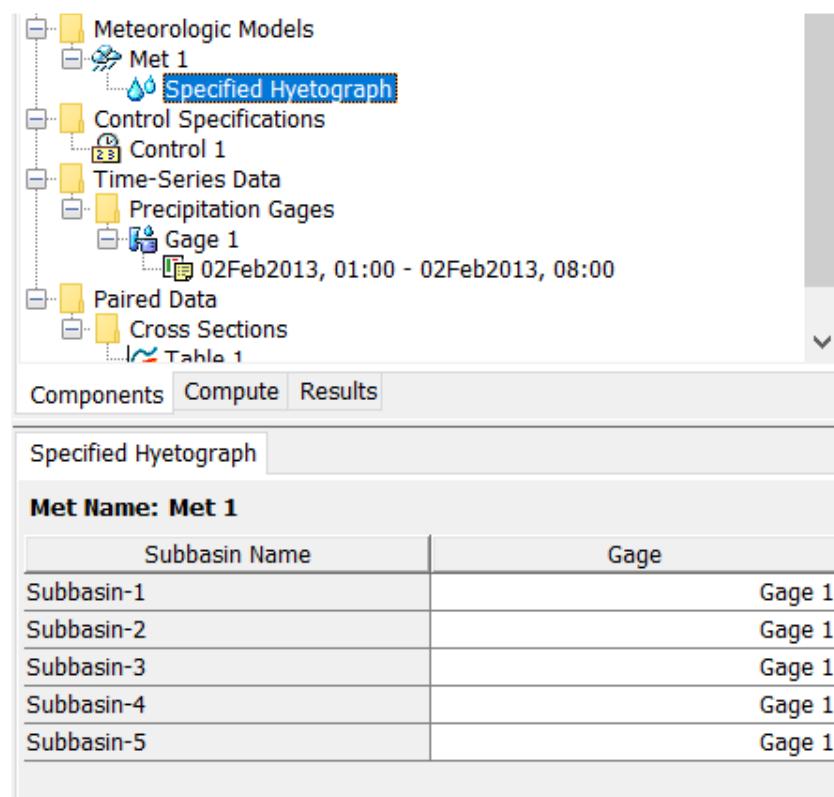


Figura 7.21. Asignación de tormentas a cada subcuenca.

III. Creación de las especificaciones de control

1. Para la creación de una especificación de control, en la barra de menú, haga clic en *Components / Control Specifications Manager*. Se abrirá un cuadro de diálogo, haga clic en *New...* y nombre su especificación de control (Figura 7.22).

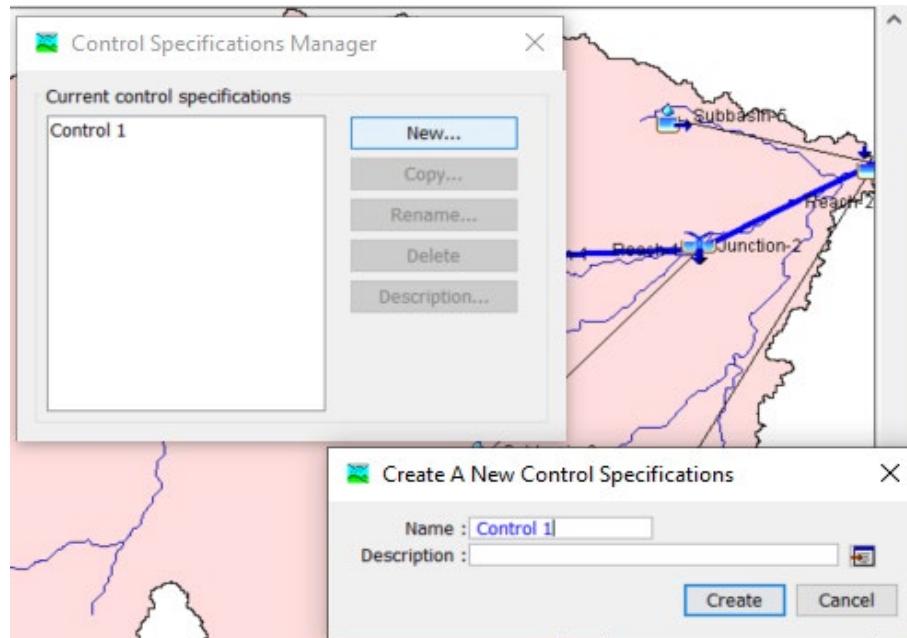


Figura 7.22. Creación de Especificaciones de control.

2. Asignar inicio y fin a la modelación, en el explorador seleccione la carpeta *Control Specifications* y haga doble clic sobre el control creado con anterioridad. En el editor de elementos, indique fecha y hora de comienzo (*Start Date*, *Start Time*) y fin (*End Date*, *End Time*) de los cálculos e intervalo de tiempo de cálculo (Figura 7.23).

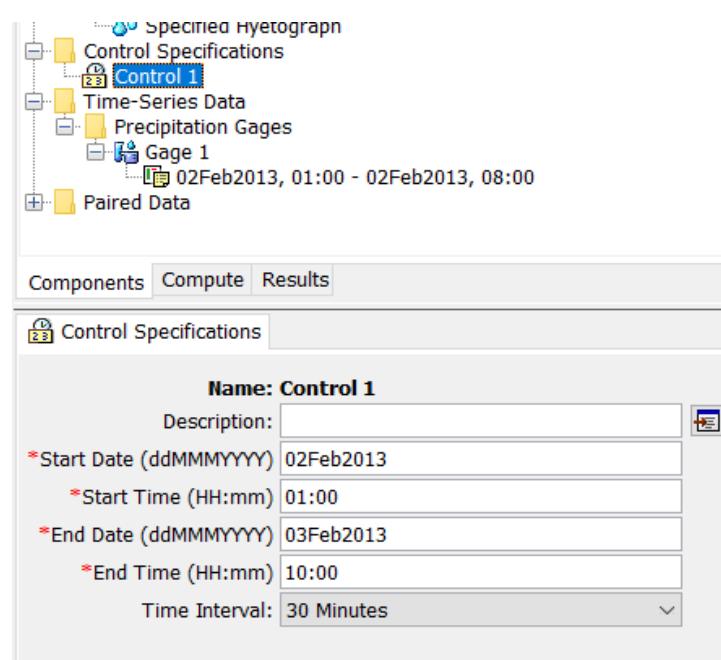


Figura 7.23. Asignación de comienzo y fin de la simulación e intervalo de tiempo de cálculo.

Nota: Recordar que las fechas establecidas en este paso deben abarcar las fechas que fueron asignadas a la tormenta y considerar la duración de la misma más el tiempo de concentración de la cuenca, para permitir el desarrollo completo de hidrograma a la salida.

IV. Creación de una simulación hidrológica

1. Para crear una corrida de simulación hidrológica, se debe seleccionar al programa cual es el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control que utilizará, ya que en un mismo proyecto pueden crearse uno o más de cada uno. Para nombrar y asignar las características de la simulación haga clic en *Compute* de la barra de menú y seleccione *Create compute / Simulation Run*. A continuación, se abrirá un cuadro de diálogo donde se le asignará un nombre (Figura 7.24).



Figura 7.24. Creación de una simulación hidrológica.

2. Haga clic en *Next >* para seleccionar el modelo de cuenca, de clic en *Next >* para seleccionar el modelo meteorológico, de clic en *Next >* para seleccionar las especificaciones de control y de clic en *Finish* para terminar. Aparecerá la simulación creada en la solapa *Compute* del explorador (Figura 7.25).

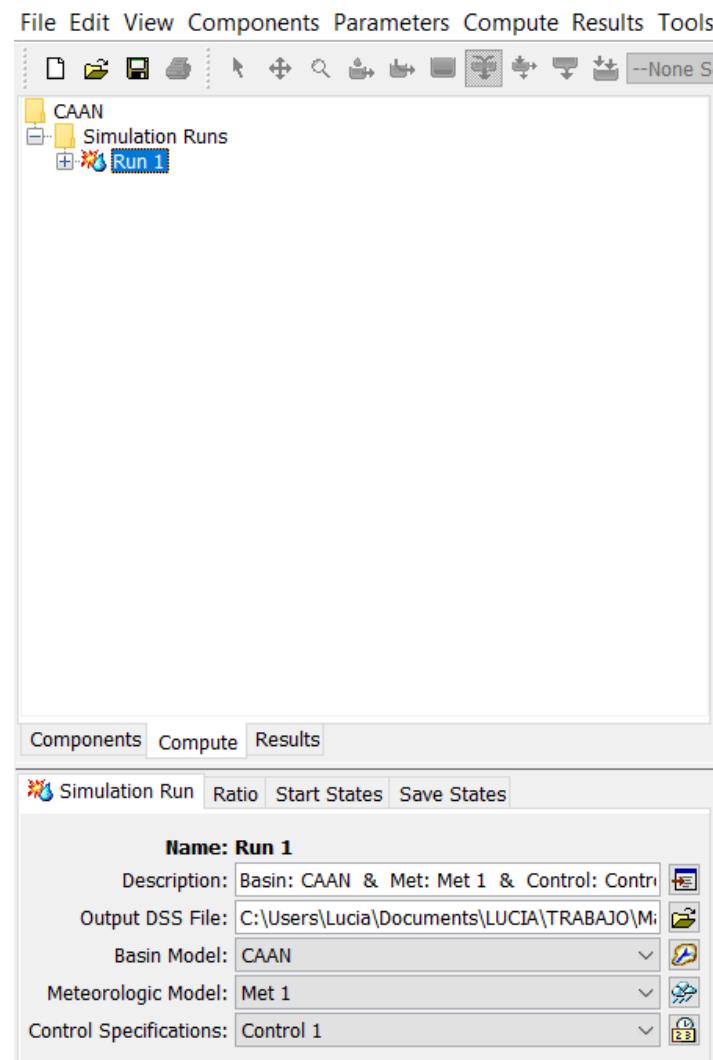


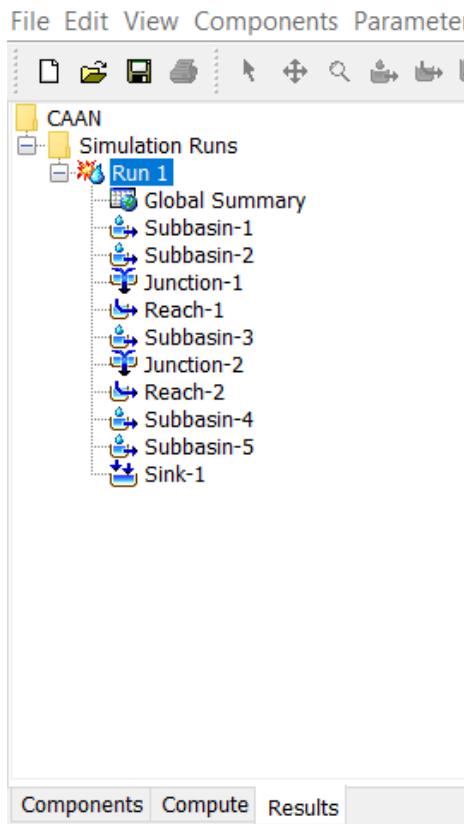
Figura 7.25. Visualización de la simulación creada.

3. Para ejecutar la simulación haga clic en *Compute* de la barra de menú y seleccione *Compute Run*, o haciendo clic derecho en la simulación creada con anterioridad y seleccionando *Compute*.

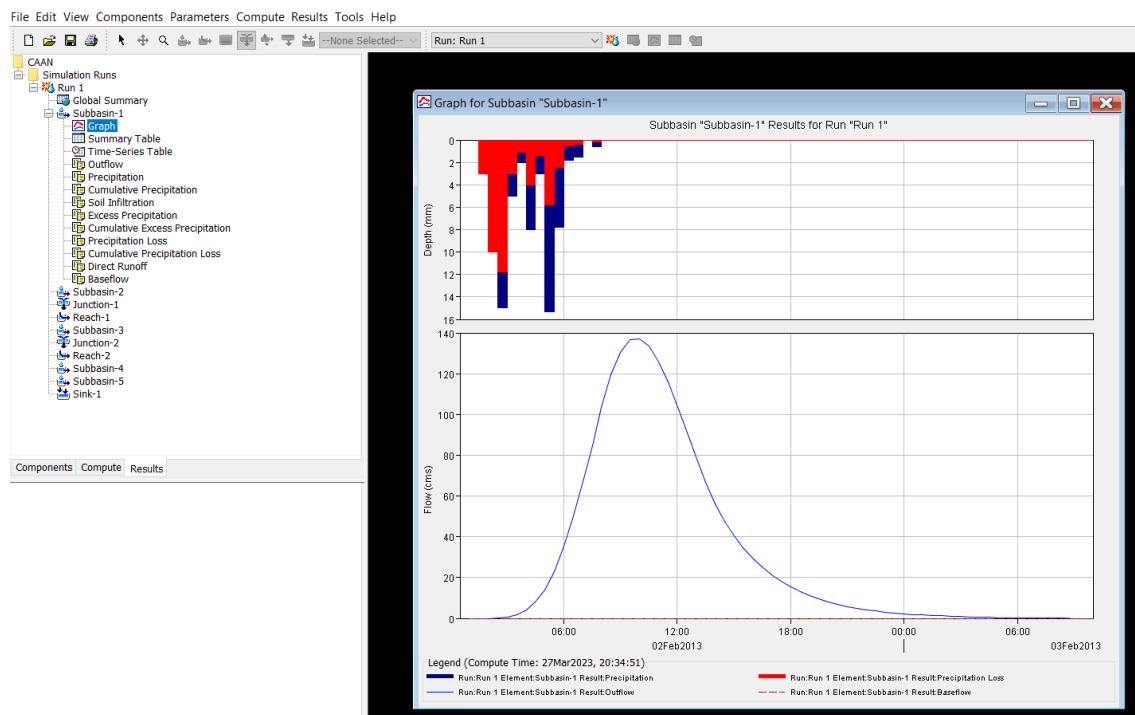
Nota: en la barra de mensajes se podrá observar en rojo si hubo algún error que impida realizar la simulación correctamente.

V. Visualizar los resultados de la simulación hidrológica

1. Haga clic en la solapa *Results* del explorador, dentro de la carpeta *Simulations Run* y luego abrir la simulación. Se desplegarán todos los elementos del modelo de cuenca y un resumen general (*Global Summary*). Podrá visualizar el hietograma e hidrograma en un mismo gráfico haciendo clic en *Graph* (Figura 7.26).

**Figura 7.26.** Visualización de resultados.

2. Se podrá visualizar el hietograma e hidrograma de cada una de las subcuenca, en un mismo gráfico, seleccionando *Graph*. (Figura 7.27).

**Figura 7.27.** Visualización del hietograma e hidrograma en un mismo gráfico de la subcuenca 1.

3. Haciendo clic sobre *Time-Series Table* de cada elemento podrán visualizar los resultados de las diferentes variables calculadas por el modelo en forma tabular, para cada intervalo modelado (Figura 7.28).

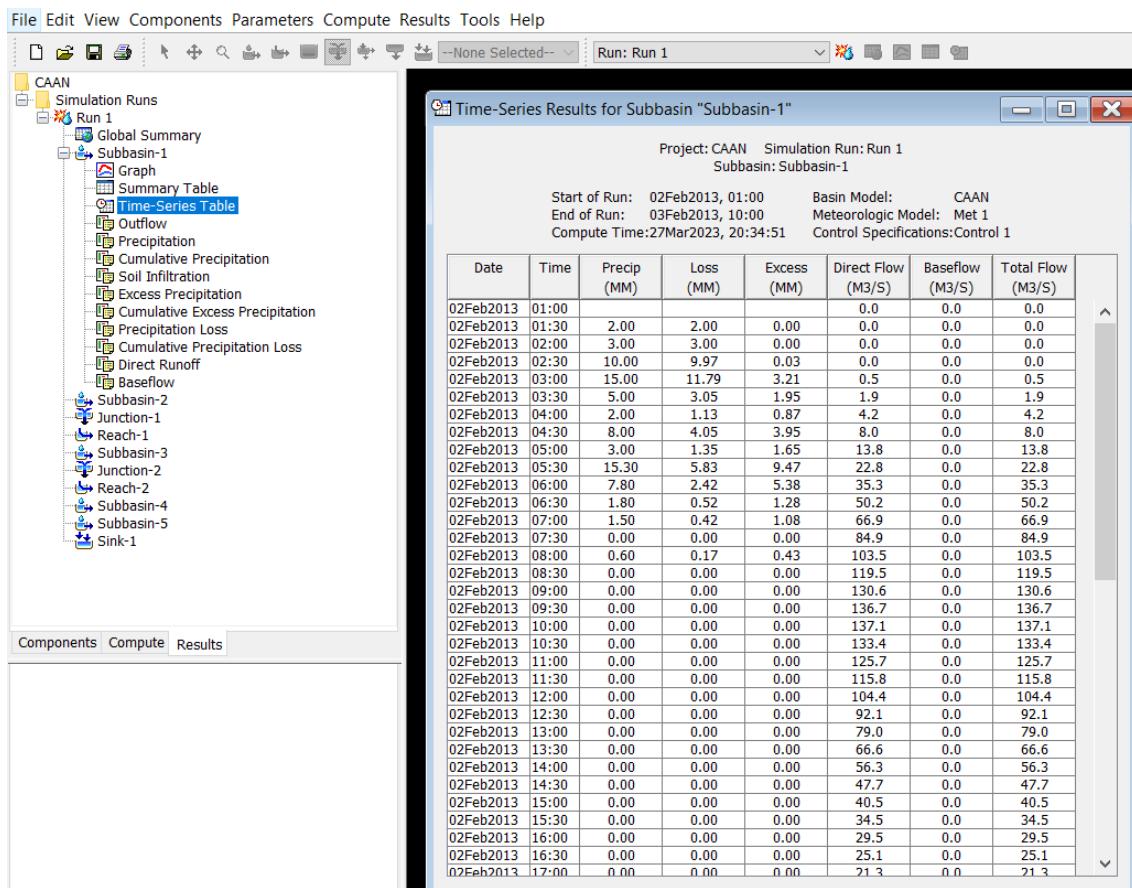


Figura 7.28. Visualización de los resultados en forma tabular de las diferentes variables calculadas.

Seleccionando cada elemento (*Outflow*, *Precipitation*, *Cumulative Precipitation*, etc.) podrán visualizar los resultados de las diferentes variables en forma gráfica. Además, haciendo clic sobre cada elemento podrá visualizar los resultados de las diferentes variables en forma gráfica o tabular, utilizando los iconos correspondientes de la barra de herramientas.

Los datos tabulares pueden ser copiados (*Copy*) o exportados (*Export*) haciendo clic en el botón derecho del mouse sobre la tabla y con los datos a copiar seleccionados (Figura 7.29).

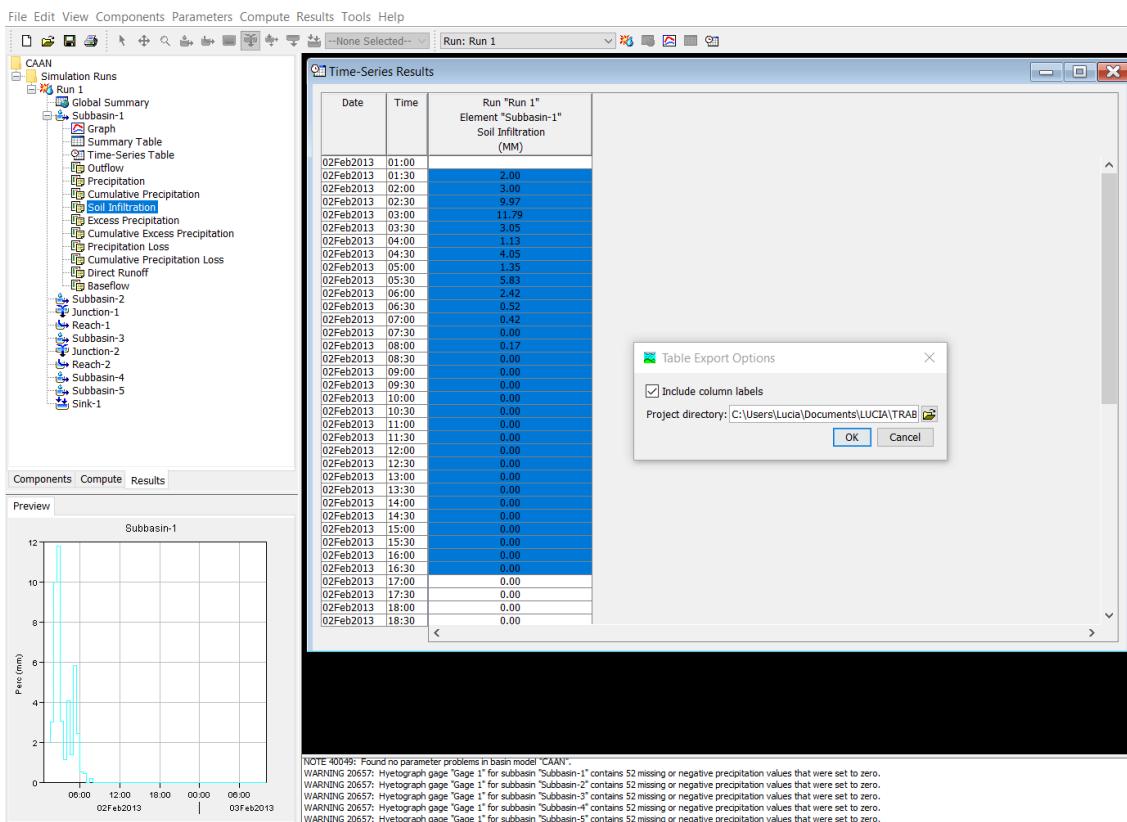


Figura 7.29. Exportación de resultados.

A continuación, se presenta a modo de resumen, la Figura 7.30 donde se exponen los datos básicos y las metodologías empleadas en el ejemplo de aplicación, como así también los resultados que otorga la modelización con el HEC-HMS 4.2.1 ®. (Gaspari et al., 2013).

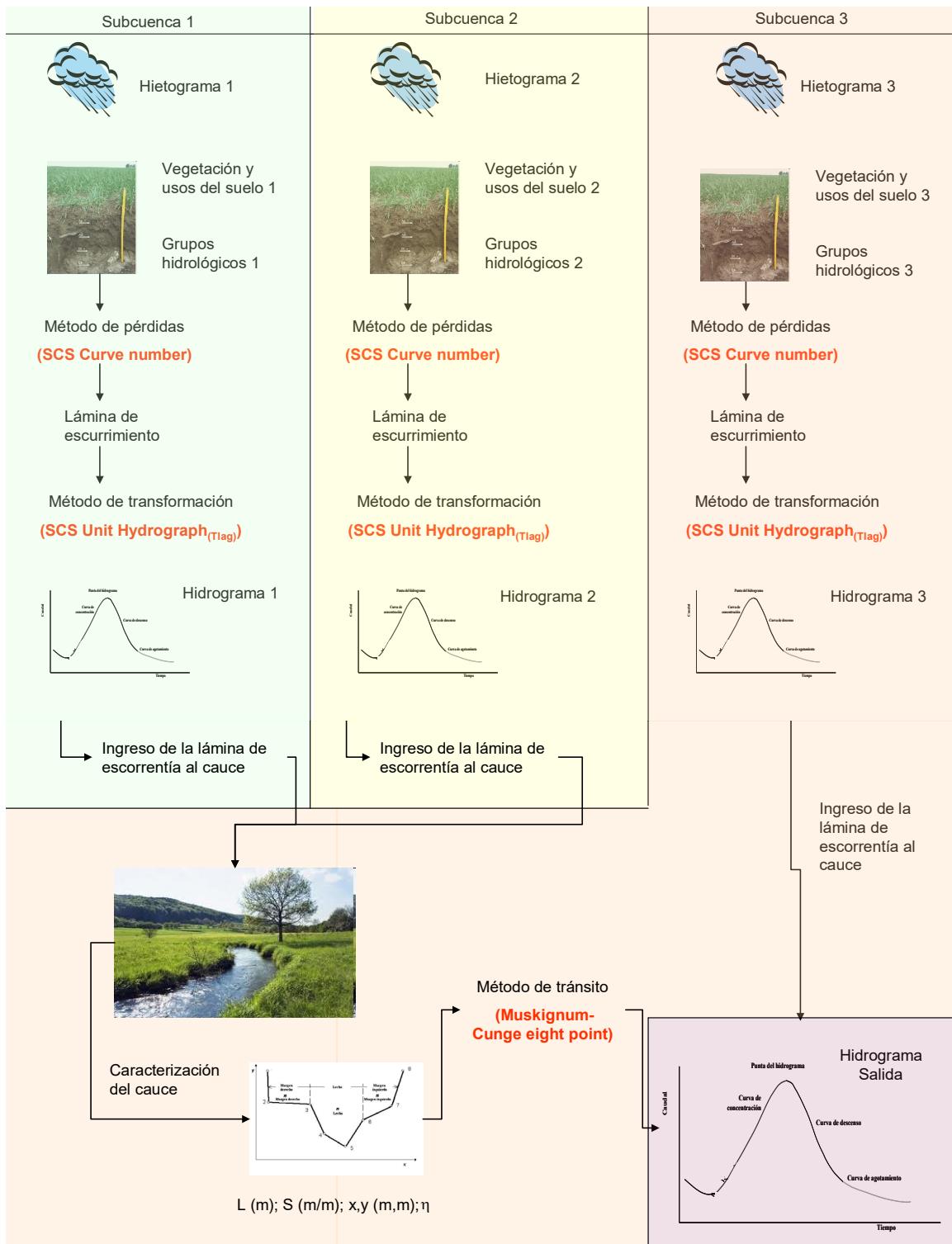


Figura 7.30. Cuadro resumen de la modelación con HEC-HMS ®. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Referencias

Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez Vagaría, A., Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. EDULP, Universidad Nacional de La Plata. Pp 191.

Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Arapa Guzman, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., Bonnesoeur, Bonnesoeur, V. (2022). *Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural*. Forest Trends, Lima, Perú.

Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., Karlovits, G. (2016). *Hydrologic modeling system HEC–HMS user's manual*. U.S. Army Corps of Engineers – Institute for Water Resources – Hydrologic Engineering Center (CEIWR– HEC). CPD–74A.

CAPÍTULO 8

Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial

María Isabel Delgado

La erosión del suelo representa un peligro para la seguridad alimentaria e hídrica (Batista et al., 2019) tanto a nivel local como global, ya que, por ejemplo, reduce la profundidad del suelo, aumentando la pérdida de suelo y disminuyendo la capacidad de los suelos para almacenar agua (Li et al., 2009). Al mismo tiempo, la producción y transporte de sedimentos puede afectar negativamente a diversos parámetros en una cuenca hidrográfica, provocando, entre otros efectos adversos, la disminución de la capacidad de almacenamiento de los embalses.

Se considera que la erosión hídrica del suelo es el proceso de disagregación y transporte de las partículas de suelo por la acción del agua, implicando el desprendimiento de sedimentos de la superficie, incluido el impacto de las gotas de lluvia y también del agua que fluye (Jain y Kothyari, 2000). Se establece cuando las gotas de lluvia caen sobre un suelo y tienen la suficiente energía para remover sus partículas, las que son liberadas y transportadas por el escorrentío superficial hacia los cursos de agua. 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 (Gaspari et al., 2013).

Los procesos de erosión se ven fuertemente afectados por muchos factores, además de las precipitaciones (Fang et al., 2013). En zonas con procesos de cambio de uso del suelo, las interacciones entre el tipo de suelo, el uso del suelo, y la producción y transporte de sedimentos, pueden ser sumamente complejas (Tramblay et al., 2010). Además de la erosión geológica, las prácticas humanas como la tala de bosques, la agricultura, la ganadería, la minería y la urbanización podrían inducir un proceso de erosión más rápido y perjudicial (El-Sawy et al., 1982). Los cambios en el uso del suelo pueden aumentar la sensibilidad de los paisajes a las perturbaciones, haciéndolos más vulnerables a fenómenos extremos (Boardman, 2006). Otros usos del suelo, como por ejemplo la urbanización -debido a su efecto impermeable o semi-impermeable-, contribuyen a generar más escorrentía y a aumentar los caudales pico, con el consiguiente aumento de la frecuencia de las inundaciones, de los procesos erosivos y, también, del transporte de algunos contaminantes (Pappas et al., 2008).

De acuerdo a Gaspari et al. (2013), los factores físicos que intervienen en la erosión hídrica son los siguientes:

Factores climáticos: la lluvia, con sus variaciones locales en cuanto a cantidad, intensidad y distribución, y la temperatura con su acción directa sobre las formas de vida.

Factor de cobertura vegetal: la parte aérea de la cubierta vegetal y su arquitectura foliar y caulinar interceptan la lluvia, amortiguando su fuerza de impacto de las gotas sobre el suelo, contribuyendo a disminuir su energía cinética inicial. 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.

Factores edáficos: en 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 los principales factores determinantes de la erosión de los mismos.

Factores topográficos: la inclinación del terreno incide en la erosión debido a que las pérdidas de suelo son mucho mayores en los terrenos de pendiente abrupta e irregular. La longitud de la pendiente también toma notable relevancia en cuanto a la determinación de la pérdida de suelo en una ladera. Por su parte, la orientación de las laderas se relaciona con las condiciones climáticas para el desarrollo de la cobertura vegetal y con el contenido de humedad del suelo, entre otros.

La utilización de modelos empíricos

Es necesario estudiar y comprender bien cómo afecta la erosión a la productividad de los suelos en diferentes condiciones de cultivo, para poder desarrollar estrategias de gestión duraderas (Li et al., 2013). El surgimiento de la utilización de fórmulas empíricas a mediados del siglo XX planteó el comienzo en la implementación de distintos métodos de determinación de caudales sólidos, dando lugar a partir de la década de 1970 a la implementación de modelos paramétricos complejos a escala de cuenca hidrográfica (Gaspari et al., 2013).

Entre los modelos disponibles para determinar la erosión del suelo y la producción de sedimentos, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) creada por Wischmeier y Smith (1978) y sus versiones modificadas y revisadas son algunos de los modelos más utilizados a nivel mundial (Sadeghi, 2004; Sinshaw et al., 2021). El modelo USLE predice la erosión del suelo, de modo de poder contribuir a la planificación para la conservación del mismo (USDA, 1997). El concepto de modelo no se basa en la descripción y simulación de procesos, sino en la comprensión de un proceso, la captura de los parámetros medibles y la delineación de un algoritmo matemático (Alewell et al., 2019).

Considerando áreas con escasez de datos, la USLE y sus versiones revisadas parecen ser adecuadas para alcanzar una estimación preliminar de la erosión del suelo (Kamamia et al., 2022). En un estudio a nivel global, Borrelli et al. (2013) estimaron que, en América del Sur, durante el período de 2001 a 2012, se produjo un aumento del 8% en la erosión del suelo como resultado asociado al cambio de uso del suelo, principalmente atribuido a la deforestación y la expansión de las áreas cultivadas en Argentina (41,6%), Brasil (19,8%), Bolivia (37,8%) y Perú (5,9%). En Argentina se cuenta con estudios científicos específicos sobre erosión y pérdida de suelo a escala nacional y regional (Irurtia et al., 2007; Gaitán et al., 2017; Casas et al., 2022).

El Modelo USLE

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) propuesta por Wischmeier y Smith en 1978 utiliza información relativa a las precipitaciones, características edáficas, gradiente y longitud de laderas, junto a las características propias del uso del suelo y las prácticas de conservación (Ecuación 8.1).

La ecuación puede aplicarse cuando la erosión es laminar y en surcos, cuando la producción de sedimentos se origina en terrenos con pendiente conocida y en canales simples y canales de terraza. No se puede utilizar para cuantificar erosión en barranco, para erosión del cauce o pérdida de masa de sedimentos en profundidad (Gaspari et al., 2013).

$$A = R * K * LS * C * P \quad \text{Ecuación 8.1}$$

Donde:

A: pérdida de suelo por unidad de área ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$)

R: factor de erosionabilidad del aguacero ($M.J.mm.ha^{-1}.h^{-1}.año^{-1}$)

K: factor de erodabilidad del suelo ($Mg.ha.h.MJ^{-1}.ha^{-1}.cm^{-1}$)

LS: factor topográfico (adimensional)

C: factor de ordenación de cultivos (adimensional)

P: factor de prácticas de cultivo (adimensional)

Se describen a continuación los factores interviniéntes en la ecuación:

* **R índice de erosión pluvial o factor de erosionabilidad de los aguaceros ($J.cm.m^{-2}.h^{-1}$)** definido como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos. Expresa la fuerza erosiva de una determinada lluvia y representa su potencial para erosionar superficialmente el suelo. Este factor se calcula a partir de registros pluviográficos históricos de más de 30 años, aplicando el siguiente procedimiento:

Se calcula el índice de erosividad para un evento (EI_{30}), expresado en ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$), a partir de la Ecuación 8.2.

$$EI_{30} = Ec \times I_{30} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

En donde:

Ec = energía cinética liberada por la lluvia ($MJ.ha^{-1}$)

I_{30} = máxima intensidad de la precipitación en un intervalo de 30 minutos ($mm.h^{-1}$)

Tener en cuenta que la Ec se calcula a partir de la ecuación 8.3.

$$EC = \sum_{j=1}^n (210,2 + 89\log I) \times (I \times T)$$

$$\quad \text{Ecuación 8.3}$$

Donde:

$$(210,2 + 89\log I) = \text{energía cinética de la lluvia (J.cm}^{-1}.\text{m}^2)$$

T= período de tiempo, para intervalos homogéneos de lluvia durante el evento (h)

I= intensidad de la lluvia en el intervalo (cm.h⁻¹)

Se debe obtener la sumatoria de todos los EI₃₀ correspondientes a cada uno de los eventos del año (Ecuación 8.4), lo cual brindará el valor del índice de erosividad anual de la lluvia (R). Luego se calcula el valor promedio del factor R para el período de años en estudio.

$$R = \sum_{j=1}^n EI_{30}$$

Ecuación 8.4

Siendo n el número de eventos durante el año.

Si bien existen trabajos locales como los de Rojas y Conde (1985) e Irurtia et al. (2007), que abordan la determinación del factor R y son considerados de referencia en la región, su información no se encuentra disponible en formato digital georreferenciado. Por su parte, Gaitán et al. (2017) han establecido su valor en todo el territorio nacional (Figura 8.1).

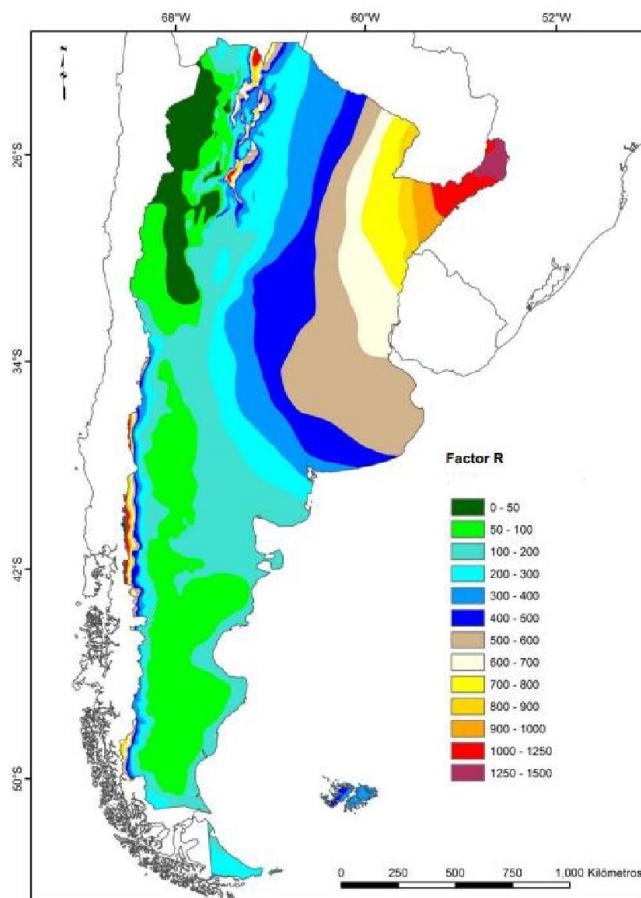


Figura 8.1. Factor R (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹). Fuente: Gaitán et al. (2017).

Actualmente existen diversas alternativas para el cálculo del factor R, e incluso determinaciones a nivel mundial generadas a partir de información satelital, como las elaboradas por Panagos et al. (2017) (Figura 8.2). Por su parte, Bezak et al. (2022) mencionan que, a pesar

de la subestimación de la erosividad de las precipitaciones en algunas partes del mundo, los productos de precipitación basados en satélites tienden a ser una opción interesante para la estimación de la erosividad de las precipitaciones, especialmente en regiones con datos terrestres limitados. Sin embargo, se debe tener presente que en algunas regiones, estos productos requieren una corrección adicional para eliminar el posible sesgo.

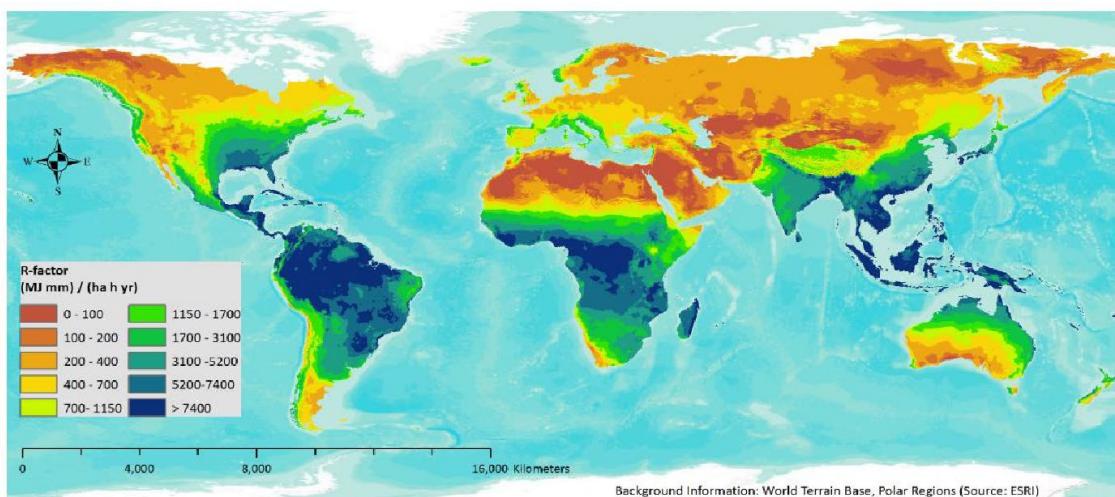


Figura 8.2. Factor R a escala global ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$), disponible para su descarga. Fuente: Panagos et al. (2017).

* **K erodabilidad del suelo** ($Mg \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$): indica la aptitud o resistencia del suelo a la erosión. Refleja la acción combinada de distintas propiedades como la permeabilidad, contenido de materia orgánica, textura y estructura. Su cálculo se realiza a partir de la ecuación 8.5.

$$100 \times K = 10^{-4} \times 2,71 \times M^{1,14} \times (12 - C) + 4,20 \times (b - 2) + 3,23 \times (c - 3) \quad \text{Ecuación 8.5}$$

Donde:

M = (% limo + % arena muy fina) x (100 - % arcilla), expresándose también como (% partículas entre 0,002 y 0,1 mm) x (% partículas entre 0,002 - 2,0 mm)

a = Porcentaje de materia orgánica = Porcentaje de Carbono Orgánico x 1,724

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

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta

5. Lenta
6. Muy lenta

En ocasión de no contar con información concerniente la estructura y la permeabilidad del suelo, se puede aplicar la fórmula simplificada para el cálculo del factor K (ecuación 8.6).

$$100 \times K = 10^{-4} \times 2,71 \times M^{1,14} \times (12 - a)$$

Ecuación 8.6

En la práctica, para la República Argentina la obtención de los datos necesarios para la determinación de este factor puede efectuarse a partir de la información proveniente del mapa de suelos elaborado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), a escala 1:50.000. La descripción de las series de suelos se encuentran disponibles en sitios como: <https://zenodo.org/record/6353509#.YyDOHHbMK3D> o <http://sisinta.inta.gob.ar/es/series/908>.

* **LS Factor topográfico (adimensional)**: se define como la relación entre la pérdida de suelo para una longitud determinada y la pérdida para una longitud de 22,1 m del mismo tipo de suelo, ya que, para su determinación Wischmeier y Smith definieron parcelas con dimensiones de 22,1 m y pendiente de 9 %, a igualdad de los demás factores intervinientes en la ecuación USLE.

L longitud de la pendiente: es la distancia desde el origen del escorrentimiento (o punto más alto de caída de la gota de lluvia) hasta el inicio de la deposición de sedimentos, o hasta que el escorrentimiento se concentre en un cauce.

S gradiente de la pendiente: es la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9%, del mismo tipo de suelo.

En la Figura 8.3 se muestra la representación gráfica del efecto de la pendiente y la longitud de ladera.

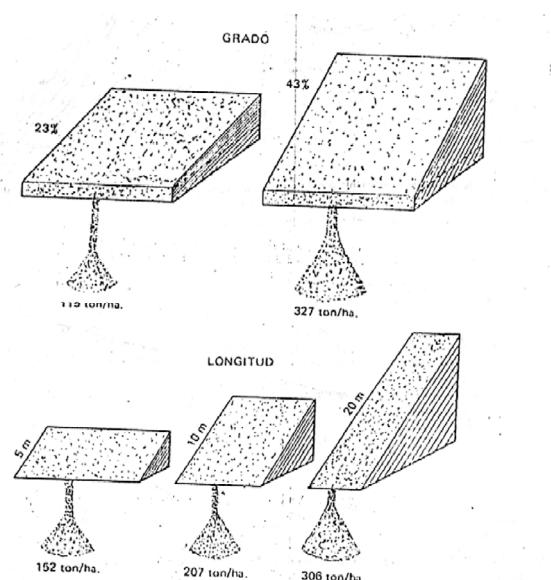


Figura 8.3. Efecto de la pendiente (gradiente o longitud) sobre las pérdidas de suelo por escorrentimiento. Fuente: Cenicafé (1975).

El cálculo del factor LS comprende una serie de ecuaciones: primero debe establecerse el valor correspondiente a la longitud de la ladera (λ) (ecuación 8.7), y además, el valor de la pendiente media por subcuenca (s_i) y de la pendiente media ponderada por cuenca (S), utilizando las ecuaciones 8.8 y 8.9, respectivamente.

$$\lambda = \frac{0,5 \times DA}{LCH}$$

Ecuación 8.7

Donde:

λ = longitud de la ladera

DA= área del sector delimitado

LCH= longitud total de los cursos que drenan

$$s_i = \left\lceil \frac{H \times (LC_i \times LC_{i+1})}{(2 \times DA_i)} \right\rceil$$

Ecuación 8.8

Donde:

s_i = pendiente media para el área i, entre los contornos j y (j + 1)

H= diferencia de cota entre contornos

LCi= longitud del contorno j

DAi= área entre los contornos j y (j + 1)

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i \times DA_i}{DA} \right)$$

Ecuación 8.9

Donde S= pendiente media ponderada por cuenca.

Posteriormente, se calcula el valor del factor LS (ecuaciones 8.10 y 8.11), dependiendo del valor de la pendiente del terreno, sea con pendientes menores a 9 % o mayores a 9 %, respectivamente.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} \times \left(\frac{0,43 + 0,3 \times S}{6,613} \right)$$

Ecuación 8.10

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} \times \left(\frac{S}{9} \right)^{1,3}$$

Ecuación 8.11

Otra alternativa utilizada para obtener el factor LS se basa en la metodología propuesta por Mintegui Aguirre (1988), la cual permite establecer el factor LS directamente en base al rango de pendiente en que se encuentre un área determinada, de acuerdo a la relación de correspondencia expresada en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Factor LS de acuerdo a rangos de pendiente expresados en %. Fuente: adaptado de Mintegui Aguirre (1988).

Rango de pendiente (%)	Factor LS
0-3	0,3
3-12	1,5
12-18	3,4
18-24	5,6
24-30	8,7
>30	14,6

* **C cultivo y ordenación (adimensional)**: expresa la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado o con vegetación en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes a una parcela, en idénticas condiciones de lluvia, suelo y topografía, pero sometida a barbecho continuo.

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 está representado por el factor de ordenación de cultivos (C). Este factor considera la protección que la vegetación proporciona al suelo, el efecto beneficioso que se produce contra la erosión y los efectos que los residuos de la vegetación tienen en la protección del suelo. Se determina experimentalmente para cada clase de cobertura vegetal.

Se presentan a continuación las Tablas 8.2 y 8.3 (extraídas de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990) y Gaspari et al. (2013)), con los valores medios anuales de Factor C.

El uso del suelo puede obtenerse a partir de determinaciones propias, dependiendo el grado de detalle alcanzado el objetivo de la investigación que se esté desarrollando. Otra posible fuente de obtención de mapas de uso del suelo, a escala mundial, es a partir de Esri (2022), donde se divide a la Tierra en 10 clases de uso y cobertura del suelo. Dicha información se encuentra disponible para el período 2017 - 2021, para ser descargada desde: <https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2>. Además, a escala local puede ser de utilidad contar con la información desarrollada por el INTA, correspondiente al Mapa Nacional de Cultivos: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2021/09/07/mapa-nacional-de-cultivos-campana-2020-2021/>.

Tabla 8.2. Valores de Factor C.

Cobertura vegetal	Factor C
Arbolado forestal denso	0,01
Arbolado forestal claro	0,03
Matorral con buena cobertura	0,08
Matorral ralo y eriales	0,20
Cultivos arbóreos y viñedos	0,40
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Cultivos en regadío	0,04

Tabla 8.3. Factor C. Valores (en 10^{-3}) para pastizales, matorrales y arbustos.

Considerar G: cubierta vegetal en contacto con el suelo, formada por pastizal de al menos 5 cm de humus, y W: cubierta vegetal en contacto con el suelo compuesta por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer.

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 matojos ($\leq 0,5$ cm)	25	G	450	200	100	042	013	003
		W	450	240	150	090	043	011
	50	G	360	170	090	038	012	003
		W	360	200	130	082	041	011
Plantas herbáceas y matojos ($\leq 0,5$ cm)	75	G	260	130	070	035	012	003
		W	260	160	110	075	039	011
	25	G	170	100	060	031	011	003
		W	170	120	090	067	038	011
Matorral (≤ 2 m)	50	G	400	130	090	040	013	003
		W	400	220	140	085	042	011
	75	G	340	160	085	038	012	003
		W	340	190	130	081	041	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable (≤ 4 m)	25	G	280	140	080	036	012	003
		W	280	170	120	077	040	011
	50	G	420	190	100	041	013	003
		W	420	230	140	087	042	011
	75	G	390	180	090	040	013	003
		W	390	210	140	083	042	011

* **P prácticas de conservación del suelo (adimensional):** es el factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo y abarca la relación entre las pérdidas de suelo para diferentes labores conservacionistas, y las correspondientes a un cultivo en surcos según la máxima pendiente, a igualdad de los restantes factores climáticos, edáficos, topográficos y de cobertura vegetal y uso del suelo. Los valores de P se determinaron en forma experimental para distintos tipos de prácticas de conservación, empleándose para los ensayos parcelas de 22,1 m de longitud de pendiente y 9% de pendiente.

Las prácticas de conservación utilizadas en tierras arables son la labranza en curvas de nivel, las fajas en contorno y los cultivos en terrazas. Por otra parte, los drenajes estabilizados para la eliminación de los excesos de agua son parte necesaria de cada una de estas prácticas. Según las medidas de conservación de suelos que se apliquen, los valores de P serán asignados utilizando la Tabla 8.4.

Tabla 8.4. Valores de Factor *P*, según tipo de práctica y rango de pendiente del terreno (%). Fuente: Gaspari et al. (2019).

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desagüe	Terrazas de infiltración
< 2	1	-	-	-
2 - 7	0,50	0,25	0,10	0,05
7 - 12	0,60	0,30	0,12	0,05
12 - 18	0,80	0,40	0,16	0,05
18 - 24	0,90	0,45	0,18	0,06
> 24	1	-	-	-

Clasificación de la Pérdida de suelo

En el año 1980 FAO publicó una clasificación de la pérdida de suelo en el trabajo denominado “Clasificación Provisional para la evaluación de la Degradación de los Suelos”, confeccionando una tabla con rangos según pérdida de suelo por aplicación del modelo USLE (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990) (Tabla 8.5). Para conocer la lámina de suelo perdida, se tiene en cuenta la cantidad de suelo perdido y la densidad del mismo, considerando que $0,1 \text{ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ es igual a $1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Por ejemplo, si se pierden $10 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ de suelo, con una densidad del suelo de $2,0 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, la pérdida de suelo será de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1} = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

Según Wischmeier y Smith (1978) hasta $12,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ de pérdidas son admisibles como máximo en un suelo profundo, de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable para la vida de las plantas. Considerando que la tolerancia a la pérdida de suelo varía según las características peculiares de cada región bajo estudio, se recomienda generar tablas de clasificación de pérdida de suelo en rangos particulares para cada región.

Tabla 8.5. Rangos de pérdida de suelo y su correspondiente grado de erosión. Fuente: FAO (1980).

Pérdida de suelo ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$)	Pérdida de suelo ($mm.ha^{-1}.año^{-1}$)	Grado de erosión hídrica	Características
< 10	< 0,6	Leve	Sólo se afecta el horizonte A o capa arable. Pequeñas áreas desnudas (sin vegetación), así como acumulación de sedimentos en la base de las pendientes o depresiones.
10 – 50	0,6 – 3,3	Moderado	Escasa formación de surquillos. El horizonte A o capa arable fue arrastrado en parte (entre 25% y 75%). Se puede encontrar mezcla del horizonte original A con el material del horizonte subyacente.
50 – 200	3,3 – 13,3	Alto	Ocurre un severo arrastre del horizonte A o capa arable, casi total. Frecuentes surcos e incluso cárcavas aisladas.
> 200	> 13,3	Muy alto	Se da una pérdida completa del horizonte A. Formación de cárcavas en una red densa.

La pérdida tolerable de suelo superficial es definida como la tasa máxima de erosión permisible para que la fertilidad del suelo pueda mantenerse durante 20 o 25 años (Morgan, 1997). Su evaluación es un estudio básico para la implementación de un modelo de ordenación territorial. Depende de diversos factores, entre los cuales se incluye la profundidad del suelo, sus propiedades físicas, el desarrollo del sistema radical de la vegetación, el contenido de materia orgánica, la pérdida de nutrientes y las características de la topografía, entre otros (López Cadenas de Llano, 1998).

En Argentina, Gaitán et al. (2017) aplicaron la clasificación presentada en la Tabla 8.6, discriminando en seis rangos de riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.

Tabla 8.6. Rangos de pérdida de suelo por erosión hídrica. Fuente: Gaitán et al., (2017).

Rango de A ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$)	Categoría
< 0,05	Muy Bajo
0,05 - 2	Bajo
2 - 5	Moderado
5 - 10	Alto
10 - 30	Muy Alto
> 30	Extremo

El modelo MUSLE

La Ecuación Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE) permite calcular el valor de pérdida de suelo para una determinada cuenca o unidad hidrológica en estudio, expresado en megagramos o toneladas, para una precipitación (Ecuación 8.12). La ecuación presenta ciertas ventajas sobre la USLE (Williams, 1981), entre las cuales se destaca que puede ser aplicada a un evento pluvial determinado y brinda mayor precisión (Smith et al., 1984).

El Factor R utilizado en la USLE se reemplaza por el efecto del flujo de escurrimiento generado en el proceso erosivo de una tormenta específica, a través del Volumen Total Escurrido (Q), en m^3 , y del Caudal pico (q), en $m^3.s^{-1}$.

$$Y = 11,8 \times (Q \times q)^{0,56} \times K \times LS \times C \times P$$

Ecuación 8.12

Donde:

Y= sedimentos emitidos en la cuenca, a partir de una tormenta aislada ($Mg.cuenca^{-1}$)

Q= volumen de escurrimiento (m^3)

Q= caudal pico o caudal máximo instantáneo ($m^3.s^{-1}$)

Para aplicar la ecuación 8.12 los datos de Q y q son obtenidos del Trabajo Práctico donde se aplicó el modelo hidrológico HEC-HMS (Capítulo 7).

Referencias

- Aleweli, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion Modelling. *International Soil and Water Conservation Research* 7: 203e225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Bezak, N., Borrelli, P., Panagos, P. (2022). Exploring the possible role of satellite-based rainfall data in estimating inter-and intra-annual global rainfall erosivity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(7): 1907-1924.
- Boardman, J. (2006). Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena* 68:73-86. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.007>
- Borrelli, P., Robinson, D., Fleischer, L., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., Panagos, P. (2013). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications* 8 (1). <https://doi:10.1038/s41467-017-02142-7>
- Casas, R., Godagnone, R., de la Fuente, J. (2022). Evaluación y cartografía de la erosión hídrica en la Argentina Evaluation and mapping of water erosion in Argentina. *Revista de Investigaciones Científicas de la Universidad de Morón*. Año 6 / N°11. <http://doi.org/10.34073/285>
- Cenicafé. (1975). *Manual de Conservación de suelos de ladera*. 1a. ed. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé). Chinchiná, Colombia. 267 pp.

- El-Swaify, S.A., Dangler, E.W., Armstrong, C.L. (1982). *Soil erosion by water in the tropics*. University of Hawaii.
- FAO. (1980). *Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment*. Rome. 86pp.
- Fang, N.Z., Shi, Z.H., Yue, B.J., Wang, L. (2013). The Characteristics of Extreme Erosion Events in a Small Mountainous Watershed. *PLoS ONE* 8(10):e76610. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076610>
- Gaitán, J., Navarro, M.F., Tenti Vuegen, L., Pizarro, M.J., Carfagno, P., Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. 1^a ed. Ediciones INTA, Buenos Aires.
- Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro_erosion_hidrica_rep_argentina.pdf
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M.I., Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Universidad Nacional de La Plata, EDULP. Libro digital, PDF. (Libro de cátedra)
- Gaspari, F.J., Rodriguez Vagaría, A., Montealegre Medina, F.A. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas. Herramientas de Sistemas de Información Geográfica*. 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata; EDULP. Libro digital, PDF. (Libro de cátedra)
- Henao, J.E. (1988). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas*, Centro de enseñanza desescolarizada. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. 399 pp.
- Irurtia, C.B., Cruzate, G., Gaspari, F. (2007). *Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica*. Guía de Divulgación Técnica, Instituto de Suelos – INTA.
- Jain, M.K., Kothiyari, U.C. (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydro Sci J* 45:771-786.
- Kamamia, A.W., Vogel, C., Mwangi, H., Feger, K., Sang, J., Julich, S. (2022). Using soil erosion as an indicator for integrated water resources management: a case study of Ruiru drinking water reservoir, Kenya. *Environmental Earth Sciences* 81:502. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10617-0>
- Li, L., Du, S., Wu, L., Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *Catena* 78:93-99. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.007>
- Li, Z., Huang, J., Zeng, G., Nie, X., Ma, W., Yu, W., Guo, W., Zhang, J. (2013). Effect on Erosion on Productivity in Subtropical Red Soil Hilly Region: A Multi-Scale Spatio-Temporal Study by Simulated Rainfall. *PLoS ONE* 8(10): e77838. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077838>
- López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 pp.
- Mintegui Aguirre, 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. Madrid pp. 2229-2245.
- Mintegui Aguirre, J.A., López Unzú, F. (1990). *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 pp.
- Morgan, R.P.C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Mundi-Prensa, Madrid, España. 343 pp.

- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K.J., Yang, J.E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G.A., Krasnov, S.F., Garobets, A., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., Hoyos, N., Naipal, V., Oliveira, P.T.S., Bonilla, C.A., Meddi, M., Nel, W., Dashti, H., Boni, M., Diodato, N., Van Oost, K., Nearing, M.A., Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports* 7: 4175. DOI: 10.1038/s41598-017-04282-8.
- Pappas, E.A., Smith, D.R., Huang, C., Shuster, W.D., Bonta, J.V. (2008). Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. *Catena* 72:146-152. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.05.001>
- Rojas, A., Conde, A. (1985). Estimación del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo para el centro-este de la República Argentina. *Ciencia del Suelo* 3(1-2):85-94.
- Sadeghi, S.H. (2004). Application of MUSLE in prediction of sediment yield in Iranian conditions. ISCO2004-13th International Soil Conservation Organization Conference-Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solution. Paper No. 998, 1-4.
- Sinshaw, B.G., Belete, A.M., Mekonen, B., Wubetu, T.G., Anley, T.L., Alamneh, W.D., Atinkut, H.B., Gelaye, A.A., Bilkew, T., Tefera, A.K., Birara Dessie, A., Fenta, H.M., Beyene, A.M., Bizuneh, B.B., Alem, H.T., Eshete, D.G., Atanaw, S.B., Tebkew, M.A., Mossie Birhanu, M. (2021). Watershed-based soil erosion and sediment yield modeling in the Rib watershed of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Energy Nexus* 3: 100023. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.1000233>
- Smith, S.J., Williams, J.R., Menzel, R.G., Coleman, G.A. (1984). Prediction of 468 sediment yield from Southern plains grasslands with the Modified Universal Soil Loss 469 Equation. *Journal of range management*, 37 (4): 295-297.
- Tramblay, Y., Ouarda, T., St-Hilaire, A., Poulin, J. (2010). Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics. *Journal of Hydrology* 380:305-317.
- USDA. (1997). *Agriculture Handbook Number 703. Predicting Soil Erosion by Water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington DC, USA.
- Williams, J.R. (1981). Testing the modified Universal Soil Loss Equation. In: *Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands*. USDA. ARM-W-26. pp. 157-164.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. United States Department of Agriculture Handbook No 537. Washington, USA. Disponible en: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>

CAPÍTULO 9

Zonificación de pérdida de suelo

María Isabel Delgado

Utilización de SIG para el análisis de la pérdida de suelo

Los procesos de erosión se ven fuertemente afectados por muchos factores, además de las precipitaciones (Fang et al., 2013). En zonas con procesos de cambio de uso del suelo, las interacciones entre el tipo de suelo, el uso del suelo, y la producción y transporte de sedimentos, pueden ser sumamente complejas (Tramblay et al., 2010), en estas zonas suele aumentar la sensibilidad de los paisajes a las perturbaciones, haciéndolos más vulnerables a fenómenos extremos (Boardman, 2006). La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) creada por Wischmeier y Smith (1978) sigue siendo actualmente a nivel mundial uno de los modelos de estimación de la pérdida de suelo más utilizados.

El modelo predice la erosión del suelo, de modo de poder contribuir a la planificación para la conservación del mismo (USDA, 1997), utilizando información relativa a las precipitaciones, características edáficas, gradiente y longitud de laderas, junto a las características propias del uso del suelo y las prácticas de conservación (Ecuación 9.1). Es importante recordar que este modelo se utiliza sólo para sólo para cálculos relativos a la erosión laminar y en surcos (Gaspari et al., 2013).

$$A = R * K * LS * C * P$$

Ecuación 9.1

Donde:

A: pérdida de suelo por unidad de área ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$)

R: factor de erosionabilidad del aguacero ($M.J.mm.ha^{-1}.h^{-1}.año^{-1}$)

K: factor de erodabilidad del suelo ($Mg.ha.h.MJ^{-1}.ha^{-1}.cm^{-1}$)

LS: factor topográfico (adimensional)

C: factor de ordenación de cultivos (adimensional)

P: factor de prácticas de cultivo (adimensional)

Se describen a continuación brevemente los factores interviniéntes en la ecuación, tener en cuenta que el procedimiento de determinación de cada factor se encuentra explicado detalladamente en el Capítulo 8.

* **R índice de erosión pluvial o factor de erosionabilidad de los aguaceros ($J.cm.m^{-2}.h^{-1}$)**: definido como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos. Expresa la fuerza erosiva de una determinada lluvia y representa su potencial para

erosionar superficialmente el suelo. Este factor se calcula a partir de registros pluviográficos históricos de más de 30 años.

* **K erodabilidad del suelo** ($Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$): indica la aptitud o resistencia del suelo a la erosión. Refleja la acción combinada de distintas propiedades como la permeabilidad, contenido de materia orgánica, textura y estructura.

* **LS Factor topográfico (adimensional)**: se define como la relación entre la pérdida de suelo para una longitud determinada y la pérdida para una longitud de 22,1 m del mismo tipo de suelo, ya que, para su determinación Wischmeier y Smith definieron parcelas con dimensiones de 22,1 m y pendiente de 9 %, a igualdad de los demás factores interviniéntes en la ecuación USLE.

L longitud de la pendiente: es la distancia desde el punto más alto de caída de la gota de lluvia hasta el inicio de la deposición de sedimentos, o hasta que el escurrimiento se concentre en un cauce.

S gradiente de la pendiente: es la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9%, del mismo tipo de suelo.

* **C cultivo y ordenación (adimensional)**: expresa la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado o con vegetación en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes a una parcela, en idénticas condiciones de lluvia, suelo y topografía, pero sometida a barbecho continuo.

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 está representado por el factor de ordenación de cultivos (C). Este factor considera la protección que la vegetación proporciona al suelo, el efecto beneficioso que se produce contra la erosión y los efectos que los residuos de la vegetación tienen en la protección del suelo. Se determina experimentalmente para cada clase de cobertura vegetal.

* **P prácticas de conservación del suelo (adimensional)**: es el factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo y abarca la relación entre las pérdidas de suelo para diferentes labores conservacionistas, y las correspondientes a un cultivo en surcos según la máxima pendiente, a igualdad de los restantes factores climáticos, edáficos, topográficos y de cobertura vegetal y uso del suelo. Las prácticas de conservación utilizadas en tierras arables son la labranza en curvas de nivel, las fajas en contorno y los cultivos en terrazas.

Al trabajar dentro de un entorno SIG, una vez obtenido el valor de la pérdida de suelo por unidad de área (A), se puede proceder a reclasificar el valor en rangos, con la intención de facilitar su interpretación visual en una primera instancia, así como la posible toma de decisiones a posteriori. Si bien existen varias clasificaciones disponibles, para los fines prácticos en este libro se presenta el procedimiento para aplicar las clasificaciones de FAO (1980) y Gaitán et al. (2017).

Procedimiento para el cálculo de la pérdida de suelo en un entorno SIG

Así como en el resto de este texto, se toma como área de estudio la cuenca alta del arroyo Napaleofú (CAAN), con el objetivo de obtener el mapa de pérdida de suelo ($Mg. ha^{-1}.año^{-1}$) en dicha unidad territorial, utilizando el programa QGIS 3.26 o superior. A continuación, se presenta el esquema de procesamiento planteado por Gaspari et al. (2019), donde se detallan los distintos inputs necesarios para aplicar el modelo USLE, así como las posibles fuentes de información a utilizar y procesos a implementar.

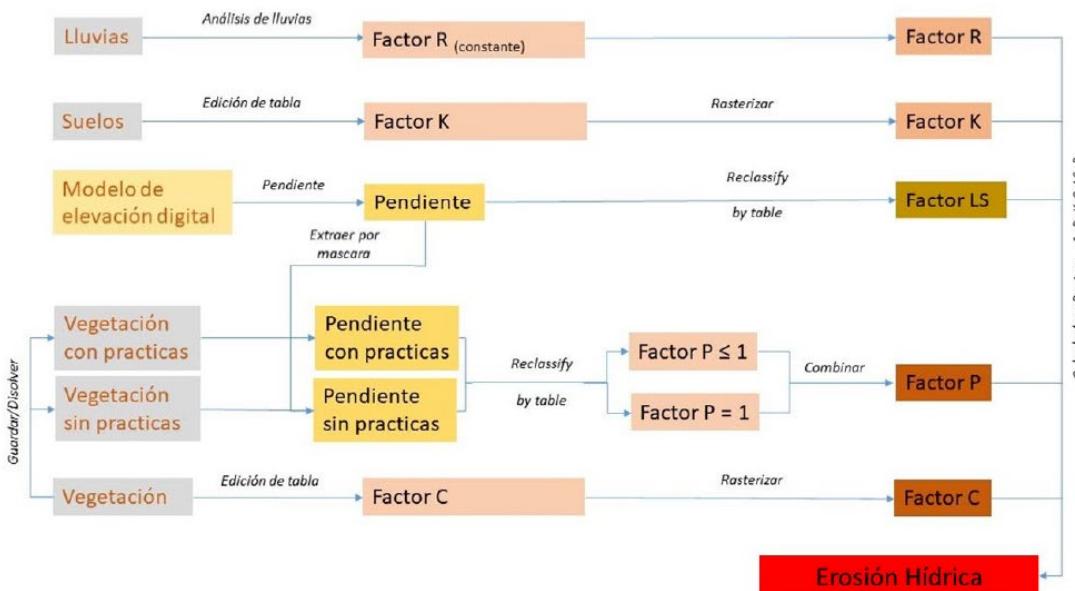


Figura 9.1. Diagrama de procesos a seguir en entorno SIG, para la obtención de la pérdida de suelo.

Fuente: Gaspari et al. (2019).

Factor R

Actualmente existen diversas alternativas para el cálculo del factor R, por ejemplo, a partir de datos de precipitación anual y/o mensual, pero no se ha establecido aún a nivel regional cuál sería la fórmula que mejor se ajusta a las condiciones locales.

Existen trabajos locales como los de Gaitán et al. (2017) y Rojas y Conde (1985) que abordan la determinación del factor R y son considerados de referencia, también, existiendo a su vez investigaciones específicas a nivel de la cuenca CAAN, como la de Rodríguez Vagaría y Gaspari (2015), quienes determinaron valores R entre 373 y 388 $J.cm.m^{-2} .h^{-1}$ para la cuenca. Por tal motivo, en esta ocasión asignaremos el valor de 380,5 $J.cm.m^{-2} .h^{-1}$ para toda la CAAN.

Tener en cuenta que también existe información disponible a nivel mundial, por ejemplo, en ESDAC (European Soil Data Centre) para obtener el valor de factor R: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-rainfall-erosivity#tabs-0-description=1>.

Por otro lado, en el caso que se contara con información del factor R en varias estaciones meteorológicas próximas al área en estudio, podría obtenerse el mapa del factor directamente a

través de la interpolación de los valores de factor R de cada estación. Para ello se debería realizar la interpolación de los datos, generando una nueva capa: ir a la Caja de Herramientas de Procesos / Interpolación, y a partir de la capa vectorial de puntos (con valores de factor R), considerar utilizar el método IDW que genera una interpolación de Distancia Inversa Ponderada (DIP), o bien el método TIN que genera una interpolación de Red de Triángulos Irregulares (RTI) a partir de una capa vectorial de puntos.

Paso a paso: como el valor del factor R que se brinda como dato es un solo valor para toda la cuenca, se debe proceder a duplicar la capa denominada “cuenca”. Luego, ir a la Tabla de atributos, y agregar un nuevo campo, donde se incorporará el valor de R. Este archivo vectorial puede rasterizarse (Raster / Conversion / Rasterizar), utilizándose de guía para los valores de resolución a ingresar, el archivo DEM. Por último, en la extensión del archivo de salida, seleccionar la opción de Usar la extensión de la capa (en este caso el MDE). Se obtendrá un mapa como el presentado en la Figura 9.2. Luego se deberá proceder a su rasterización.

Recordar que, en este caso, por tratarse de un valor uniforme para toda la cuenca, no es imprescindible generar el mapa del factor R, ya que puede incorporarse su valor de forma manual directamente al momento de aplicar la ecuación 9.1 en la Calculadora ráster del SIG.

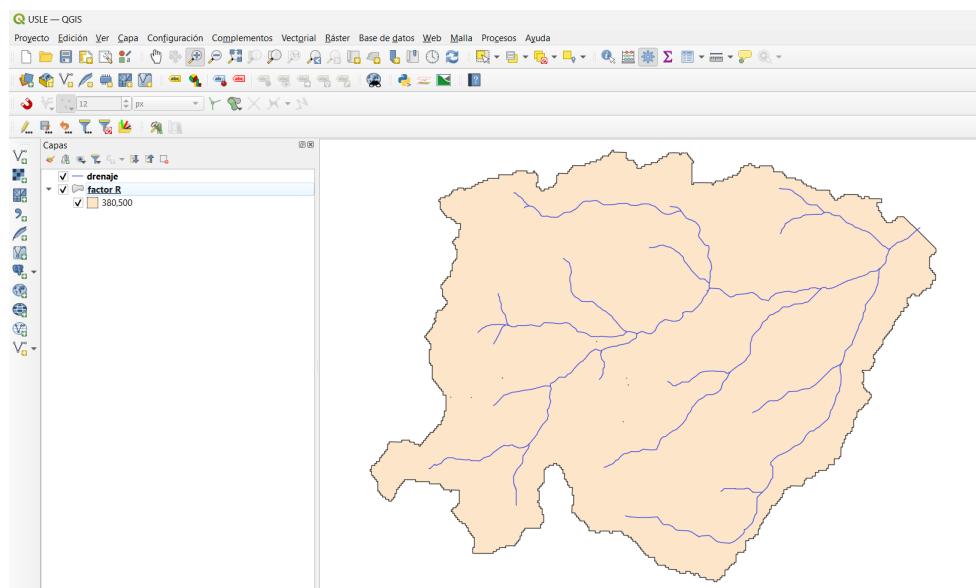


Figura 9.2. Mapa de factor R ($J.cm.m^{-2}.h^{-1}$).

Factor K

Este factor se obtiene a partir del procesamiento del mapa de suelos. En esta actividad utilizaremos la información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) a escala 1:50.000.

En la práctica, para la República Argentina la obtención de los datos necesarios para la determinación de este factor puede efectuarse a partir de la información proveniente del mapa de suelos elaborado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), a escala 1:50.000. La descripción de las series de suelos se encuentran disponibles en sitios como: <https://zenodo.org/record/6353509#.YyDOHHbMK3D> o <http://sisinta.inta.gob.ar/es/series/908>.

En caso que no se cuente con el mapa de suelos, el procedimiento para su obtención es el siguiente: para recortar el archivo al área límite de la cuenca, y teniendo en cuenta que se trata de dos archivos en formato vectorial (.shp), es el siguiente: Vectorial / Herramientas de Geoprocreso / Cortar. Identificar las Unidades Cartográficas (UC) que se encuentran dentro de la cuenca, y establecer el porcentaje de ocupación de cada Serie dentro de cada Unidad Cartográfica. Primero calcular el factor K de cada Serie (Ecuación 9.2.), y luego ponderar por su porcentaje de incidencia en cada Unidad Cartográfica. Una vez que se determine el valor de factor K de cada UC, ingresarla al GIS.

Paso a paso: a partir del mapa de suelos (obtenido como dato en el TP), proceder a abrir la Tabla de atributos y agregar un campo, coloque un nombre al mismo, el tipo de valor que contendrá, en este caso será “número decimal” y su longitud y precisión. Se incorporarán los valores del factor K calculados previamente. Tener en cuenta que para calcular el factor K se deberá aplicar la ecuación 9.2.

$$100 \times K = 10^{-4} \times 2,71 \times M^{1,14} \times (12 - a) + 4,20 \times (b - 2) + 3,23 \times (c - 3) \quad \text{Ecuación 9.2}$$

Donde:

M = (% limo + % arena muy fina) x (100 - % arcilla), expresándose también como (% partículas entre 0,002 y 0,1 mm) x (% partículas entre 0,002 - 2,0 mm)

a = Porcentaje de materia orgánica = Porcentaje de Carbono Orgánico x 1,724

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

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta
6. Muy lenta

Luego de aplicados los valores de factor K correspondientes a cada complejo de suelo en la CAAN (Figura 9.3), de acuerdo a Rodriguez Vagaría y Gaspari (2015). Se obtendrá un mapa como el presentado en la Figura 9.4, con los correspondientes valores de factor K. Luego proceder a rasterizarlo.

id	Factor K
1	0,204
2	0,232
3	0,168
4	0,427
5	0,427
6	0,427
7	0,206
8	0,228
9	0,17
10	0,149
11	0,267
12	0,276
13	0,276
14	0,249
15	0,273
16	0,268
17	0,249
18	0,301

Figura 9.3. Valores de factor K ($Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$) en la CAAN. Fuente: adaptada de Rodriguez Vagaría y Gaspari (2015).

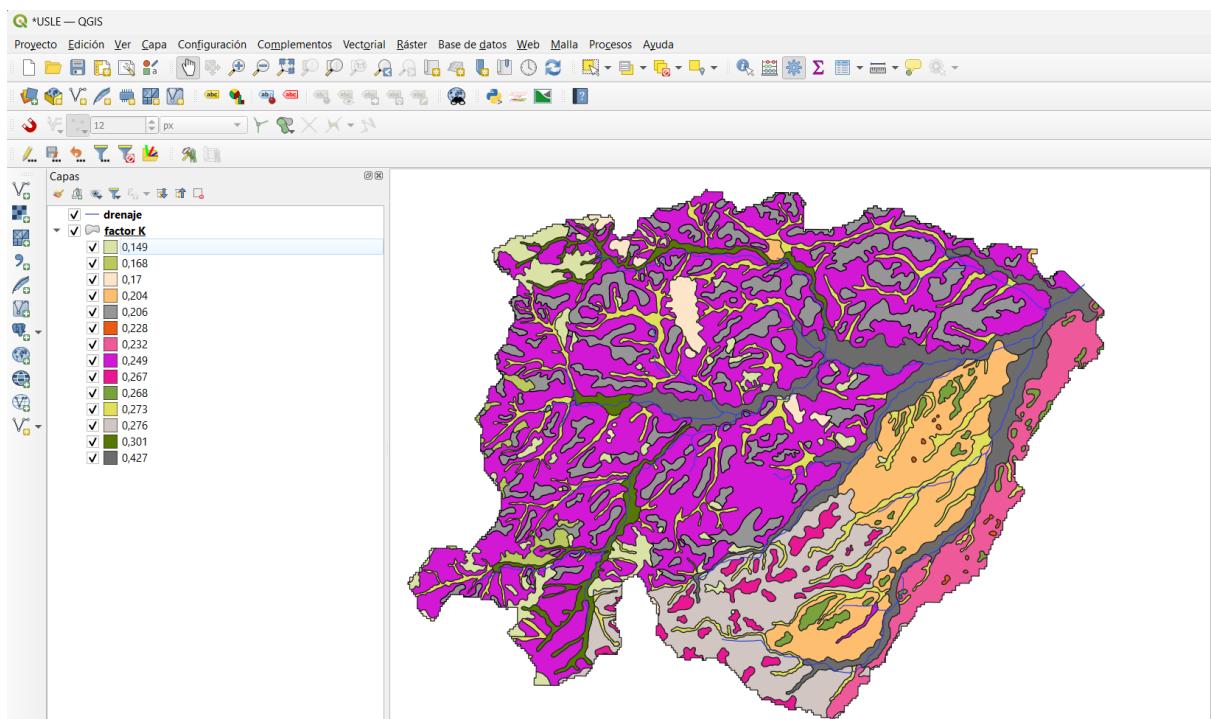


Figura 9.4. Mapa de factor K ($Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$).

Factor LS

El mapa de factor LS se obtendrá a partir del mapa de pendientes (en porcentaje), el cual ya fue generado previamente a partir del DEM (Capítulo 6). Dicho mapa fue reclasificado en rangos de pendiente, los cuales son coincidentes con los presentes en la clasificación propuesta por Mintegui Aguirre (1988) (Tabla 9.1), la cual establece el valor del factor LS para un determinado sector, de acuerdo al rango de pendiente en que se encuentre.

En el caso de que no se dispusiera de un MDE para el área de estudio, existen diversos sitios donde pueden descargarse de manera gratuita. Una posibilidad es desde el sitio web del Instituto

Geográfico Nacional (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>).

Tabla 9.1. Factor LS de acuerdo a rangos de pendiente expresados en %. Fuente: adaptado de Mintegui Aguirre (1988).

Rango de pendiente (%)	Factor LS
0-3	0,3
3-12	1,5
12-18	3,4
18-24	5,6
24-30	8,7
>30	14,6

Cabe mencionar que actualmente en QGIS se puede establecer automáticamente el factor LS. Para ello se debe recurrir desde la Caja de Herramientas de Proceso al comando r.watershed y desde *Advanced Parameters* indicar que genere el archivo .tif correspondiente al factor LS (Figura 9.5).

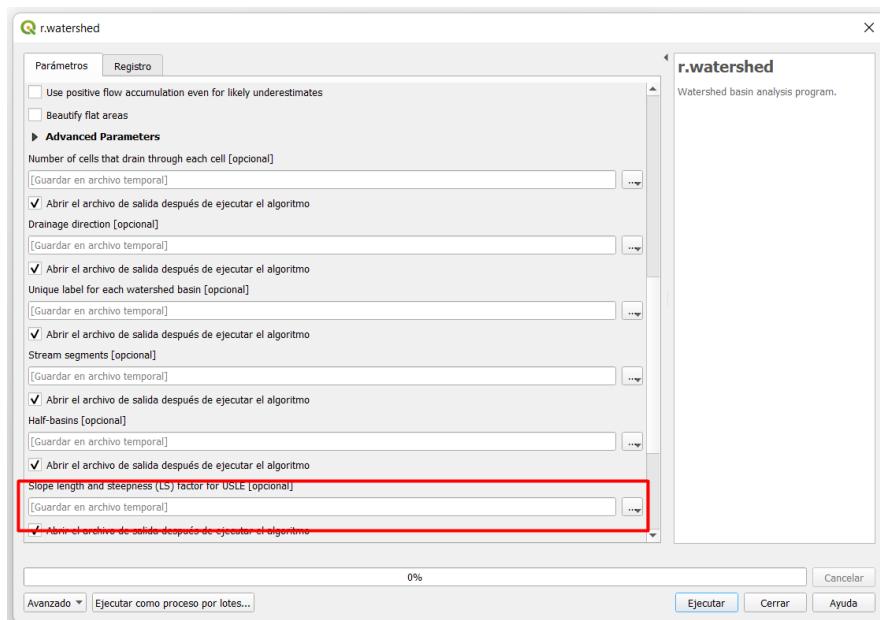


Figura 9.5. Generación automática del factor LS dentro del QGIS.

Paso a paso: en este práctico procederemos a obtener el mapa de pendientes a partir del MDE (en caso que no contemos con el generado en el Capítulo 6), para ello ir a Raster / Análisis / Pendiente. Allí elegir el archivo DEM.tif, aplicando el valor 1 a la relación de unidades verticales a horizontales, recordando tildar la opción correspondiente a “pendiente expresada en porcentaje”. Luego, se deberá proceder a reclasificar el mapa de pendiente obtenido, con el comando “Reclasificar por tabla” dentro de la Caja de Herramientas de Procesos (Figura 9.6), aplicando los valores establecidos en la Tabla 9.1. Tener en cuenta que las opciones elegidas determinarán los rangos a implementar por el programa, en este caso utilizar como límite de

rangos la opción **min < valor <= max** (Figura 9.7). Verificar que los rangos establecidos no dejen píxeles sin asignar a una clase. Este procedimiento permitirá realizar diversos tipos de clasificaciones del mapa de pendiente, donde sólo se deberá modificar el máximo y mínimo de cada clase. Se pueden crear cuantas clases sean necesarias.

A continuación, ya teniendo el mapa de rangos de pendiente, se abre la Tabla de atributos y se agrega un campo de datos, con números decimales, donde se ingresarán los valores del factor LS de acuerdo a la Tabla 9.1. Por último, se procede a rasterizar el mapa obtenido, utilizando el campo de valor de LS. Se obtendrá un mapa como el presentado en la Figura 9.8, con los correspondientes valores de factor LS. Proceder a rasterizar dicho mapa.

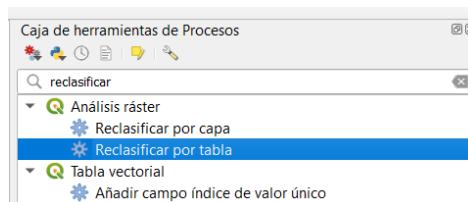


Figura 9.6. Reclasificar por tabla.

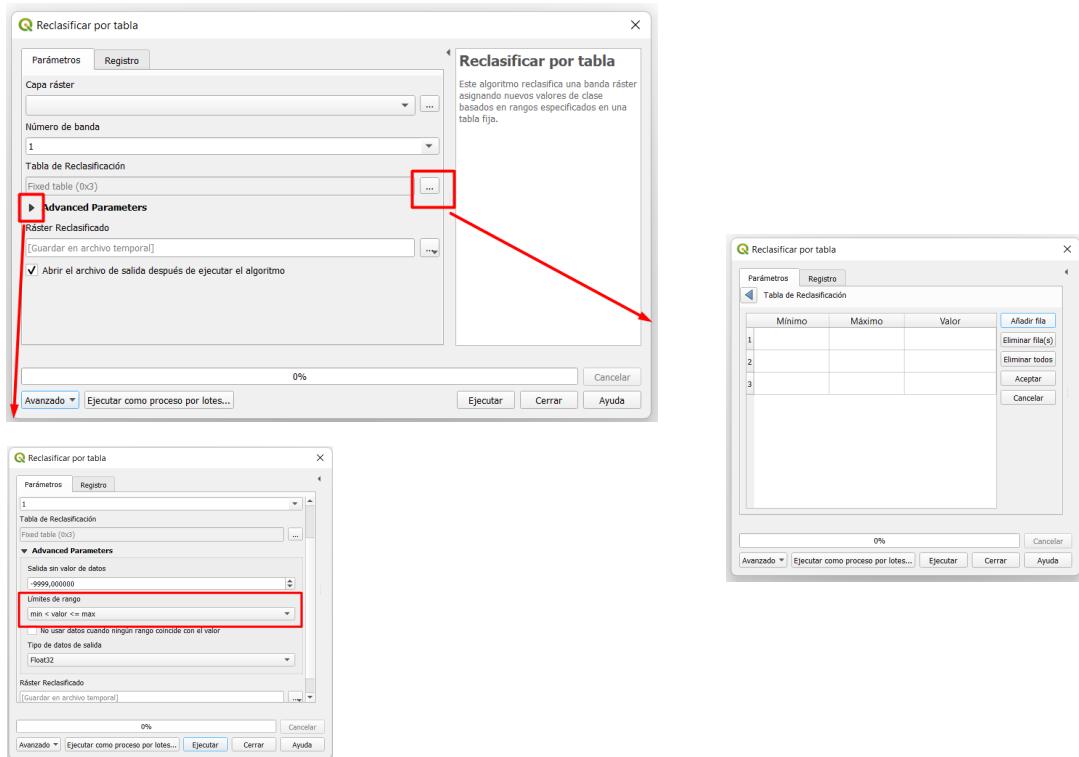


Figura 9.7. Establecer los límites de los rangos y los valores correspondientes a la tabla de clasificación a asignar.

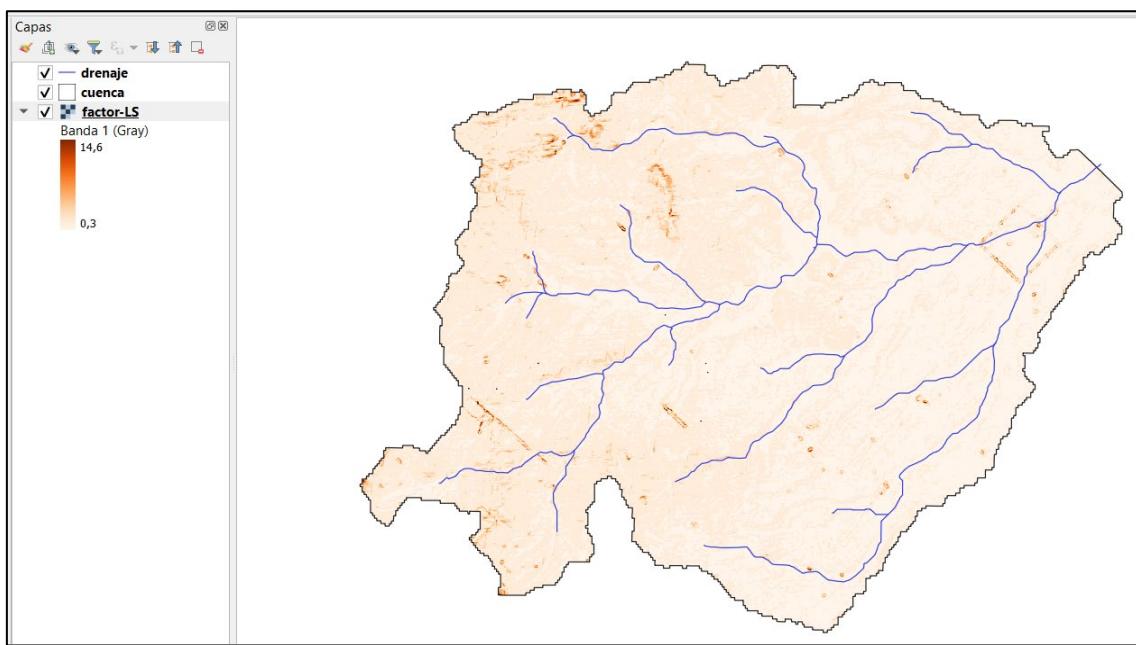


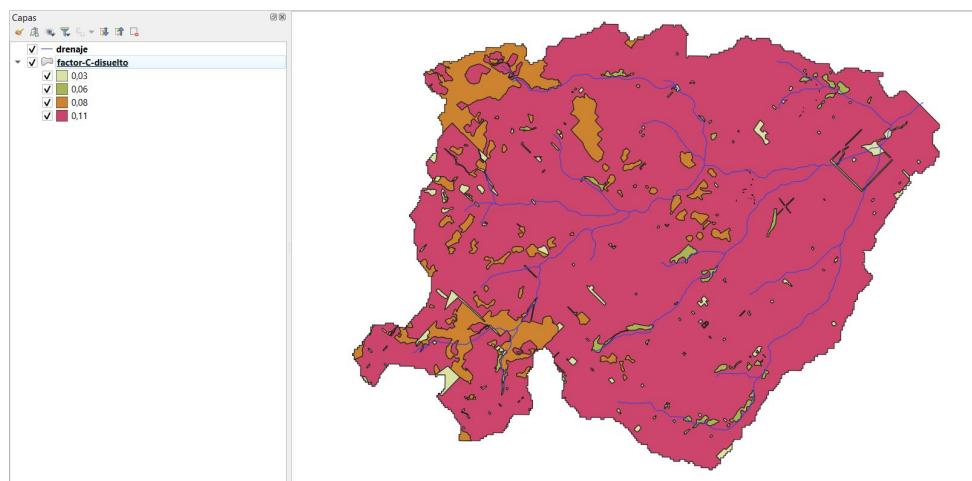
Figura 9.8. Mapa de factor LS.

Factor C

Se determina experimentalmente para cada clase de cobertura vegetal, la información concerniente al uso del suelo puede obtenerse a partir de determinaciones propias o de terceros, obtenidas por ejemplo a partir de digitalizaciones de polígonos sobre imágenes de Google Earth o bien a partir de Clasificaciones supervisadas y/o no supervisadas de imágenes satelitales, dependiendo el grado de detalle alcanzado -tanto espacial como temporal- del objetivo de la investigación que se esté desarrollando.

Paso a paso: para la obtención del mapa de factor C se parte del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo, y a partir de la Tabla de atributos se agrega un campo más, de tipo decimal, donde se ingresarán los correspondientes valores del factor de acuerdo a las características de cada categoría presentadas en el capítulo 8 (Tablas 8.2 y 8.3). Posteriormente, se procede a rasterizar el mapa obtenido.

Si se asigna el mismo valor de factor C a distintos usos del suelo, es conveniente proceder a aplicar el comando Disolver una vez ingresados los valores del factor, de modo de simplificar el mapa final generado y su visualización y procesamiento. Se obtendrá un mapa como el presentado en la Figura 9.9, con los correspondientes valores de factor C. Luego, se deberá proceder a rasterizar dicho mapa.

**Figura 9.9.** Mapa de factor C.

Factor P

En este caso, del mismo modo que en el factor C, se utilizará de base el mapa de uso y cobertura vegetal. Pero, en esta oportunidad, se tendrá en cuenta la información adicional respecto de las prácticas conservacionistas desarrolladas en la cuenca. Tener en cuenta que se deberá generar un nuevo mapa de rangos de pendiente, acorde a lo establecido en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2. Valores de Factor P, según tipo de práctica y porcentaje de pendiente.
Fuente: Gaspari et al. (2019)

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desague	Terrazas de infiltración
< 2	1	-	-	-
2 - 7	0,50	0,25	0,10	0,05
7 - 12	0,60	0,30	0,12	0,05
12 - 18	0,80	0,40	0,16	0,05
18 - 24	0,90	0,45	0,18	0,06
> 24	1	-	-	-

Paso a paso: la obtención del mapa de factor P se realiza en varios pasos. En primera instancia se debe obtener un mapa de pendientes sólo en aquellas áreas donde existen prácticas de conservación, para ello se procede a ejecutar la herramienta Cortar Ráster por Capa de Máscara, desde Barra de Menú / Ráster / Extracción. En “Capa de entrada” seleccionar el archivo de pendientes, en “Capa máscara” el archivo de prácticas (o bien el archivo de uso del suelo, habiendo seleccionado los polígonos con prácticas previamente, y en ese caso, tildando la opción “objetos seleccionados solamente”). Proceda a reclasificar dicho archivo raster, utilizando los valores de P de la Tabla 9.2. Luego, rasterizar el mapa obtenido. El segundo paso es asignar el valor “1” a todos los polígonos que no posean práctica de conservación dentro de la cuenca.

Para ello se generará un archivo con valor 1 para toda la cuenca, eliminando los polígonos con prácticas (puede, por ejemplo, tomarse la capa de límite de cuenca, asignando el valor de 1 a un nuevo campo, y aplicar “Cortar” para recortando los polígonos con prácticas). Luego, rasterizar dicha capa. Por último: aplicar el comando “Combinar” desde la Barra de Menú / Raster / Misceláneas, de modo de unir ambos mapas (el raster con valores de P sólo donde hay prácticas, y el raster con valor 1 en toda la cuenca que no tiene prácticas). De este modo, se obtiene el mapa de factor P, como el presentado en la Figura 9.10. En esta ocasión el mapa obtenido ya se encuentra en formato ráster, por lo que no es necesario convertirlo.

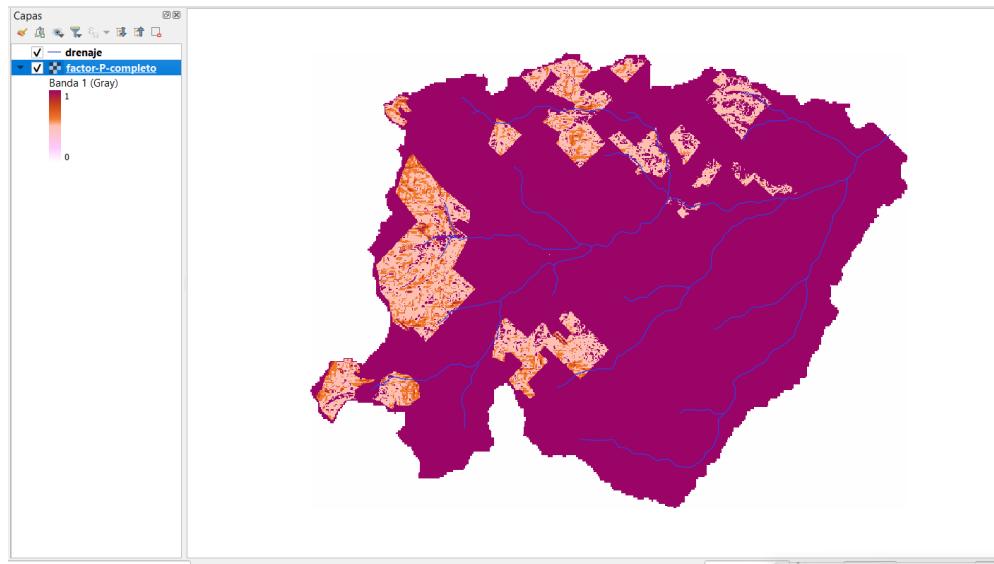
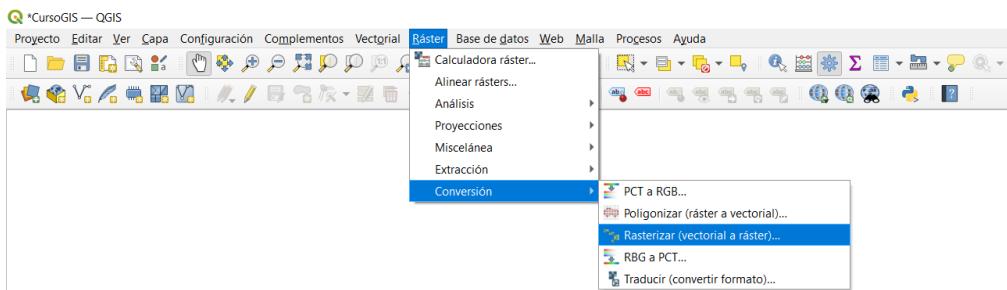
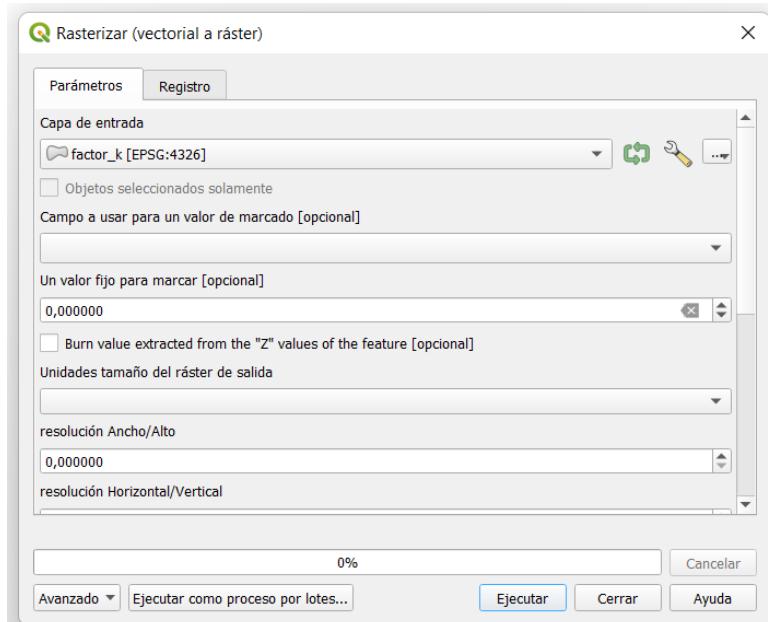


Figura 9.10. Mapa de factor P.

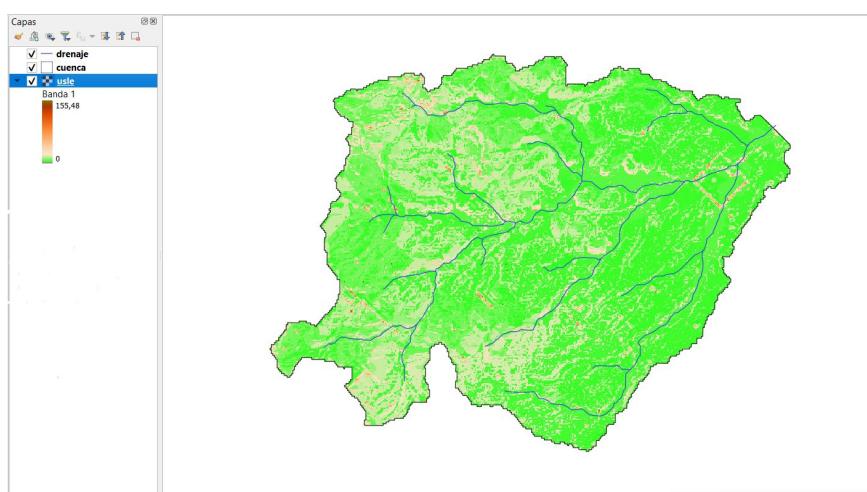
Obtención de la pérdida de suelo

En el caso que no se lo hubiera hecho antes, proceder a rasterizar los archivos de los factores que se encuentren en formato vectorial. Para ello ir a Ráster / Conversión / Rasterizar (Figura 9.11), luego, ingrese los datos correspondientes para la rasterización (Figura 9.12). En la capa de entrada colocar el archivo a convertir (por ejemplo, el correspondiente al Factor K), y seleccionar “Campo a usar para un valor de marcado” que contenga los valores del archivo a crear (valores de K). Se requiere configurar las características de la grilla del archivo raster. En este caso, ya se dispone de un archivo ráster (el MDE), por lo cual se utilizará dicha información para asignarla en la rasterización.

En el cuadro “Unidades tamaño del raster de salida” seleccionar “Unidades georreferenciadas”, En resolución Alto / Ancho y Horizontal / Vertical colocar el tamaño del píxel, el cual se obtendrá del archivo raster que se usó de base. A partir de Extensión de salida se establecen las coordenadas máximas y mínimas del nuevo archivo raster. Por último, colocar un nombre al archivo de salida.

**Figura 9.11.** Rasterización de archivos.**Figura 9.12.** Ventana de información a ingresar para la rasterización.

Una vez que se cuenta con todos los archivos en formato ráster, proceder a utilizar la Calculadora Ráster para multiplicar los archivos de los 5 factores interviniéntes en la ecuación USLE (utilizando los operadores disponibles). Verificar que los 5 mapas se encuentren en el mismo Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC). Dar un nombre al mapa de salida. Se generará el mapa de pérdida de suelo, expresado en ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$), como en el caso de la Figura 9.13.

**Figura 9.13.** Mapa de pérdida de suelo ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$).

Clasificación del mapa de pérdida de suelo en rangos

Para realizar la clasificación del mapa de pérdida de suelo se debe buscar la opción “Reclasificar por tabla” dentro de la Caja de Herramientas de Procesos. Tener en cuenta que las opciones elegidas determinarán los rangos a implementar por el programa. **Verificar que los rangos establecidos no dejen píxeles sin asignar a una clase.**

De acuerdo a FAO (1980): una vez obtenido el mapa de pérdida de suelo (A) se procede a su Reclasificación de acuerdo a las categorías de la Tabla 9.3. A la hora de la presentación tratar de respetar la paleta de colores mencionada en la tabla, de modo de facilitar la interpretación visual. Se obtendrá el mapa de pérdida de suelo en rangos (Figura 9.14).

Tabla 9.3. Rangos de pérdida de suelo. Adaptado de FAO (1980).

Pérdida de suelo ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$)	Grado de erosión	Color
< 10	Leve	Verde
10 – 50	Moderado	Amarillo
50 – 200	Alto	Naranja
> 200	Muy Alto	Rojo

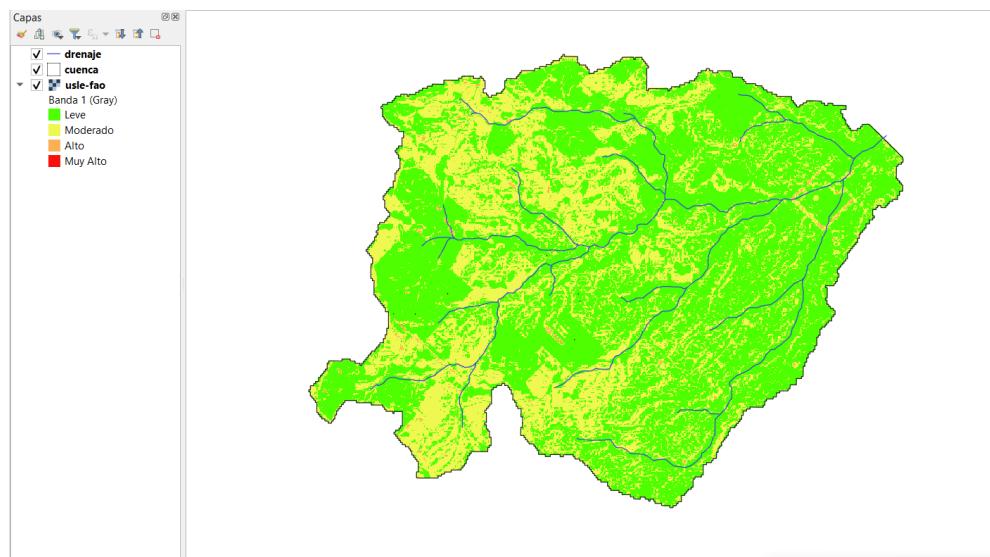
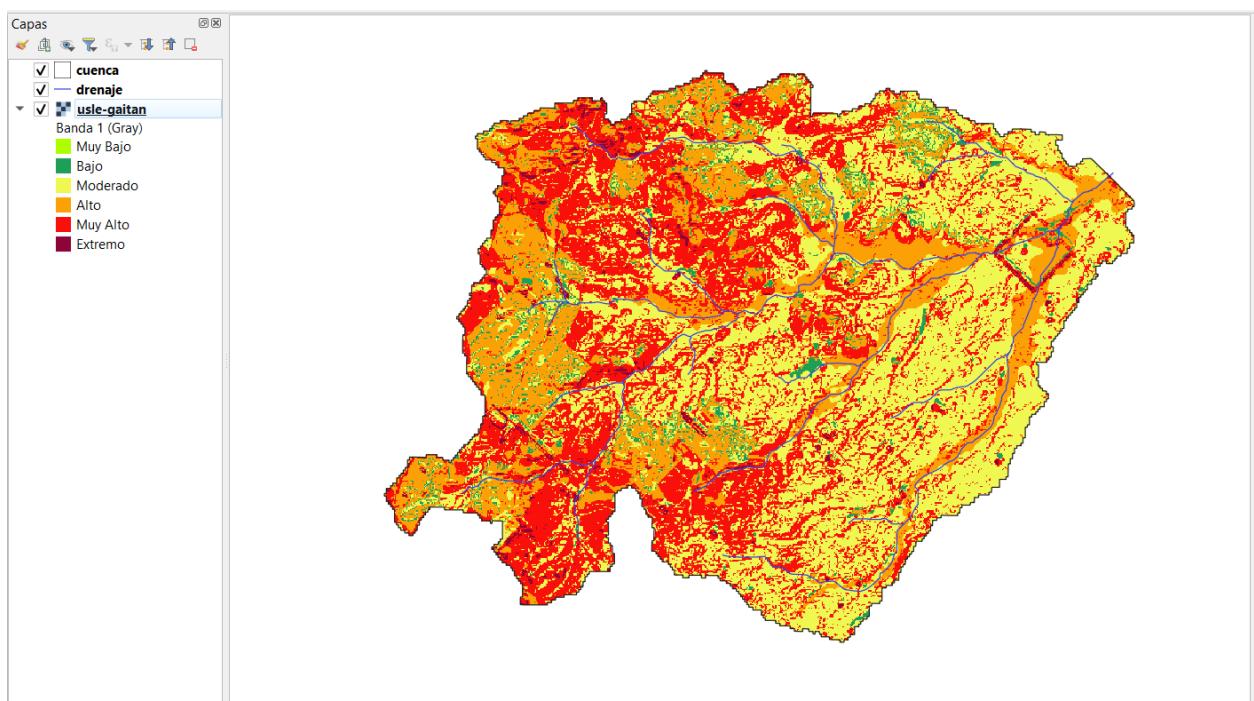


Figura 9.14. Mapa de pérdida de suelo, clasificado de acuerdo a FAO (1980).

De acuerdo a Gaitán et al. (2017): del modo que, en el inciso anterior, se aplica una Reclasificación del mapa de pérdida de suelo, pero siguiendo las categorías de la Tabla 9.4 en esta oportunidad. Tratar de respetar la paleta de colores para facilitar la interpretación visual. Se obtendrá el mapa de pérdida de suelo, discriminado en rangos (Figura 9.15).

Tabla 9.4. Rangos de pérdida de suelo por erosión hídrica. Adaptado de Gaitán et al. (2017).

Rango de A ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$)	Categoría	Color
< 0,05	Muy Bajo	Verde claro
0,05 - 2	Bajo	Verde oscuro
2 - 5	Moderado	Amarillo
5 - 10	Alto	Anaranjado
10 - 30	Muy Alto	Rojo
> 30	Extremo	Bordó

**Figura 9.15.** Mapa de pérdida de suelo, clasificado de acuerdo a Gaitán (2017).

Referencias

- Boardman, J., (2006). Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena* 68: 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.007>
- FAO. (1980). *Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment*. Rome. 86pp.
- Fang, N.Z., Shi, Z.H., Yue, B.J., Wang, L. (2013). The Characteristics of Extreme Erosion Events in a Small Mountainous Watershed. *PLoS ONE* 8 (10):e76610. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076610>

- Gaitán, J., Navarro, M.F., Tenti Vogen, L., Pizarro, M.J., Carfagno, P., Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina.* 1^a ed. Ediciones INTA, Buenos Aires. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro_erosion_hidrica_rep_argentina.pdf
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M.I., Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas.* Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Universidad Nacional de La Plata, EDULP. Libro digital, PDF. (Libro de cátedra)
- Gaspari, F.J., Rodriguez Vagaría, A., Montealegre Medina, F.A. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas. Herramientas de Sistemas de Información Geográfica.* 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata; EDULP. Libro digital, PDF. (Libro de cátedra)
- Mintegui Aguirre, 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. Madrid pp. 2229-2245.
- Mintegui Aguirre, J.A., López Unzú, F. (1990). *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación.* Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 pp.
- Rodríguez Vagaría, A., Gaspari, F. (2015). Estimación de la admisibilidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 56 (1):105-119
- Rojas, A., Conde, A. (1985). Estimación del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo para el centro-este de la República Argentina. *Ciencia del Suelo* 3 (1-2): 85-94.
- Tramblay, Y., Ouarda, T., St-Hilaire, A., Poulin, J. (2010). Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics. *Journal of Hydrology* 380: 305-317.
- Wischmeier W. H., Smith D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning.* United States Department of Agriculture Handbook No 537. Washington, USA. Disponible en: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>

CAPÍTULO 10

Fenómeno torrencial

Fernanda Julia Gaspari

Dinámica hídrica por torrentes

Los flujos torrenciales se describen como una mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones, que se desplazan rápidamente a lo largo de cauces en cuencas pequeñas y de montaña, generando tiempos de respuesta muy cortos para la toma de acciones por parte de la población localizada en las zonas bajas inundables (Aristizábal et al., 2020). De esta manera, es posible definir al Torrente como una corriente natural de agua temporal que en general, se presenta en cuencas reducidas, altamente erosionables, de pendientes fuertes e irregulares, en las que, al ocurrir una tormenta, se originan súbitas y repentinas crecidas de corta duración capaces de arrastrar grandes cantidades de material, que son depositados tanto en el lecho del río como en las zonas ribereñas de inundación. Estos materiales conforman el caudal sólido, representado por dos fracciones, la primera corresponde a las suspensiones y está constituida principalmente por materiales provenientes de erosión hídrica superficial (laminar y en regueros); la segunda es formada por los acarreos y su constitución se debe a la incorporación de los materiales del lecho y márgenes del cauce a la corriente (Gaspari et al., 2013).

En las últimas décadas las pérdidas económicas y humanas asociadas a eventos climáticos han incrementado dramáticamente y han ocurrido con mayor frecuencia. Un importante número de investigadores consideran que este escenario global será cada día más crítico, como consecuencia del incremento en términos de frecuencia o intensidad de los eventos climáticos extremos asociados al calentamiento global y del incremento de la exposición de la población e infraestructura a eventos climáticos extremos (Aristizábal et al., 2020).

Por otro lado, en el marco de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas de Colombia (POMCA) las avenidas torrenciales son entendidas como inundaciones de tipo fluvial rápidas o torrenciales. La Guía Técnica para la formulación de los POMCA define las avenidas torrenciales como crecientes súbitas que por las condiciones geomorfológicas de la cuenca están compuestas por un flujo de agua con alto contenido de materiales de arrastre, con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014; Aristizábal et al., 2020).

La variabilidad de explicaciones que presenta el fenómeno torrencial se debe a su diferente origen, según su geología, hidrología, ambiente, su distribución espacial dentro de la cuenca, su proporción de agua y sedimentos y su granulometría, que conforman los factores que modifican el comportamiento de su flujo sobre el terreno.

Gaspari et al. (2013) expresan que vistos los orígenes del caudal sólido en una corriente torrencial se deduce que el control de dicha actividad debe estar centrado en forma conjunta, tanto en el origen del material en suspensión, a través de técnicas de control de la erosión hídrica

superficial, como en el origen de los acarreos, generalmente, a través de obras de infraestructura hidráulica como son los diques de contención.

García Nájera (1962) considera a la **pendiente de compensación** como un concepto de capital importancia en la corrección de torrentes, y la define como aquella pendiente en la cual una corriente saturada, pasa sobre un lecho formado por acarreos de igual naturaleza y composición granulométrica que los que constituyen el caudal sólido de la corriente. Gaspari et al. (2013) expresan que se trata de un estado de equilibrio dinámico, donde el volumen de material que deja una sección del cauce aguas abajo, es similar al que llega desde aguas arriba.

La instalación de diques transversales, para la corrección de torrentes, provoca que los materiales acarreados por las aguas sean retenidos, formándose depósitos o aterramientos que elevan el perfil natural del cauce aguas arriba de las estructuras, lográndose una nueva pendiente (pendiente de compensación), menor que la pendiente original del cauce y ligada a la geometría del lecho torrencial, a la granulometría de los materiales y a las características hidráulicas de la corriente (Iroume y Gayoso, 1991), favoreciendo la retención de sedimentos y bajar la velocidad del flujo torrencial.

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 degradándose. 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, es la pendiente de compensación (j), con la cual se alcanza un estado de equilibrio entre la erosión y la sedimentación en el cauce (una compensa a la otra) (Figura 10.1). 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.

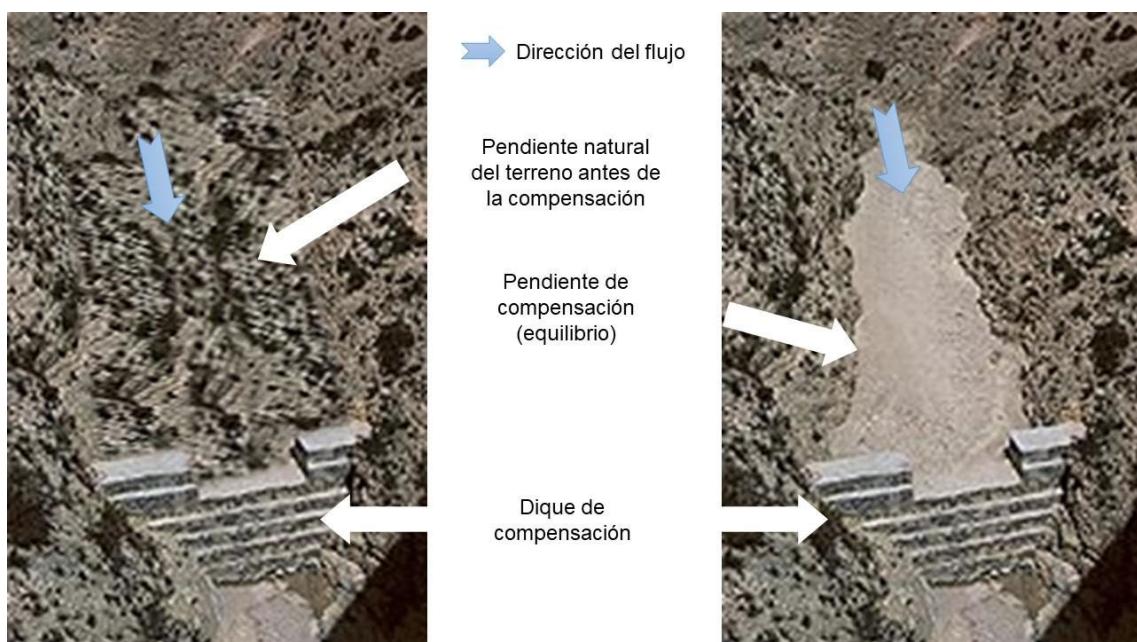


Figura 10.1. Formación de la pendiente de compensación aguas arriba de una obra. Izquierda: Obra recién instalada; Derecha: Obra ya compensada, luego de varios años de funcionamiento.

Cuantificación de la pendiente de compensación

En el cálculo de la pendiente de compensación se debe empezar con la suposición de que una corriente saturada tiene una velocidad tal que cuando pasa sobre un lecho de un arroyo / torrente, formado por acarreos 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 acarreos prácticamente constante, entonces, con el paso del tiempo, se dice que este lecho adoptó la pendiente de compensación.

El método para su cálculo implica una secuencia de iteraciones sucesivas que permite determinar 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 de compensación (j). Para su determinación, se aplica un procedimiento basado en la ley de transporte máximo propuesto por García Nájera (1962), y detallado en Mintegui Aguirre y López Unzú (1990), que se describe a continuación.

En la Figura 10.2 se presenta un corte topográfico (perfil del terreno vista de arriba) donde se expresa las curvas de nivel de un área montañosa y el diagrama de la triangulación del aterramiento de un posible dique para alcanzar la pendiente de compensación. La línea media que corta en dos al triángulo, expresa el sitio donde se establecería el ancho medio del aterramiento que representa el real ancho medio del cauce (b).

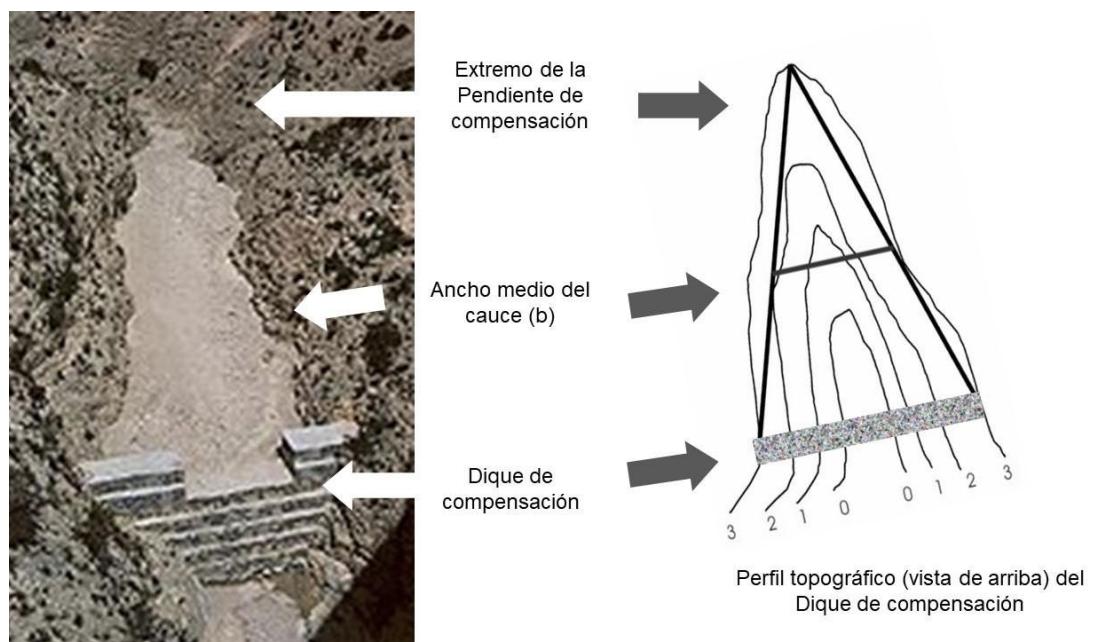


Figura 10.2. Diagrama de la sección media del cauce (triangulación del aterramiento del dique).

Seguidamente, se presenta un ejemplo práctico de la secuencia de cálculo de la pendiente de compensación con datos, ecuaciones y resultados. Es importante mencionar, que, para los ajustes finales de las ecuaciones, se recomienda que las iteraciones se realicen con la ayuda de una planilla de cálculo (Tabla 10.1 y 10.2).

Tabla 10.1. Ejemplo práctico para el cálculo de la pendiente de compensación. Datos de base.

DATOS DE BASE		DATOS
g	Aceleración de la gravedad ($m.s^{-2}$)	9,8 $m.s^{-2}$
Q	Caudal de cálculo ($m^3.s^{-1}$)	10 $m^3.s^{-1}$
b	Ancho medio del cauce (m)	3 m
β	Rugosidad del lecho	1,85
ω_o	Pe agua ($tn.m^{-3}$)	1 $tn.m^{-3}$
δ	Pe materiales ($tn.m^{-3}$)	2,2 $tn.m^{-3}$
X	Proporción de arrastre	0,05
λ	Coef de forma de los acarreos (grava)	2,1
V	Vol máx material de arrastre (m^3)	0,2 m^3
V_m	Vol medio material de arrastre (m^3)	0,00001 m^3

DATOS OBTENIDOS DEL PERFIL TOPOGRÁFICO		DATOS DE CAMPO
L	Longitud del dique (m)	6 m
L_c	Longitud de la cubeta (m)	2,4 m
H_t	Altura dique (m)	4 m
J	Pendiente longitudinal del cauce (%)	5,22 %

Tabla 10.2. Ejemplo práctico para el cálculo de la pendiente de compensación. Secuencia de cálculo.

DENOMINACIÓN	ECUACIÓN	REFERENCIAS	RESULTADO
q Caudal característico ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-3}$)	$q = g \cdot Q \cdot (2 \cdot b)^{-1}$	Donde: g representa la aceleración de la gravedad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); Q , el caudal ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) y b el ancho medio del cauce (m).	$16,33 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-3}$
c Coeficiente de rugosidad de Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{\beta}{\sqrt{h}}}$	Donde β representa la rugosidad del lecho que toma el valor de 2 cuando el lecho posee gran rugosidad, y h representa la profundidad (m) y sustituye al radio hidráulico en cauces anchos.	29,46
h Profundidad (m)	$h = \frac{Q}{(b \cdot u)}$	Donde Q es Caudal de cálculo (m^3/s), b es el Ancho medio del cauce (m), u es la Velocidad del movimiento de una corriente con arrastres.	0,897 m
w Pe del agua con arrastres ($\text{tn}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\omega = \omega_0 + \chi \cdot (\delta - \omega_0)$	Donde ω_0 el peso específico del agua ($\text{tn}\cdot\text{m}^{-3}$); χ la proporción de arrastres, y δ el peso específico de los materiales de arrastre ($\text{tn}\cdot\text{m}^{-3}$).	
cs Coeficiente de Bazin para una suspensión ($\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$cs = C \cdot \sqrt{\frac{\omega_0^3}{(1 + \chi) \cdot (\omega_0 + \chi \cdot \delta)^3}}$	Donde C es el Coeficiente de Manning; ω representa el peso específico del agua y la ω_0 del agua con arrastres; el valor de χ puede tomarse como 0,10.	24,58

Tabla 10.2. Ejemplo práctico para el cálculo de la pendiente de compensación. Secuencia de cálculo. Continuación.

DENOMINACIÓN	ECUACIÓN	REFERENCIAS	RESULTADO
γ Fuerza límite de arrastre (m)	$\gamma = \frac{\sqrt{0,385 \cdot \delta \cdot (\delta - \omega) \cdot \lambda \cdot V}}{\omega \left[1 + \sqrt[4]{10,5 \cdot \left(\frac{V}{Vm} - 1 \right)} \right]}$	Donde δ el peso específico de los materiales de arrastre ($tn.m^{-3}$); ω el peso específico del agua con arrastres ($tn.m^{-3}$); λ representa el coeficiente de forma de los acarreos; V , el volumen máximo de material de arrastre (m^3), y V_m , el volumen medio del material de arrastre (m^3).	0,027 m
ζ p ($m^2.s^{-2}$)	$\zeta = Cs^2 \cdot \gamma$	Donde Cs representa el Coeficiente de Bazin para una suspensión y la γ es la fuerza límite de arrastre (m).	$16,21\ m^2.s^{-2}$
u Velocidad que tendrán las aguas desprovistas de acarreos ($m.s^{-1}$)	$u^7 + q \cdot u^4 - 3 \cdot \zeta^2 \cdot q = 0$	Aplicación del método iterativo para el cálculo de u .	$3,71\ m.s^{-1}$

Obtenido el valor de u , se puede redefinir h . Luego, el h es reemplazado en la ecuación del Coeficiente de Bazin (C) y se obtiene el valor final de C . A partir de estos datos se puede calcular nuevamente Cs y ζ con las. Nótese que los valores de q y de γ no varían.

j Pendiente de compensación (%)	$j = \frac{g \cdot u^3}{2 \cdot Cs^2 \cdot q}$	Donde g representa la gravedad ($m.s^{-2}$); u es la velocidad ($m.s^{-1}$); Cs representa el Coeficiente de Bazin para una suspensión y q es el caudal característico.	2,54%
L Longitud de la pendiente de compensación (m)	$L = \frac{H}{J - j}$	Donde H , la altura del aterramiento (m); J , la pendiente natural del terreno (%), y j la pendiente de compensación (%). Dividir por 100 denominador para cambio de unidades a (m).	149,48 m

Obras de control de torrentes

Un dique es una obra que se construye en sentido perpendicular al eje del cauce de la quebrada, cuya función es regular la pendiente del cauce disminuyendo la velocidad de los flujos de lodo y piedra, reteniendo el material sólido transportado.

La efectividad de estas obras varía sustancialmente, ya que están condicionadas a múltiples factores: dimensionamiento hidráulico de la estructura en función del área vertiente, condiciones de ubicación, conocimiento de las características ambientales de la cuenca y de las variables geomorfológicas del curso (pendiente de equilibrio del cauce, granulometría del lecho), índice de estabilidad de la corriente, diseño del dique en relación con el tipo de utilidad deseada, normativa de cálculo según el dimensionado estático de la obra, entre otros (Conesa, 2004).

Al momento de diseñar una obra transversal, se pueden utilizar diversos tipos de estructuras y materiales, sin que pueda establecerse ninguna regla fija, pues el buen juicio del ingeniero determinará en cada caso el tipo y los materiales más convenientes y económicos para su construcción. Debe considerarse, sin embargo, que se trata normalmente de obras de pequeña envergadura (< 15 m de altura), que se construyen en zonas abruptas y mal comunicadas, de forma que no puede disponerse, en general, de grandes medios para su ejecución (López Cadenas de Llano, 1988).

Para iniciar las actividades de diseño se necesita evaluar el lugar de emplazamiento, es decir, realizar una recorrida para la definición de las pendientes del terreno, reconociendo valles y cauce, lo cual puede realizarse topográficamente, a partir de la elaboración de perfiles transversales y longitudinales a campo, en el sitio de ubicación tentativa de la obra. Otros datos necesarios son caudal líquido y sólido (volumen medio y máximo) emitido por ese torrente cuando está en actividad.

Los materiales más utilizados para la construcción de diques son el hormigón sin piedras o muy chicas; solo de piedra y hormigón, de mampostería (con mortero de cemento) construido con piedras brutas o poco labradas unidas con cemento; de gaviones formados por piedras dentro de jaulas de alambre en forma de paralelepípedo rectangular, alambre galvanizado o acerado; de mampostería en seco que son sólo con piedras ordenadas, sin cemento, piedras grandes y paredes de asiento plano.

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 la obra está vacía aguas arriba, 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. Cuando se inicia la sedimentación y colmatación aguas arriba, ejerce un efecto regulador del transporte sólido y la atenuación de los picos de crecidas. En esta etapa, comienza la

consolidación del fondo del cauce, fijando el perfil longitudinal del mismo, evitando en muchos casos su degradación y la erosión regresiva.

3. Alcanzada la colmatación, se alcanza la pendiente de compensación, como producto de la formación de la cuña de aterramiento y el centrado del flujo (Figura 10.1).

4. 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. Este fenómeno 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. 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.

Partes constitutivas de un dique

La vista transversal de un dique expresa diferentes partes constitutivas según su distribución en el cauce. La obra se forma de dos partes principales: el **cuerpo** y las dos alas laterales (Figura 10.3). Dentro del cuerpo de obra se establece la cubeta o vertedero y los mechinales. La **cubeta** está ubicada 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, comúnmente, 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. Otro elemento de evacuación del agua son los **mechinales**, que 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 progresá 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 (10-20 cm Ø) o cuadrada (20-40 cm). Las **alas** deben poseer una pendiente sobre el terreno entre 5-20 % para seguridad cuando el nivel de agua supera el vertedero.

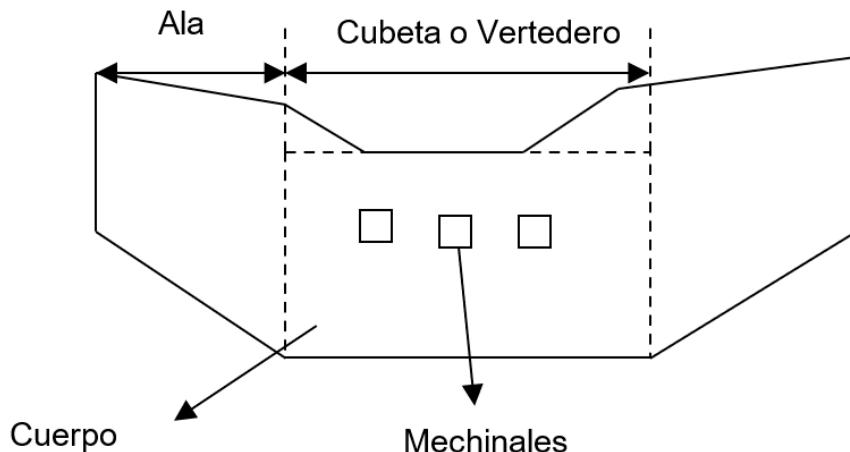


Figura 10.3: Partes principales de la obra en vista transversal. Fuente: Gaspari et al. (2013).

En la Figura 10.4 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. El empotramiento de un dique es la socavación que se realiza en el terreno para su soporte.

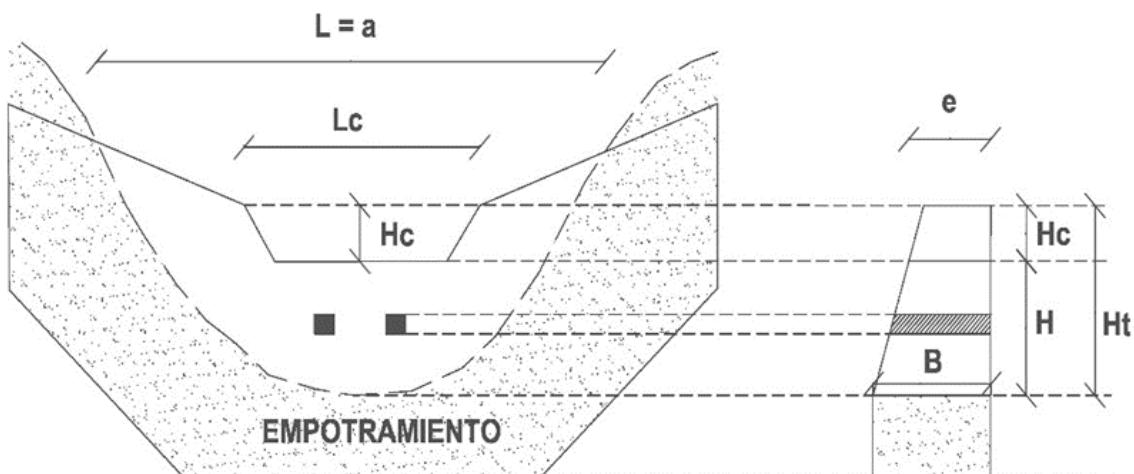


Figura 10.4. Corte transversal y lateral para el dimensionamiento de una obra torrencial. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Siendo:

L Ancho (a) del corte transversal del perfil del terreno.

Lc Longitud de la cubeta o ancho del vertedero.

Ht Altura total del dique.

H Altura útil del dique.

Hc Profundidad o altura de la cubeta / vertedero.

e Espesor del dique = Coronación de la obra.

B Base del dique.

Los diques presentan una infraestructura 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.

Está construida con el mismo o con diferentes materiales con respecto al dique y se denomina defensa al pie o zampeado. La longitud de la defensa al pie (d) se calcula por la Fórmula de Angherholzer (Figura 10.5).

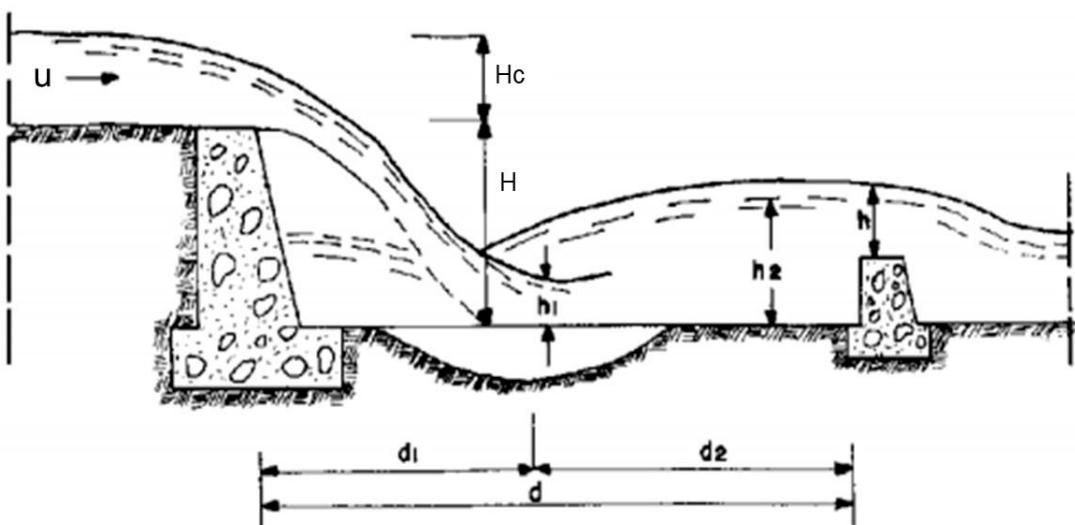


Figura 10.5. Corte lateral de una obra torrencial y defensa al pie. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Por último, para aliviar el empuje que debe soportar la obra se dejan ventanas denominadas mechinales, sobre la estructura que sirven para drenar el aterramiento. Pueden tener forma circular o rectangular y presentar una distribución a tres bolillos. La cantidad óptima de mechinales en un dique, se estima que es uno cada 5 a 8 m² de paramento.

Metodología para el diseño de obras de control de torrentes

García Nájera (1962) propuso una metodología de cálculo para el dimensionamiento de un dique de características torrenciales, según los Principios de Hidráulica Torrencia, la cual se sustenta 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, anteriormente calculada. Este modelo de cálculo se basa en determinar las diferentes características estructurales del dique / obra de compensación, 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. El procedimiento se resume en las siguientes etapas:

1. Dimensionamiento de la cubeta.
2. Determinación del espesor de coronación.
3. Cálculo del ancho de la base.
4. Determinación de la defensa al pie.
5. Definición del número de mechinales.
6. Condiciones de estabilidad al vuelco y al deslizamiento.
7. Comprobaciones de estabilidad de la obra.

La estabilidad del dique está dada por las fuerzas ejercidas por el peso propio de la obra (G) y el empuje del agua y/o sedimentos (E) acumulados aguas arriba de la obra. Esta geometría se puede visualizar en la Figura 10.6.

- El empuje hidrostático es una fuerza desfavorable. Se puede considerar en forma puntual (E_p) ($Mg.m^{-1}$) o sobre toda la estructura en forma homogénea (E). Los esfuerzos de empuje hidrostático que condicionan la estabilidad se presentan sobre el cuerpo de una obra, siendo estos el corte por desplazamiento sobre su base y el esfuerzo de vuelco. Estos esfuerzos son generados primero por el agua y posteriormente por los sedimentos acumulados aguas arriba de la obra, desde la base hasta la coronación, sucesivamente en el tiempo, se vaya formando la pendiente de compensación. El empuje del agua, cuando todavía no está colmatado el dique, es muy importante, ya que el dique deberá soportar diferentes esfuerzos según el tipo de caudal líquido emitido por cada tormenta producida.
- El peso propio de la obra (G) es la fuerza vertical que otorga estabilidad. Generalmente un dique presenta en corte una geometría trapezoidal. Debido a ello, el peso puede ser calculado a partir de las dos partes que lo conforman, una debida al peso de los materiales generados por el rectángulo (G1), y la otra formada por el peso del triángulo restante (G2). De esta manera, el peso total del dique se calculará como la suma de ambos pesos parciales.
- En el análisis integrado de las fuerzas que inciden sobre la obra (E y G), para que el dique sea estable, es condición que la fuerza resultante (R) debe pasar por el tercio central de la base del dique, generando una tensión de valor cero, por lo cual R se transmite al suelo (Figura 10.6).

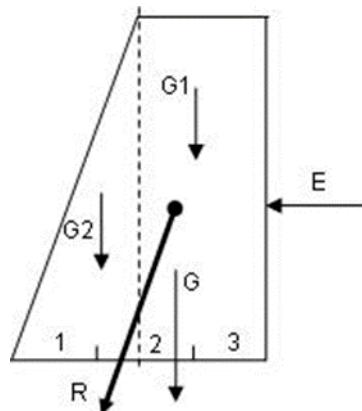


Figura 10.6. Fuerzas ejercidas sobre un dique de gravedad con pared recta aguas arriba y talud recto aguas abajo: Peso (G), empuje (E) y resultante de fuerzas (R).

La condición ideal de estabilidad se representa en el caso en que el E (fuerza de empuje) de los sedimentos acumulados aguas arriba del dique (E_p), dada en forma lateral a la obra y la presión ejercida por el agua, es menor que el momento de estabilidad dado por el peso G, en este caso la obra no se vuelca ni se desplaza ($E_p \leq G$).

Para la estabilidad de la obra se deben realizar las comprobaciones de la condición de estabilidad, para lo cual se analiza sobre puntos de equilibrio (R), si el sistema de control permanece en el mismo estado en ausencia de cualquier perturbación o entrada la salida de esa fuerza. Para determinar la estabilidad de un dique se deben cumplir tres condiciones: al vuelco, al deslizamiento y de las tensiones internas de la obra.

La **estabilidad al vuelco** depende de las dimensiones de la obra.

La **estabilidad al deslizamiento** se determina a partir del peso del dique (G) y el coeficiente rozamiento de obra (f) que puede tomar diversos valores según el estrato donde está implantada la obra, como, por ejemplo: 0,55 (arena) y 0,70 (hormigón sobre roca).

Para la determinación de las **tensiones máxima, mínima y media admisibles** de la obra, se debe determinar el momento resultante y la excentricidad que depende de los momentos de estabilidad y vuelco, del tamaño de la base y el peso de la propia obra. A partir de los resultados alcanzados con la tensión media (σ_m), se establece que la obra cumple con la condición de las tensiones cuando: σ_m se encuentra dentro de los siguientes rangos, según corresponda el sitio de emplazamiento de la obra:

- 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 granulares	mayor de 2 Mg.m ⁻²
- Suelos cohesivos	mayor de 3 Mg.m ⁻²

A continuación, en la Tabla 10.3 se presenta el desarrollo del cálculo de dimensionamiento y comprobaciones de estabilidad de una obra de corrección de torrentes, indicando las diferentes etapas, considerando que se utilizarán datos y resultados alcanzados con la metodología de pendiente de compensación (Tabla 10.4 y 10.5).

Tabla 10.3. Ejemplo práctico para el dimensionamiento de un dique de corrección de torrentes. Datos de base**DATOS DE BASE**

g	Aceleración de la gravedad (m.s^{-2})	9,8 m.s^{-2}
Q	Caudal de cálculo ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	10 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
δ	Pe materiales (Mg.m^{-3})	2,2 Mg.m^{-3}
δh	Densidad del hormigón (Mg.m^{-3})	2,4 Mg.m^{-3}
ω	Pe del agua con arrastres (Mg.m^{-3})	1,06 Mg.m^{-3}
c	Coeficiente de seguridad	1,5
f	Coeficiente de rozamiento	0,7
u_i	Velocidad que tendrán las aguas desprovistas de acarreos (m.s^{-1})	Obtenido de pendiente de compensación 3,714 m.s^{-1}

DATOS OBTENIDOS DEL PERFIL TOPOGRÁFICO

L	Long dique (m)	Este dato se debe modificar para corregir estabilidad de la obra	6 m
Lc	Long cubeta (m)		2,4 m
Ht	Altura dique (m)		4 m
J	Pendiente longitudinal del cauce (%)		5,22%

Tabla 10.4. Ejemplo práctico para el dimensionamiento de un dique de corrección de torrentes. Secuencia de cálculo de datos base.

DENOMINACIÓN		ECUACIÓN	REFERENCIAS	RESULTADOS
Lc	Longitud de la cubeta (m)	$L_c \equiv \frac{1}{3} \cdot L$	Donde: L (m) es la longitud o ancho del perfil topográfico a campo.	2,4 m
Hc	Altura cubeta (m)	$H_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{(g \cdot L_c^2)}}$	Donde: Q es el caudal total de desagüe ($m^3.s^{-1}$); g , la aceleración de la gravedad ($9,8 m.s^{-2}$) y L_c (m) en la longitud de cubeta.	1,21 m
	Altura cubeta más 5% revancha (m)	$H_c = H_c \cdot 1,05$	Se recomienda aplicar una revancha de 5% para contención y seguridad	1,27 m
H	Altura útil dique (m)	$H = H_t - H_c$	Donde: H_t es la altura total del dique (m), que se establece topográficamente, y H_c es la altura de la cubeta(m).	2,729 m
e	Espesor de cubeta (coronación) (m)	$e = c \cdot \left(\frac{\omega \cdot H_c}{f \cdot \delta h^\circ} \right)$	Donde: c es el coeficiente de seguridad; ω es el peso específico del agua con arrastres ($tn.m^{-3}$); H_c es la altura de la cubeta (m); f el coeficiente de rozamiento, y δh° , la densidad del hormigón ($tn.m^{-3}$).	1,202 m
B	Ancho de base (m)	$B = \sqrt{\left(\left(\frac{5}{4} \cdot e^2 \right) + \left(\frac{\omega}{\delta h^\circ} \cdot H^2 \right) \right)} - \frac{edel agua con arrastre (tn.m^{-3})}{2\delta h^\circ}$	Donde: e es la coronación (m), ω es el peso específico del agua con arrastre ($tn.m^{-3}$); δh° , la densidad del hormigón ($tn.m^{-3}$) y H es la altura útil de la obra (m).	1,65 m

Defensa al pie de Angherholzer

d	Longitud de la defensa al pie (m)	$d = \left((u + \sqrt{2gHc}) \sqrt{2 \cdot \frac{H}{g}} \right) + Hc$	Donde: u es la velocidad del agua sobre el vertedero ($m.s^{-1}$), g es la gravedad, Hc es la altura de la cubeta / vertedero (m) y H la altura útil del dique o de caída libre (m).	7,61 m
---	-----------------------------------	--	--	--------

Tabla 10.5. Ejemplo práctico. Secuencia de cálculo de las condiciones de estabilidad del dique: Cálculo de las fuerzas intervinientes (Figura 10.5).

DENOMINACIÓN	ECUACIÓN	REFERENCIAS	RESULTADOS
Fuerza desfavorable: Empuje hidrostático			
Ep Empuje puntual ($Mg.m^{-1}$)	$Ep = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H^2$	Donde: ω es el peso específico del agua con arrastre ($tn.m^{-3}$) y de la altura útil del dique (H) (m).	3,95 m
E Empuje del dique ($Mg.m^{-1}$)	$E = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H^2 \cdot a$	Donde: ω es el peso específico del agua con arrastre ($tn.m^{-3}$) y de la altura útil del dique (H) (m); a es el ancho del corte transversal (m).	23,69 m
Fuerza favorable: Peso de la obra			
G1 Peso de la obra de la sección 1 (Mg)	$G1 = \delta h^o \cdot e \cdot H$	Donde: δh^o es la densidad del material de la obra ($Mg.m^{-3}$), que en este caso es hormigón armado, e el espesor de la coronación (m) y H la altura útil (m).	7,87 tn
G2 Peso de la obra de la sección 2 (Mg)	$G2 = \frac{1}{2} \cdot (B - e) \cdot \delta h^o \cdot H$	Donde: δh^o es la densidad del material de la obra ($Mg.m^{-3}$), que en este caso es hormigón armado, e el espesor de la coronación (m), el ancho de la base (B) y H la altura útil del dique (m).	1,48 tn
G Peso total de la obra (Mg)	$G = G1 + G2$	Donde: $G1$ y $G2$ es el peso de ambas secciones (Mg).	9,36 tn

Tabla 10.6. Ejemplo práctico. Secuencia de cálculo de las comprobaciones de estabilidad del dique.

DENOMINACIÓN	ECUACIÓN	REFERENCIAS	RESULTADOS
Estabilidad al vuelco			
Me Momento estabilizante ($Mg \cdot m^{-1}$)	$Me = G \cdot (X)$	$X = \left(\frac{11}{9}\right) \cdot e$ Donde: G es el peso de la obra (Mg) y e es la coronación (m).	13,76 $Mg \cdot m^{-1}$
Mv Momento de vuelco ($Mg \cdot m \cdot m^{-1}$)	$Mv = Ep \cdot \frac{1}{3} \cdot H$	Donde: Ep es el empuje puntual ($Mg \cdot m^{-1}$) y H es altura útil dique (m).	3,59 $Mg \cdot m \cdot m^{-1}$
Estabilidad al vuelco	$Me \cdot Mv^{-1}$		3,83
<i>Considerando que la relación $(Me / Mv) \geq 1,5$, entonces la obra cumple condición de estabilidad al vuelco.</i>			
Estabilidad al deslizamiento			
Fr Fuerza de roce ($Mg \cdot m^{-1}$)	$Fr = G \cdot f$	Donde: G es peso el dique (Mg) y el coeficiente rozamiento de obra (f) según el estrato de implantación: 0,55 (arena) y 0,70 (hormigón sobre roca)	6,55 $Mg \cdot m^{-1}$
<i>La condición de estabilidad al deslizamiento se cumple Si:</i>		$Fr \cdot (Ep)^{-1} \geq 1,1$	1,66
<i>$Ep \cdot (G)^{-1} < 0,7$</i>		Donde: Fr es la fuerza de roce ($Mg \cdot m^{-1}$), Ep es el empuje puntual ($Mg \cdot m^{-1}$) y G es peso el dique (Mg).	0,42
Tensiones admisibles			
MR Momento resultante ($Mg \cdot m \cdot m^{-1}$)	$MR = Me - Mv$	Donde: Me es el momento estabilizante ($Mg \cdot m \cdot m^{-1}$) y Mv es el momento de vuelco ($Mg \cdot m \cdot m^{-1}$).	10,16 $Mg \cdot m \cdot m^{-1}$
e* Excentricidad de la obra	$e^* = \left(\frac{MR}{G}\right) - \left(\frac{B}{2}\right) = m - \left(\frac{B}{2}\right)$	Donde: MR es el Momento resultante ($Mg \cdot m^{-1}$), G el peso del dique (Mg) y B la base de la obra (m).	0,25
<i>Para cumplir con la condición de excentricidad, $e^* \leq (B / 6)$</i>			

Tabla 10.7. Ejemplo práctico. Secuencia de cálculo de las comprobaciones de estabilidad del dique. Condición de las tensiones extremas admisibles.

DENOMINACIÓN	ECUACIÓN	REFERENCIAS	RESULTADOS
σ_1 Tensión extrema máxima, aguas abajo (Mg.m ⁻²)	$\sigma_1 = \frac{G}{B} \cdot \left[1 + \left(6 \cdot \frac{e^*}{B} \right) \right]$	Donde: G el peso del dique (Mg), B la base de la obra (m) y e^* la excentricidad.	10,93 Mg.m ⁻²
σ_2 Tensión extrema mínima, aguas arriba (Mg.m ⁻²)	$\sigma_2 = \frac{G}{B} \cdot \left[1 - \left(6 \cdot \frac{e^*}{B} \right) \right]$	Donde: G el peso del dique (Mg), B la base de la obra (m) y e^* la excentricidad.	0,37 Mg.m ⁻²
σ_{media}	<p><i>La cuantificación de la tensión media de la obra (σ_m) se establece según la tensión mínima σ_2.</i></p> $\sigma_m = \frac{1}{4} \cdot (3 \cdot \sigma_1 + \sigma_2)$ $\sigma_m = \frac{3}{4} \cdot \sigma_1$	Se utiliza esta ecuación cuando $\sigma_2 > 0$ Se utiliza esta ecuación cuando $\sigma_2 \leq 0$	8,29 Mg.m ⁻² 8,19 Mg.m ⁻²

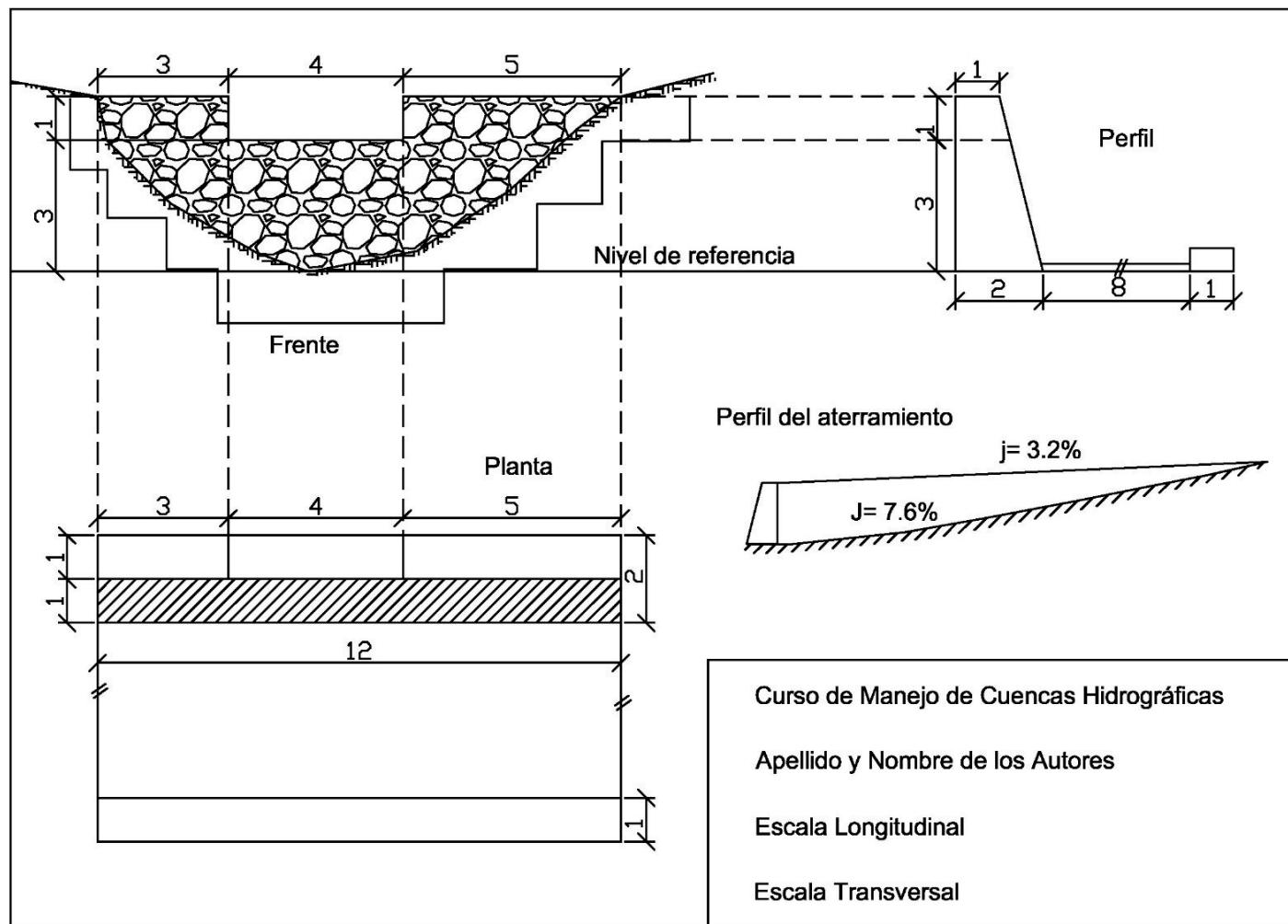


Figura 10.7. Plano de dimensionamiento de un dique con sus perfiles.

Ejemplo de elaboración del Plano de dimensionamiento de un dique de corrección de torrentes

A partir de los resultados alcanzados del dimensionamiento del dique se realiza el planteo gráfico, a escala, en papel o digital, para esquematizar las partes constituyentes de la obra. Para ello se presentan tres vistas características acotadas que reflejan dicho planteo. Las mismas son:

- Frente: donde se expone el corte transversal del curso y la obra. Se indican: el cuerpo con la longitud de las alas y de la cubeta. También se indica la ubicación del / los mechinales y el empotramiento.
- Planta: es la vista desde arriba de la obra, donde se indican la coronación, la base, las alas, la cubeta y además la defensa al pie y zampeado, si existiere.
- Perfil: se muestra el espesor de la coronación y de la base, los mechinales, la defensa al pie. Además, se apuntan las alturas: total, útil y de la cubeta.

Todo el esquema debe ser realizado a escala horizontal y vertical constante. Además, debe presentar una breve carátula con el nombre del/los autores.

En relación con el perfil del aterramiento, se sugiere la dimensión de la pendiente del terreno y la de compensación una vez construido el dique. Este dibujo debe presentar las dimensiones reales en texto y no necesariamente una escala. En la Figura 10.7 se presenta un ejemplo de un Plano de dimensionamiento de un dique con sus tres perfiles de diseño: frente, planta y perfil, indicando también el perfil del aterramiento y pendiente de compensación.

Efectos hidrológicos de los diques de corrección de torrentes

Gaspari et al. (2009) indican que un dique durante su vida útil genera efectos muy diversos sobre el ambiente puntual, local y hasta regional, y de índole desde socioeconómico 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 torrencial es la retención de sedimentos y el caudal de punta, 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: Acompaña 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 favorable de la dinámica morfológica de barrancos, torrentes y ramblas y sobre la transitabilidad para la ictiofauna.

Referencias

- Aristizábal, E.; Arango Carmona, M. I. y I.K.García López. (2020). "Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 29 (1): 242-258. v29n1.72612.
- Conesa, G. C. (2004). Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. *NIMBUS*, N° 13-14, ISSN 1139-7136, pp. 125-142
- García Nájera, J. M. (1962). *Principios de hidráulica torrencial. Su aplicación a la corrección de torrentes*. Ministerio de Agricultura, Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial; Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid. 349 pp.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A. y S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 p.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A. y S Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3. Actualización constante on line SEDICI.
- Iroume A., J. Ganoso. (1991). La pendiente de los depósitos en los torrentes del cerro Divisadero, Coyhaique, Chile. *Bosque*. 12(1): 37-42.
- López Cadenas de Llano, F. (1988). Corrección de torrentes y estabilización de cauces. *Colección FAO: Fomento de tierras y aguas* Nro. 9. 184 pp. Disponible en: <http://books.google.com.ar/books?id=LYSz9cvPvXwC&lpg=PA4&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=true>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. (2014). *Guía técnica para la formulación de los POMCAS*. no. 104. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo.
- Mintegui Aguirre, J. A., F. López Unzú. (1990). *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 pp.

CAPÍTULO 11

Restauración hidrológica

María Isabel Delgado

Medidas de manejo del escurrimiento superficial

En el marco del Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (período 2021-2030, declarado por la Asamblea General de las Naciones Unidas mediante la resolución A/RES/73/284, de 1 de marzo de 2019, a fin de apoyar y ampliar los esfuerzos encaminados a prevenir, detener e invertir la degradación de los ecosistemas en todo el mundo y concienciar sobre la importancia del éxito de la restauración de los ecosistemas), se brinda la oportunidad de transformar los sistemas de producción. En este sentido, se expresa que la restauración de los entornos forestales, agropecuarios y acuícolas debe contribuir, primordialmente, a restablecer la salud y estabilidad de estos ecosistemas, de modo que puedan satisfacer las necesidades humanas de producción de alimentos y medios de subsistencia sostenibles (FAO, 2020).

La restauración agro-hidrológica trata de englobar en un plan unificado de acción, la problemática común a suelos, agua y vegetación de las cuencas, conduciendo a un auténtico proceso de ordenación. Los objetivos generales de la ordenación agro-hidrológica de una cuenca hidrográfica y de su posterior restauración hidrológico-forestal se centran en el uso racional de los recursos que dispone, fundamentalmente el suelo y el agua.

Su estudio se divide en dos grandes grupos, de acuerdo a Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (1994):

- Relacionados a los problemas generados por los eventos torrenciales en la cuenca.
- Referidos a la utilización agronómica de la cuenca y el aprovechamiento racional de los recursos hídricos y las potencialidades vegetativas.

De acuerdo a Mintegui Aguirre y López Unzú (1990), el término agrohidrológico incluye tanto las actuaciones de carácter forestal como las prácticas agrícolas habituales en las superficies vertientes de la cuenca, así como las medidas adecuadas en los cauces de evacuación de los flujos de avenida y las obras auxiliares. La restauración de los ecosistemas requiere de un enfoque integrado que reconozca los complejos factores sociales, políticos, económicos y ambientales que interactúan en la degradación de los territorios agrícolas. Con un enfoque integrado, también se puede empoderar a las partes interesadas para que encuentren y apliquen soluciones restauradoras sostenibles.

Comprender las causas profundas y los factores que contribuyen a la degradación —mediante procesos de consulta amplios y evaluaciones participativas de la degradación de las tierras— es

indispensable para diseñar estrategias efectivas de restauración de los ecosistemas, con intervenciones de gestión de los cultivos, el ganado y la flora y fauna silvestres (FAO, 2020).

La identificación de áreas prioritarias torrenciales y el diseño y 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 torrencial (Gaspari et al., 2013). Por ejemplo, los esfuerzos de restauración para la recuperación del servicio ecosistémico de provisión de agua se justificarán en aquellas cuencas que han sufrido cambios como consecuencia del hombre y donde su impacto se ve reflejado en el reducido nivel de satisfacción de las distintas demandas sociales y económicas por dicho servicio. Ello se observa por ejemplo en cuencas que entregan una deficiente calidad de agua que impacta en la salud de la población, genera menores caudales que impiden y limitan el desarrollo de actividades productivas que dependen del uso del agua (agricultura, acuicultura, etc.), y contribuye a una mayor recurrencia e intensidad de eventos extremos (caudales mínimos, crecidas e inundaciones) que impactan en la salud y bienestar de las personas, así como a la infraestructura (Little y Lara, 2010).

Las actuaciones en la temática pueden sintetizarse en dos líneas de acción: la utilización racional de las áreas de cultivo, que cubren las zonas de menores pendientes y suelos más fértiles, y el establecimiento de una cubierta vegetal protectora adecuada en el resto del territorio. Ésta puede adquirir distintas formas tales como praderas, áreas de matorral o monte bajo y finalmente zonas de bosque, bien sean de repoblación o naturales (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990). La restauración ecológica, de acuerdo a la Sociedad para la Restauración Ecológica, es considerada como una actividad pensada para dar curso al restablecimiento de un ecosistema degradado, teniendo en cuenta su composición específica y la estructura de la comunidad, procesos funcionales y su capacidad de adaptación a la perturbación (De Paz et al., 2019). Se considera que en esta definición está implícito tanto el hecho de alcanzar una situación anterior al disturbio, como también, el de lograr su mejora (Azpilicueta et al., 2011). Son numerosos los ejemplos fallidos de proyectos de restauración a causa de la acción erosiva de la escorrentía, la cual limita el desarrollo del suelo y la vegetación. Por tal motivo, se deberían enfocar las acciones de la restauración hacia el manejo adecuado de la escorrentía, como paso previo imprescindible para que el sistema posea una cierta estabilidad endógena, a partir de la cual el resto de procesos ecológicos puedan funcionar y llevar al sistema a niveles de complejidad que le aporten una cierta resiliencia (Nicolau et al., 2013). Autores como Whisenant et al. (1995) han advertido que para alcanzar un suelo biológicamente funcional es requerimiento previo garantizar la estabilidad de los recursos edáficos, frecuentemente amenazada por la acción erosiva de la escorrentía o del viento.

Se considera que el éxito de proyectos de restauración, enfocados en la recuperación del servicio ecosistémico de provisión de agua, se basará en distintos componentes. Por ejemplo, vinculados a los aspectos ecológicos y ambientales, se perseguirán cambios graduales y comprobables en la estructura de los ecosistemas a diferentes escalas espaciales para una mejor respuesta hidrológica de la cuenca (aumento de caudales bases, menor recurrencia e intensidad de eventos extremos). Por su parte, dentro de los aspectos socio-económicos debería producirse un incremento en la satisfacción social y económica por el uso del agua, generando una disminución de los conflictos asociados a este recurso. Por último, y no por ello de menor

importancia, dentro del componente de conocimiento y educación, se buscará un avance sustancial en el conocimiento científico, difusión y transferencia tecnológica respecto a la ecología de cuencas y reeducación de su uso, y el desarrollo de políticas públicas expresadas, por ejemplo, en planes de ordenamiento territorial a escala de cuenca, monitoreo y aprendizaje para mejorar las prácticas de restauración (Little y Lara, 2010).

Las características de la restauración variarán según el territorio, es decir, en cada región se adoptará una solución distinta, en función en última instancia de los objetivos y las necesidades de la sociedad. Puede ir desde la reparación de determinadas funciones ecosistémicas, por ejemplo, en los agroecosistemas, hasta el restablecimiento pleno de los ecosistemas nativos (FAO, 2020). Existe una diferencia entre restauración ecológica pasiva y activa, según sean las acciones llevadas adelante para alcanzar el objetivo propuesto. El primer concepto incluye tareas consistentes en eliminar o modificar una alteración específica, como, por ejemplo, retirar el ganado del bosque para permitir que el proceso de regeneración actúe por sí solo. El segundo, refiere a intervenciones adicionales, tales como plantación y siembra de especies nativas que se han perdido (Nowak y Urretavizcaya, 2014). En Argentina, el primer antecedente de restauración de bosques nativos tuvo lugar en Isla Victoria, en el Parque Nacional Nahuel Huapi (Nowak y Urretavizcaya, 2014). En la restauración forestal, entendida como el proceso destinado a recuperar la integridad ecológica y mejorar zonas deforestadas o paisajes forestales degradados, se recomienda el uso de especies nativas, propias de la zona a restaurar. Las especies naturalizadas son aquellas que se establecen en el área sin dificultad y cumplen sus ciclos de vida sin perjudicar al ecosistema. Si esa especie presenta un comportamiento agresivo de colonización y las condiciones ambientales favorecen su dispersión, estas pueden convertirse en invasoras, llegando a tener consecuencias devastadoras para las especies nativas y por lo tanto convertirse en una amenaza para la salud ecosistémica (Chifarelli y Albujal Carbonell, 2022). Según el Mecanismo para la Restauración de Bosques y Paisajes de la FAO, la restauración de bosques y paisajes (RBP) es “un proceso activo que reúne a las personas para determinar, negociar y aplicar prácticas que restablecen un equilibrio óptimo convenido de los beneficios ecológicos, sociales y económicos de los bosques y los árboles en un ámbito más amplio de usos de la tierra (FAO, 2020). En el mismo sentido, Chifarelli y Albujal Carbonell (2022) expresan que la restauración integral de un ecosistema no consiste únicamente en recuperar la biomasa nativa, sino que también consiste en un trabajo continuo junto con las comunidades locales para lograrlo.

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.

En la Tabla 11.1 se presenta una caracterización de las distintas medidas a ser implementadas. La tabla fue extraída de Gaspari et al. (2013), quienes a su vez se basaron en López Cadenas del Llano (1998) y Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008) para su confección.

Tabla 11.1. Clasificación de obras de corrección de torrentes, propósitos y áreas geográficas afectadas. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Área geográfica afectada	Problemas que se pueden presentar	Acciones destinadas a combatirlos	
		Clasificación	Descripción
Cuenca de recepción	Erosión laminar y en regueros / Erosión en cárcavas / Problemas de infiltración y contenido de humedad del suelo / Avenidas originadas por los aguaceros torrenciales / Erosión en profundidad, movimientos en masa	Biológicas	Reforestación
			Mejora de las coberturas vegetales
		Prácticas mecánicas	Terrazas
			Bancales
Caucos de drenaje (torrentes y ríos torrenciales)	Perfiles no equilibrados en los torrentes / Lechos no consolidados, por lo tanto inestables / Laderas inestables / Importante transporte de materiales por la corriente (sedimentos y acarreos), que amenazan con aterrinar las obras de infraestructura / Márgenes inestables con cauces divagantes e inundaciones por avenidas	Pequeñas obras hidráulicas	Albarradas Palizadas Fajinas
			Diques de consolidación Diques de retención total o selectivo
		Obras transversales	Espigones Muros de defensa de márgenes (malecones, escolleras)
			Obras longitudinales
		Obras mixtas	Umbrales de fondo Perfiles escalonados con tramos erosionables
			Cubiertas vegetales a lo largo de los márgenes de los cauces
		Biológicas	

Breve descripción de las distintas medidas a implementar

Reforestación: la cubierta vegetal, contribuye tanto a incrementar la infiltración, como a disminuir la velocidad de la lámina de escurrido superficial, pues incrementa la rugosidad de la superficie por la que circula; a su vez, favorece el flujo subsuperficial del agua en los períodos de precipitaciones abundantes. Por dichos motivos, se considera que la cobertura vegetal, especialmente la cobertura forestal, actúa como un regulador natural de los recursos hídricos.

Mejora de las coberturas vegetales: la vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo, sus funciones pueden mejorarse, por ejemplo, a partir del enriquecimiento de pastizales. Este enriquecimiento comprende la diseminación de semillas, tanto de especies nativas como exóticas, con el fin de conseguir la germinación e instalación de las mismas para aumentar los recursos forrajeros.

Terrazas: esta medida comprende la confección de un camellón y un canal de tierra, construidos en sentido perpendicular a la pendiente. De este modo, el agua que escurre por el suelo es interceptada, favoreciendo el proceso de infiltración. Se considera que generan una disminución en la velocidad y volumen de la escorrentía, reducen los caudales pico y aumentan el contenido de humedad del suelo.

Bancales: consisten en plataformas o escalones construidos en serie, en forma perpendicular a la pendiente y separados por paredes protegidas con vegetación. Generalmente se utilizan sitios con pendientes entre el 30 y el 45%.

Drenajes: su construcción puede realizarse de forma manual o mecanizada. Comprende estructuras, naturales o artificiales, que buscan recoger las aguas sobrantes de una determinada zona y encauzarlas fuera de la misma.

Palizadas: se colocan estacas ancladas al terreno (aproximadamente de 1 m), que servirán de base. También es posible colocar estacas pequeñas cada 30 a 50 cm, entrelazadas con ramas vivas de fácil enraizamiento.

Fajinas: conformadas por manojos de ramas y tallos atados, colocados en el fondo de zanjas poco profundas, (las cuales siguen el contorno de la ladera), que se recubre parcialmente de tierra después.

Diques de consolidación: estas medidas evitan los fenómenos directos de erosión en los cauces y en las laderas marginales afectadas de inestabilidad por la acción erosiva. Sirven para fijar el perfil longitudinal del lecho, a través de la construcción de varios diques consecutivos que generan una pendiente no erosionable.

Diques de retención: están destinados a detener la mayor cantidad posible de materiales, sólidos o líquidos. Se emplazan aguas arriba de la zona en que se producen los daños por acarreos o caudales líquidos, aprovechando la existencia de buenas cerradas y de ensanchamientos que definan importantes volúmenes de embalse.

Diques de laminación: su función principal es la de disminuir la punta de los caudales líquidos de avenida mediante el embalse temporal del caudal de avenida cuando el caudal que llega al dique sea superior al que sea capaz de evacuar por las troneras.

Espigones: son estructuras apoyadas o empotradas en la orilla, que están dentro de la corriente. Desvían las líneas de corriente alejándolas de la orilla. Además, tienden a favorecer que entre ellas se depositen los materiales arrastrados por el cauce.

Muros de defensa de márgenes (malecones, escolleras): se trata de estructuras apoyadas directamente en la margen de un río a fin de evitar que la corriente de agua esté en contacto con el material para evitar totalmente o reducir la erosión lateral que se produce en las márgenes de los ríos.

Umbrales de fondo: se trata de obras transversales, de carácter auxiliar a las obras longitudinales, para controlar la erosión del lecho. Se colocan en los tramos erosionables en que no es posible el uso de diques de corrección.

Cubiertas vegetales a lo largo de los márgenes de los cauces: la vegetación puede utilizarse como instrumento para la protección de las márgenes en los cursos de agua.

En coincidencia con lo manifestado por FAO (2020), se resalta la relevancia de que las labores de restauración sean inclusivas, y que procuren generar oportunidades para los colectivos sociales desfavorecidos y marginados. Es necesario desarrollar las capacidades locales y valorar los conocimientos autóctonos, empoderando a las comunidades para que conciban, elaboren, ejecuten y se beneficien de los proyectos de restauración, de este modo se promoverán las prácticas innovadoras de diversificación, se potenciarán las sinergias y las complementariedades

y se reducirá al mínimo la diferencia entre ventajas y desventajas, vigorizando los servicios ecosistémicos en los sistemas agrícolas.

Referencias

- Azpilicueta, M., Gallo, L., Pastorino, M., Lozano, L. (2011). Aspectos genéticos de la restauración ecológica del bosque nativo: Ejemplos de aplicación en la Región Andino-Patagónica. *Serie técnica: "Sistemas Forestales Integrados"*. Cuadernillo N° 2. INTA EEA Bariloche.
- Chifarelli, V., Albuja Carbonell, D. (2022). Ciencia y reforestación | ¿Especies Exóticas en la Restauración Forestal?. *Argentina Forestal*. <https://www.argentinaforestal.com/2022/02/27/ciencia-y-reforestacion-especies-exoticas-en-la-restauracion-forestal/>
- De Paz, M., Gobbi, M., Raffaele, E. (2019). Revisión de las experiencias de revegetación con fines de restauración en bosques de la Argentina. *Ecología Austral*, 29: 194-207. <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.2.0.689>
- FAO. (2020). *Documento de posición sobre “restauración de los ecosistemas” relativo a los ecosistemas de producción, en el contexto del Decenio de las Naciones Unidas sobre la restauración de los ecosistemas (2021-2030)*. Comité Forestal. FO: COFO/2020/Inf.7. ND651/s. 11pp.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M.I., Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Universidad Nacional de La Plata, EDULP. Libro digital, PDF. (Libro de cátedra)
- Little, C., Lara, A. (2010). Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque*, 31(3): 175-178.
- López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 pp.
- Mintegui Aguirre, J.A., López Unzú, F. (1990). *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 pp.
- Mintegui Aguirre, J.A., Robredo Sánchez, J.C. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del Agua*, 1 (2): 69 a 82.
- Mintegui Aguirre, J.A., Robredo Sánchez, J.C. (2008). *Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para la América Latina y el Caribe*. PHI – VII, documento técnico Nro. 13. 178 pp.
- Nicolau, J., Moreno de las Heras, M., Merino-Martín, L., Espigares, T. (2013). Bases eco-hidrológicas para aplicar la restauración ecológica en minería. En: *Restauración ecológica en minería: de la teoría a la práctica* (pp.47-63). Editorial Fundación Ciudad de la Energía.
- Nowak, C., Urretavizcaya, M. (2014). Restauración con especies arbóreas nativas en Patagonia. *Patagonia Forestal*; 20, 1: 32-35.

Whisenant, S.G., Thurow, T.L., Maranz, S.J. (1995). Initiating autogenic restoration on shallow semiarid sites. *Restoration Ecology*, 3, 61-67.

CAPÍTULO 12

Gestión y legislación de cuencas hidrográficas

Fernanda Julia Gaspari

Procedimientos de gestión para la toma de decisiones

Según FAO⁸ las cuencas hidrográficas deberían entenderse como sistemas dinámicos caracterizados por diversas interacciones y relaciones espaciales entre las personas y el medio ambiente que se manifiestan como redes de sistemas diferentes de uso de la tierra. Las relaciones socioeconómicas, culturales y ambientales, los flujos y los conflictos que se generan entre las partes superior e inferior de una cuenca hidrográfica se denominan vínculos aguas arriba y aguas abajo. Uno de los principios fundamentales de la gestión de las cuencas hidrográficas consiste en examinar estos vínculos. Otros principios importantes son: abordar las causas subyacentes y los factores que provocan la degradación ambiental (en lugar de tratar los síntomas); planificar un proceso iterativo que conste de ciclos de análisis, formulación, ejecución y evaluación de un plan, que permita un aprendizaje y ajustes continuos; trabajar entre los distintos sectores, con todos los grupos de partes interesadas y niveles administrativos, integrando así los aspectos de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo; y combinar los conocimientos locales y científicos en relación al agua y al ambiente.

Saavedra (2018) menciona que la disponibilidad de agua en el futuro será cada vez más limitada si procesos y accesiones integrales no son implementados rápidamente para la gestión de los recursos hídricos y el ambiente, disponibles en las cuencas hidrográficas. Investigaciones indican que, de acuerdo a estimaciones recientes, el incremento en la demanda de agua, además del incremento de la población y el crecimiento económico puede resultar en más de un treinta por ciento de demanda de agua no satisfecha para el 2030.

Se entiende por MICH como “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” (Gaspari et al., 2009). Este manejo otorga al desarrollo sustentable un ámbito geográfico de aplicación que incluye un proceso antrópico 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 (Gaspari et al., 2013).

Considerando la evolución del concepto MICH, como consecuencia de la aplicación de políticas integradoras, se genera una planificación y gestión para el desarrollo sostenible, que forma parte de la base indispensable para la comprensión y aplicación del buen uso y manejo de los recursos naturales y establecer, basado en lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana y de la calidad de vida de su población. MICH se define como un conjunto de esfuerzos tendientes

⁸ <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/watershed-management/basic-knowledge/es/>

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 (Gaspari et al., 2002).

El documento denominado “Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable”, elaborado por el señor Axel Douroujeanni (2000) expresa una contribución hacia el MICH, para mejorar la toma de decisiones conducentes al desarrollo sostenible en la región de América Latina, el cual constituye una versión revisada y actualizada de la “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.

Teniendo en cuenta que el MICH se conduce al concepto moderno de sustentabilidad, ésta se puede definir como es la capacidad del ser humano de satisfacer las necesidades básicas y fomentar el mejoramiento de la calidad vida, como individuo y como sociedad, a corto, mediano y largo plazo y en armonía con los recursos naturales. Este concepto comenzó a forjarse en el año 1972 cuando fueron sembradas las bases del desarrollo sustentable y el concepto de sustentabilidad en la *Conferencia de las Naciones Unidas* en Estocolmo. En 1992, se celebró el *Earth Summit* en Río de Janeiro, donde las Naciones Unidas determinaron y formalizaron el concepto actual de desarrollo sustentable y sostenibilidad para proteger el medioambiente. El desarrollo sustentable busca preservar, conservar y aprovechar los recursos naturales, siendo su principal objetivo evitar o frenar el daño ambiental a corto y largo plazo.

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 con 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. 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 (Gaspari et al., 2009).

Esta situación se puede ilustrar con la Figura 12.1, adaptación propia del Triángulo de Nijkamp, en el que cada lado del representa un objetivo, las flechas ubicadas en los lados representan el sentido del logro de cada uno de los objetivos (de 0 a 100%) y el área central 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 como base, el ámbito o espacio dentro del cual se pretende alcanzar el desarrollo sustentable, en este caso la cuenca hidrográfica⁹.

⁹ Informe Regional Sustainable Development and Natural Resources Use, World Bank Annual Conference on Development Economics, Washington D.C., 1990.

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, como por ejemplo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)¹⁰ a nivel mundial.

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 apropiado dibujar los lados de los objetivos en planos distintos (Figura 12.1 izquierda). Esta representación luego se integra en los planos económico, social y ambiental reforzando los intercambios logrados entre crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental, que no se producen sólo dentro de cada plano, sino también existe interacción entre distintas áreas. Estos intercambios entre distintos ámbitos, por ejemplo, entre tecnología (crecimiento económico), avances sociales y recursos naturales (sustentabilidad ambiental), permiten compensar las deficiencias internas de algunos de los ámbitos para lograr los objetivos deseados en forma equilibrada, tendiendo al desarrollo sustentable (Figura 12.1 derecha).

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.

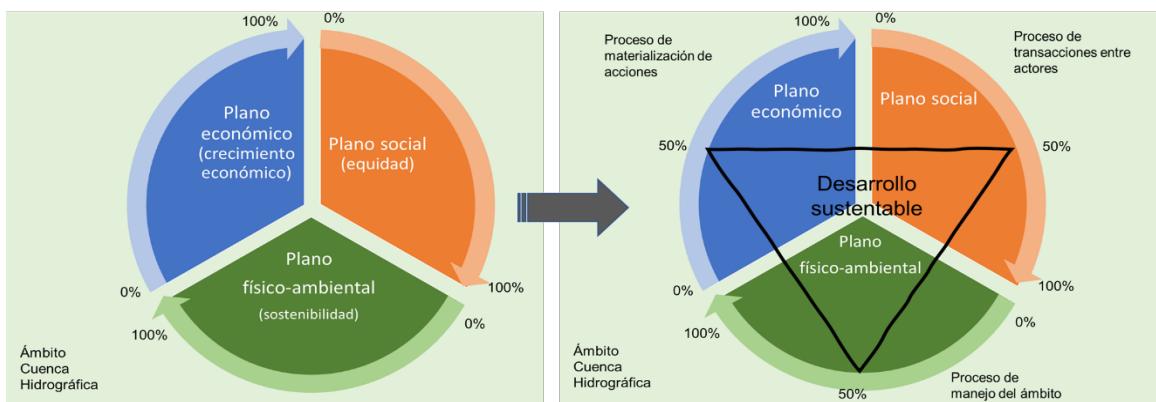


Figura 12.1. Representación gráfica de los diferentes planos del análisis del crecimiento económico, la equidad y la sustentabilidad ambiental. Fuente: Adaptación propia de Nijkamp (1990).

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

¹⁰ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

recursos y las cambiantes aspiraciones de los actores, por citar sólo algunas de las variables involucradas (Gaspari et al., 2009).

Para pasar de la simple enumeración de los conflictos, como en el triángulo de Nijkamp, a una secuencia de actividades para resolver los conflictos (procedimientos), se ha procedido a cambiar el triángulo por un cubo (Figura 12.2).

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 12.2), lo que confiere al análisis tres dimensiones y múltiples planos.

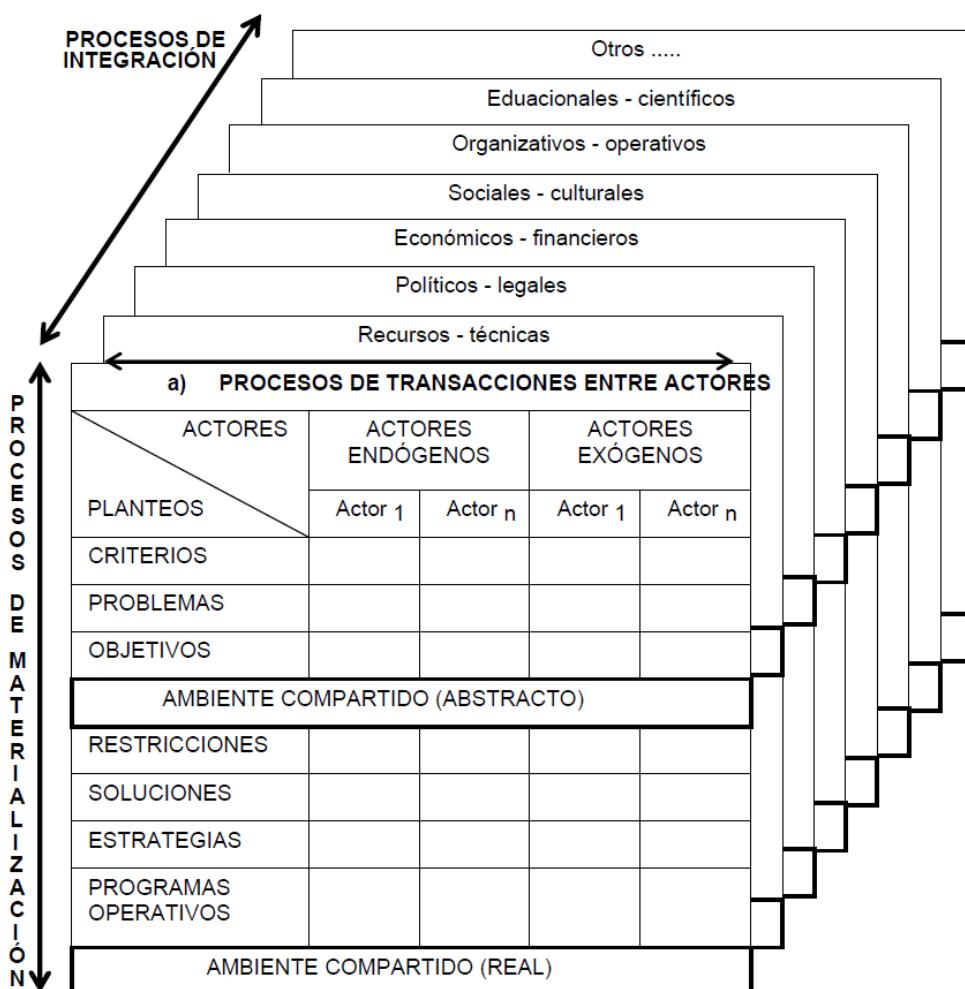


Figura 12.2. Marco conceptual y operacional de aportes al desarrollo sustentable con equidad. Fuente Douroujeanni, CEPAL. (1989).

La analogía entre objetivos y procedimientos de gestión ilustrados, lo define Douroujeanni (1990) por medio de un análisis en tres dimensiones, que representan los procedimientos de acción, y múltiples planos, expresados por Nijkamp, como se muestra en la Tabla 12.1.

La secuencia del proceso de materialización de acciones según Douroujeanni (1990) se ilustra en una Cartilla metodológica que explica cada una de las etapas procedimentales (Tabla 12.2).

Tabla 12.1. Analogía entre objetivos y procedimientos de gestión. Fuente: Dourjeanni (1992).

Objetivos	Procedimientos (Cubo)
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

Tabla 12.2. Procesos de materialización de acciones.

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).
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)	<i>Reinicio del ciclo</i>	<i>Reiniciar el ciclo en niveles progresivamente más detallados y precisos.</i>

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, como así también la incorporación de cada una de las dimensiones y áreas temáticas. 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.

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. 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 y Jouravlev, 1999).

Recomendaciones estratégicas para el MICH

A continuación, se exponen recomendaciones estratégicas tomadas de Saavedra (2018) de un trabajo realizado a nivel de microcuenca en Bolivia.

AMBIENTE FAVORABLE

- Revisar y ajustar las políticas y normas sectoriales relevantes (ej. agua, cuencas, energía, bosques, agricultura y desarrollo rural) a nivel nacional y subnacional, en particular durante la formulación y/o evaluación de programas/proyectos de gestión de cuencas.
- Promover el diálogo entre y dentro de las instituciones y sectores públicos para apoyar la integración horizontal y vertical a escala de microcuenca y cuencas estratégicas.
- Establecer mecanismos para la colaboración y coordinación interministerial y para la comunicación sistemática ascendente de modelos y esquemas de gobernanza de cuencas desarrollados localmente (microcuenca, subcuenca).
- Fortalecer la capacidad de los individuos (por ejemplo, líderes locales de la gestión de cuencas, jóvenes, etc.) y de las organizaciones (por ejemplo, usuarios de agua, Organismos de gestión de cuencas (OGC) y plataformas de cuencas, etc.) en base a las organizaciones existentes y a las necesidades existentes.
- Fortalecer la capacidad de liderazgo, la planificación estratégica e integrada y el fomento del desarrollo de una visión de cuenca entre los actores locales (por ejemplo, el gobierno municipal, los OGC, las organizaciones campesinas, los usuarios del agua, las organizaciones productivas, salud, educación, el sector privado -servicios de agua, minería, turismo-, etc.).
- Fomentar el establecimiento de programas de formación en gestión integral de cuencas, cambio climático y reducción del riesgo de desastres por parte de universidades y centros de investigación, incorporando hallazgos e instrumentos de investigación actualizados.
- Apoyar la puesta en común y el intercambio de conocimientos y aprendizajes a nivel nacional, regional y local con los diferentes actores estratégicos.
- Establecer alianzas con agencias internacionales y nacionales que promueven la gestión de cuencas y otros enfoques integrados del paisaje, universidades y centros de investigación.
- Planificar y presupuestar recursos para promover la comunicación para el desarrollo como un mecanismo de sensibilización y concientización de la población y actores locales y para la sistematización de resultados, estudios de caso, historias de éxito y lecciones aprendidas dentro de los proyectos y programas de gestión de cuencas.

- Difundir las experiencias y resultados de las intervenciones de gestión de cuencas en foros de discusión local, municipal, departamental y nacional, conferencias técnicas y científicas.
- Buscar financiamiento para la gestión integral de cuencas de múltiples fuentes, y desarrollar nuevos mecanismos de financiamiento que puedan superar las carencias de los enfoques sectoriales (por ejemplo, fondos verdes del clima, fondos de adaptación y donantes multilaterales, incentivos nacionales o subnacionales, etc.).
- Alentar a los gobiernos subnacionales e instancias locales (ej. ONG, fundaciones, etc.) que apoyen las intervenciones de mediano a largo plazo en materia de gestión de cuencas, en lugar de los proyectos a corto plazo.

PRIORIZACIÓN DE CUENCAS

- Tomar la cuenca como unidad de gestión y manejo coordinado del agua y recursos naturales.
- Utilizar un enfoque anidado; analizar las relaciones espaciales en un área suficientemente grande (cuencas estratégicas) mientras se concentran las intervenciones en un área central de demostración (subcuencas y microcuencas).
- Aprovechar las experiencias anteriores para identificar qué tamaños y escalas de cuencas (estratégicas y microcuencas) son mejores para la ampliación y la replicación.
- En pequeños proyectos enfocados en demostrar el enfoque de gestión de cuencas, concentrar las actividades en terreno en una microcuenca.
- En proyectos/programas de mayor envergadura, determinar el número y tamaño de microcuencas y cuencas estratégicas con base en los recursos humanos y financieros disponibles (por ejemplo, 100 km² para una microcuenca o 5000 km² para una cuenca estratégica).
- Al priorizar las microcuencas, utilizar criterios tales como representatividad, visibilidad y accesibilidad; evidencia de la degradación de las cuencas y potencial de restauración; diversidad en los patrones de uso de la tierra, productos y problemas a ser abordados; interés genuino demostrado por los actores (población local y sus organizaciones incluido el gobierno municipal); compromiso y apoyo demostrado por parte de los gobiernos subnacionales y las entidades locales; y la necesidad de protección de las áreas de alto valor tanto aguas arriba como aguas debajo de la cuenca o la presencia de proyectos estratégicos (ej. energía, carreteras, red ferroviaria, etc.).

INVOLUCRAMIENTO DE LOS ACTORES ESTRATÉGICOS EN MICROCUENCAS Y CUENCAS ESTRATÉGICAS

- Desarrollar un análisis cuidadoso e inclusivo de los actores involucrados que habitan la microcuenca (mapeo de actores) al inicio.
- Identificar las comunidades y organizaciones locales que desarrollarán la gestión de la cuenca en base a criterios transparentes, distinguiendo claramente entre participación directa e indirecta de los grupos de interés.
- Identificar acciones específicas con cada organización local en las cuencas bajo cada producto o resultado relevante del plan de la cuenca.

- Fomentar la inclusión de los jóvenes, mujeres y los grupos vulnerables de intervención.
- Involucrar a promotores y líderes/as comunitarios (líderes locales) u organizaciones locales referentes para asegurar el compromiso continuo de la población de la cuenca.
- Involucrar a los estudiantes y profesores de las unidades educativas o líderes locales s (por ejemplo, centros de formación, institutos técnicos, etc.) en actividades de campo para el beneficio mutuo y para cultivar futuros campeones, gestores y líderes/as en gestión de cuencas
- Cuando el entorno social, institucional y político conduzca a una estructura de gobernanza formalizada, establecer OGC para fomentar la participación y la concertación de todos los actores de la cuenca.
- Los OGC deben ser producto de la negociación con los actores presentes y basarse en las estructuras existentes, sin duplicar sus funciones.

DIAGNÓSTICO PARTICIPATIVO DE LA MICROCUENCA

- Llevar a cabo un diagnóstico participativo de la situación y tendencias de la cuenca para entender las principales problemáticas, necesidades, actores y establecer una línea de base y adaptar las soluciones al contexto local al inicio de la intervención en la cuenca.
- Involucrar al personal técnico del gobierno municipal en el diagnóstico y línea base (evaluación) para fomentar la apropiación del proceso de diagnóstico.
- Seleccionar y capacitar a los líderes locales en el diagnóstico y monitoreo de la cuenca.
- El desarrollo del diagnóstico y línea de base no debe llevar mucho tiempo y dejar el tiempo suficiente para la planificación e implementación de acciones en la cuenca.
- Para que el diagnóstico de la cuenca sea breve, consulte la documentación existente de los programas y proyectos en curso o anteriores en la zona.
- Recopilar únicamente los datos necesarios para el análisis de los principales problemas y el diseño de posibles soluciones.
- Centrar la evaluación en el agua y las principales influencias degradantes en la cuenca.
- Analizar los sistemas existentes de tenencia de la tierra, el agua y los bosques para identificar los factores que impulsan u obstaculizan la inversión en las cuencas.
- Para asegurar la inclusión, utilice herramientas de mapeo participativo (p.ej. mapas parlantes del pasado, presente y futuro de las cuencas) y de análisis, como los propuestos en la metodología del plan de gestión local de microcuencas.
- Incorporar herramientas para evaluar los beneficios de las funciones ecosistémicos de las cuencas y los costos de pérdida y daño, y herramientas geoespaciales modernas de beneficio costo o costo efectividad (por ejemplo, caja de herramientas de resiliencia).
- Para construir la confianza y el compromiso de todos los actores de las cuencas, identificar algunas acciones "sin arrepentimiento" para una implementación temprana.
- Tener el diagnóstico participativo validado por todos los actores de la cuenca.

LA IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS Y ESTABLECIMIENTO DE PRIORIDADES

- Desarrollar diferentes escenarios de opciones futuras de uso y manejo de la tierra en la cuenca, basados en la información y datos recolectados durante el diagnóstico de la cuenca (por ejemplo, mapas parlantes del pasado, presente y futuro de la microcuenca).

- Involucrar a los actores de las cuencas en el análisis de los problemas, la identificación de alternativas (buenas prácticas de manejo de suelos, agua y vegetación) y la identificación de las áreas prioritarias de intervención en la cuenca.
- Aumentar la sensibilidad, conciencia y la apropiación por parte de las familias y organizaciones locales de las prácticas priorizadas de uso y manejo de la tierra, suelo, agua y vegetación que podrían ser más favorables que las prácticas actuales.
- Centrarse en las prioridades identificadas por los actores locales y en aquellos problemas o conflictos relacionados con el agua y el uso de la tierra que necesitan una solución urgente.
- Planificar una combinación de intervenciones de corto, mediano y largo plazo. Las intervenciones deben estar centradas en el manejo y conservación de los ecosistemas y el desarrollo agropecuario que genera ingresos directos para las familias.
- Para las medidas de conservación física, acentuar la bioingeniería del suelo y las medidas de protección y conservación de fuentes de agua y áreas de recarga hídrica, siempre que sea viable.
- Preferir los beneficios colectivos a los individuales.
- Evaluar la factibilidad económica, política e institucional y los riesgos ambientales y sociales de las soluciones propuestas para la sostenibilidad de la gestión de cuencas.
- Identificar organizaciones locales (por ejemplo, el gobierno municipal, los OGC, usuarios del agua, y las plataformas de cuencas estratégicas) que puedan asegurar la continuidad de la gestión de cuencas después de que termine el proyecto/intervención.
- Identificar algunas acciones "sin arrepentimiento" para la implementación de acciones tempranas en la cuenca.
- Contar con el diagnóstico participativo de la cuenca validado por todos sus actores.

ELABORACIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN DE CUENCAS

- Enfocar el plan de gestión de cuencas en el agua para facilitar intervenciones coherentes y articuladas con los otros recursos naturales y que mantenga la motivación de la población y organizaciones locales.
- Armonizar el plan de gestión de la cuenca con los planes municipales existentes (Planes de gestión hídrica y ambiental, etc.) y planes de cuenca a escala mayor (ej. Plan Director de Cuenca, Nacional, etc.).
- Establecer sinergias con los programas y planes sectoriales relevantes de los gobiernos subnacionales (gobernación y municipios).
- Preparar un plan de Gestión de cuencas sólo si se cuenta con los esfuerzos y recursos financieros locales, así como el compromiso y corresponsabilidad de los actores locales para su implementación.
- Donde existan planes locales de gestión de cuencas, considerar enriquecer estos planes en lugar de desarrollar nuevos planes.
- En el plan, utilizar tanto como sea posible en tablas, diagramas y mapas, manteniendo las secciones narrativas tan cortas como sea posible.
- Organizar un taller-cumbre para la validación formal del plan por todas las organizaciones locales interesadas y las autoridades técnicas y municipales.

- El plan debe ser aprobado por todas las partes interesadas y los compromisos y esfuerzos para su implementación deben ser establecidos y debidamente firmados por todos los actores de modo de tener una verdadera apropiación del plan por parte de los actores locales.
- Ajustar y actualizar el plan periódicamente; esto es necesario para todos los planes, independientemente de su visión, alcance y calidad.

IMPLEMENTACIÓN

- Mantener una perspectiva a largo plazo para el involucramiento y participación comprometida de las familias y organizaciones locales con la implementación efectiva del plan de gestión de la cuenca.
- Promover el reparto de las responsabilidades de aplicación entre el municipio, OGC y organizaciones locales desde las primeras etapas de implementación del plan.
- Implementar el plan por sectores y zonas de la cuenca (alta, media y baja) a través de planes de trabajo anuales.
- Dirigir cada intervención a las necesidades de las familias, comunidades y organizaciones locales.
- Buscar coherencia en el suministro de materiales e insumos y la obtención de aportes (en mano de obra y efectivo) de todos los actores de la cuenca en la implementación de las medidas propuestas.
- Siempre que sea posible, desarrollar incentivos y mecanismos para compensar la provisión de las funciones ecosistémicas de la zona alta y media de la cuenca.

MONITOREO

- Preparar un plan o sistema de monitoreo y evaluación para organizar la recolección, procesamiento y análisis regular de datos.
- Monitorear no sólo los resultados (para la evaluación del desempeño del proyecto o la intervención), sino también los múltiples procesos y de los efectos e impactos en la cuenca.
- Combinar el monitoreo técnico de interacciones complejas con el monitoreo participativo de algunos parámetros biofísicos fáciles de medir por parte de las comunidades locales (ej. agua, suelos, bosques).
- Fortalecer las capacidades y habilidades de monitoreo a nivel municipal y de las comunidades y organizaciones locales.
- Fomentar una transición del seguimiento a corto plazo dirigido por el proyecto al seguimiento a largo plazo dirigido por los actores locales.
- Elaborar un conjunto de indicadores (específicos, medibles, alcanzables, pertinentes y sujetos a plazos) que permitan establecer la línea de base de la cuenca y establecer los objetivos de la intervención, la adaptación al cambio climático y la reducción del riesgo de desastres.
- Incluir indicadores de cambios en el desempeño de las organizaciones y gobiernos subnacionales involucrados en la gestión de cuencas e indicadores de cambios en el ecosistema/paisaje resultantes de la intervención/acción del proyecto.
- Utilizar el monitoreo como base para la gestión del conocimiento, el aprendizaje y la comunicación de las experiencias y logros de la gestión de cuencas.

Normas vigentes en Argentina

La legislación nacional actual está constituida por las normas contenidas fundamentalmente en el Código Civil, el Código de Comercio, el Código de Minería, el Código Penal y leyes federales como las de energía, navegación, transporte, puertos, protección del ambiente y de los recursos naturales, entre otros, las que contienen disposiciones directa o indirectamente relacionadas con el agua. A su vez la Nación ha ratificado tratados internacionales sobre aguas compartidas, ingreso de buques nucleares en aguas argentinas, préstamos para obras de abastecimiento de agua potable y saneamiento urbano y rural, construcción de obras de uso múltiple y otros cuya normativa involucra directa o indirectamente al agua (Pochat, 2005).

La visión compartida por la comunidad hídrica argentina fue que el aprovechamiento de los recursos hídricos debe realizarse armonizando los valores "social", "económico" y "ambiental" que la sociedad le adjudica al agua, y que la única forma de utilizar el agua en beneficio de toda la sociedad provendrá de encontrar el balance justo en la aplicación de estos tres valores que guían la política hídrica; que sólo será posible alcanzar a través de la participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones. En el 2003 los representantes de las jurisdicciones provinciales suscribieron el Acta Constitutiva del Consejo Hídrico Federal (COHIFE), como ámbito de discusión, concertación y coordinación de la política hídrica en el que participan las provincias, la ciudad autónoma de Buenos Aires y la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SsRH). Desde su creación, este organismo ha desarrollado una labor permanente de consolidación del espacio institucional y un esfuerzo de funcionamiento y desarrollo con activa participación de sus miembros. El COHIFE suscribió el Acuerdo Federal del Agua y los Principios Rectores de Política Hídrica, y se acordó elevarlos al Congreso Nacional para materializar una normativa a través de una ley Marco Nacional de Política Hídrica. En esa oportunidad, cada integrante del organismo se comprometió a compatibilizar e instrumentar dichos principios en las políticas, legislaciones y la gestión de las aguas de sus respectivas jurisdicciones (Fuente: <http://www.hidricosargentina.gov.ar/cohife.html>) (Gaspari et al., .2013). Los Principios Rectores conforman una guía a los legisladores responsables de traducir la visión del recurso hídrico en una legislación marco coherente y efectivo, que sustente las raíces históricas y los valores de cada provincia; y a los administradores a crear organizaciones y programas de acción adecuados. 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. El texto completo de los Principios Rectores se encuentra en la página web: http://www.hidraulica.gov.ar/legales/principios_rectores_de_politica_hidrica.pdf.

En el primero de los Principios Rectores de la Política Hídrica de Argentina, se señala que el agua es un recurso renovable, escaso y vulnerable, y como tal debe ser tratado para asegurar su disponibilidad a futuro (Conte et al., 2020).

La SsRH también ha promovido la institucionalización y el fortalecimiento de organizaciones de cuencas interjurisdiccionales, las que tienen por objetivo facilitar la coordinación de la gestión

hídrica en las diferentes jurisdicciones. Se define a los **Comité de Cuencas** como organismos interestatales, conformados por representantes de las provincias y del estado Nacional, quienes articulan y ejecutan las acciones esenciales para lograr un uso eficiente, racional y responsable del recurso hídrico. La creación de estas organizaciones facilita la gestión integrada de los recursos hídricos compartidos y promueve la cooperación entre instituciones a partir de emprendimientos conjuntos que beneficien a todas las partes. Su finalidad es evitar conflictos mediante la generación de propuestas superadoras para impedir que decisiones no acordadas conduzcan a situaciones de conflicto. Actualmente existen catorce Comité de Cuencas Interjurisdiccionales en la República Argentina (Fuente: <http://www.hidraulica.gov.ar/>-<https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/organizacion-de-cuencas>).

Los comités de cuenca interjurisdiccionales son mesas de negociación en las cuales representantes de las jurisdicciones tratan de llegar a consensos sobre cuestiones relacionadas con la gestión del agua en las cuencas hídricas que abarcan varias jurisdicciones, para tener en cuenta que lo que se haga en cada jurisdicción afectará a las demás.

Los organismos de cuenca generalmente tienen fines determinados, que pueden haber sido acordados en comités de cuenca o en reuniones interjurisdiccionales referidas a cuestiones específicas. Los acuerdos interjurisdiccionales también pueden dar lugar a la concepción de proyectos de cuenca que tengan ese alcance, para cuya ejecución se constituyen grupos de trabajo que no son organismos sino unidades ejecutoras que son disueltas cuando completan los trabajos que se les encomendaron.

La normativa argentina que incumbe en la temática de MICH está conformada por leyes nacionales y provinciales. Se puede decir que, en materia de leyes provinciales, hay provincias que tienen bien desarrollada su normativa y otras que ni siquiera tienen leyes específicas sobre temas que les afectan, tales como promoción de sistemas de riego, organización de usuarios, derechos de agua, tarifas que incluyan un pago adecuado del agua, gestión de acuíferos, etc. En cuanto a la gestión del agua en cuencas, pocas leyes de agua de las provincias se refieren explícitamente al tema. Sin embargo, el Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires (Ley N° 12.257), dedica completamente su Título VIII a los Comités de Cuencas Hídricas y los Consorcios, siendo muy detallado. Por otra parte, algunas provincias han dictado leyes específicas relacionadas con la gestión del agua en cuencas (Pochat, 2005).

El marco jurídico en Argentina está dado por la normativa nacional a través de la Constitución Nacional (Art. 41), el Código Civil (Art. 2.340 inc.3; Art. 2.641), la Ley de Bosques Protectores (Ley 13.273) y el Tratado del Río de La Plata y su frente marítimo (Ley 20.645). La Normativa Provincial está dada por el artículo 28 de la Constitución Provincial y diferentes leyes provinciales.

A continuación, se enumera legislación de interés de algunas de ellas¹¹:

* Constitución Argentina

- **Artículo 41:** Reconocimiento del derecho de todos los habitantes a un ambiente sano, y el deber de preservarlo. Impone a quien provoca un daño al ambiente la obligación de recomponerlo.

¹¹ <https://sites.google.com/site/marconormativoambiental/argentina>

• **Artículo 43:** Toda persona puede interponer acción de amparo contra todo acto u omisión de autoridades públicas o de particulares, que en forma actual o inminente lesione, restrinja, altere o amenace, con arbitrariedad o ilegalidad manifiesta, derechos y garantías reconocidos por la Constitución Nacional.

• **Artículo 124:** Corresponde a las provincias el dominio de los recursos naturales.

• **Artículo 200:** La Ley 24.051 establece en sus artículos 55 y siguientes que se aplicarán las penas previstas en el Art. 200 del Código Penal al que “utilizando los residuos a los que se refiere la presente ley, envenenare, adulterare o contaminare de un modo peligroso para la salud, el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general”. Esta pena se agrava si el hecho es seguido de muerte de alguna persona, y es sensiblemente menor si el hecho es causado por imprudencia o negligencia.

* **Código Civil. Leyes de presupuestos mínimos.** Dada la trascendencia que poseen en nuestro marco normativo ambiental hay varias leyes de presupuestos mínimos sancionadas por el Congreso de la Nación.

Ley general del ambiente N° 25.675 (2002). La ley protege el ambiente garantizando su cuidado, la educación y participación de los ciudadanos y ciudadanas, controlando el impacto y el daño ambiental que puedan causar las personas.
<https://www.argentina.gob.ar/justicia/derechofacil/leysimple/ley-general-del-ambiente>

Ley de Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial. N° 26639 (2010). Establece los presupuestos mínimos para la protección de los glaciares y del ambiente periglacial con el objeto de preservarlos como reservas estratégicas de recursos hídricos para el consumo humano; para la agricultura y como proveedores de agua para la recarga de cuencas hidrográficas; para la protección de la biodiversidad; como fuente de información científica y como atractivo turístico. Los glaciares constituyen bienes de carácter público.

Ley de Derecho de acceso a la información ambiental. N° 25.831 (2002). Las autoridades competentes nacionales, provinciales y de la Ciudad de Buenos Aires, concertarán en el ámbito del COFEMA los criterios para establecer los procedimientos de acceso a la información ambiental en cada jurisdicción. Garantiza el acceso a la información ambiental que se encuentre en poder del Estado, tanto en el ámbito nacional como provincial, municipal y de la Ciudad de Buenos Aires, como así también de entes autárquicos y empresas prestadoras de servicios públicos, sean públicas, privadas o mixtas. El acceso a la información ambiental será libre y gratuito para toda persona física o jurídica, a excepción de aquellos gastos vinculados con los recursos utilizados para la entrega de la información solicitada. Para acceder a la información ambiental no será necesario acreditar razones ni interés determinado. Se considerarán infracciones a esta Ley, la obstrucción, falsedad, ocultamiento, falta de respuesta en el plazo establecido en el artículo anterior, o la denegatoria injustificada a brindar la información solicitada, y todo acto u omisión que, sin causa justificada se provoque.

Ley de Evaluación de Impacto Ambiental. N° 23879. Establece que el Poder Ejecutivo procederá a realizar la evaluación de las consecuencias ambientales que producen o podrían

producir en territorio argentino cada una de las represas construidas, en construcción y/o planificadas, sean éstas nacionales o extra nacionales.

Ley de Protección del ambiente de la Provincia de Buenos Aires. N° 11.723 (1995). La protección, conservación, mejoramiento y restauración de los recursos naturales y del ambiente en general en el ámbito de la Provincia de Bs. As., a fin de preservar la vida en su sentido más amplio; asegurando a las generaciones presentes y futuras la conservación de la calidad ambiental y la diversidad biológica. En la localización de actividades productivas de bienes y/o servicios, en el aprovechamiento de los recursos naturales y en la localización y regulación de los asentamientos humanos deberá tenerse en cuenta: la naturaleza y características de cada bioma; la vocación de cada zona o región, en función de sus recursos, la distribución de la población y sus características gea-económicas en general; y las alteraciones existentes en los biomas (unidad que se define por componentes geográficos, por efecto de los asentamientos humanos, de las actividades económicas o de otras actividades humanas o fenómenos naturales).

Código de aguas de la Provincia de Buenos Aires - Reglamentación Ley 12.257 - Decreto 3511 (2007) publicada en (2008) El Código de Aguas aprobado por la Ley N° 12257 estableció el régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico en la Provincia de Buenos Aires. Aprueba la reglamentación del Código de Aguas establecido por la Ley.

El marco legal argentino en materia ambiental apoya las tendencias globales del Desarrollo Sostenible, concepto oficializado en la “Cumbre de Río” en 1992 y reiterado en convenios a los que ha adherido el país, entre los que se destacan:

- **Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo.** Establecer una alianza mundial equitativa, con nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores claves de las sociedades y las personas, con acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses y se proteja la integridad del sistema ambiental. (Ley Nro: 25.841: Acuerdo Marco sobre Medio Ambiente del MERCOSUR, suscripto en Asunción. Sancionada el 26/11/2003. Publicada en el Boletín Oficial del 15/01/2004).
- **Convenio marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático** Estabilización de las concentraciones de Gases Efecto Invernadero –GEI- en la atmósfera, para impedir interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático, permitiendo el desarrollo económico sostenible (ley nacional 24.295).
- **Convenio de Estocolmo: contaminantes orgánicos persistentes (COPs)** Cuyo objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los COPs, con medidas para reducir o eliminar las liberaciones derivadas de la producción y uso (ley nacional 26.011).
- **Convenio sobre Biodiversidad** Conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que deriven de la utilización de recursos genéticos. (Ley nacional 24.375).
- **Convención de las NU sobre lucha contra la desertificación.** Ley nacional 24.701: Apruébese la convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación.

La normativa legal Argentina está disponible en el Buscador de leyes ambientales
<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/normativa>

Páginas web recomendadas

1. Consejo Federal de Planificación (COFEPLAN). Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/habitat/cofeplan>
2. Consejo Hídrico Federal (COHIFE). Recuperado de <https://www.cohife.org/>
3. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/infraestructura-y-politica-hidrica/politica-hidrica/cuencas>
4. Autoridad del Agua (ADA). Recuperado de <http://www.ada.gba.gov.ar/>
5. Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS). Recuperado de <https://www.opds.gba.gov.ar/>
6. [Ministerio de Obras Públicas](#)
7. [Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica](#)

Publicaciones Cartográficas en referencia a la legislación vigente

MAPAS SATELITALES:

<https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/mapas-satelitales>

MAPA DE CUENCAS ARGENTINA

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/mapa_cuencas_ssrh_130x91cm_ed2017.jpg

MAPA CUENCAS BSAS

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/000_buenosaires.jpg

REGIÓN LAGUNERA DEL SUROESTE DE BUENOS AIRES DE LA REGION PAMPEANA

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/98_reglagunerasobsas_web-min.jpg

Referencias

- Conte, A., Etchepareborda, M., Marino, M. (2020). *Argentina económica: Actividad agrícola-ganadera. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina.* <https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=25362ceb139445519f15d54635ba87a8>

- 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., 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.
- Gaspari, F.J. (2002). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica*. Huelva. España. Ediciones Cooperativas. Buenos aires. 179 pp.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A., S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 p.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A., S. Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3. Actualización constante on line SEDICI.
- Saavedra, C. (2018). *La gestión integral de cuencas en Bolivia y el apoyo de la Cooperación Suiza: una perspectiva desde la práctica a nivel de microcuencas. Proyecto Gestión integral del agua*. HELVETAS Swiss Intercooperation. Proyecto de Trabajo. Bolivia. 20 p.

CAPÍTULO 13

Ordenamiento territorial

Fernanda Julia Gaspari

Instrumentos de planificación para el desarrollo sostenible

Un enfoque sistémico del concepto de cuenca hidrográfica supera la idea de reducirla a una superficie de convergencia del escurrimiento hídrico superficial, debido a 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), contemplando elementos físicos (topográficos), biológicos, que conforman diferentes unidades ecológicas, y socio-políticos, representados por la sociedad y la gestión del territorio (municipios, provincias o regiones). 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; 2009).

Este enfoque integral y del conocimiento sistémico del hombre y la naturaleza permite establecer que una cuenca proporciona un marco de referencia para proyectar el desarrollo sustentable regional (Gaspari et al., 2013).

Considerar a una cuenca y hasta a una microcuenca, según escala de trabajo, como ámbito de planificación de acciones orientadas a introducir cambios en los sistemas de producción, buscando conciliar e integrar los objetivos de producción y protección de los recursos naturales, es una opción técnica y estratégica dictada por la naturaleza de las interacciones entre estos recursos.

En la microcuenca ocurren interacciones indivisibles entre los aspectos económicos (relacionados a los bienes y servicios producidos en su área), sociales (relacionados a los patrones de comportamiento de los usuarios directos e indirectos de los recursos de la cuenca) y ambientales (relacionados al comportamiento o reacción de los recursos naturales frente a los dos aspectos anteriores). Por ello, las acciones a desarrollarse en la microcuenca deben considerar todas estas interacciones.

Este análisis territorial promueve que el territorio se conforme como la esencia como integradora del ambiente en una visión holística y sistemática de la relación sociedad-naturaleza. Gaspari et al. (2013) mencionan que territorio se entiende 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, y donde planifica sus actividades socio-económicas y productivas.

El proceso y/o estrategia de planificación de carácter técnico-político, a través del cual se pretende configurar, en el corto, mediano y largo plazo, una organización del uso y ocupación del territorio, acorde a las potencialidades y limitaciones de este, las expectativas y aspiraciones de la población y los objetivos sectoriales de desarrollo (económicos, sociales, culturales y económicos) se denomina Ordenamiento Territorial (OT).

Esta planificación se concreta en planes que expresan un modelo territorial, a largo plazo, que la sociedad percibe como deseable y las estrategias mediante las cuales se actuará sobre la realidad para evolucionar hacia dicho modelo (Palacio et al., 2004), con el desafío de mantener y mejorar la calidad de vida de la población, fomentar la integración social y procurar el buen uso y aprovechamiento de los recursos naturales y culturales.

Según experiencias propias y de diversos organismos de investigación y desarrollo, en la actualidad, el OT se realiza por medio de estudios transdisciplinarios que integran una metodología de trabajo acorde al objetivo y objeto de estudio. Un programa transdisciplinario define y sugiere alternativas de compatibilización entre la sustentabilidad ambiental y el crecimiento económico.

Según Gaspari et al. (2009) 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.

Esta compatibilización de alternativas es, según Dourojeanni (1990), cuando la sustentabilidad ambiental dependiente del crecimiento económico brinda orientaciones sobre utilización de los recursos disponibles y cómo “manejarse” el medio ambiente para evitar su deterioro. Considerando además que el crecimiento económico es dependiente de la sustentabilidad ambiental, ya que establece diversas orientaciones económicas respondiendo a

las demandas de los recursos, definiendo condiciones ambientales “adecuadas” y productivas para que no afecte al entorno.

Función de un Plan de Ordenación Territorial para el manejo de cuencas hidrográficas

“El ordenamiento territorial es la expresión espacial de las políticas económicas, sociales, culturales y ecológicas de toda la sociedad. [...] es una política pública, destinada a orientar el proceso de producción social del espacio mediante la aplicación de medidas que tienen por finalidad la mejora de la calidad de vida de la población a través de su integración social en el territorio y el uso y aprovechamiento ambientalmente sustentable y democrático de los recursos naturales y culturales [...].” (Dirección Nacional de Planificación Estratégica Territorial, 2016).

El plan es una herramienta de planificación. Constituye un conjunto de objetivos y propuestas que se expresa a tracción y coordinación, con metas establecidas en el tiempo. Contiene decisiones de carácter general que expresan los lineamientos fundamentales, las prioridades que se derivan de esas formulaciones, la asignación de recursos acorde a esas prioridades, las estrategias de acción y el conjunto de medios e instrumentos para alcanzar las metas y objetivos propuestos. Un plan supone crear una herramienta que ayuda a obtener resultados y a clarificar dudas acerca del trabajo a realizar: define objetivos y actividades para alcanzarlos, establece prioridades, identifica recursos necesarios y cuantifica los niveles de desempeño esperados. En resumen, es una guía que orienta objetivos, actividades y recursos de forma coherente y articulada.

El principal instrumento de la política de ordenamiento territorial es el Plan Estratégico Territorial (PET)¹². El plan debe tener cuatro características principales:

- ✓ Sistémico e integral: debe abordar todas las dimensiones territoriales (social, económica, ambiental, física, jurídico-administrativa) de forma integrada, ya que es preciso entender sus vinculaciones y su funcionamiento en conjunto.
- ✓ Participativo: el diseño y la implementación de un plan genera efectos directos e indirectos sobre diversos actores públicos y privados del territorio sobre el que se interviene, cuanto mayor sea el conocimiento que éstos tengan sobre las acciones de planificación, mejores serán las posibilidades de consensuar su validez, ajustar sus procedimientos y potenciar sus resultados.
- ✓ Flexible: el plan debe ser lo suficientemente dúctil para adaptarse a los cambios que se producen en el territorio, de modo que se pueda reorientar según nuevos contextos y necesidades y, de modo que pueda ser parte de un proceso de planificación continuo que tiende a mejorarse en el tiempo.
- ✓ Prospectivo: el plan debe pensarse con una visión a corto, mediano y largo plazo, teniendo en cuenta diferentes escenarios posibles y planteando un escenario deseado a futuro, a fin de encauzar las acciones del presente, tomando medidas proactivas.

¹² <https://www.argentina.gob.ar/habitat/secretaria-desarrollo-territorial/dnpt/plan-estrategico-territorial>

El PET Argentina PET Avance IV 2018, es el instrumento de planificación para guiar el despliegue de la inversión pública y privada y ordenar el territorio. Plasma objetivos estratégicos y, a su vez, incorpora los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los acuerdos del Marco de Sendai en relación con la gestión de riesgos de desastres, y las prioridades acordadas en la reunión de Hábitat III donde se estableció la Nueva Agenda Urbana (NAU). En 2021, el Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat acuerda la Resolución 2021-44-APN-MDTYH, donde se crea el Programa Nacional de Capacitación y Asistencia Técnica en Planificación y Ordenamiento Territorial, que contribuye a la capacitación de técnicos y funcionarios de la Administración Pública Nacional, provincial, municipal en Políticas de Planificación y Ordenamiento territorial para mejorar las capacidades de los gobiernos locales y provinciales, tanto en materia de recursos humanos como de equipamiento.

La gestión de cuencas hidrográficas

La mayoría de los países en desarrollo y en particular los de América Latina, presentan características muy diferentes y particulares. Aun cuando algunas cuencas hidrográficas pueden presentar semejanzas en su función y/o uso, 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).

Un manejo integral de cuencas hidrográficas (MICH) es un conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, que establecen una solución a los problemas causados por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, para lograr un mejor desarrollo y calidad de vida de su población.

Es común que la gestión del agua y del territorio se desarrolle en forma parcial, fragmentada e incluso descoordinada, por los diferentes actores que tienen competencia en su gestión. Por ello se debe concertar un sistema integrado de gestión que requiere fortalecimiento en el conocimiento de los elementos que integran y participan en el ciclo hidrológico, potenciando el valor que poseen las diversas cuencas hidrográficas y sus culturas asociadas, reconociendo las características singulares de cada una de éstas.

El proceso de implementación de MICH, se puede trabajar a diferentes escalas, como por ejemplo a nivel de microcuencas, con base al análisis de los actores locales (ej. organismos de gestión de cuencas (OGC), usuarios del agua, municipios, etc.). En ella, se ha conceptualizado la sostenibilidad en la gestión integral de cuencas a nivel local como un proceso de gestión continuo, ordenado, concertado, participativo e institucionalizado de las intervenciones sobre el territorio de una cuenca con el fin de incrementar el acceso y disponibilidad al agua y sus servicios ecosistémicos en cantidad y calidad y que cuenta con servicios de apoyo y asistencia técnica que contribuye a que la cuenca mantenga y/o mejore, en el tiempo, su dinámica hídrica, su

capacidad de resiliencia y de producción de beneficios socioeconómicos y provisión de funciones ecosistémicas para la población que ella habita (Saavedra, 2018).

Por ello, la gestión de cuencas se refiere al proceso de desarrollar acciones e iniciativas (ej. planes, programa y proyectos) para mantener y mejorar las funciones ecosistémicas de la cuenca para la población y ambiente., siendo el principal propósito de la gestión, manejar, proteger, conservar, mantener y restaurar la calidad del agua y los recursos naturales asociados en la cuenca a través de un esfuerzo holístico e integrado.

Estos esfuerzos deben ser compartidos no solo por los usuarios de las cuencas hidrográficas sino por las instituciones político administrativas que la integran (Tabla 13.1) (Gaspari et al., 2015). Este concepto global 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 (Gaspari et al., 2009).

Tabla 13.1. Objetivos para el MICH. Fuente: Gaspari et al. (2015).

PROPSITO	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE TRABAJO Y MEDIDAS
Manejo de cuencas	Conservación y mejoramiento del suelo, control de erosión, regulación del escurrimiento, control de sedimentos y protección de embalses, mejoramiento de bosques y pastizales. Protección de la calidad del agua.	Corrección de torrentes y regulación de ríos torrenciales. Práctica de conservación de suelos. Pequeños embalses para conservación del agua. Manejo silvo-pastoril.
Uso recreativo del agua	Ofrecer oportunidad de recreación basado en el recurso agua.	Embalses, facilidades como parques, muelles, etc.
Control de inundaciones	Prevención o reducción de daños por inundaciones, a obras y actividades. Regulación de ríos, etc.	Diques, presas, muros, mejoramiento hidráulico del cauce, zonificación, medidas de pronóstico.
Irrigación	Producción agrícola.	Diques, presas, embalses, pozos, canales, bombas, obras de drenaje, etc.
Acueductos	Suministro de agua para uso doméstico, industrial, comercial y otros.	Diques, presas, embalses, pozos, red de distribución, bombas, planta de tratamiento, etc.
Drenaje	Producción agrícola. Desarrollo urbano. Protección de la salud pública.	Zanjas, drenajes, muros, estaciones de bombeo, etc.
Piscicultura y vida silvestre	Mejoramiento del hábitat para peces y vida silvestre con propósito de recreación y otros, fomento de la piscicultura como actividad deportiva y comercial.	Refugios, viveros, escaleras de peces, regulación del régimen, embalses, control de la contaminación, regulación en el uso de la tierra.
Reducción de la contaminación	Protección o mejora de la calidad del agua de acuerdo con el uso doméstico, industrial, comercial, agrícola, pecuario y hábitat acuático, etc.	Planta de tratamiento. Embalse de regulación. Sistema de alcantarillas. Regulación de medidas legales.

Integrando conceptos, FAO y de Saavedra (2018), se define a la gestión de cuencas hidrográficas como toda intervención humana destinada a garantizar la utilización sostenible de los recursos naturales de la cuenca, y trata de ofrecer soluciones a estas amenazas. Su origen está estrechamente relacionado con la visualización de deterioro ambiental, ecológico y socioeconómico de la cuenca que puede ser evitado, la identificación de impactos dañinos en la cuenca puede ser rápida de manera que la prevención, remediación o mejoras puedan ser llevadas a cabo rápidamente por una gestión adecuada de los recursos. Esta también puede prevenir el déficit o estrés hídrico en las comunidades y centros población y la pobre calidad del agua, incrementa la producción e ingresos de las familias campesinas en la cuenca, reducir o mitigar los efectos de posibles sequías e inundaciones y colaborar en incrementar los niveles de recarga de las aguas subterráneas.

Por último, el reconocimiento de la relación entre el uso de la tierra aguas arriba y los rendimientos y la calidad del agua dio lugar al desarrollo de los conceptos de gestión / manejo / ordenación de cuencas hidrográficas. La MICH considera la gestión y la conservación de todos los recursos naturales disponibles de manera exhaustiva. Ofrece un marco para integrar diferentes sistemas de uso de la tierra y medios de vida (como la silvicultura, el pastoreo y la agricultura), utilizando el agua como el “punto de entrada” en la formulación de las intervenciones, para conservar la gama de servicios ambientales —especialmente los servicios hidrológicos— ofrecidos por una cuenca hidrográfica y reducir o evitar los efectos negativos en las cuencas bajas, aumentando la productividad de los recursos y mejorando los medios de vida locales al mismo tiempo.

La gestión de cuencas hidrográficas y los servicios ambientales

Los Servicios Ambientales (SA) son aquellas funciones de los ecosistemas que generan beneficios y bienestar para las personas y la comunidad, considerando que ni se transforman ni se gastan en el proceso de utilización del consumidor, distinguiéndose de los bienes ambientales (Gaspari et al., 2016).

Según FAO los beneficios o servicios provistos por los ecosistemas a la sociedad se presentan desde múltiples perspectivas: la percepción del hombre, el estudio y análisis de sus dimensiones ecológicas, económicas, sociales y legales, y por último e integrador, su cuantificación y su optimización¹³.

La evaluación de ecosistemas del milenio (EEM) con sus siglas en inglés MEA (MEA, 2005) clasifica a los bienes y servicios ambientales en cuatro categorías dependiendo de los bienes y servicios que ofrecen (Tabla 13.2) (Granizo Andocilla, 2018).

- ✓ Servicios de Soporte: Servicios utilizados para producción de los SA, provisionando y manteniendo al ecosistema de manera directa e indirecta (ej. Ciclo hidrológico, Ciclo de nutrientes).

¹³ <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/watershed-management/basic-knowledge/es/>

- ✓ Servicios de Provisión: Productos que se obtienen de los ecosistemas, los cuales se pueden consumir teniendo su propio mercado fijo, pueden ser tangibles y finitos (ej. provisión de productos, productos forestales no maderables).
- ✓ Servicios de Regulación: Beneficios derivados de la regulación y función del ecosistema, conservando los procesos (ej. Control de erosión, servicio de regulación hídrica, regulación del carbono).
- ✓ Servicios Culturales: Recursos tangibles e intangibles, surgiendo de la interacción entre la sociedad y el ecosistema; “beneficios no materiales” (ej. valor espiritual, ecoturismo, reflexión).

Tabla 13.2. Clasificación de los servicios ambientales. Fuente: MEA (2005).

Servicios			
Soporte	Provisión	Regulación	Culturales
Biodiversidad	Alimento	Regulación de gas	Belleza escénica
Ciclo de nutrientes	Materias primas	Regulación del clima	Recreación
Formación de suelo	Recursos genéticos	Prevención de disturbios	Información cultural y artística
Producción primaria	Recursos medicinales	Regulación del agua	Información espiritual e histórica
Polinización	Recursos ornamentales	Provisión de agua	Ciencia y educación
Control biológico		Tratamiento de desechos	

El estudio de los SA tiende a generar instrumentos óptimos para el OT, proporcionando a los gestores sociales y ambientales diversos elementos para conocer, analizar, diagnosticar y plantear usos de la tierra más virtuosos y justos para el presente y para las generaciones futuras.

Las cuencas hidrográficas cumplen importantes SA, como ser: el suministro de agua dulce, la regulación y protección del flujo del agua y de los recursos naturales, el mantenimiento de la calidad del agua, el suministro de energía (como la energía hidroeléctrica), la conservación de la biodiversidad y turismo y recreación. Es importante mencionar que los bosques y los árboles desempeñan un papel muy importante en los procesos hidrológicos de las cuencas hidrográficas, siendo los generadores de varios de los antes mencionados SA.

Los servicios y las funciones de las cuencas hidrográficas pueden verse amenazados por la deforestación, el aprovechamiento de madera incontrolado, los cambios en los sistemas agrícolas, el sobrepastoreo y la construcción de carreteras y caminos, la contaminación y la invasión de plantas introducidas. Además, pueden quedar afectados por perturbaciones naturales como incendios forestales, tormentas y enfermedades. El deterioro de las funciones de las cuencas hidrográficas tiene importantes consecuencias negativas, ya que podría provocar la erosión y la reducción de la productividad del suelo, la sedimentación de corrientes de agua, embalses y litorales, un aumento de la escorrentía y de inundaciones repentinas, la menor

infiltración en las aguas subterráneas, la disminución de la calidad del agua y la pérdida del hábitat acuático y de biodiversidad.

Las relaciones entre la población humana y el entorno de las cuencas hidrográficas se desenvuelven en un amplio marco en el cual se dan procesos internos y externos a la cuenca, río arriba y río abajo, de orden micro y macro (FAO, 2007). La demanda de servicios de las cuencas hidrográficas y el reconocimiento del valor económico de estos servicios están creciendo a nivel mundial. Cada vez se crean más sistemas en los que los usuarios de agua de las cuencas bajas compensan a los responsables de la gestión de las cuencas hidrográficas aguas arriba por sus servicios, que garantizan el suministro de servicios ambientales como el agua limpia.

La conservación de los SA dependerá de estrategias de adaptación, de planes de manejo integral con cumplimiento de las leyes, establecimiento de usos prioritarios y los usos eficientes del recurso hídrico. Para asegurar el SA de provisión hídrica y el desarrollo de los sistemas productivos en cuencas experimentales ante el cambio global (cambio climático y cambio de uso del suelo) este libro expresa resultados alcanzados en proyectos de investigación que permiten expresar desafíos para la conservación del SA de disponibilidad y provisión hídrica (Gaspari et al., 2015).

La gestión adaptativa de los recursos hídricos bajo el enfoque de los Servicios Ambientales (SA) para el ordenamiento agrohidrológico en cuencas hidrográficas constituye una oportunidad de inclusión y compromiso de todas las partes implicadas (gobierno, científicos, usuarios), junto a la interacción e intercambio de información científica, cultural - política a diferentes escalas (local, regional) (Gaspari et al., 2015).

La gestión de cuencas hidrográficas y los ODS

“Se necesita un nuevo paradigma del desarrollo que coloque al ser humano en el centro, considere el crecimiento económico como un medio y no como un fin, proteja las oportunidades de vida de las actuales y futuras generaciones y respete los sistemas naturales de los que dependen todos los seres vivos” (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de 17 objetivos globales (Objetivos del Milenio = ODS) para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas (un total de 169) que deben alcanzarse en los próximos 15 años ¹⁴ (Figura 13.1).

Para alcanzar estas metas, todo el mundo tiene que hacer su parte: los gobiernos, el sector privado, la sociedad civil y personas, para alcanzar el desarrollo sostenible, integrando al ambiente, la economía y sociedad (Figura 13.2). Esta compatibilización de alternativas es, según Douroujeanni (1990), cuando la sustentabilidad ambiental dependiente del crecimiento económico

¹⁴ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

brinda orientaciones sobre utilización de los recursos disponibles y cómo “manejar” el medio ambiente para evitar su deterioro. Considerando, además, que el crecimiento económico es dependiente de la sustentabilidad ambiental, ya que establece diversas orientaciones económicas respondiendo a las demandas de los recursos, definiendo condiciones ambientales “adecuadas” y productivas para que no afecte al entorno.



Figura 13.1. Objetivos de desarrollo sostenible.

Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>



Figura 13.2. Desarrollo sostenible: una integración para el manejo de cuencas hidrográficas. Fuente: SDSN Australia/Pacific (2017).

Los ODS incluyen una compleja gama de desafíos sociales, económicos, y medioambientales, que requerirá de transformaciones en el funcionamiento de las sociedades y las economías, y en cómo interactuamos con nuestro planeta. La educación, la investigación, la innovación y el liderazgo serán esenciales para ayudar a la sociedad a enfrentar estos desafíos. Las universidades, debido a su labor de generación y difusión del conocimiento y su preeminente

situación dentro de la sociedad, están llamadas a desempeñar un papel fundamental en el logro de los ODS. Es probable que ninguno de los ODS pueda cumplirse sin la implicación de este sector. Comprometerse con los ODS también beneficiará en gran medida a las universidades, pues ayudará a demostrar su capacidad de impacto, atraerá el interés de formación relacionada con los ODS, creará nuevas alianzas, permitirá acceder a nuevas fuentes de financiación y definirá a la universidad como institución comprometida. La educación y la investigación se reflejan explícitamente en varios de los ODS en los que las universidades tienen un papel directo. Sin embargo, la contribución de las universidades a los ODS es mucho más amplia, ya que pueden apoyar tanto la implementación de cada uno de ellos, como la de su propio marco (SDSN Australia/Pacific, 2017).

Los ODS que se pueden identificar sobre ecosistemas y con injerencia directa en el MICH son el Objetivo 6 y el Objetivo 15, como lo describe Consejo Nacional de Coordinación de Políticas Sociales de la Presidencia de la Nación Argentina (<https://www.argentina.gob.ar/politicassociales/ods/institucional/17objetivos>).

- OBJETIVO 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

El agua libre de impurezas y accesible para todos es parte esencial del mundo en que queremos vivir. Hay suficiente agua dulce en el planeta para lograr este ideal. La escasez de recursos hídricos, la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado influyen negativamente en la seguridad alimentaria y la salud. La sequía afecta a algunos de los países más pobres del mundo, recrudece el hambre y la desnutrición. Para 2050, al menos una de cada cuatro personas probablemente viva en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce.

Las metas de este objetivo son:

- 6.1) Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.
- 6.2) Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
- 6.3) Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos, reduciendo el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
- 6.4) Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir el número de personas que sufren falta de agua.
- 6.5) Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza.
- 6.6) Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

- OBJETIVO 15: Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica

Los bosques, además de proporcionar seguridad alimentaria y refugio, son fundamentales para combatir el cambio climático, ya que protegen la diversidad biológica y las viviendas de la población indígena. Cada año desaparecen 13 millones de hectáreas de bosque y la degradación persistente de las zonas áridas ha provocado la desertificación de 3.600 millones de hectáreas. La deforestación y la desertificación provocadas por las actividades humanas y el cambio climático suponen grandes retos para el desarrollo sostenible y han afectado a las vidas y los medios de vida de millones de personas en la lucha contra la pobreza.

Las metas de este objetivo son:

- 15.1) De aquí a 2020, asegurar la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y sus servicios, los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales.
- 15.2) De aquí a 2020, promover la puesta en práctica de la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, detener la deforestación, recuperar los bosques degradados y aumentar considerablemente la forestación y la reforestación a nivel mundial.
- 15.3) Luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación del suelo.
- 15.4) Asegurar la conservación de los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica, a fin de mejorar su capacidad de proporcionar beneficios esenciales para el desarrollo sostenible.
- 15.5) Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de biodiversidad y, de aquí a 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción.
- 15.6) Promover la participación justa y equitativa en los beneficios derivados de la utilización de los recursos genéticos y promover el acceso adecuado a esos recursos, según lo convenido internacionalmente.
- 15.7) Adoptar medidas urgentes para poner fin a la caza furtiva y el tráfico de especies protegidas de flora y fauna y abordar tanto la demanda como la oferta de productos ilegales de flora y fauna silvestres.
- 15.8) De aquí a 2020, adoptar medidas para prevenir la introducción de especies exóticas invasoras y reducir significativamente sus efectos en los ecosistemas terrestres y acuáticos y controlar o erradicar las especies prioritarias.
- 15.9) De aquí a 2020, integrar los valores de los ecosistemas y la biodiversidad en la planificación, los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad nacionales y locales.

Los ODS y de la seguridad hídrica conforman la base para la gestión integrada del agua, requiriendo la construcción de esquemas de gobierno participativos. Al respecto, uno de los Principios de Dublín señala que: El desarrollo del recurso hídrico y su manejo deben basarse en un enfoque participativo, involucrando a los planificadores y a los legisladores en todos los niveles. Para ello, es necesario diseñar, crear e institucionalizar espacios para la participación (no únicamente de consulta) y garantizar que las medidas y estrategias sean el resultado del

consenso de las expresiones, estableciendo acuerdos. Estos espacios deben ser parte de los planes de gestión desde su inicio; de otro modo, las acciones y decisiones que se adopten corren el riesgo de ser “medidas condenadas al fracaso”, sea por falta de entendimiento, aceptación social u otras resistencias al cambio (Paris, 2020).

Hay que reconocer que hay Metas que como menciona Naciones Unidas, en su web oficial, Para prevenir, detener y revertir la degradación de los ecosistemas de todo el mundo, las Naciones Unidas han declarado la Década para la Restauración de los Ecosistemas (2021-2030). Esta respuesta coordinada a nivel mundial ante la pérdida y degradación de los hábitats se centrará en desarrollar la voluntad y la capacidad políticas para restaurar la relación de los seres humanos con la naturaleza. Asimismo, se trata de una respuesta directa al aviso de la ciencia, tal y como se expresa en el Informe especial sobre cambio climático y tierra del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, a las decisiones adoptadas por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en las convenciones de Río sobre cambio climático y biodiversidad y a la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>).

Referencias

- Dirección Nacional de Planificación Estratégica Territorial. (2016). *Plan Estratégico Territorial Argentina (PET) Avance IV 2018*. Secretaría de Planificación Territorial y Coordinación de la Obra Pública (SPTyCOP) del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda (MIOPyV). Buenos Aires. 368 p.
- Dourojeanni, A. (1990). *Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable (Aplicado a microrregiones y cuencas)*. Documento 89/05/Rev.1. Serie de ensayos.
- Dourojeanni, A., A. Jouravlev. (1999). *Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos*. CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. 176 pp. <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/5668/LCR1948-E.pdf>
- Gaspari, F., Bruno, J., Rickfelder, R., Hauri, B., Cornelly, I., Oroná, C., M. Leonart. (2006). *Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas Serranas del Partido de Tornquist. Estudio de Prefactibilidad*. 135 p.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A., S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 p.
- Gaspari, FJ; Senisterra, G.E.; Delgado, MI; Rodríguez Vagaría, A., S. Besteiro. (2013). *Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. ISBN 978-950-34-0963-3. Actualización constante on line SEDICI.
- Gaspari, F.J.; Denegri, G.A.; Senisterra, G.E.; Delgado, M.I.; Rodríguez Vagaría, A.M., A.R. Díaz Gómez. (2016). *Valoración de servicios ambientales para el ordenamiento agrohidrológico en cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.. 137 p. ISBN. 978-950-34-1324-1.

- Granizo Andocilla, D.R. (2018). *Valoración económica de los bienes y servicios ambientales de la Cuenca del Río Pasurco, sector Murielado, Parroquia Fátima*. Tesis. Universidad Estatal Amazónica. Pastaza-Ecuador. 66 p.
- MEA. (2005). Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry*. World Resources Institute, Washington, DC. 34 p.
- Palacio P., J. L.; M. T. Sánchez S.; J. M. Casado I.; E. Propin F.; J. Delgado C.; A. Velázquez M.; L. Chias B.; M. I. Ortiz A.; J. González S.; G. Negrete F.; J. Gabriel M., R. Márquez. (2004). *Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 168 pp.
http://books.google.com.ar/books?id=_kvT8mQKH_QC&lpg=PA9&ots=OcSxIhW2Lj&dq=ordenamiento%20territorial&lr&hl=es&pg=PA12#v=onepage&q=ordenamiento%20territorial&f=false
- Paris, M. (2020). *La Seguridad Hídrica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: manual de capacitación para tomadores de decisión*. UNESCO. ISBN: 978-92-3-300138-1
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374917.locale=es>
- Saavedra, C. (2018). *La gestión integral de cuencas en Bolivia y el apoyo de la Cooperación Suiza: una perspectiva desde la práctica a nivel de microcuencas. Proyecto Gestión integral del agua*. HELVETAS Swiss Intercooperation. Proyecto de Trabajo. Bolivia. 20 p.
- SDSN Australia/Pacific. (2017). *Getting started with the SDGs in universities: A guide for universities, higher education institutions, and the academic sector*. Australia, New Zealand and Pacific Edition. Sustainable Development Solutions Network – Australia/Pacific, Melbourne. <https://reds-sdsn.es/wp/wp-content/uploads/2017/02/Guia-ODS-Universidades-1800301-WEB.pdf>

Las autoras

de Antuño, Lucía

Ingeniera Civil egresada de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (FI), Magister Scientiae en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas de la FCAyF-UNLP. Actualmente se desempeña como Ayudante Diplomado en el curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas en la FCAyF-UNLP y Ayudante Diplomado en las cátedras de Geotecnia I y II de la FI - UNLP. Profesora Adjunta en el curso de Geología II, de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, de la Universidad Católica de La Plata. Ha participado en diversos congresos nacionales e internacionales relacionados al ambiente e hidrología, habiendo publicado trabajos en congresos y revistas de investigación. Investigadora formada del Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), (UNLP-CICPBA). Cuenta con amplia trayectoria en la consultoría privada, así como asesorías en el campo de la administración pública, orientados a la hidrología y recursos hídricos.

Delgado, María Isabel

Ing. Forestal, Mg.Sc. en Manejo de Integral de Cuencas Hidrográficas (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP), Especialista en Docencia Universitaria (UNLP) y Dra. en Ingeniería (Universidad Nacional de Rosario). Actualmente ocupa el cargo de Jefa de Trabajos Prácticos en el curso de Manejo de cuencas hidrográficas (FCAyF-UNLP) y se desempeña como Investigadora Asistente en el CONICET, con lugar de trabajo en la División Ficología del Museo de La Plata (FCNyM-UNLP). Ha realizado numerosas participaciones en eventos científicos, habiendo publicado además artículos de investigación tanto en revistas locales como internacionales. Ha sido directora/codirectora de proyectos acreditados de investigación y de extensión. En el ámbito de la UNLP ha dirigido Trabajos Finales de Ing. Forestal y de Lic. en Geología, y dirige actualmente una Tesis de Doctorado.

Gaspari, Fernanda Julia

Ingeniera Forestal (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP) y Magister Scientiae en Conservación y Gestión del Medio Natural (Universidad Nacional de Andalucía). Dra. en Ingeniería Hidráulica (Universidad Nacional de Rosario). Con 24 años en docencia universitaria, siendo actualmente en Grado Profesora Adjunta a Cargo del Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP). En Post-Grado se desempeña como Directora de la Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, siendo además Profesora a cargo de tres cursos. Sub directora del CEIDE (Centro de Estudios integrales de la Dinámica Exógena). Entre sus publicaciones se encuentran 11 libros, 8 capítulos de libro y más de 50 artículos en revistas y más de 125 trabajos en congresos. Ha realizado informes técnicos y organizado convenios inter-institucionales. Dirige numerosas Tesis de Maestría y Doctorado.

Gaspari, Fernanda Julia

Contribuciones al manejo de cuencas hidrográficas : herramientas y procedimientos básicos / Fernanda Julia Gaspari ; María Isabel Delgado ; Lucía de Antueno. - 1a ed. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata ; La Plata : EDULP, 2025.

Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-34-2561-9

1. Cuencas Hidrográficas. I. Delgado, María Isabel II. de Antueno, Lucía III. Título
CDD 551.23

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
48 N.º 551-599 / La Plata B1900AMX / Buenos Aires, Argentina
+54 221 644 7150
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2025
ISBN 978-950-34-2561-9
© 2025 - Edulp

n
naturales


EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA