

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Lineamientos Para la Recuperación Ambiental de Cauces  
Urbanos en las Zonas de Montaña**

**Alberto Polo Cueto**

**Bogotá, D.C., 08 de Agosto de 2.017**



**Lineamientos Para la Recuperación Ambiental de Cauces  
Urbanos en las Zonas de Montaña**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Ingeniero Rubén Darío Ochoa Arbeláez  
IC Msc Recursos Ambientales  
Director de Tesis**

**Bogotá, D.C., 08 de Agosto de 2.017**



La tesis de maestría titulada “Lineamientos Para la Recuperación Ambiental de Cauces Urbanos en las Zonas de Montaña”, presentada por Alberto Polo Cueto, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

INGENIERO RUBÉN DARÍO OCHOA ARBELÁEZ

Director de tesis

INGENIERO GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

Jurado

INGENIERO HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

Jurado

Bogotá, D.C., 31 de Julio de 2.017

## DEDICATORIA

A Martha que me ha dado su apoyo  
incondicional en todas las metas de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

El autor expresa sus agradecimientos a:

RUBÉN DARÍO OCHOA ARBELÁEZ, ingeniero civil de la Universidad la Gran Colombia, Especialista en seguridad industrial higiene y gestión ambiental. Uniagraria 2007. Maestría en ingeniería civil con énfasis ambiental. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2012. Candidato a doctor en territorio y medio ambiente Universidad de Valencia (España). Director del presente trabajo de grado.

GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS, Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Master of Science en recursos hidráulicos y Ph.D. en Engineering Science and Mechanics de Virginia Tech. Ha sido miembro del Consejo Directivo, director del Centro de Estudios Hidráulicos, vicerrector y rector de la Escuela. Experto en hidráulica e hidrología computacional.

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ, Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ingeniero hidrólogo del Centro de Estudios Hidrográficos (Madrid, España). Estudios de doctorado en ingeniería de caminos, canales y puertos en la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Madrid, España). Ha sido director del Buque Explorador de Cormagdalena y vicerrector administrativo de la Escuela. Actualmente se desempeña como profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Experto y consultor privado en hidráulica, hidrología e ingeniería fluvial.

Las directivas de la Facultad de Ingeniería y en particular a las de Maestría en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

## **RESUMEN**

En muchas de las poblaciones colombianas es posible observar el deterioro ambiental de los cuerpos hídricos, la invasión de las rondas hidráulicas y los cauces que ocasionan riesgos a los habitantes de los sectores más vulnerables de la población.

En la actualidad es un objetivo de las autoridades encargadas de la planeación de las ciudades la recuperación del medio natural. Se requiere generar espacios de vida para mitigar los efectos ambientales y propiciar el desarrollo sostenible en los sectores vulnerables de las ciudades. (POMCA. Decreto 1640 de 2012, Ministerio del medio ambiente y desarrollo sostenible). De esta forma, es necesario plantear lineamientos para el análisis de la situación y el manejo de la problemática ambiental, con el propósito de establecer acciones que recuperen el paisaje, que sean sostenibles y se adecuen a la realidad de las ciudades.

Desde este punto de vista y teniendo en cuenta la problemática que se presenta en la periferia de las ciudades se plantea en forma general los aspectos que pueden ser tenidos en cuenta en la caracterización de los cauces urbanos en la zona de montaña y una metodología que puede ser implementada en procesos de recuperación de cauces urbanos.

**LINEAMIENTOS PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES URBANOS EN  
LAS ZONAS DE MONTAÑA**

**TABLA DE CONTENIDO**

	RESUMEN .....	vi
1	INTRODUCCIÓN .....	11
2	GLOSARIO .....	13
3	PROBLEMA .....	25
4	JUSTIFICACIÓN .....	27
5	OBJETIVOS .....	28
5.1	OBJETIVO GENERAL .....	28
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
6	LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES .....	29
7	OBJETIVOS DE LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES URBANOS DE MONTAÑA .....	35
8	ASPECTOS RELEVANTES DE LOS CAUCES EN EL ENTORNO URBANO.....	37
8.1	EFFECTOS DE LA URBANIZACIÓN EN LOS CAUCES .....	39
8.1.1	Efectos físicos .....	39
8.1.2	Efectos químicos .....	40
8.1.3	Efectos sobre la biota.....	41
8.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS CAUCES Y CUENCAS EN EL ENTORNO URBANO .....	42
8.3	BIOTA EN LOS RÍOS URBANOS.....	47
8.4	LOS CAUCES URBANOS Y LA COMUNIDAD.....	52
8.5	PROCESOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DE LOS CAUCES DE URBANOS.....	55

8.6	PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS EN LOS CAUCES URBANOS .....	61
9	LINEAMIENTOS A TENER EN CUENTA EN UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE CAUCES URBANOS.....	64
9.1	ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS .....	64
9.2	ASPECTOS HIDRÁULICOS .....	68
9.2.1	Caudales de interés Morfológico .....	71
9.2.2	Caudales de interés probabilístico .....	73
9.3	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS .....	76
9.4	ASPECTOS BIÓTICOS .....	78
10	PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES URBANOS .....	81
10.1	Identificación de la Problemática del cauce .....	85
10.1.1	Definición de la problemática en el cauce .....	87
10.1.2	Identificación de la condición referente .....	89
10.2	Determinación de las metas y objetivos de la recuperación.....	89
10.3	Alcance del proyecto de recuperación .....	91
10.4	Diseño de las alternativas de recuperación .....	93
10.5	Proceso de implementación de las obras de recuperación .....	95
10.6	Monitoreo de las obras de recuperación .....	98
11	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....	100
12	REFERENCIAS.....	102

**Lineamientos Para la Recuperación Ambiental de Cauces Urbanos en las Zonas De  
Montaña**

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Diferencias entre restauración, rehabilitación y reclamación.....	33
Figura 2. Cauce urbano .....	38
Figura 3. Delimitación de las zonas de los cauces Urbanos.....	39
Figura 4. Cauce y Cuenca Urbana.....	42
Figura 5. Variaciones de la forma de un cauce urbano .....	43
Figura 6. Rio Fucha – Cuenca Alta .....	44
Figura 7. Erosión en un cauce urbano de montaña.....	45
Figura 8. Forma de la sección del cauce.....	46
Figura 9. Cordón ripario .....	50
Figura 10. Dinámica del agua en la zona hiporeica.....	52
Figura 11. Modificación de la respuesta Hidrológica .....	56
Figura 12. Ríos de Montaña – Rugosidad del canal.....	57
Figura 13. Pendiente longitudinal del canal- Cauce de Montaña.....	62
Figura 14. Caudal generador .....	73
Figura 15. Secciones de flujo para diferentes periodos de retorno.....	74
Figura 16. Propuesta Metodológica para le recuperación de cauces de montaña.....	84
Figura 17. Proceso de Identificación de la problemática del cauce .....	87
Figura 18. Enfoque para identificar la problemática del cauce .....	88
Figura 19. Concepto de la condición referente.....	89
Figura 20. Metas y Objetivos de la Recuperación.....	90
Figura 21. Proceso de establecer las metas y Objetivos de la recuperación .....	91
Figura 22. Metas y Objetivos de la Recuperación .....	92
Figura 23. Elaboración de las alternativas de recuperación .....	93
Figura 24. Proceso de implementación de las obras de recuperación .....	96
Figura 25. Proceso de monitoreo de las obras de recuperación .....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Periodos de retorno a considerar en la evaluación de cuencas urbanas que reciben aportes de colectores de aguas lluvias .....	66
Tabla 2. Caudales de interés morfológico .....	71
Tabla 3. Aspectos que pueden afectar la morfología de los cauces.....	76

## 1 INTRODUCCIÓN

En muchas de las poblaciones colombianas es posible observar el deterioro ambiental de los cuerpos hídricos, la invasión de las rondas hidráulicas y los cauces que ocasionan riesgos a los habitantes de los sectores más vulnerables de la población.

En la actualidad es un objetivo de las autoridades encargadas de la planeación de las ciudades la recuperación del medio natural. Se requiere generar espacios de vida para mitigar los efectos ambientales y propiciar el desarrollo sostenible en los sectores vulnerables de las ciudades<sup>1</sup>.

De esta forma, es necesario plantear lineamientos para el análisis de la situación y el manejo de la problemática ambiental, con el propósito de establecer acciones que recuperen el paisaje, que sean sostenibles y se adecuen a la realidad de las ciudades.

El presente documento pretende establecer algunos lineamientos que desde el punto de vista de la ingeniería pueden ser tenidos en cuenta para los procesos de recuperación ambiental de cauces urbanos.

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de este documento comienza estableciendo las

---

<sup>1</sup> Pomcas. Decreto 1640 de 2012, Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

definiciones necesarias para diferenciar los términos de restauración ecológica, la rehabilitación de cauces, la reclamación de cauces y la recuperación ambiental de cauces, lo cual permite determinar el alcance que puede pretenderse de un proceso de recuperación ambiental de cauces urbanos.

También, con base en estas definiciones y la delimitación de la problemática, se procede en el documento a establecer la caracterización de los cauces urbanos y los aspectos que pueden determinar su comportamiento. El conocimiento del origen del problema permitirá el planteamiento de lineamientos a considerar en el tratamiento de procesos de restauración de cauces y en una propuesta metodológica encaminada al manejo de la problemática relacionada.

## 2 GLOSARIO

**Agradación.** El proceso geológico por el cual el fondo de la corriente se eleva por el depósito de material adicional transportado desde aguas arriba.

**Altura orográfica.** Parte de la geografía física que trata de la descripción de las montañas.

**Aluvial.** Sedimento arrastrado por las lluvias o las corrientes.

**Aluvión.** Depósitos sedimentarios creados por arroyos sobre lechos de ríos, llanuras de inundación. El término se aplica a los depósitos en curso de tiempo reciente.

**Antrópica.** Donde interviene el hombre.

**Arácnidos.** Dicho de un artrópodo: Compuesto de cefalotórax, cuatro pares de patas, y dos pares de apéndices bucales, variables en su forma y su función, sin antenas ni ojos compuestos, y con respiración aérea.

**Asentamiento.** Acción y efecto de asentar o asentarse.

**Avalancha.** Masa grande de una materia que se desprende por una vertiente, precipitándose por ella.

**Bioingeniería.** Una técnica de ingeniería que aplica conocimientos biológicos en el diseño y obra de construcciones de tierra y agua y en la con pendientes inestables y arroyos.

**Biota.** Conjunto de la fauna y la flora de una región.

**Bosques de galería.** Se identifica por sus características al ser una formación vegetal continua, estrecha y alargada, localizada en las riberas fluviales y sometidas a los períodos

de mayor o menor encharcamiento. Diferenciándose bien de las comunidades colindantes desde un punto de vista fisonómico o florístico.

**Calentamiento global.** Este es el término utilizado para describir el recalentamiento general del planeta debido principalmente a las actividades del ser humano, lo cual es producido por la acumulación de ciertos gases en la atmósfera superior de la Tierra, llamados gases de efecto invernadero.

**Capacidad erosiva.** Depende del caudal y de la velocidad. Es la capacidad de transportar materiales.

**Carga de nutrientes.** Cantidad de nutrientes que entra en un ecosistema en un período de tiempo concreto.

**Carga del lecho.** La parte del transporte de sedimentos de un canal que no está en suspensión, consistente en material grueso que se mueve sobre o cerca del lecho del canal.

**Cauce.** Lecho de los ríos y arroyos.

**Caudal de Emisión:** Masa de contaminante transferida a la atmósfera por unidad de tiempo.

**Climatología.** Conjunto de las condiciones propias de un determinado clima.

**Coefficiente de rugosidad de Manning (n).** Un coeficiente empírico para calcular la rugosidad de una corriente utilizando la determinación de la velocidad del agua en los cálculos de descarga de la corriente.

**Coluvión.** Término general para depósitos sueltos de tierra y roca movidos por gravedad.

**Contaminante.** Sustancia o compuesto que afecta negativamente al ambiente.

**Cordones riparios.** Denominados bosques de galería de los ríos.

**Cuenca:** Es la unidad espacial natural de la biogeoestructura, donde se integran los componentes sólidos, líquidos y gaseosos, formando unidades definidas de ocupación del espacio.

**Cuenca Hidrográfica:** Es una porción del terreno definido por donde discurren las aguas en forma continua o intermitente hacia un río mayor, un lago o el mar.

**D<sub>50</sub> / D<sub>100</sub>.** El tamaño de partícula para el cual el 50 o el 100 por ciento de la muestra es más fino.

**Degradación.** Proceso bioquímico mediante el cual las moléculas orgánicas complejas se convierten en moléculas simples. Se utiliza este término al deficiente manejo de los suelos, son aquellos que se encuentran en estado de salinización, alcalinización, acidificación, etc.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Cantidad de oxígeno consumida durante un tiempo determinado, a temperatura dada, para descomponer la materia orgánica por oxidación.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es una medida compleja de la contaminación química del agua, basada en la determinación de los miligramos de Oxígeno (O<sub>2</sub>) consumidos por litro de muestra que se somete a un proceso de “digestión”, es decir, que se calienta a 150° C durante dos horas en presencia de un agente oxidante fuerte (como el dicromato de potasio).

**Descarga dominante.** La descarga que tiene el mayor impacto en el canal.

**Descarga.** La tasa de flujo expresada en volumen por unidad de tiempo. La descarga es el producto de la velocidad media y el área transversal del flujo.

**Drenaje.** Acción y efecto de drenar.

**Drenar.** Dar salida y corriente a las aguas muertas o a la excesiva humedad de los terrenos, por medio de zanjas o cañerías.

**Ecología.** Es la ciencia que estudia las relaciones de los seres vivos con el ambiente, o sea estudia la estructura y función de la biosfera. Comprende la historia de la vida y hábitos de todos los animales y plantas, su descripción, albergues, distribución y métodos de vida, en comunidades o solitarios.

**Ecosistemas.** Es el conjunto de factores abióticos y bióticos de una determinada zona (espacio) y la interacción que se establece entre ellos en un tiempo determinado.

**Erosión del lecho.** Proceso por el cual el agua afloja y libera el suelo y la roca desde el fondo de un cuerpo de agua, resultando por lo general en una profundización del cuerpo de agua.

**Erosión.** Pérdida de la capa vegetal que cubre la tierra, dejándola sin capacidad para sustentar la vida. La erosión tiene lugar en lapsos muy cortos y esta favorecida por la pérdida de la cobertura vegetal o la aplicación de técnicas inapropiadas en el manejo de los recursos naturales renovables (suelo, agua, flora y fauna).

**Escorrentía.** Fenómeno de escurrido de las aguas sobre el suelo cuando esta supera la capacidad de infiltración.

**Esfuerzo de corte.** Una medida de la fuerza erosiva que actúa sobre el canal. Se expresa como fuerza por unidad de área ( $N/m^2$ ). En un canal, el esfuerzo de cizallamiento es creado por el flujo de agua paralelo a los límites del canal, el cizallamiento del banco es una función

combinada de la magnitud y duración del flujo, así como la forma de la curva y la sección transversal del canal.

**Especies arbóreas.** Grupo de organismos muy parecidos entre sí de la misma forma que lo fueron sus antepasados. Es la unidad taxonómica fundamental y tiene nomenclatura binomial (dos nombres): el primero es el nombre genérico y el segundo es el específico. Las especies similares y relacionadas se agrupan dentro del mismo género. Ha sido el problema biológico más discutido en taxonomía, siendo el grupo fundamental de toda clasificación.

**Fisiología.** Ciencia que tiene por objeto el estudio de las funciones de los seres orgánicos.

**Fisiológica.** Pertenece o relativo a la fisiología.

**Flujo aluvial.** Los arroyos que tienen límites erosionables y son libres de ajustar.

**Flujo base.** Caudal que circula por un río debido a causas más remotas que la escorrentía de una lluvia reciente.

**Fluviales.** Pertenece o relativo al río.

**Geología.** Ciencia que trata de la forma exterior e interior del globo terrestre, de la naturaleza de las materias que lo componen y de su formación, de los cambios o alteraciones que éstas han experimentado desde su origen, y de la colocación que tienen en su actual estado.

**Geomorfología fluvial.** La ciencia de los procesos de los ríos. También, las características distintivas del canal producidas por la acción de un arroyo o río.

**Geomorfología.** Estudia la forma del relieve y su evolución. Estrechamente relacionada con la geobotánica, la ecología vegetal y la planificación física.

**Gestión ambiental.** Es el conjunto de las actividades humanas que tiene por objeto el ordenamiento del ambiente y sus componentes principales como son: la política, el derecho y la administración ambiental.

**Gradiente hidráulico.** (a) La pendiente de la superficie del agua. (b) La caída de la presión cabeza por longitud en la dirección del flujo de la corriente.

**Hábitat.** Lugar de condiciones apropiadas para que viva un organismo, especie o comunidad animal o vegetal.

**HEC-HMS. (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System).** Es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y por extensión en nuestro país.

**Hidráulico.** Que se mueve por medio del agua o de otro fluido.

**Hidrogeología.** Parte de la geología que se ocupa del estudio de las aguas dulces y, en particular, de las subterráneas y su aprovechamiento.

**Hidrología.** Disciplina de las ciencias naturales que trata de las aguas.

**Homogenización biótica.** Impacto del hombre sobre el planeta previo a la Revolución Industrial al favorecer a unas pocas especies de plantas (trigo, cebada, garbanzo) y animales (ovejas, vacas, cabras, caballos). Con este objeto ha modificado la vegetación,

combatido a sus enemigos, monopolizado el agua y contaminado el ambiente con toneladas de vertidos fecales, nutrientes y pesticidas.

**Incisión de un canal.** El cambio en la sección transversal del canal resultante del proceso de degradación.

**Incisión.** Corte hacia abajo o atrincherado. Canal de corriente que se ha profundizado.

**Infiltración.** Es el proceso mediante el cual el agua penetra al subsuelo y es gradualmente conducida a capas más profundas pudiendo penetrar a través de los mantos rocosos subterráneos y pasar entre sus pequeñas grietas.

**Inundación.** Llenar o cubrir un lugar de agua u otro líquido.

**Invasiones.** Acción y efecto de invadir.

**Invertebrados bénticos.** Animal sin huesos en la espalda, sin columna vertebral. Van desde los protozoos hasta los insectos, gusanos, caracoles y ostras, la región ecológica en el nivel más bajo de un cuerpo de agua, como un océano o un lago, incluyendo la superficie del sedimento y de algunas capas del subsuelo. Los organismos que viven en esta zona se llaman bentos.

**Lineamientos.** Delineación o dibujo de un cuerpo por el cual se distingue y conoce su figura.

**Macrófitas.** Plantas acuáticas. Constituyen formas macroscópicas de vegetación acuática. Comprenden las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos).

**Macroinvertebrados.** Se utiliza comúnmente para referirse a animales invertebrados tales como insectos, moluscos y anélidos.

**Meteorización.** Fragmentación o degradación parcial o total de las rocas y los minerales en contacto con la atmósfera, la hidrosfera o la biosfera.

**Microbiota.** Es el conjunto de microorganismos que se localizan de manera normal en distintos sitios del cuerpo humano.

**Microorganismo.** Término que se aplica a los innumerables organismos animales y vegetales minúsculos que, por regla general, sólo son visibles con el auxilio de un microscopio. Incluyen bacterias, ciertos hongos y algas, así como foraminíferos, diatomeas y todos los minúsculos organismos flotantes que constituyen la vegetación flotante marina.

**Mitigar.** Disminuir los efectos negativos sobre el medio ambiente.

**Morfología.** Parte de la biología que trata de la forma de los seres orgánicos y de las modificaciones o transformaciones que experimenta.

**Morfometría.** Conjunto de técnicas, procedimientos y métodos utilizados para determinar atributos, configuración del relieve y, con base a ellos, conocer el sistema de relaciones espaciales que caracterizan a las formas del terreno.

**Optimización.** Es la mejor forma de utilización de los recursos, a la par de su conservación y evitando al máximo su deterioro.

**Patrón de flujo.** Es la distinta configuración que forman dos más fases al fluir juntas por un conducto.

**Perturbación.** Es el deterioro de uno o varios de los componentes del medio ambiente (por ejemplo, el aire, el suelo, el agua, etc.), situación que afecta en forma negativa a los organismos vivientes.

**Planicie de inundación.** Cualquier tierra baja que bordea un arroyo y es inundada periódicamente por las aguas de la corriente.

**POMCA.** Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca. Es el instrumento a través del cual se realiza la planeación del adecuado uso del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca; entendido como la ejecución de obras y tratamientos, con el propósito de mantener el equilibrio entre el aprovechamiento social y el aprovechamiento económico de tales recursos, así como la conservación de la estructura físico -biótica de la cuenca y particularmente del recurso hídrico.

**Procesos hidrológicos.** El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas de su ciclo; éstos procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años.

**Radio hidráulico.** El área de la sección transversal de una corriente dividida por la humedad del perímetro.

**Reclamación.** Corresponde entonces a una serie de actividades para cambiar la capacidad biofísica de un ecosistema para beneficio del hombre.

**Recuperación ambiental.** Es el proceso consistente en reducir, mitigar e incluso revertir en algunos casos, los daños producidos en el medio físico para volver en la medida de lo posible a la estructura, funciones, diversidad y dinámica del ecosistema original.

**Recursos.** Medio de cualquier clase que, en caso de necesidad, sirve para conseguir lo que se pretende.

**Rehabilitación.** Restituir un ecosistema degradado. Esta mejora puede ser diferente de su condición original.

**Restauración.** Es el restablecimiento de las propiedades originales de un ecosistema o hábitat en cuanto a estructura comunitaria, complemento natural de las especies y cumplimiento de sus funciones naturales.

**Restaurar.** Restablecer las propiedades originales de un ecosistema o hábitat.

**Revestimiento.** La protección del banco se realiza mediante su blindaje con material resistente a la erosión.

**Ribera.** Margen y orilla del mar o río.

**Ribereña.** Perteneciente o relativo a la ribera.

**Sedimentos.** Materia que, habiendo estado suspenda en un líquido, se posa en el fondo por su mayor gravedad.

**Socavación.** Acción y efecto de socavar.

**Sostenible.** Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.

**Sostenibilidad.** Proceso de racionalización de las condiciones sociales, económicas, educativas, jurídicas, éticas, morales y ecológicas fundamentales que posibiliten la adecuación del incremento de las riquezas en beneficios de la sociedad sin afectar al medio ambiente, para garantizar el bienestar de las generaciones futuras.

**Sotobosque.** Es el área de un bosque que crece más cerca del suelo por debajo del dosel vegetal.

**Sustentabilidad.** Aquello que sirve para dar vigor y permanencia.

**SWMM. Storm Water Management Model.** Es un modelo dinámico de simulación de la calidad hidrológica-hidráulica del agua. Se utiliza para simulación de un solo evento o de largo plazo (continua) de la cantidad y calidad de escorrentía de áreas principalmente urbanas.

**Talud.** Inclinação del paramento de un muro o de un terreno.

**Tiempo de concentración.** Es el tiempo necesario para que el caudal saliente se estabilice, cuando ocurra una precipitación con intensidad constante sobre toda la cuenca.

**Tratamiento.** Modo de trabajar ciertas materias para su transformación.

**Suelo urbano.** Lo conforman las áreas destinadas a usos urbanos que cuenten con infraestructura vial y de acceso a servicios públicos domiciliarios, posibilitándose su urbanización y edificación.

**Suelo de expansión urbana.** Lo conforman las áreas que quieren destinarse en el futuro a usos urbanos, según la ejecución de planes de crecimiento del suelo urbano.

**Suelo rural.** Lo conforman las áreas no aptas para uso urbano por razones de oportunidad o por el hecho de tener una destinación diferente.

**Suelo suburbano.** Lo conforman las áreas ubicadas en suelo rural en las cuales se ve cierta urbanización. Por lo tanto, allí se establecen medidas diferentes para regular esas especiales circunstancias.

**Suelo de protección.** Lo conforman las áreas que, por sus características, hacen parte de zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructura destinada a la provisión de servicios públicos o zonas de riesgo para asentamientos humanos. Por estas razones no se permite allí la urbanización.

**Valle fluvial.** Es una hendidura producida por el río al excavar y está limitada por dos laderas o vertientes. Puede ser sólo una hendidura profunda, un corte de sierra entre laderas verticales (gargantas) pero las laderas, por lo general, se van haciendo más suaves a medida que el valle se ensancha.

**Vertimiento.** Acción y efecto de verter.

**Zona hiporeica.** Puede estar constituida exclusivamente de agua superficial en el caso de los ríos colgados sobre la capa aluvial o caracterizarse por una mezcla de agua superficial y de agua subterránea cuando se dan intercambios con la capa acuífera.

### 3 PROBLEMA

Desde hace siglos las orillas de los ríos han sido lugares atractivos para el desarrollo urbano. Las áreas urbanas son establecidas a lo largo de los ríos y sus zonas de inundación ocasionando cambios en la forma y funcionamiento de los ecosistemas fluviales.

Una de las consecuencias de la urbanización ha sido la creación de extensas zonas urbanas marginales en la periferia de las grandes ciudades, sin ninguna planificación de infraestructura y servicios. En estas zonas marginales se encuentran asentamientos de pobladores que llegan de las áreas rurales o ciudades más pequeñas y se establecen en asentamientos irregulares (invasiones).

Estas invasiones generalmente se establecen en lugares ambientalmente sensibles (a las orillas de los cauces), expuestos a peligros de diverso tipo, especialmente inundaciones y deslizamientos.

Estos procesos urbanísticos generan conversión de un sistema ecológico natural a uno urbano y son responsables de varios efectos sobre el ambiente, tales como alteración de la composición de la atmósfera, de los parámetros hidrológicos de la cuenca, de la morfología de los cauces, así como de las condiciones naturales del suelo.

De esta forma, el desarrollo urbano está asociado con la transformación del uso de la tierra, el cual se asocia también con la perturbación en la cuenca del río, la degradación de la

calidad del agua de los ríos, el aumento de las inundaciones y deslizamientos.

## 4 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo sostenible en una cuenca fluvial requiere el conocimiento de las interrelaciones entre la urbanización, el ecosistema de la cuenca del río y el clima.

En cuencas urbanizadas el incremento de las áreas impermeables reduce la infiltración y el tiempo de concentración de la escorrentía superficial resultando en una respuesta de la cuenca (caudal) más rápida y de mayor magnitud que la de condiciones naturales; el caudal base del cauce, por el contrario, disminuye; la construcción de estructuras hidráulicas asociadas con los desarrollos urbanísticos, tal como puentes, canalizaciones, muros, retenciones, rectificación de cauces, etc., alteran la morfología del cauce de manera irreversible, lo mismo que el hábitat natural. (Cepal, 1999).

El conflicto generado por la urbanización desordenada debe ser gestionado con el fin de evitar daños a la vida humana y a la propiedad. De esta forma, es necesario plantear esquemas sostenibles que permitan minimizar o mitigar los impactos sobre los cauces y sus cuencas que sirvan como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en las zonas urbanas.

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo General**

Establecer los lineamientos y conceptos generales que pueden ser tenidos en cuenta para la recuperación ambiental de quebradas que transcurren a través de poblaciones en las zonas de montaña.

### **5.2 Objetivos Específicos**

1. Recopilar la información técnica que enmarque la recuperación ambiental de cauces en zonas de montaña.
2. Determinar los aspectos técnicos, ambientales y sociales relevantes de los cauces en el entorno urbano que deben considerarse en proyectos de recuperación ambiental de cauces en zonas de montaña.
3. Establecer los lineamientos generales desde el punto de vista técnico, ambiental y social que pueden ser tenidos en cuenta en los procesos de recuperación ambiental de cauces en zonas de montaña.
4. Plantear una propuesta metodológica para la recuperación ambiental de los cauces urbanos en zonas de montaña.

## 6 LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES

Teniendo en cuenta el objetivo de este proyecto es necesario puntualizar a continuación algunos conceptos que permitan definir el alcance y propósito de las labores enfocadas a la gestión ambiental sobre los cursos de agua.

**Restauración ecológica:** La restauración es una actividad deliberada que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema respecto a su salud - procesos funcionales - integridad - composición de especies y estructura de la comunidad- y sostenibilidad -resistencia a disturbios y resiliencia. (Clewel et. al. 2005; SER International 2004).

Con frecuencia el ecosistema que requiere restauración se ha degradado, dañado, transformado o totalmente destruido como resultado directo o indirecto de las actividades del hombre. En otros casos estos impactos en los ecosistemas fueron causados o empeorados por causas naturales como incendios, inundaciones, tormentas o erupciones volcánicas, hasta tal grado que el ecosistema no se puede restablecer por su cuenta al estado anterior a la alteración o a su trayectoria histórica de desarrollo (Clewel et. al. 2005; SER International 2004).

La restauración trata de retomar un ecosistema a su trayectoria histórica. Por lo tanto, las condiciones históricas son el punto de partida ideal para diseñar la restauración. El ecosistema restaurado puede no recuperar su condición anterior debido a limitaciones y condiciones

actuales que pueden orientar su desarrollo por una trayectoria diferente (Clewell et. al. 2005; SER International 2004).

Existen dos aspectos que deben considerarse y que limitan el alcance de la restauración. El primero radica en que muchas actividades humanas resultan ser incompatibles con los sistemas naturales, por lo tanto, deben ser modificadas o trasladadas; este es el caso de las descargas y vertimientos de viviendas que invaden la ronda hidráulica de los cauces. El segundo consiste en que para la mayoría de los casos es muy difícil encontrar referencias del estado natural del cauce en épocas pasadas, lo cual hará que el proceso de restauración diste de la condición original del cauce, caso que ocurre en los cauces urbanos.

Para lograr una auténtica restauración fluvial se requiere de la recuperación del territorio fluvial mediante la eliminación de obstáculos longitudinales y transversales, lo cual permite la recuperación hidrogeomorfológica del cauce que a su vez permita el normal tránsito de las crecientes y la movilización de sedimentos.

De acuerdo con lo anterior en el caso de los cauces urbanos, en donde la urbanización ha invadido el espacio del cauce, es difícil pretender lograr un proceso de restauración ecológica pues no se logrará volver a la condición inicial del cauce sin eliminar del todo la intervención antrópica.

**Rehabilitación ecológica:** Comparte con la restauración un enfoque fundamental en los ecosistemas históricos o preexistentes como modelos o referencias, pero las dos actividades difieren en sus metas y estrategias. La rehabilitación enfatiza la reparación de los procesos, la

productividad y los servicios de un ecosistema, mientras que las metas de la restauración incluyen el restablecimiento de la integridad biótica preexistente en términos de composición de especies y estructura de la comunidad (SER International 2004).

Básicamente la rehabilitación ambiental se fundamenta en el conocimiento de los principios y las causas de degradación de los sistemas naturales para mejorar la calidad de vida de la sociedad humana con el desarrollo de proyectos que recuperen los espacios alterados y/o degradados.

**Reclamación<sup>2</sup>:** Se conoce como la restauración del potencial ambiental de un área dada para un uso o conjunto de usos predeterminados (ej.: abastecimiento hídrico, recreación pasiva, investigación, etc.); sus métodos y alcances dependen de un objetivo económico.

La reclamación corresponde entonces a una serie de actividades para cambiar la capacidad biofísica de un ecosistema. El ecosistema resultante es diferente al ecosistema existente antes de la reclamación. El término implica el proceso de adaptación de los recursos para servir a un propósito utilitario humano, tal como la conversión de zonas ribereñas o pantanosas, ecosistemas agrícolas, industriales o usos urbanos.

La reclamación, dentro del contexto de la restauración ambiental, tiene una aplicación aún más amplia que la rehabilitación ambiental. Los objetivos de la reclamación ambiental serían dar un propósito útil al espacio dentro del contexto regional. El resultado sería la obtención de un

---

<sup>2</sup> Proveniente del término *Land Reclamation* que se traduce al español como reclamación de tierras.

ecosistema completamente diferente del natural que conlleva a que se estabilice el terreno, se consolide la seguridad pública y se mejore estéticamente mediante una revegetación que se realizaría con una o pocas especies propias de la región.

La reclamación difiere de la rehabilitación y la restauración en que éstas tienen como objetivo devolver un ecosistema a una condición natural anterior, mientras que la reclamación implica una modificación del paisaje para servir a un ser humano en particular (National Engineering HandBook Part 654, 2007).

**Recuperación:** la recuperación significa una mejora del estado actual de los ríos y sus alrededores, dirigiéndose a la valorización general de las propiedades ecológicas, sociales, económicas y estéticas. En términos del desarrollo urbano sostenible la restauración de las aguas urbanas corresponde a la mejora y/o realce de las condiciones existentes (Schanze et. al. 2004).

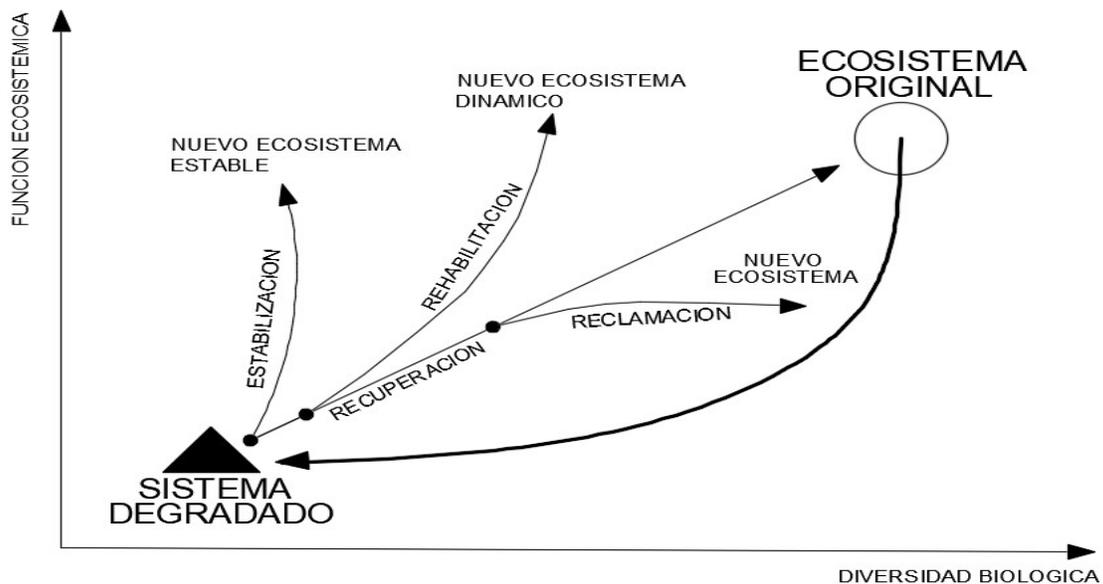
Dentro del proceso de gestión ambiental de las ciudades, la recuperación de cauces es aplicable a sectores en donde la degradación ambiental ya se ha producido, entendiéndose que la recuperación es un proceso para mejorar, corregir y/o prevenir la degradación de los cauces intervenidos.

Lo que realmente puede esperarse de la recuperación pluvial es mejorar y establecer los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos en un sistema hidrográfico degradado, substituyendo la pérdida o el riesgo de elementos que pertenecen al sistema natural. (Wohl et al. 2005). Expresado de otra forma, puede establecerse que la recuperación debe

hacerse pensando obtener un sistema fluvial natural que corresponda a la realidad del entorno. Para ello, debe tenerse en cuenta que las soluciones que se ofrezcan para un proceso de recuperación deben responder a una combinación entre lo funcionalmente posible, lo que es económicamente factible y que responda a la realidad del entorno.

De lo anterior se desprende que, en el ámbito de los cauces urbanos, se pueden hablar de procesos de **reclamación** o procesos de **recuperación**. En los procesos de reclamación se hará necesaria la modificación del paisaje para obtener un nuevo ecosistema, diferente al natural, pero con una función estética y funcional para las zonas urbanas intervenidas (Ej.: senderos ecológicos, parques en la ronda, parques inundables); en los procesos de recuperación se enfocan únicamente los procesos que permitan mejorar, corregir y/o prevenir la degradación de los cauces intervenidos.

**Figura 1. Diferencias entre restauración, rehabilitación y reclamación.**



Fuente. El autor. Adaptado de: K.J, Gregory, The Human Role in Changing River Channels, 2006.

En muchas ocasiones, en especial en los cauces urbanos, no es posible efectuar un proceso de recuperación sin incluir alguna funcionalidad estética de las zonas urbanas intervenidas y comúnmente se les llama a los procesos de reclamación como procesos de recuperación, usando el término de recuperación ambiental para describir acciones de reclamación ambiental.

De la misma manera, en otras ocasiones, se les llama a los procesos de recuperación, procesos de restauración, usando indistintamente el termino; sin embargo, es importante resaltar que un proceso de restauración estrictamente hablando no podrá darse en los cauces urbanos pues no se llegará nunca a la condición inicial del cauce.

## **7 OBJETIVOS DE LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES URBANOS DE MONTAÑA**

Los objetivos de la recuperación ambiental comprenden las acciones que mitiguen o eliminen las causas y efectos de la intervención antrópica del cauce; de esta forma, son objetivos de la recuperación ambiental de cauces urbanos, las labores tendientes a:

- Evitar el Incremento de la escorrentía desde superficies urbanas selladas o impermeables.
- Mitigar el cambio de la dinámica hidrológica, minimizando la magnitud y frecuencia de la descarga pluvial.
- Mitigar el Incremento de las velocidades de flujo en los cursos de agua con el consecuente incremento en el riesgo de erosión.
- Recuperación del flujo base que alimenta las corrientes en tiempo seco.
- Manejo y mitigación del impacto que generan obstrucciones sobre el cauce (Represamientos, Secciones de conductos, alcantarillas, bajo infraestructura, edificios y sectores de pueblos y ciudades).
- Manejo y mitigación de obstrucciones por la infraestructura urbana a lo largo o debajo de los cursos de agua (conductos de alcantarillado, líneas de abastecimiento eléctrico, tuberías de agua y gas, vías, etc.).
- Eliminación del ingreso de varias sustancias (ej.: nutrientes, metales pesados, sales, compuestos orgánicos) desde vertimientos o descargas directas de aguas residuales.
- Manejo de las descargas de aguas de drenaje de la superficie urbana.

- Generación y recuperación de espacios para los hábitats naturales (cuerpo de agua, orillas, cauce, plano inundable, plantas).
- Propender por generar espacios que permitan la continuidad ecológica. Evitando la degradación de áreas ribereñas debido a la separación funcional del curso de agua y el uso extensivo dentro del área urbanizada.
- Recuperación y/o cambio de la biodiversidad (fauna y flora) perdida.

Nótese que en el caso de cauces urbanos no puede hablarse estrictamente de recuperación ambiental pues, conforme los objetivos de la recuperación, es necesario realizar labores que terminarán generando un nuevo entorno que resultarían en un proceso de reclamación ambiental.

## **8 ASPECTOS RELEVANTES DE LOS CAUCES EN EL ENTORNO URBANO**

El estudio de la afectación de los cauces por los seres humanos se inició en 1956 (Lane, 1955; Strahler, 1956). En esa época se estudió la relación entre el la búsqueda de oro y los procesos de agradación de los ríos y se identificaron las consecuencias en el cambio de las corrientes. En 1967 (Wolman 1967) se estableció la relación entre el cambio del uso de la tierra y la urbanización sobre los cauces. Posteriormente, a partir de 1977 (Graf, 1977), se han efectuado estudios más elaborados sobre el impacto de las actividades humanas en el cambio de los cauces, teniendo hoy en día un concepto más claro con respecto a la problemática. (Gregory, 2006).

En la actualidad se conoce como un cauce urbano al conjunto de componentes físicos, químicos y cambios ecológicos, en el cual las superficies impermeables alteran el régimen natural flujo propiciando la contaminación de las aguas, la alteración del régimen hidrológico, los cambios geomorfológicos y la degradación química como resultado de la pérdida de biodiversidad.

De esta forma, se resalta que el aspecto predominante en la degradación de un cauce es la existencia de una superficie impermeable como principal factor estresante en el ecosistema.

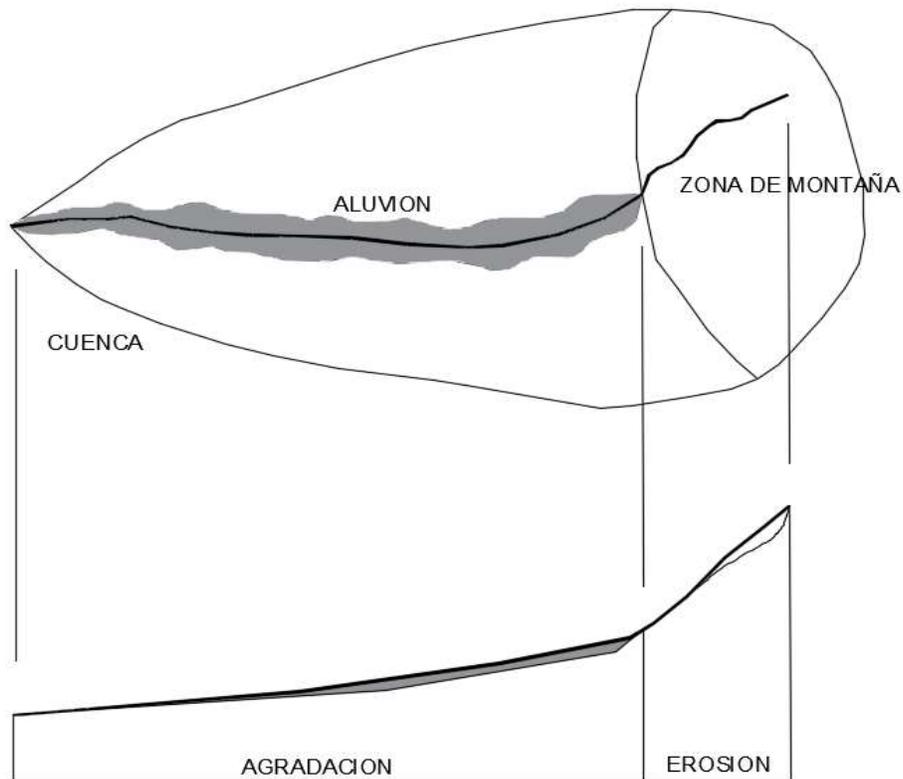
**Figura 2. Cauce urbano**



Fuente: Imagen tomada de <http://www.lne.es/caudal/2013/12/28/hidrografica-aborda-limpieza-rios-atraviesan/1520342.html>

Puede establecerse que la afectación de los cauces puede darse en cualquiera de las etapas de los ríos, produciendo diferentes efectos dependiendo de la etapa en que se desarrolle el cauce. Por ejemplo, en la parte alta se producen efectos de erosión y en la parte baja del cauce los procesos son de agradación, en los cauces las partes altas son proclives a deslizamientos, mientras que, en las partes bajas, con menor pendiente, las inundaciones son los fenómenos que se aprecian en el comportamiento del cauce.

**Figura 3. Delimitación de las zonas de los cauces Urbanos**



Fuente: Adaptado de K.J, Gregory, The Human Role in Changing River Channels, 2006.

<https://www.researchgate.net/publication/215524372>

## 8.1 Efectos De La Urbanización En Los Cauces

En los procesos urbanísticos, es decir, en la conversión de un sistema ecológico natural a uno urbano, se presentan varios efectos sobre el ambiente y los cauces, que se pueden clasificar en tres tipos: efectos físicos, químicos y biológicos.

### 8.1.1 Efectos físicos.

Los principales efectos físicos de la urbanización sobre los cauces son:

- 1) Las alteraciones en la hidrología de la cuenca del río junto con los cambios en la geomorfología y la temperatura de los ríos.
- 2) Los cambios del paisaje como convertir espacios abiertos cubiertos por vegetación en superficies impermeables y/o cubiertas, lo cual influye en la hidrología regional de una cuenca fluvial. Esto conduce a problemas como la escasez de agua, deterioro de la calidad del agua, el cierre de la cuenca y la ocurrencia de inundaciones frecuentes en la región.
- 3) La alteración del flujo de la corriente. El flujo base en la cuenca del río se ve disminuido y este representa un componente importante de los ecosistemas.
- 4) En cuanto a la morfometría se pueden observar cambios en el patrón de flujo y el régimen de la sedimentación de los ríos. El desarrollo urbano aumenta la producción y la deposición de sedimentos fluviales en los canales debido al aumento de la erosión de las orillas del río que ensancha los canales. La construcción de presas, los cambios en el uso del suelo a lo largo de la cuenca y la construcción de estructuras de defensa contra las crecidas del río cambian el comportamiento del sistema.

### **8.1.2 Efectos químicos.**

Se nombran entre otros los siguientes:

- 1) El efecto del calentamiento global sobre los ecosistemas acuáticos puede asociarse con el deterioro de la calidad del agua del río a través de la eutrofización.
- 2) La urbanización aumenta la temperatura del agua directamente por la descarga de agua caliente de los hornos de industrias en los ríos. Se encuentra en aumento la actividad microbiana en el agua del río.
- 3) El aumento de la carga de nutrientes, metales y contaminantes orgánicos en el río debido al vertimiento de aguas industriales y municipales y al vertido directo de basura. En algunos casos se observa la adición de productos químicos nocivos provenientes de prácticas agrícolas.
- 4) Los usos urbanísticos se correlacionan directamente con la disminución de la calidad del agua. Los ríos urbanos se caracterizan por la presencia de

contaminantes orgánicos, la salinidad, el total de sólidos en suspensión, metales pesados, nitratos orgánicos, micro-contaminantes, la acidificación, la eutrofización. Muchas veces se aprecia la muerte completa del río debido a la alta demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).

- 5) La presencia de metales como Cu y Zn en el agua del río son indicadores de la contaminación antropogénica. Otros metales son Hg, Ca, Cr, Ni, Co, Mg, K, Na, Fe, Al, Mn, Cu y Zn y Pb que pueden tener efectos adversos sobre el ambiente fluvial.
- 6) El escurrimiento de las zonas urbanas durante la precipitación e inundaciones puede agregar tóxicos orgánicos persistentes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), y bacterias coliformes fecales al agua del río. Esto contribuye a la mortalidad de los organismos acuáticos y enfermedades como el cáncer en los seres humanos.

### **8.1.3 Efectos sobre la biota.**

Los efectos biológicos se reflejan en el hábitat y se relacionan los siguientes:

- 1) Los cambios en el hábitat natural de la flora y la fauna de las cuencas fluviales, la pérdida de biodiversidad y el deterioro de las funciones de los ecosistemas son los efectos biológicos de la urbanización en las cuencas fluviales.
- 2) Los cambios en los patrones del uso del suelo reducen la riqueza de especies y disminuyen la estabilidad de los ecosistemas.
- 3) Los macro invertebrados bénticos y los peces actúan como indicadores para dar la relación entre los patrones de desarrollo urbano y las condiciones ecológicas en las cuencas.
- 4) La homogenización biótica es el aumento en la similitud de las especies a lo largo del tiempo. Es causada principalmente por la sustitución de especies nativas con extranjeras y/o especies introducidas, que provoca la migración o la extinción de especies nativas.



Al inicio el valle fluvial tiene forma de “V”, con laderas simétricas o asimétricas, típicos de las partes más altas en donde apenas está iniciando la intervención antrópica. La forma en V se trunca a medida que se va disminuyendo la pendiente longitudinal del cauce y se encuentran las intervenciones ocasionadas por el entorno urbano.

**Figura 5. Variaciones de la forma de un cauce urbano**



*Incisión del cauce- Zonas de alta pendiente Incisión del cauce – Zonas de baja pendiente*

Fuente: Adaptado de la guía para la restauración de rondas y nacederos del distrito capital (2004)

**Figura 6. Rio Fucha – Cuenca Alta**



Fuente: El autor

Las características físicas de estos cauces están asociadas con la matriz del suelo que conforma el cauce fluvial; se pueden observar suelos sobre matrices arcillosas o matrices arenosas, las cuales determinan los procesos erosivos que se observan en los cauces.

En zonas altas, en las aguas, se pueden ver cauces de aguas claras, sin embargo, ya en zonas urbanas se observan cauces contaminados que transportan las aguas residuales provenientes de los espacios urbanizados.

**Figura 7. Erosión en un cauce urbano de montaña**



Fuente: <http://www.bogota.gov.co/article/distrito-revela-mejora-en-la-calidad-del-agua-de-varios-tramos-de-los-quebradas-de-la-ciudad>

Se observan en las fotografías los procesos de falla de la banca (arriba) y erosión de la banca (abajo), en un cauce urbano de montaña.

**Figura 8. Forma de la sección del cauce**



Fuente: El autor

En la figura se observan las formas de incisión del cauce en “V” con el afloramiento del fondo rocoso. Y la pérdida de cobertura vegetal en las bancas que genera una gran

producción de sedimentos. En la de abajo: se visualiza la contaminación del agua de los cauces proveniente de las basuras arrojadas y aguas residuales provenientes de las descargas de las viviendas. También puede apreciarse la intervención antrópica sobre el curso de agua con la construcción de alcantarillas para el paso de vías sobre el cauce.

La cuenca hidrográfica de las zonas montañosas se caracteriza por cauces pequeños, en los cuales las áreas de ronda presentan altas pendientes, en las cuales factores tales como la permeabilidad de la superficie, tamaño de la cuenca, la densidad de drenaje, la rugosidad, la longitud y la pendiente del canal pueden verse afectados de forma tal que la escorrentía adquiere mayor magnitud y velocidad (Keckeis et. al. 2008; Gurnell et. al 2007; Allan 1995).

### **8.3 Biota En Los Ríos Urbanos**

La cuenca hidrográfica es un ecosistema, el cual estará en equilibrio si el intercambio de energía en ella se mantiene estacionario (Entradas = Salidas), si hay un desbalance en el intercambio energético se produce la degradación del ecosistema que forma el cauce. Por ejemplo, la cuenca hidrográfica posee dos zonas directamente relacionadas: el medio acuático (fluvial) y el medio ribereño (ronda hidráulica); entre estas dos zonas existen un sin número de interrelaciones y la alteración de cualquiera de ellas producirá afectaciones en los elementos de la cuenca. Cuando se modifica las condiciones del área de ronda retirando parte de su vegetación, el suelo pierde el poder de retención del agua, generando procesos erosivos que inciden en la velocidad de arrastre de sedimentos que generan por un lado desestabilización en la banca de los cauces e inundaciones agua abajo en las zonas de menor pendiente.

Los bosques de las riberas de los ríos son denominados también bosques de galería, cordones riparios o ripisilva. Las especies vegetales que los conforman presentan raíces altamente adaptadas a permanecer saturadas de agua cuyas características les permiten permanecer en suelos con las fluctuaciones propias de la dinámica fluvial (aumento y reducción de caudales, al igual que la velocidad de los mismos). Esta vegetación está igualmente adaptada a la fricción generada por los materiales que transporta la corriente. (DAMA, 2004).

La vegetación de los cordones riparios cumple numerosas funciones, entre las cuales se encuentran: proteger al suelo contra la erosión, regular los intercambios entre el medio acuático y el terrestre, brindar hábitat a muchas poblaciones animales y vegetales permitiendo la conformación de corredores ecológicos.

La distribución espacial de la vegetación de las áreas de ronda posee dos tipos de arreglos, en su dimensión longitudinal y su dimensión transversal: **La dimensión longitudinal**, que depende de los tramos del río en el cual se encuentra altitudinalmente (cuenca alta, media o baja) y está determinada por factores como: pH del suelo, la luminosidad, la humedad, el grado de pendiente y la altura sobre el nivel del mar, entre otros; y, **la dimensión transversal**, (desde la orilla del río hacia fuera) en donde está la vegetación del cordón ripario, la cual conforma una banda o cinta que generalmente acompaña al cauce durante todo su recorrido. En este patrón de distribución espacial, se diferencian tres zonas:

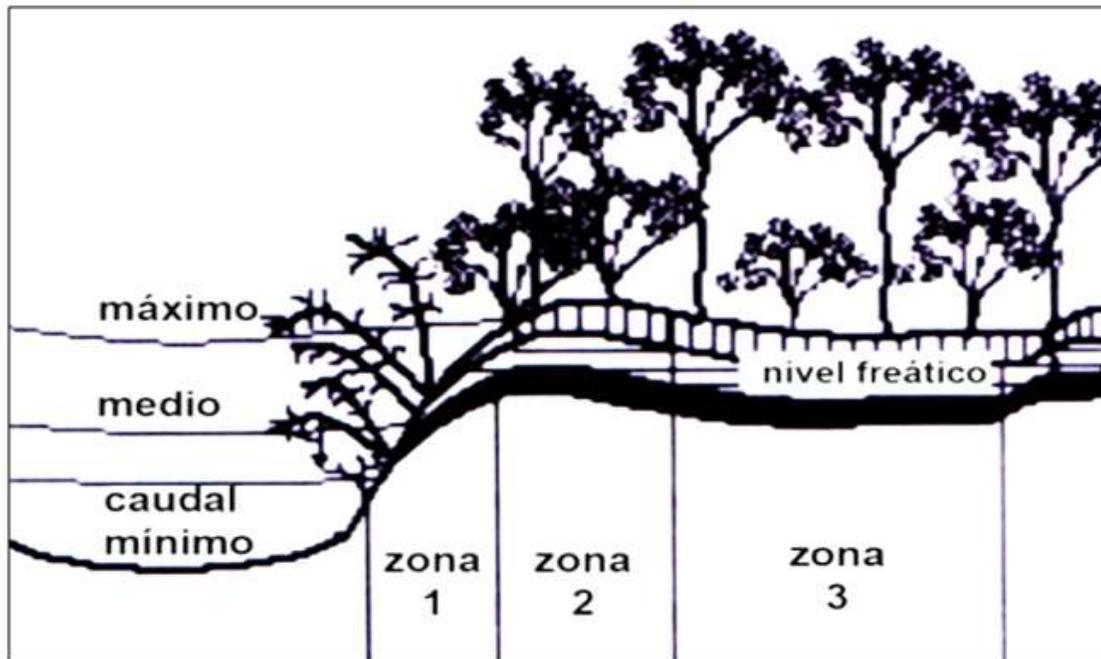
En la zona 1, en donde el suelo permanece la mayor parte del año anegado, se encuentra

vegetación adaptada a las variaciones en el nivel de agua, expuesta a sufrir remociones periódicas y a la erosión originada por el arrastre de partículas. Frecuentemente en los cuerpos de agua que aún se encuentran conservados se puede encontrar vegetación que invade el cauce, particularmente especies adaptadas a recibir la luz solar y algunas macrófitas (plantas acuáticas).

En la zona 2, en donde los suelos periódicamente están inundados y conservan durante todo el año humedad, suelen encontrarse los típicos bosques (sotobosque). El sotobosque suele ser muy variable y los estratos arbustivos y herbáceos presentan mayor o menor desarrollo según la intensidad de la luz y el nivel de afectación generado por el hombre. Otro grupo de especies importantes en los cordones riparios corresponde a los bejucos y las plantas trepadoras, las familias más comunes de bejucos son las cucurbitáceas, rubiáceas y solanáceas.

En la tercera zona (Zona 3), el nivel freático suele oscilar y estar más lejano de la orilla de tal forma que el suelo puede permanecer seco durante todo el año. Allí se encuentran especies arbóreas más grandes.

**Figura 9. Cordón ripario**



Fuente: Adaptado de la guía para la restauración de rondas y nacederos del distrito capital (2004)

La vegetación que compone estos corredores riparios puede oscilar según factores antrópicos que modifican de forma directa estos bosques eliminándolos o introduciendo plantaciones forestales exóticas, cultivos agrícolas, potreros, generando erosión, sedimentación, canalización, represamientos, cambios de curso, urbanización y contaminación.

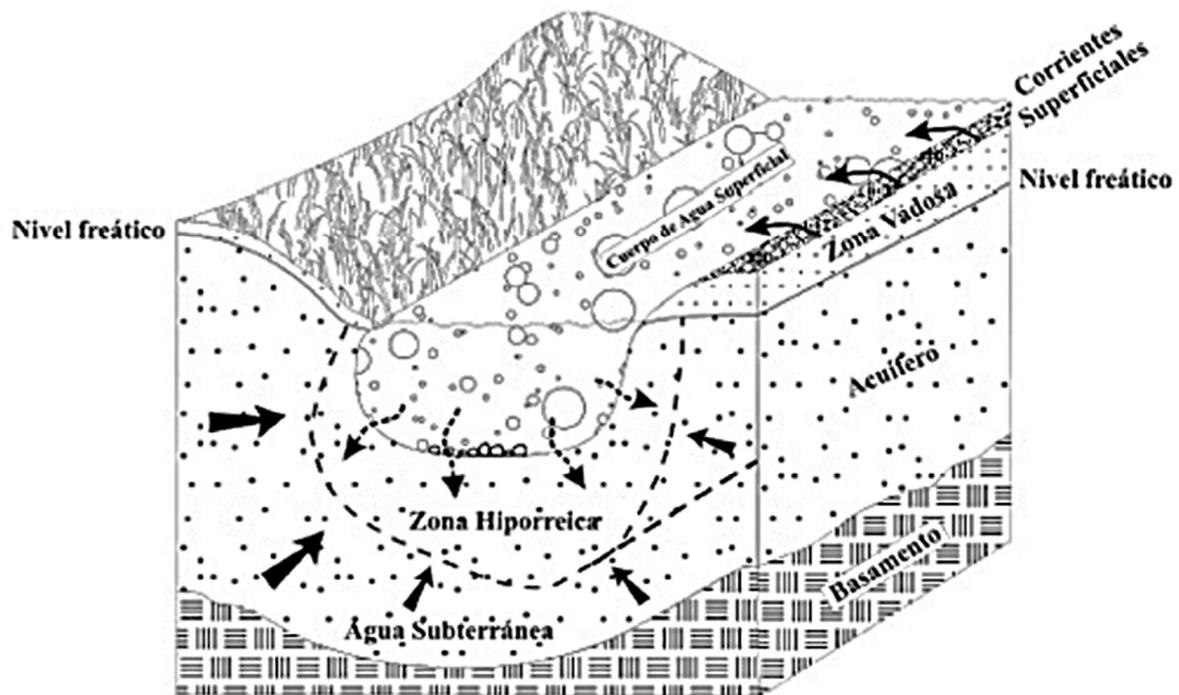
La eliminación de la vegetación en las áreas de ronda produce un incremento en la velocidad de la corriente, el cual aumenta la capacidad erosiva y, por ende, la carga de partículas en suspensión, ya que la vegetación no sólo mantiene unidas las partículas del suelo, sino que también actúa amortiguando la fuerza entre la corriente y la orilla.

La composición y la diversidad de la fauna asociada a los cuerpos de agua varía según las especies vegetales que hacen parte del cordón ripario; otros factores que modifican, facilitan o restringen su presencia están relacionados con la calidad de las aguas, su pH, la temperatura, la composición de los materiales del cauce (lodo, roca, grava), la profundidad de los cuerpos hídricos y, por supuesto, la presencia y la actitud del hombre.

Muchas de las especies de insectos, arácnidos, anfibios y peces que hacen parte de la fauna que está asociada a las riberas, desarrollan todo o parte de su ciclo biológico dentro del agua (metamorfosis y desarrollo larvario) o dependen de ella para su alimentación, puesta de huevos, etc. Otras especies superiores como las aves y los mamíferos usan las riberas como refugio y fuente de alimentación por las condiciones especiales que presenta la vegetación que hace parte de los cordones riparios.

Otra fase importante de los cauces es la zona hiporeica, que es la porción de acuíferos inconfiados bajo la corriente. Los biólogos definen esta zona como el subsuelo habitado por macro invertebrados; los hidrólogos definen la zona como un subsuelo fluyente que contiene los trayectos de flujo que se originan y terminan en la corriente, y como la zona de mezcla entre el agua superficial y el agua subterránea de fuentes profundas. Los intercambios entre agua subterránea y el agua de la corriente asociada con esta zona pueden afectar sustancialmente la química del agua de la corriente, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes.

Figura 10. Dinámica del agua en la zona hiporreica



Fuente: Adaptado de [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx).

En cuencas urbanas es muy poco frecuente la presencia de peces; en aguas no contaminadas si puede observar la presencia de anfibios e insectos y de algunos mamíferos inferiores y aves.

#### 8.4 Los Cauces Urbanos y la Comunidad

Los seres humanos, inevitablemente, modifican cualquier paisaje que ocupan. Hooke (2000) afirma que los seres humanos son ahora el principal agente causante de las variaciones geomorfológicas de los cauces, pues el hombre esculpe el paisaje en todo el mundo. Las actividades humanas generan impactos y, aunque estos sean de corta

duración, pueden generar cambios a largo plazo en la morfología fluvial.

En el inicio del siglo XXI, aproximadamente el 10% de la población mundial vive en las regiones montañosas (Grötzbach y Stadel, 1997). En Europa central, hoy en día, se presenta una disminución de la densidad de la población y la recuperación gradual de la vegetación de las tierras altas nativas. En otras regiones montañosas de latitudes bajas se ha incrementado la extracción de vegetación nativa asociada con la tala de madera y la minería. De otra parte, con el aumento de la población mundial, la demanda de alimentos sigue aumentando y las regiones montañosas no son ajenas a la ocupación de tierras para cultivos.

Los impactos humanos sobre los ríos pueden ser directos si éstos implican cambios en el agua y sedimentos, como por ejemplo un vertimiento a las aguas, o indirecto si es causado por un cambio en la morfología de las zonas de ronda, por ejemplo, una actividad como la tala de bosques que aumenta el caudal de escorrentía superficial y la producción de sedimentos en el cauce.

El efecto de la urbanización genera pérdida en la cobertura vegetal y se refleja en el aumento de la lámina de agua y la producción de sedimentos, la erosión, la pérdida de hábitat y un mayor potencial de fluir sobre la cota de inundación, (Ryan y Grant, 1991; Madsen, 1995). La eliminación de la vegetación reduce la evapotranspiración y la interceptación (Cline et al., 1977).

La transición de la vegetación, natural o agrícola, por edificios y carreteras modifica

dramáticamente los efectos de agua y sedimentos de una cuenca de drenaje. Durante la fase inicial de construcción la vegetación es eliminada en gran medida y la superficie es modificada. Esto se traduce en el aumento de caudales y producción de sedimentos. Tras la finalización de la construcción, cuando las superficies de tierra son estabilizadas y reemplazadas por calles y edificios, la producción de sedimentos desciende a un valor insignificante que comúnmente es inferior a los valores de la pre-urbanización.

Las instalaciones de colectores pluviales drenan rápidamente las superficies de las vías, aportan a la disminución de la infiltración y reducen el tiempo de recorrido en la cuenca, lo cual se traduce en picos de flujo de mayor magnitud y corta duración, (Konrad et al., 2005), que pueden provocar mayor inestabilidad del cauce.

Otro aspecto importante de la urbanización es la introducción de contaminantes en los canales de flujo a través de la escorrentía y sedimentos. Estos incluyen contaminantes orgánicos biodegradables que reducen el oxígeno disuelto en los cauces. Los contaminantes pueden también tomar la forma de nutrientes que causan eutrofización o sólidos que contribuyen a la turbidez y toxicidad. Los contaminantes pueden ser también de hidrocarburos y metales tóxicos para una variedad de organismos (Ellis, 1987).

Otras actividades humanas que originan degradación del cauce son el pastoreo, la minería y la siembra de cultivos. El pastoreo, que compacta el suelo, reduce la infiltración y aumenta la escorrentía. A escala mundial, el sobrepastoreo conduce a la degradación de la tierra aumentando la erosión y sedimentación hasta 100 veces cuando la cubierta vegetal se reduce (Hofmann y Ries, 1991); la minería de montaña generalmente resulta en mayor

producción de sedimentos y la introducción de contaminantes en los ríos de montaña. Finalmente, la siembra de los cultivos altera la capacidad de infiltración del suelo y, por lo tanto, el agua y los sedimentos de manera análoga a los cambios que acompañan a la tala de bosques y el pastoreo.

En este aparte es necesario mencionar el cambio climático, cuyo impacto es generado por las actividades humanas. Tanto el muestreo sistemático de los gases atmosféricos durante los últimos 40 años, como las burbujas de aire atrapadas en el hielo polar, indican que las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y de otros compuestos (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) han aumentado desde el comienzo de la Revolución Industrial.

Los cambios climáticos afectan a todos los aspectos de la hidrología y la geomorfología de las montañas (Goudie, 2006). Como la vegetación y los procesos de formación suelos responden a cambios en la temperatura y las precipitaciones, esto provoca cambios en la capacidad de infiltración del suelo y rendimientos hídricos (Onodera et al., 2007; Wang et al., 2007; Christensen et al., 2008).

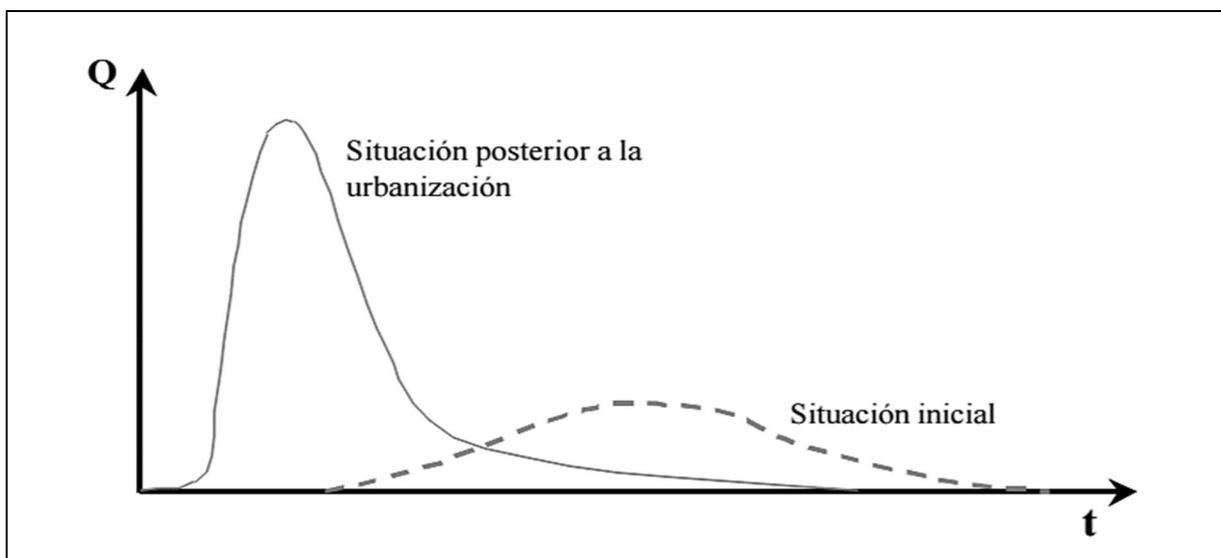
## **8.5 Procesos Hidrológicos E Hidráulicos de los Cauces de Urbanos**

El comportamiento de las precipitaciones en regiones de montaña depende de diferentes factores como la altura orográfica, la orientación, la distancia al mar u océano, etc. El efecto orográfico es más o menos intenso según las características de la corriente de aire incidente. Cuanto más húmeda sea esta, menor elevación orográfica necesitará para condensar y precipitar. Llasat y Puigcerver, (1992), mediante regresiones lineales con las estaciones meteorológicas, dedujeron que la altitud explica un 64% de la variabilidad de la

precipitación. La distancia al mar y la orientación de las cadenas montañosas también se consideraron importantes y, otros factores, como la pendiente.

El impacto de un proceso urbanizador modifica el hidrograma de respuesta de la cuenca, presentándose variaciones importantes como se muestra a continuación:

**Figura 11. Modificación de la respuesta Hidrológica**



Fuente: Adaptado de Hidrología Urbana, Flumen 2007

- 1) El volumen total de escorrentía aumenta.
- 2) El proceso de concentración de caudal ocurre con mayor rapidez.
- 3) El caudal punta es mayor.
- 4) El tiempo de concentración se acorta.
- 5) La calidad del agua de escorrentía se deteriora.

El aumento de volumen se origina al reducirse la infiltración como producto de la elevada

impermeabilidad del medio; la reducción en el tiempo base del hidrograma se explica a través de las mayores velocidades del agua por una red de drenaje artificial mucho menos rugosa; finalmente el caudal punta es consecuencia de los dos casos anteriores. En relación al deterioro de la calidad del agua, la escorrentía en superficie arrastra todo tipo de elementos existentes en la ciudad (polvo, restos orgánicos, grasas, etc.).

De otra parte, el comportamiento hidráulico de canales de montaña es menos entendido que el de los canales aluviales. Las ecuaciones hidráulicas se han desarrollado para canales de pendientes pequeñas y estas no describen adecuadamente los ríos de montaña en los cuales se presentan pendientes pronunciadas, la rugosidad se encuentra en forma grano grande y los perfiles de velocidad son de tipo No-logarítmico, con régimen crítico y supercrítico.

**Figura 12. Ríos de Montaña – Rugosidad del canal**



<http://www.cajaviviendapopular.gov.co/?q=Noticias/jornada-de-concientizaci%C3%B3n-familias-en-riesgo>

En ríos de montaña se utiliza comúnmente la ecuación de Bernoulli con el propósito de expresar los intercambios de energía del flujo (Julien, 1995).

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_L$$

**Ecuación 8-1**

Donde,

$\alpha$  es coeficiente de Coriolis que corrige la cabeza de velocidad que varía de 1,03 a 1,36 para los canales prismáticos. Este coeficiente es generalmente más alto para los pequeños canales donde puede ser superior a 2. El mayor valor conocido para mediciones de laboratorio es de 7,4 (Chow, 1959).

$V$ , es la velocidad media (m/s),

$g$  es la gravedad ( $m^2/s$ ),

$p$  es la presión del sistema ( $N/m^2$ ),

$\gamma$  es el peso específico del fluido ( $N/m^3$ ),

$z$  es la elevación con respecto al dato de referencia (m),

$h_L$  es la pérdida de energía (m),

Los subíndices denotan valores aguas arriba (1) y aguas abajo (2). El primer término ( $\alpha v^2/2g$ ) representa la energía cinética, el segundo ( $p/\gamma$ ) la presión, el tercero ( $z$ ) representa la energía potencial; y el cuarto,  $h_L$ , la pérdida de carga sobre una determinada longitud de canal (la pendiente de energía), la cual se puede

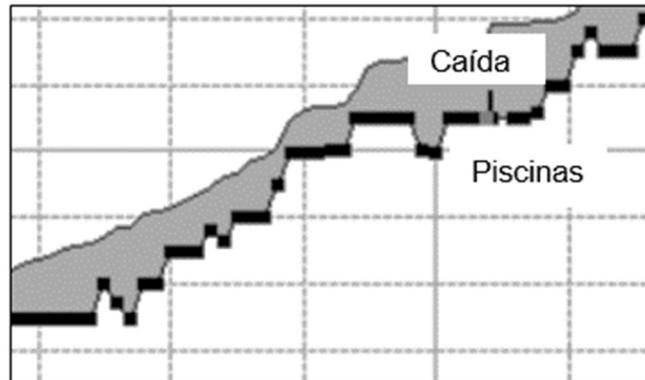
expresar como la pérdida de la energía mecánica y cinética causada por la resistencia a lo largo del canal por la fricción y la resistencia ofrecida por la forma del canal.

La resistencia de la forma del canal es atribuida al tamaño del grano, la forma de la banca, las obstrucciones en el cauce y a los sedimentos en el flujo (Roberson y Crowe, 1993). El coeficiente de rugosidad de Manning tiene en cuenta los componentes que ofrecen la resistencia al flujo, pero en ríos de montaña resulta difícil su estimación. Se usan las ecuaciones de Manning, Chezy o Darcy-Weisbach para la determinación de los coeficientes de resistencia al flujo ( $n$ ,  $C$ , o  $f$ ).

En resumen, no existe en la actualidad una ecuación bien probada, consistentemente precisa para calcular los coeficientes de resistencia de los ríos de montaña.

Los intentos más recientes para desarrollar ecuaciones empíricas para predecir la resistencia en canales suelen emplear  $f$  en lugar de  $n$  porque  $f$  es adimensional y es físicamente interpretable como coeficiente de arrastre si la resistencia se equipara con el peso del fluido por unidad de área de lecho y asumió proporcional al cuadrado de la velocidad (Ferguson, 2007). Canales con cascadas y piscinas, muestran una fuerte correlación entre la  $f$  y *el coeficiente de* descarga adimensional ( $q^*$ ) (Comiti et al., 2007), donde,

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gD_{84}^3}}$$



Ecuación 8-2

David et al. (2010) encontró que  $f$  se correlaciona fuertemente con la gradación del lecho del cauce, en canales del tipo cascada-piscina, y  $q^*$ . Encontrando la siguiente relación.

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{0.5} = \frac{a_1 a_2 \left(\frac{d}{D}\right)}{\left[a_1^2 + a_2^2 \left(\frac{d}{D}\right)^{1.67}\right]^{0.5}}$$

Ecuación 8-3

Donde  $a_1$  es una constante, típicamente 6,7, si  $D_{50}$  se usa como escala de rugosidad, u 8,2 si se utiliza  $D_{84}$  o  $D_{90}$ ;  $a_2$  es una constante, típicamente entre 1 y 4;  $d$  es la profundidad media del flujo; Y  $D$  es un diámetro característico utilizado. La ecuación representa una curva lisa, asintótica a una 1/6-potencia cuando  $d / D \gg 1$ , pero a una relación lineal en  $d / D < 1$ . Esto proporciona una relación de resistencia aplicable a corrientes superficiales y profundas sobre lechos gruesos.

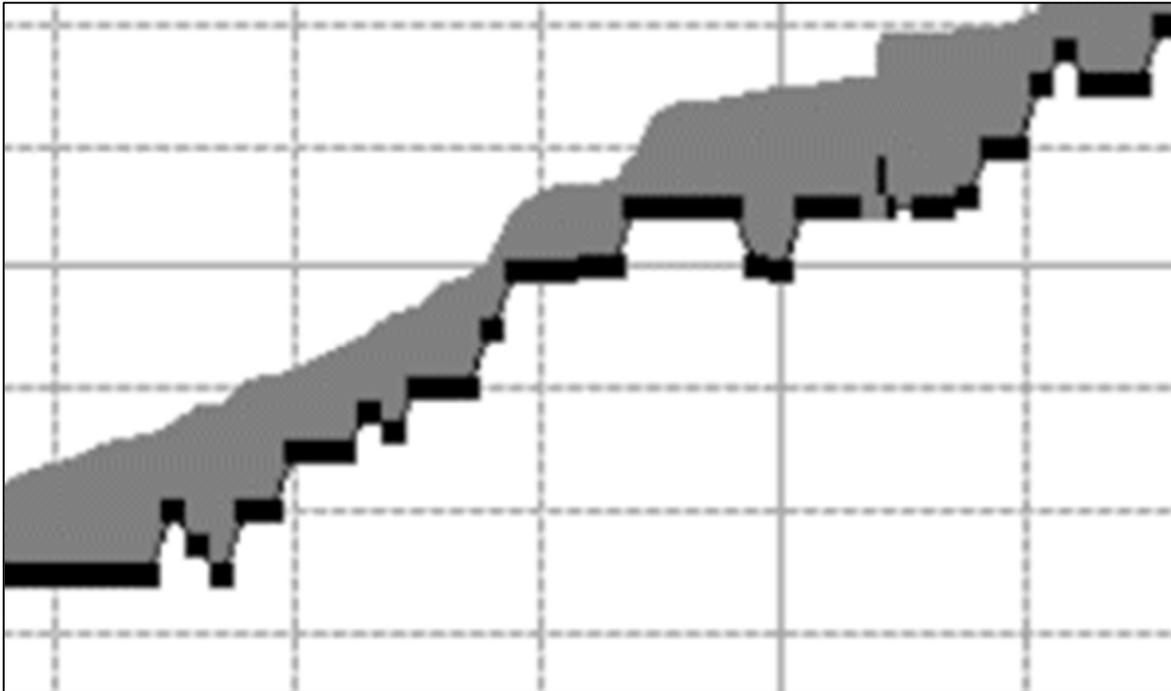
Los valores de  $f$  o  $n$  tienden a ser muy altos en ríos de montaña comparados con canales de pendiente inferior, y varían considerablemente en relación a la etapa y a la morfología del canal (Lee y Ferguson, 2002). Los valores declarados de  $f$  para el pequeño cauce puede estar en el rango de 5 a 380 (Curran y Wohl, 2003; MacFarlane y Wohl, 2003). Reid y Hickin (2008).

Dadas las dificultades para obtener los coeficientes de resistencia en cauces de montaña, se propone que, una vez establecida la ecuación de pérdidas a utilizar, se efectúen medidas en el canal de las otras variables (por ejemplo, la velocidad, el área, la profundidad de flujo) que permitan estimar el coeficiente aproximado de flujo del cauce que se está estudiando.

## **8.6 Procesos Geomorfológicos En Los Cauces Urbanos**

La mayoría de los canales aluviales están sujetos a restricciones morfológicas como resultado de las diferentes resistencias del sustrato o controles geológicos (Ouchi, 1985; Schumm, 1986); sin embargo, estos tienden a tener un perfil longitudinal suave. Entretanto, los ríos de montaña, los perfiles longitudinales pueden ser segmentados, rectos, convexos o cóncavos, con variaciones grandes de la pendiente longitudinal y transversal del canal.

**Figura 13. Pendiente longitudinal del canal- Cauce de Montaña**



Fuente: El autor

Algunas de las características morfológicas que presentan los cauces de montaña son las siguientes:

- 1) La potencia de la corriente en la caída es baja en relación con la resistencia del sustrato, y la capacidad de incisar el fondo del canal es baja (Merritts y Vincent, 1989; García, 2006).
- 2) En un sistema dominado por rocas, las variaciones estructurales aguas abajo de la corriente pueden influir fuertemente en la resistencia del sustrato y aumentar el suministro de sedimentos.
- 3) Factores como el uso de la tierra, incendios forestales, inundaciones y movimientos de masas pueden también afectar el suministro de sedimentos y la morfología del canal.
- 4) La variación longitudinal de la pendiente refleja la resistencia del sustrato, por esta razón

se aprecian variaciones en el ancho, patrón del canal, y en el tamaño del lecho del canal. En los cauces de montaña, valles más amplios son propensos a tener una menor pendiente en el canal, formado en estos sectores aluviones de materiales gruesos, mientras que las zonas con valles estrechos son propensas a mostrar rocas empinadas.

- 5) En contraste con esta variabilidad espacial, los canales de montaña en algunas regiones del mundo mantienen una morfología de canal relativamente estable a través del tiempo. Sólo en eventos extremos y relativamente poco frecuentes se pueden alterar sustancialmente los límites del canal. Después de estos eventos extremos, el canal vuelve a estar estable durante décadas a siglos.
- 6) La variabilidad temporal de la morfología del canal de montaña es una función de la perturbación, frecuencia y la magnitud de éste. La naturaleza del ajuste de canal a una perturbación brusca o un cambio prolongado en agua y sedimentos dependerán de la magnitud y duración de los cambios exteriores y de la resistencia del canal. Ajustes muy rápidos pueden ocurrir en la relación ancho/profundidad o en la configuración del lecho; sin embargo, cambios en la pendiente del canal se pueden presentar tras un prolongado lapso de tiempo. (Knighton, 1984, 1998).

## **9 LINEAMIENTOS A TENER EN CUENTA EN UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE CAUCES URBANOS**

### **9.1 Aspectos Hidrológicos E Hidráulicos**

El análisis hidrológico es un primer paso en el proceso de recuperación de cauces y pretende describir el carácter de la hidrología de una corriente dada y su cuenca.

El objetivo del análisis hidrológico es estimar los caudales de flujo<sup>3</sup>, lo cuales pueden determinarse mediante modelos hidrológicos que utilizan datos de precipitación para calcular los diferentes eventos de tormentas para diferentes periodos de retorno.

El conocimiento de la precipitación, su distribución espacial y temporal, es fundamental para una correcta caracterización de la respuesta hidrológica de la cuenca y la evaluación de sus riesgos, así como para la cuantificación de los recursos hídricos, especialmente en zonas de cabecera con importante variabilidad climática.

Dependiendo del tamaño de la cuenca pueden usarse diferentes modelos lluvia –

---

<sup>3</sup> Cuando se dispone de datos de aforo de la cuenca, se utilizarán estos para determinar las distribuciones de probabilidad de ocurrencia y estimar los caudales asociados a un periodo de retorno. Los modelos lluvia – escorrentía son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje.

escorrentía y puede aplicarse el método racional<sup>4</sup> para cuencas menores u otros modelos como el Hec-Hms<sup>5</sup> o el SWMM<sup>6</sup> para cuencas mayores y cuencas urbanas.

Muchas cuencas urbanas presentan en la zona aguas arriba de la población una cuenca de cabecera, con una cubierta natural, y esa cuenca drena en la ciudad integrándose a la red de alcantarillado. En estos casos, que constituyen cauces en cuencas urbanas, se debe elegir adecuadamente el periodo de retorno para evitar subvaloraciones o sobrevaloraciones en los caudales que se consideran para evaluar el cauce.

La cuenca de cabecera asociada al cauce suele ser de mayores dimensiones que la zona urbana que drena a través del colector por lo que el suceso de lluvia que se produce en la ciudad puede que no revista la misma importancia a nivel de cuenca. En principio, los sucesos que producen caudales importantes en la cuenca fluvial y la cuenca urbana se pueden considerar sucesos independientes, si la diferencia de tamaño entre cuencas es

---

<sup>4</sup> Este método es un modelo empírico simple, utilizado en el diseño de sistemas de drenaje urbano con áreas relativamente pequeñas, en las cuales se pueda considerar que la intensidad de lluvia no varía espacialmente. Se recomienda el uso en cuencas urbanas con áreas de drenaje menores a 80 ha. (Ras-2000). No aplica en el análisis de cuencas de cabecera.

<sup>5</sup> Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling Systems, Hec-Hms, es un programa de simulación hidrológica para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias Subcuencas a partir de condiciones extremas de lluvia.

<sup>6</sup> Storm Water Management Model, SWMM se desarrolló por primera vez en 1971 por la agencia ambiental de los estados unidos EPA, habiendo experimentando desde entonces diversas mejoras. La edición actual, que corresponde a la 5ª versión del programa, es un código reescrito completamente a partir de ediciones anteriores. Funcionando bajo Windows, EPA SWMM 5 proporciona un entorno integrado que permite introducir datos de entrada para el área de drenaje, simular el comportamiento hidrológico e hidráulico de cuencas urbanas.

grande. Por otro lado, si la cuenca urbana es muy pequeña y el suceso de lluvia actúa de manera uniforme en todo el territorio, es improbable que el pico de lluvia de ambas partes de la cuenca se presente en el mismo instante. En estos casos, el US Army Corps of Engineers preparó algunas tablas que se sugieren para su aplicación en la evaluación de cuencas urbanizadas.

**Tabla 1. Periodos de retorno a considerar en la evaluación de cuencas urbanas que reciben aportes de colectores de aguas lluvias**

Relación de áreas	Periodo de retorno 2 años		Periodo de retorno 5 años	
	Cauce Principal	Colector	Cauce Principal	Colector
10000/1	1	2	1	5
	2	1	5	1
1000/1	1	2	2	5
	2	1	5	2
100/1	2	2	2	5
	2	2	5	5
10/1	2	2	5	5
	2	2	5	5
1/1	2	2	5	5
	2	2	5	5

Relación de áreas	Periodo de retorno 10 años		Periodo de retorno 25 años	
	Cauce Principal	Colector	Cauce Principal	Colector
10000/1	1	10	2	25
	10	1	25	2
1000/1	2	10	5	25
	10	2	25	5
100/1	5	10	10	25
	10	5	25	10

Relación de áreas	Periodo de retorno 10 años		Periodo de retorno 25 años	
	Cauce Principal	Colector	Cauce Principal	Colector
10/1	10	10	10	25
	10	10	25	10
1/1	10	10	25	25
	10	10	25	25

Relación de áreas	Periodo de retorno 50 años		Periodo de retorno 100 años	
	Cauce Principal	Colector	Cauce Principal	Colector
10000/1	2	50	2	100
	50	2	100	2
1000/1	5	50	10	100
	50	5	100	50
100/1	10	50	25	100
	50	10	100	25
10/1	25	50	50	100
	50	25	100	50
1/1	50	50	100	100
	50	50	100	100

Fuente: Gómez, Manuel, Flumen, Hidrología urbana, 2007

Una vez establecidas las lluvias de diseño en el análisis de las precipitaciones es necesario definir la tormenta de diseño, que en este caso se define como un evento de periodo de retorno  $T$ , con una duración  $D$  y una precipitación total  $P$ .

A partir de las curvas IDF se pueden definir tormentas de diseño para distintos periodos de retorno y duraciones. Debido a que para un mismo periodo de retorno la intensidad media disminuye con la duración de la tormenta, el evento de diseño debe seleccionarse para una

duración lo menor posible compatible con el tamaño de la cuenca. Esto conduce a proponer que la duración de la tormenta de diseño sea igual al tiempo de concentración de la cuenca aportante. De otra parte, teniendo en cuenta que la estimación del tiempo de concentración en una cuenca es imprecisa y como no hay uniformidad en las metodologías de cálculo, el uso del método del bloque alterno (Maidment, 1988) permite distribuir las intensidades al interior de la duración de la tormenta, de manera que para cualquier duración que se escoja la intensidad resultante tiene el mismo periodo de retorno según la curva IDF.

## 9.2 Aspectos Hidráulicos

Finalmente, el resultado de la modelación hidrológica será la determinación de una serie de caudales que servirán a diferentes propósitos dependiendo del tipo de análisis que se requiera de acuerdo con la necesidad del estudio.

Para la evaluación de los caudales del cauce puede usarse el programa Hec-Ras<sup>7</sup>. Su uso conlleva una responsabilidad importante en cuanto a la necesidad de conocer las limitaciones en su aplicación. Por tal razón, es importante tener en cuenta las características de la aplicación, las cuales se anotan a continuación:

- El Hec- Ras es un modelo unidimensional en energías, permite el cálculo en dominios con escalas muy grandes de modo que la simulación de kms. de río se realiza con una

---

<sup>7</sup> El programa Hec-Ras es un modelo hidráulico unidimensional creado por la USACE (United States Army Corps of Engineers), de libre distribución. El Hec-Ras resuelve la ecuación de la energía para la resolución de problemas hidráulicos.

velocidad de cálculo enorme (orden de segundos).

- El uso de la ecuación de la energía para el balance entre secciones, dada la incertidumbre existente en la estimación de las pérdidas de carga (resistencia al flujo), es un método bastante aproximado en problemas de gran escala (fluviales).
- La simplificación del flujo turbulento tridimensional a un flujo unidimensional es relativamente aceptable para grandes escalas (ríos y barrancos) con precisiones poco exigentes.
- Hec-Ras no es un modelo turbulento. La ecuación de la energía supone siempre distribuciones hidrostáticas de presiones y la ecuación de fricción permanente de Manning. Por tanto, la solución es una pura simplificación y no se ajusta a la realidad en casos donde las presiones y las tensiones turbulentas se alejan del modelo lineal.
- Hec-Ras no es un modelo 3D (x,y,z) ni 2D (x,y) sino que es un modelo 1D (x), de modo que la solución siempre es una aproximación o promedio de la real. Un ejemplo: un fenómeno tan importante como la extensión del flujo por las llanuras de inundación para grandes avenidas, el Hec-Ras no lo puede evaluar en principio. La posibilidad de dividir la sección en subsecciones lo convierte en un modelo quasi 2D muy débil pues no tiene en cuenta la transferencia lateral de momentum del flujo. La distribución lateral de velocidades no es correcta. En consecuencia, la solución de flujo en curvas es aproximada.
- En el Hec Ras sólo se pueden modelar ríos y barrancos con pendientes menores de  $10^\circ$  ( $\alpha < 10^\circ$ ,  $S_o < 0.18$ ), ya que no se tiene en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua ( $\cos \alpha$ ) en las ecuaciones.
- El Hec Ras no simula los saltos, ni los obstáculos correctamente (Hec-Ras no realiza balance de fuerzas). Existen métodos para simular o reproducir dichos efectos, pero son

altamente arbitrarios y dependen mucho del tipo de flujo.

- El resultado del Hec-Ras viene altamente condicionado por las consideraciones geométricas adoptadas (Trazado de secciones, Áreas Inefectivas, Leeves, Pérdidas de estrechamiento y expansión, etc.).
- El Hec-Ras presenta problemas en la elección de la profundidad crítica. Dificultad para hallar la profundidad crítica en secciones naturales complejas que contienen varios calados críticos (terrazas fluviales). Todo análisis de flujo se basa en la determinación de la morfología del canal para una descarga determinada. Se conoce como descarga ( $Q_d$ ) dominante a aquella que es responsable de dar forma y mantener la morfología del canal, y a la descarga efectiva ( $Q_e$ ) a la transporta el mayor volumen de los sedimentos a largo plazo. (Esta descarga se calcula integrando un flujo Curva de duración y una curva de clasificación de sedimentos).

Para el uso de este software u otro de similares características o que evalúe condiciones de flujo en 2D en cuencas urbanas, el ingeniero deberá tener en consideración las particularidades del flujo, como lo son la preponderancia de la rugosidad del flujo y las altas pendientes de estos cauces. Por lo tanto, existe la necesidad de tratar de calibrar el modelo para su uso en las estimaciones del comportamiento del cauce.

Desde el punto de vista hidráulico es necesario la evaluación de diferentes caudales que le permitirán al ingeniero elaborar modelos del cauce y estimar su comportamiento. De esta forma se definen caudales de interés desde el punto de vista morfológico y desde el punto de vista probabilístico.

-

### 9.2.1 Caudales de interés Morfológico

Los caudales de interés morfológico se presentan y describen a continuación

**Tabla 2. Caudales de interés morfológico**

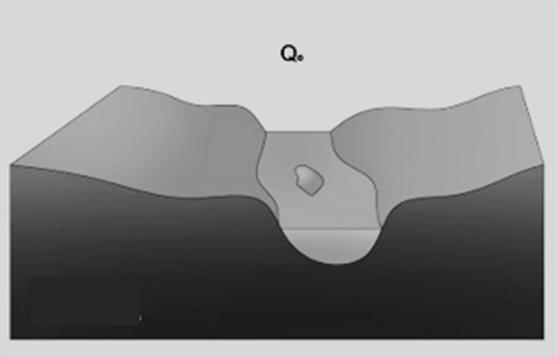
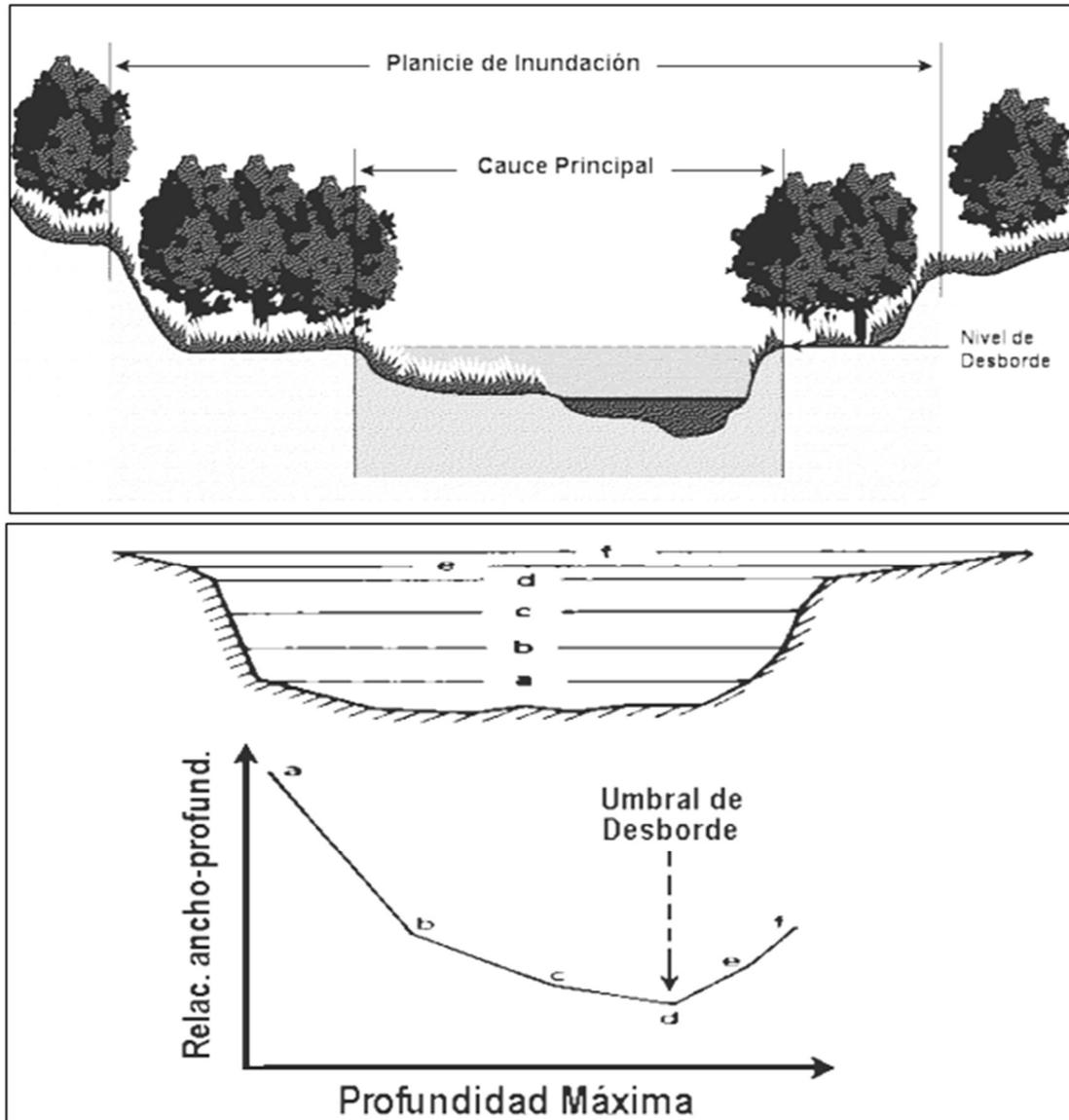
<p><b>Caudal base (Qe):</b> Se define como el caudal mínimo necesario para el mantenimiento de las características esenciales y la estructura de la comunidad natural (flora y fauna ribereña), basándose en criterios estrictamente hidrológicos, personalizados y propios de cada ambiente fluvial considerado, El caudal base, también llamado caudal de estiaje o caudal de aguas bajas, es el <b>caudal que debe permitir el mantenimiento de la vida</b> y es el que se utiliza para definir, para cada río, el caudal mínimo o caudal ecológico o medioambiental.</p>	 <p>El diagrama ilustra un perfil transversal de un río. Se muestra el cauce central y las riberas elevadas. Una línea horizontal indica el nivel del agua, etiquetado como 'Qe', que representa el caudal base. Este nivel de agua cubre el fondo del cauce y las zonas bajas de las riberas, dejando las partes más altas de las riberas secas. El fondo del cauce está representado por una línea irregular que muestra variaciones de profundidad.</p>
<p><b>Caudal de mantenimiento (Qm):</b> Se define como el caudal que pretende garantizar la conservación de un nivel admisible de organización y estructura biológica de las comunidades naturales acuáticas, tanto a nivel espacial como temporal.</p>	



Figura 14. Caudal generador



Fuente: [http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC\\_Farias\\_Caudal\\_Dominante.pdf](http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC_Farias_Caudal_Dominante.pdf)

### 9.2.2 Caudales de interés probabilístico

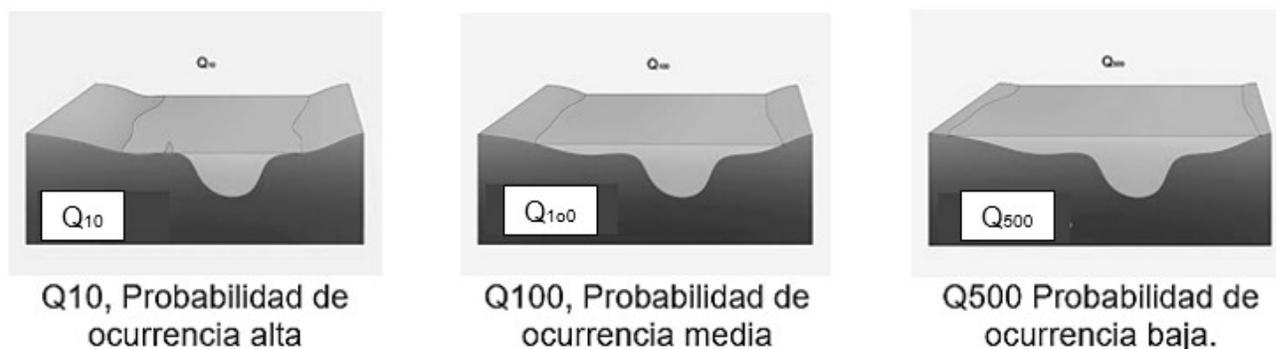
En el caso de cuencas urbanas, desde el punto de vista de la vulnerabilidad y riesgo, es

necesario evaluar las cotas de inundación de los cauces urbanos para diferentes periodos de retorno, para lo cual se recomienda la estimación de los niveles de agua en el cauce con los caudales calculados para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Los caudales probabilísticos por su temporalidad y cantidad, desbordan el río. Cuando el caudal supera el caudal generador ( $Q > Q_b$ ), el río ocupa lo que se conoce como llanura de inundación. Estas zonas dependen del tipo de río y del nivel de urbanización que le haya llevado a cabo en sus riberas.

Esto caudales sirven para definir escenarios probabilísticos donde se definen las manchas de agua, es decir, la zona que se inunda asociada a ese caudal.

**Figura 15. Secciones de flujo para diferentes periodos de retorno**



Fuente: Adaptado de <http://aquaproomnibus.blogspot.com.co/2014/06/tipos-de-caudales-avenidas.html>

Desde el punto de vista hidráulico, en el análisis de la corriente, el enfoque principal es determinar las fuerzas que afectan la estabilidad del lecho y las bancas. Se usa para evaluar las condiciones existentes de la corriente y evaluar los cambios en las fuerzas hidráulicas inherentes a unas condiciones o diseños propuestos.

El objetivo del análisis hidráulico suele utilizarse para comprender cuantitativamente los procesos que pueden degradar un canal, para proponer medidas tendientes a que la sección longitudinal y transversal serán hidráulicamente estables.

Debe tenerse en cuenta que, en los ríos de montaña, la importancia relativa al tamaño del grano, la forma del canal y la resistencia al flujo, varían entre distintas secciones del canal de acuerdo con la variación de la pendiente y la morfología del canal. Muchas investigaciones, se centran en relacionar la resistencia total con una altura de rugosidad característica,  $k_s$ , que se equipara a un diámetro representativo del grano. Trabajos recientes sugieren que, para las formas de lecho fuertemente verticales,  $k_s$  puede describirse mejor en términos de forma del lecho en lugar del tamaño del grano. (Wohl, 2010).

Adicionalmente a las consideraciones efectuadas, en los estudios hidrológicos e hidráulicos debe contemplar los siguientes aspectos:

- Los estudios hidrológicos deberán determinar las características morfométricas de la cuenca y el cauce, así como la clasificación del tipo de flujo de la corriente: (permanente, intermitente o efímero), la determinación del orden de la corriente, la descripción del uso de la cuenca, la identificación de las zonas de inundación, las dimensiones y pendientes del canal en tramos críticos, la Identificación de terrazas y llanuras de inundación.
- Con base en el reconocimiento de campo o en información secundaria, se hará un inventario georreferenciado de vertimientos directos al cauce y de conexiones erradas en la microcuenca de la quebrada.
- Identificación de zonas de pondaje, zonas de rápidos y zonas de posible sedimentación.
- Identificación de zonas estables e inestables en el tramo del estudio; y se pueden establecer las zonas de erosión y de sedimentación y las zonas inundables.

### 9.3 Aspectos Geomorfológicos

Desde el punto de vista geomorfológico, el objetivo es limitar aquellos aspectos que pueden generar cambios morfológicos en el cauce; es así que deben estudiarse durante los recorridos de campo los siguientes aspectos, para diagnosticarlos y proponer medidas que los mitiguen o los eliminen.

**Tabla 3. Aspectos que pueden afectar la morfología de los cauces**

<b>ASPECTO A EVALUAR Y A CONSIDERAR</b>	<b>EFECTOS QUE PUEDEN OCASIONAR EN LA MORFOLOGÍA DEL CAUCE</b>
<b>Deforestación</b>	Generada por efectos de la urbanización. Incrementa los procesos erosivos y producción de sedimentos en el cauce.
<b>Pastoreo de animales</b>	Genera problemas de compactación del suelo, erosión laminar, erosión de laderas y aceleramiento en el ciclo de nutrientes.
<b>Erosión superficial</b>	Originada por la desprotección del suelo, induce una mayor tasa de remoción. Este proceso afecta la capa más superficial del suelo en donde se encuentra la materia orgánica, la cual es arrastrada por aguas de escorrentía y vientos, lo que acelera el proceso erosivo.
<b>Agricultura</b>	Produce cambios en la estructura del suelo ocasionados por el uso del arado, la introducción del monocultivo, uso indiscriminado de agroquímicos que alteran las poblaciones biológicas del suelo y del agua, al igual que alteran el ciclo de los nutrientes y generan la acumulación de moléculas contaminantes.
<b>Incendios</b>	Además de destruir el banco de semillas, plántulas y la microbiota, pueden llegar a originar la degradación química del suelo.
<b>Contaminación</b>	Originada por el deficiente o inexistente tratamiento de las aguas servidas, la gestión inadecuada de residuos de las

<b>ASPECTO A EVALUAR Y A CONSIDERAR</b>	<b>EFFECTOS QUE PUEDEN OCASIONAR EN LA MORFOLOGÍA DEL CAUCE</b>
	labores agropecuarias, la baba, las heces y el orín de los animales. Los cuerpos hídricos se vuelven canales de desagüe, en donde además de recibir gran parte de las aguas residuales, reciben basuras y escombros.
<b>Movimientos en masa</b>	Deslizamientos, corrientes de lodo y reptación.
<b>Minería</b>	Las actividades mineras producen impactos negativos en las microcuencas, tales como la alteración de los drenajes superficiales, la contaminación de las aguas por sedimentos, la alteración de los caudales subterráneos, la eliminación o reducción de la capa vegetal, la alteración y eliminación de hábitats, el desplazamiento de especies animales, la inestabilidad en las márgenes, el aumento de la erosión, modificaciones en el microclima y la variación en las formas de los cauces.
<b>Procesos no planificados de urbanización</b>	Se construye sobre las áreas de ronda, se realizan canalizaciones de forma no técnica, tomas de agua que alteran los cursos de las microcuencas, se obstruye el flujo de los cauces, se invaden las áreas de ronda y ocurre un remplazamiento de las coberturas naturales.

De esta forma, en el análisis geomorfológico del cauce, se deberán realizar las siguientes actividades:

- Recopilar la información aerofotogrametría existente con el propósito de realizar un análisis de Multitemporal de la morfología del cauce.
- Mediante de la realización de visitas a campo, hacer el reconocimiento de las unidades litológicas y geomorfológicas y efectuar una descripción detallada y sistemática de afloramientos, medición y análisis de estructuras geológicas, levantamiento del perfil de

meteorización y los depósitos de vertiente o aluviales involucrados.

- Establecer si los cambios geomorfológicos dentro del cauce están asociados a procesos de degradación lateral, degradación vertical, variaciones de las márgenes y fondo del cauce.
- Identificación de procesos morfo dinámicos activos, inactivos y potenciales tales como deslizamientos, caídas de roca, inundaciones, avenidas torrenciales y, en general, toda clase de procesos de origen geológico o geomorfológico que puedan afectar la zona de interés y las obras de estabilización.
- Con base en la información documental o estudios existentes y en la información observada de campo, caracterizar las diferentes obras de arte y estructuras que se encuentren en el área de estudio del cauce, tales como puentes, pontones, contenciones y demás que ameriten un análisis de estabilidad.
- Determinar las características del suelo del canal (erosionable, cohesivo, no cohesivo).
- Describir los perfiles de las riberas, material de las bancas e inestabilidad.
- Fijar los controles geológicos y estructuras de control (alcantarillas, pasos bajo agua, etc.).

Con los resultados de los estudios geomorfológicos se podrán hacer pronósticos sobre la evolución futura del flujo del cauce.

#### **9.4 Aspectos Bióticos**

En la evaluación desde el punto de vista biológico la investigación se centrará en el análisis de la flora y fauna que tiene en cuenta los siguientes objetivos:

- La recuperación de hábitats para los animales.

- El restablecimiento de corredores de flora y fauna.
- La recuperación de las interacciones loticas.
- El aumento en la conectividad y demás funciones ecológicas.
- El mejoramiento estético y visual del entorno.

Debe tenerse en cuenta que la morfología del cauce es el factor principal de la calidad del hábitat, puesto que las aguas morfológicamente apropiadas pueden hacer uso de la buena calidad del agua para alcanzar el mejor estado ecológico posible (Petts 2000). La conectividad de aguas desempeña un papel importante en la ecología de la corriente; estrechamente vinculada al tipo morfológico de los cursos de agua, describe la relación de las aguas con sus alrededores, los cuales incluyen los hábitats ribereños, y las partes del río aguas arriba y aguas abajo. Esto corresponde al hecho de que la ecología de los cuerpos del agua es influenciada en gran parte por la disponibilidad y la accesibilidad de hábitats más o menos distantes y por la interrelación permanente y periódica de las aguas y su biota con sus alrededores y viceversa (Allan 1995).

Así mismo, debe contemplarse en el desarrollo del proyecto de restauración la mejora de los hábitats fluviales con el objeto de optimizar la diversidad biológica del sistema fluvial y mejorar la relación de los procesos biológicos con el resto de componentes del medio.

En el análisis desde el punto de vista ambiental es necesario realizar las siguientes actividades:

- Identificar los eventos que hayan generado impactos negativos en los corredores ecológicos de ronda, relacionados con eventos de inundación o de remoción en masa.
- Análisis de vegetación. Realizar la revisión detallada de la bibliografía técnica y

científica existente sobre la vegetación (páramos, selva andina, matorral y pastizal xerófilo, vegetación riparia, vegetación acuática, especies invasoras, plantaciones, jardinería).

- Elaborar el diagnóstico ambiental de campo, con el objetivo de definir la tipología y caracterización de los tipos de vegetación y los tipos de flora más representativa, comunidades o asociaciones vegetales presentes en las quebradas.
- Hacer el mapa de coberturas vegetales a escala detallada para cada quebrada y el inventario forestal de la ronda hidráulica (RH) y zona de manejo y preservación ambiental (ZMPA) de las quebradas.
- A partir de esta información, efectuar la zonificación ambiental de cada quebrada, especificando entre otras, las áreas de conservación estricta, de recuperación ecológica, uso público, etc.
- Análisis de fauna. Compilar, ilustrar y analizar la información disponible, complementada con la observación de campo, para realizar el inventario faunístico (mamíferos, aves, anfibios, reptiles, artrópodos) entre otros.

## **10 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CAUCES URBANOS**

La restauración de ríos comprende el uso de técnicas dirigidas a la mejora de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales. El diseño de la restauración debe plantearse considerando la recuperación de los procesos que aseguran la integridad ecológica del sistema, sobre una imagen de referencia coherente con las características sociales y ambientales del tramo fluvial. (Cedex, 2011). En ese orden de ideas, la propuesta metodológica que se plantea a continuación propende por solucionar la problemática identificada en los cauces urbanos y está encaminada a la solución de los siguientes aspectos:

- Evitar el Incremento de la escorrentía desde superficies urbanas selladas o impermeables.
- Mitigar el cambio de la dinámica hidrológica, minimizando la magnitud y frecuencia de la descarga pluvial.
- Mitigar el Incremento de las velocidades de flujo en los cursos de agua con el consecuente incremento en el riesgo de erosión.
- Manejo y mitigación del impacto que generan obstrucciones sobre el cauce (Represamientos, Secciones de conductos, alcantarillas, bajo infraestructura, edificios y sectores de pueblos y ciudades).
- Manejo y mitigación de obstrucciones por la infraestructura urbana a lo largo o debajo de

los cursos de agua (conductos de alcantarillado, líneas de abastecimiento eléctrico, tuberías de agua y gas, vías, etc.).

- Eliminación del ingreso de vertimientos o descargas directas de aguas residuales.
- Generar y recuperar los espacios para los hábitats naturales (cuerpo de agua, orillas, cauce, plano inundable, plantas).
- Generar espacios que permitan la continuidad ecológica.
- Recuperar de la biodiversidad (fauna y flora) perdida.
- Integrar al entorno urbano, la cuenca hidrográfica

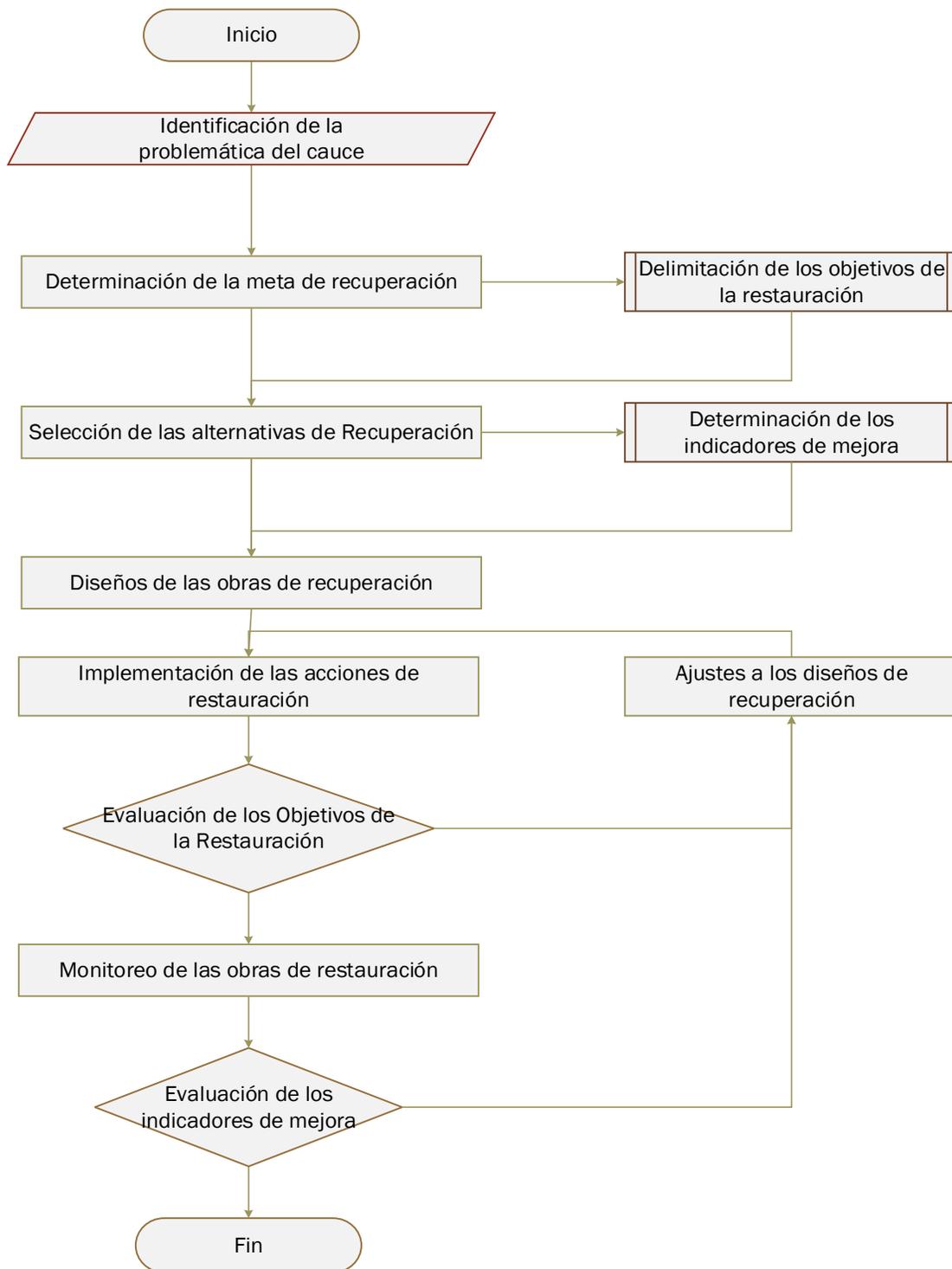
Para lograr los objetivos de recuperación es importante establecer que la recuperación de cauces no es una acción puntual; es un proceso que comprende múltiples iteraciones que deben permitir al ingeniero establecer los mecanismos de optimización y comprobación de las soluciones que proyecte; y eso supone la dificultad que presentan estos procesos, pues deben ser evaluados constantemente durante la implementación de las acciones que se propongan teniendo en cuenta la dinámica fluvial de los cauces.

Las propuestas de recuperación en lo posible deben ser evaluadas y ajustadas de acuerdo con las características que se encuentren el cauce en el momento de ejecutar las intervenciones, así mismo deberán ser evaluadas luego de su implementación para establecer si cumplen debidamente el propósito para el cual fueron propuestas o si los resultados fueron los esperados.

De esta manera, un proceso de recuperación debe planearse en etapas que van desde la recopilación de información hasta el monitoreo y seguimiento de las acciones ejecutadas

para la recuperación de una cuenca o corriente urbana. Se propone un proceso metodológico que de manera ordenada permita la identificación de la problemática, su evaluación y planteamiento de las acciones de recuperación, finalizando con un proceso de monitoreo que permite la verificación de los objetivos propuestos. La metodología propuesta se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

**Figura 16. Propuesta Metodológica para le recuperación de cauces de montaña**



Fuente: Propia

## 10.1 Identificación De La Problemática Del Cauce

Previo a un proceso de restauración de cauces y cuencas intervenidas es necesario hacer un breve diagnóstico en donde se establezca una línea base con el objetivo de determinar hasta donde es posible llegar en el proceso de restauración del cauce.

El grado de alteración del cauce determinará las intervenciones requeridas para alcanzar un grado de recuperación que se desee. Esto plantea la necesidad de establecer unas metas y objetivos en la restauración, las cuales deberán ser sopesadas para establecer la viabilidad de lograr los objetivos iniciales.

Los objetivos que se quieran lograr deberán ser contrastados mediante un diagnóstico preliminar que se constituirá en la línea base mediante la cual se podrá reevaluar la realidad posible dentro del proceso de restauración.

En el diagnóstico preliminar se deberán establecer las condiciones actuales del cauce determinando mediante recorridos previos aspectos generales que pueden ayudar a definir el grado de intervención antrópica y el establecimiento de una condición restaurada posible después de los procesos de intervención.

Desde este punto de vista el establecimiento de la línea base deberá contemplar las siguientes actividades:

- Diagnóstico de las condiciones socioeconómicas de la zona de ronda del cauce. En desarrollo de esta actividad se identificarán los actores sociales y la problemática

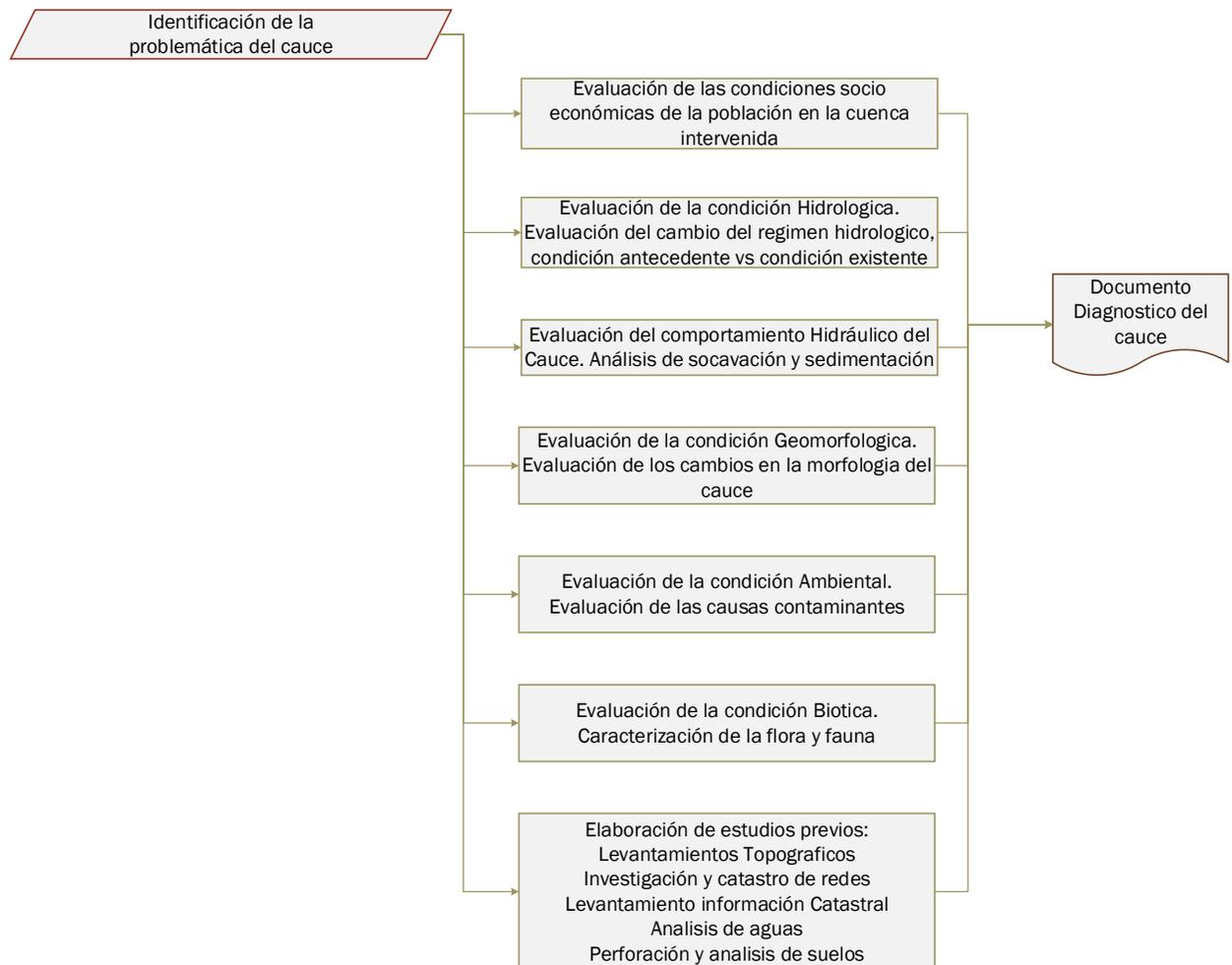
de la comunidad asociada a los cauces.

- Diagnóstico de la condición hidrológica previa a la urbanización, la cual servirá de referente para las evaluaciones del cauce.
- Diagnóstico de las condiciones geomorfológicas del cauce. Este punto debe hacerse en retrospectiva mediante el uso de fotografías aéreas de años anteriores que permitan identificar los cambios morfológicos en el cauce y los procesos de urbanización sobre la cuenca.
- Diagnóstico de las condiciones ambientales. Se deberá hacer un análisis de coberturas del suelo en donde se identificarán los cambios de uso del suelo y afectaciones sobre la flora y fauna del curso de agua.

Se incluyen como actividades a realizar dentro de la definición de la línea base las siguientes:

- Análisis morfológico de las condiciones del cauce (Incluye la caracterización geológica y geomorfológica y paisajística de la cuenca).
- Análisis de las condiciones de la flora y la fauna del cauce (análisis del cordón ripario).
- Análisis de las condiciones ambientales (contaminación de las aguas del cauce).
- Análisis socioeconómico de las zonas de ronda del cauce (elaboración de mapas sociales).
- Caracterización climatológica e hidrológica de la cuenca.

**Figura 17. Proceso de Identificación de la problemática del cauce**



Fuente: Propia

### 10.1.1 Definición de la problemática en el cauce

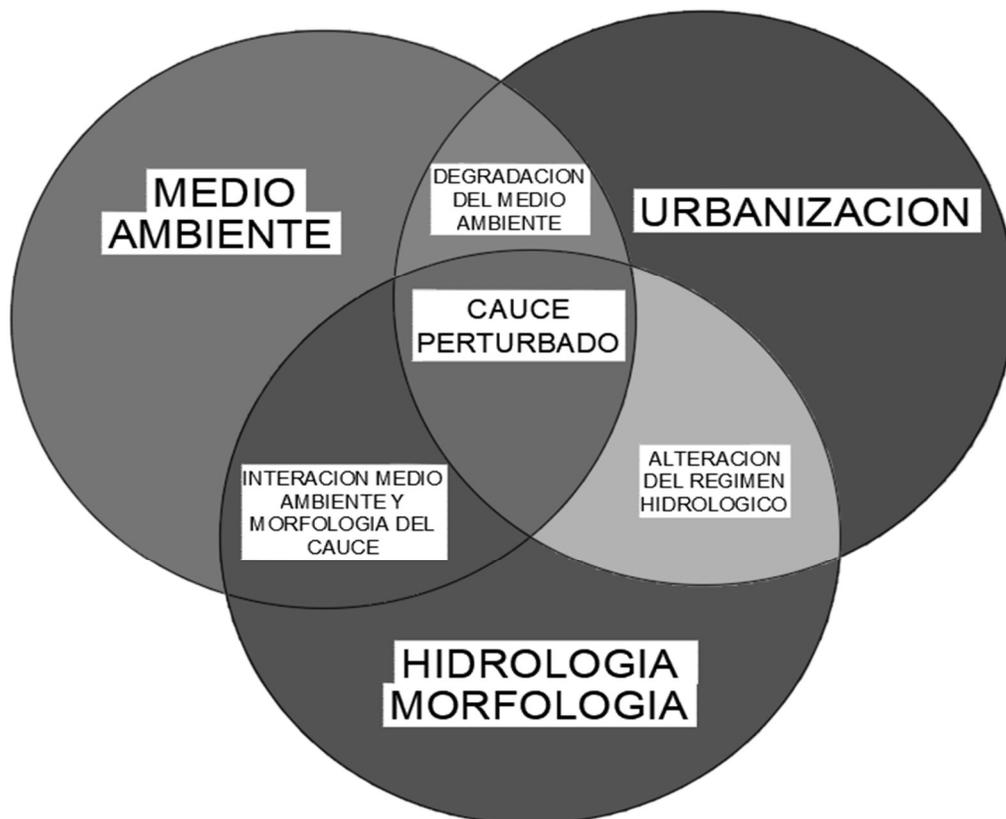
La identificación de los problemas de degradación de un sistema fluvial requiere un adecuado diagnóstico del estado de sus diferentes elementos (BERNHARDT et al., 2005).

La definición de la problemática del cauce consiste en el análisis de los aspectos

identificados en la línea base y comprende la interrelación de los aspectos sociales, hidrológicos, geomorfológicos y ambientales que permitan establecer cómo evolucionó la degradación del cauce, desde su condición natural hasta llegar a su condición urbanizada.

El análisis se efectúa sobre el precepto de relaciones causa efecto y de una manera holística la cual permitirá analizar las condiciones identificadas desde el punto de vista de las múltiples interacciones que los caracterizan.

**Figura 18. Enfoque para identificar la problemática del cauce**



Fuente: propia

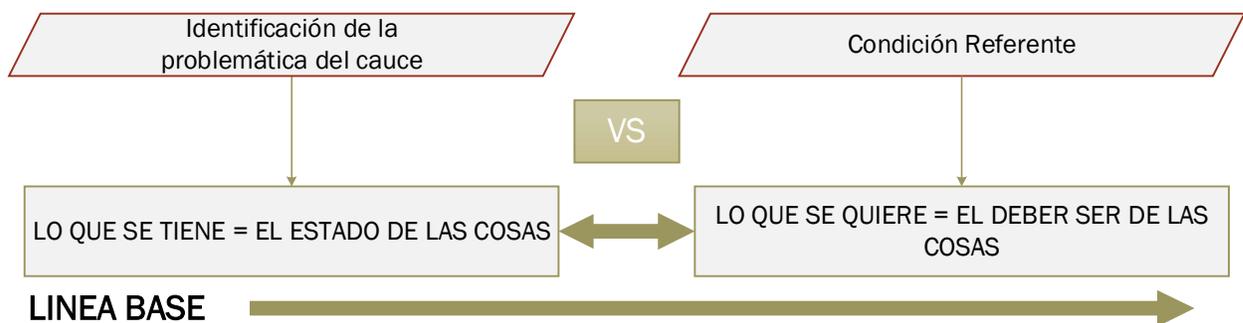
### 10.1.2 Identificación de la condición referente

La condición referente consiste definir la condición ideal que quisiera conseguirse después de efectuar intervenciones para corregir la problemática identificada en el cauce.

Teniendo como meta llegar a una condición referente, es posible plantear metas reales, posibles o ejecutables desde los diferentes aspectos que deben contemplarse para realizar un proceso de restauración. La condición real que se logre no será igual a la condición referente deseada, puede ser que, dependiendo de la situación identificada, solamente pueda lograrse una condición de estabilidad para eliminar condiciones inestables que requieren ser intervenidas limitando así el proceso de restauración al establecimiento de una realidad posible.

En la definición de línea base deben establecerse indicadores que establezcan nivel de degradación biológica, físico-química e hidromorfológica. Los indicadores permiten analizar los aspectos del sistema que cuentan con un mayor nivel de degradación y plantear, a partir de su estudio, los mecanismos más favorables para la recuperación de cauce.

**Figura 19. Concepto de la condición referente**



Fuente: propia

### 10.2 Determinación De Las Metas Y Objetivos De La Recuperación.

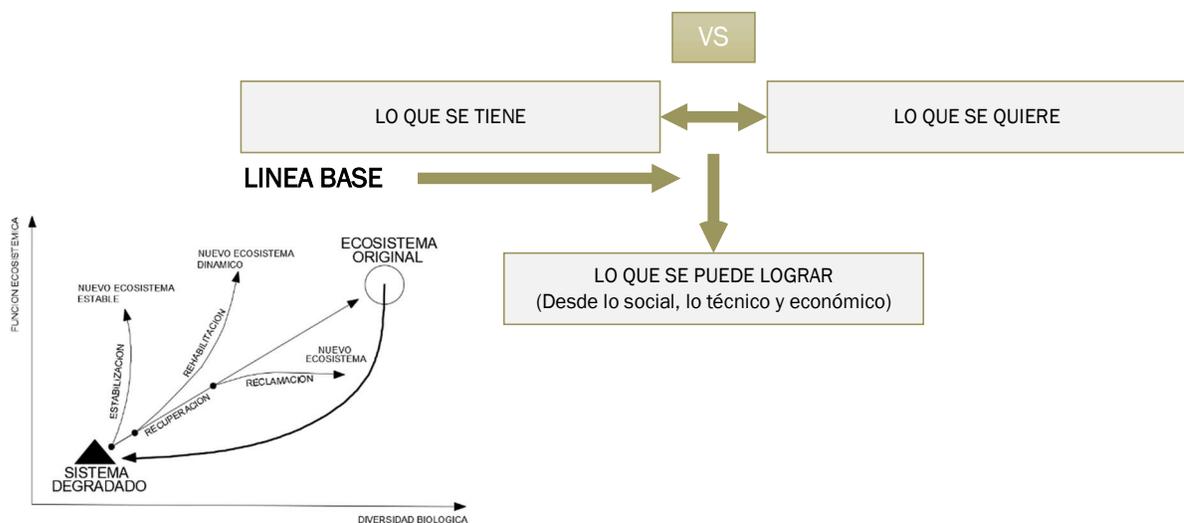
La definición de la realidad posible dentro del proceso de restauración dependerá de

condicionantes técnicos, sociales y económicos.

Desde el punto de vista técnico deberán tenerse en cuenta los aspectos que pueden modificarse para recuperar la calidad de las aguas en el cauce o minimizar el impacto de las aguas de escorrentía provenientes de las zonas urbanas o situaciones identificadas de inestabilidad geotécnica o morfológica que puedan ser o no mitigados.

Desde el punto de vista social es importante resaltar que en un proceso de restauración es incluyente con la comunidad, la comunidad debe ser participe activo del proceso y se requiere que esta se apropie del espacio y valore su función ambiental. Actividades que generan problemática en el cauce, como el pastoreo, cultivos en la zona de ronda, asentamientos de población indigente en las orillas del cauce, deben ser eliminadas si se espera conseguir un proceso sostenible en el tiempo.

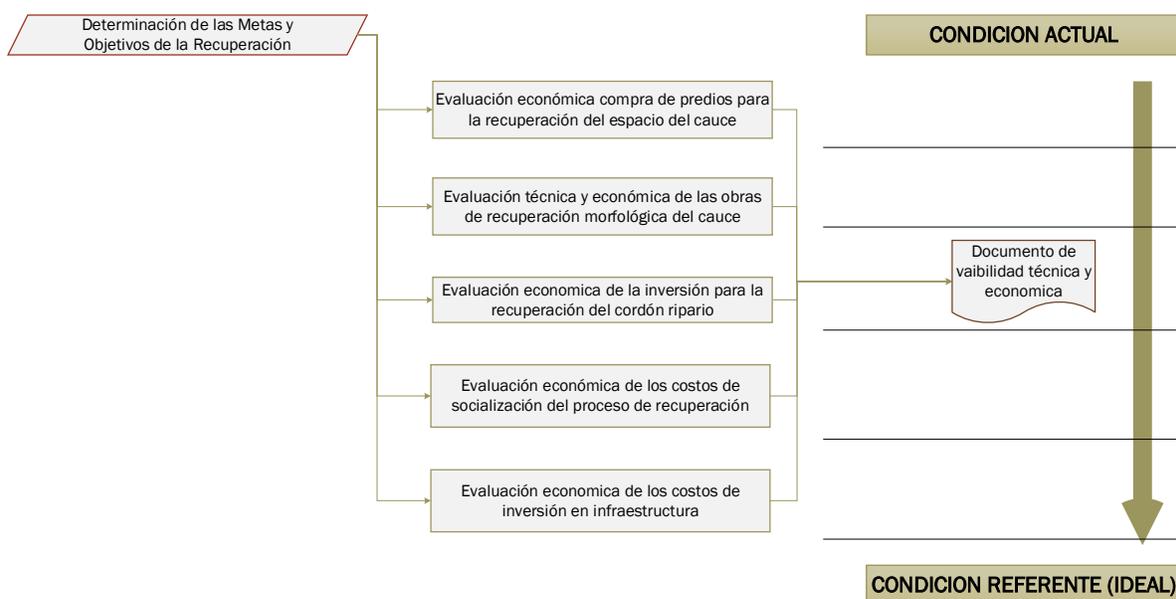
**Figura 20. Metas y Objetivos de la Recuperación**



Fuente: propia

En lo económico se destaca que las metas y objetivos de una recuperación se definen de acuerdo con los recursos requeridos y la realidad económica de las administraciones municipales que deberán establecer y priorizar los rubros de inversión en recuperación del espacio público y obras de infraestructura requeridas de acuerdo con la condición referente deseada.

**Figura 21. Proceso de establecer las metas y Objetivos de la recuperación**



Fuente: propia

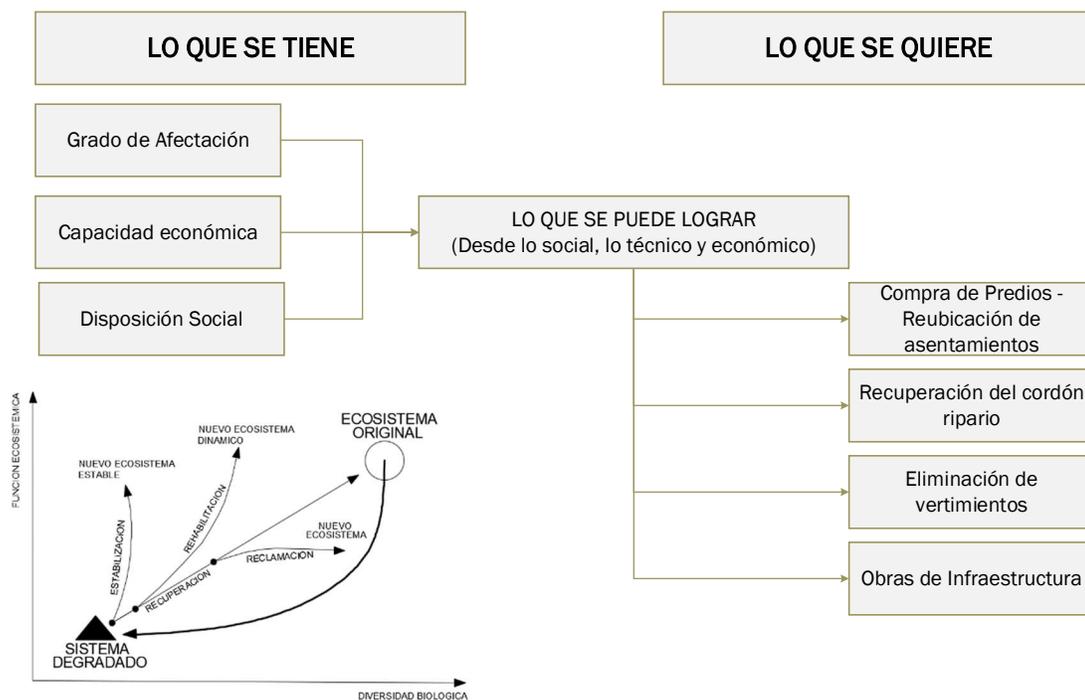
### 10.3 Alcance Del Proyecto De Recuperación

Un proceso de recuperación dependerá entonces de la perspectiva real evaluada, es decir, de las conclusiones a las que se llegaron en el análisis de la línea base, en la cual se definió exactamente hasta donde se puede llegar dentro de la restauración que se pretende realizar.

El alcance de un proceso de restauración dependerá entonces de poder delimitar aquellos

aspectos que representen la realidad del proceso de recuperación; es posible que un proceso no pueda ser ejecutado por que no se cuenta con los recursos suficientes para realizar las acciones de recuperación o que la comunidad no presente ningún interés en el mejoramiento de las condiciones de su entorno.

**Figura 22. Metas y Objetivos de la Recuperación**



Fuente: propia

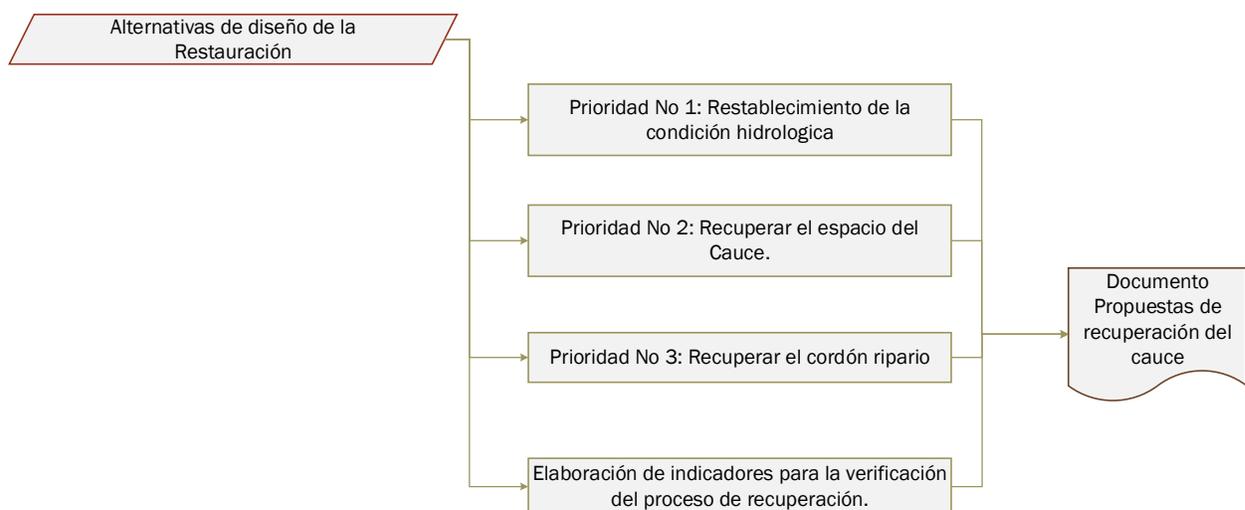
Sin embargo, cabe anotar que una vez que se plantea un proceso de recuperación debe considerarse, en primer lugar, que un proceso de recuperación requiere de la participación de la comunidad aledaña localizada en la ronda del cauce y que es importante la apropiación del espacio por parte de la comunidad para que ella misma sea garante de la sostenibilidad de las posibles intervenciones que se hagan en el cauce; en segundo lugar, que un proceso de recuperación comprende una serie de intervenciones continuas y

sostenidas en el tiempo y que la inversión de recursos se hará en etapas programas a corto, mediano y largo plazo. Las inversiones a corto plazo serán encaminadas a solucionar problemáticas que generen peligro a la integridad de la comunidad (por ejemplo, en la recuperación de la ronda hidráulica mediante la compra de predios en la zona de ronda para eliminar asentamientos en las zonas inundables del cauce o la eliminación de vertimientos, y su reubicación); las inversiones a mediano plazo estarán representadas en la recuperación del cordón ripario mediante obras de protección del cauce y acciones de revegetalización, y capacitación a la comunidad. Las inversiones a largo plazo tienen que ver con el ordenamiento urbano y obras de infraestructura que eliminen definitivamente la problemática asociada a la contaminación y deterioro del cauce.

#### 10.4 Diseño De Las Alternativas De Recuperación

En el diseño de los procesos de restauración se plantean tres etapas en el diseño que permitirán definir el proceso del diseño de la restauración.

**Figura 23. Elaboración de las alternativas de recuperación**



Fuente: propia

- 1) **Etapa No 1: Restablecimiento de las pautas hidrológicas:** Esto en atención a que el régimen de caudales determina los cambios eco morfológicos y estos inciden de manera directa sobre los parámetros ecológicos. El análisis de la morfología y dinámica fluvial ofrecerá los determinantes para el manejo de los caudales y limitar los procesos de erosión.
  
- 2) **Etapa No 2: Restablecer el espacio del cauce:** Se plantea en cauces urbanos la recuperación del territorio fluvial. El territorio fluvial delimitado ha de ser coherente con las simulaciones hidráulicas realizadas para diferentes periodos de retorno con el fin de caracterizar e identificar las zonas inundables y favorecer la reducción de los riesgos asociados a las crecidas fluviales. La integración de estas simulaciones con los estudios de régimen de caudales ambientales, aportan la base para un éxito funcional sostenible del sistema posterior a las actuaciones.
  
- 3) **Etapa No 3: Restablecimiento del Cordón Ripario:** A partir del diagnóstico de la vegetación se pueden diseñar las actuaciones necesarias para mejorar su composición específica y la estructura y funcionamiento de los bosques riparios (MAGDALENO, 2011). Entre otras, destaca la utilización en entornos urbanos y periurbanos de técnicas de bioingeniería que permiten solventar problemas de estabilidad de los cauces, sin prescindir de la existencia de una formación vegetal riparia que permita el desarrollo de diferentes procesos ecológicos.

En todo proceso de recuperación es fundamental el desarrollo de estas etapas, pues como

se ha anotado a lo largo del documento, el proceso de urbanización genera el desbalance en el régimen hidrológico, lo cual termina ocasionando cambios en el ecosistema, degradándolo. Por esta razón, las soluciones de restauración están enfocadas a la eliminación de la causa que las origina. Es claro, que la urbanización no ha de desaparecer para que el ecosistema se recupere, sin embargo, en la actualidad existen técnicas que permiten la minimización del impacto y bajo un sistema de indicadores (Hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos y ambientales) establecer el grado de recuperación que pueda llegar a lograrse sobre el cauce.

Los diseños que se propongan en un proceso de restauración deberán contar con las siguientes características:

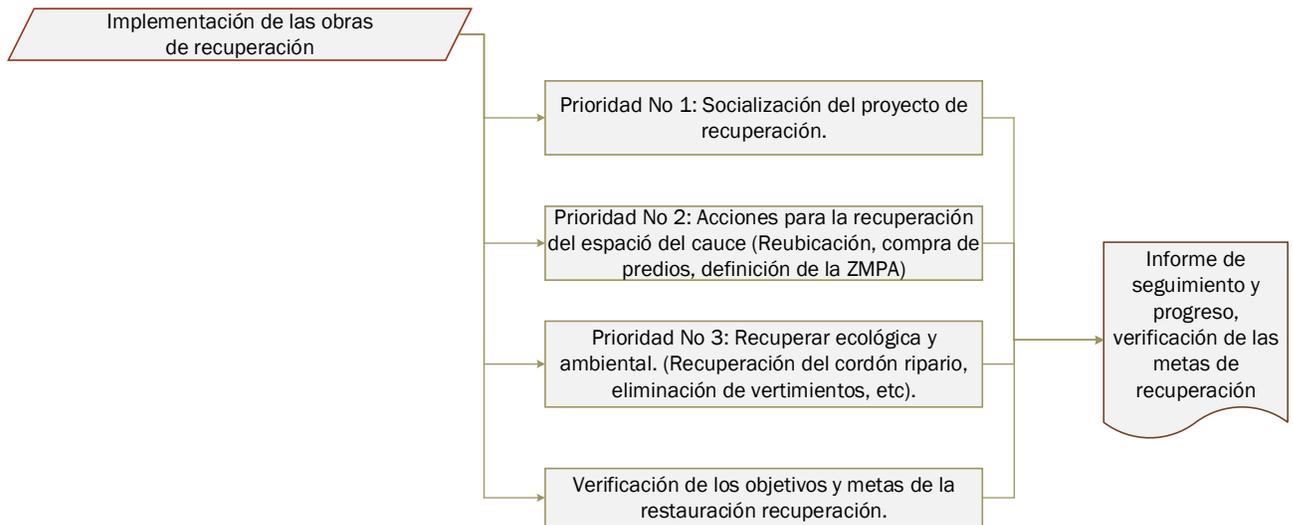
- 1) Los diseños deben ser dinámicos pensados en los procesos y funciones del río. El objetivo es ayudar al río a conseguir un equilibrio dinámico sostenible. Esto implica tratar de dar continuidad al río para que recupere su forma, eliminando los obstáculos en el cauce y propendiendo por plantear obras que mitiguen los procesos de degradación.
- 2) Los componentes ecológicos deben ser claramente identificados, y evaluados para generar indicadores que puedan medir la mejora llevada a cabo por el proyecto de recuperación en el ecosistema.

### **10.5 Proceso De Implementación De Las Obras De Recuperación**

De manera similar a lo expresado en los diseños de alternativas de recuperación, es

necesario presentar un orden lógico para su implementación.

**Figura 24. Proceso de implementación de las obras de recuperación**



Fuente: propia

En primer lugar, los procesos de restauración deben ser socializados y adoptados por la comunidad. Esto implica una serie de talleres con la comunidad para que pueda realizarse su reubicación a zonas en donde no se invada el espacio del cauce. También, a las comunidades aledañas, fuera de las zonas de ronda, deberán capacitarse para evitar que arrojen basuras a los cauces y soslayen prácticas que atenten contra el sistema ecológico que quiere recuperarse. Esto es fundamental en el sostenimiento de las soluciones que se vayan a implementar.

En segundo lugar, es necesario restablecer el espacio del cauce. Esto implica la compra de

predios en zonas de ronda hidráulica<sup>8</sup>. (En Bogotá se define la zona de manejo y protección ambiental, ZMPA<sup>9</sup>). En especial, debe recuperarse el espacio público definido como la ronda hidráulica, para generar el espacio al río y el lugar en donde se deberán efectuar las actuaciones para mitigar el impacto producido por los cambios hidrológicos en la cuenca. En esta zona también se construirán interceptores de alcantarillado que eliminen los vertimientos de aguas residuales a los cauces. Es decir, en esta zona se construirán obras de infraestructura bajo tierra que permitan la recuperación del cauce.

Las actuaciones siguientes dentro del proceso de recuperación serán las obras que mitiguen el impacto hidrológico<sup>10</sup> y las obras que mitiguen la erosión en la zona de ronda, seguidas por obras de protección de la banca para la estabilización geomorfológica del cauce. Estas obras están encaminadas a mitigar los efectos de las inundaciones en el cauce.

Posteriormente, el proceso deberá centrarse en la recuperación ecológica y ambiental, aunque es de anotar, que las medidas adoptadas en pasos anteriores propenden por la recuperación ecológica. En esta instancia, se efectuarán las labores tendientes a la

---

<sup>8</sup> Ronda hidráulica: Zona de protección ambiental e hidráulica no edificable de uso público, constituida por una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de mareas máximas (máxima inundación), de hasta 30 metros de ancho destinada principalmente al manejo hidráulico y la restauración ecológica.

<sup>9</sup> Es la franja de terreno de propiedad pública o privada contigua a la ronda hidráulica, destinada principalmente a propiciar la adecuada transición de la ciudad construida a la estructura ecológica., la restauración ecológica y la construcción de la infraestructura para el uso público ligado a la defensa y control del sistema hídrico. (Decreto 190 del 22 de junio de 2004, Art 78) Alcaldía Mayor de Bogotá D. C.

<sup>10</sup> Aplican las obras de drenaje urbano no convencional, como los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), que eliminan los picos de lluvia y permiten la entrega de las aguas pluviales urbanas sin erosionar la zona de ronda y entregar las aguas lluvias por infiltración al cauce.

recuperación del cordón ripario y los hábitats que conforman la zona del cauce.

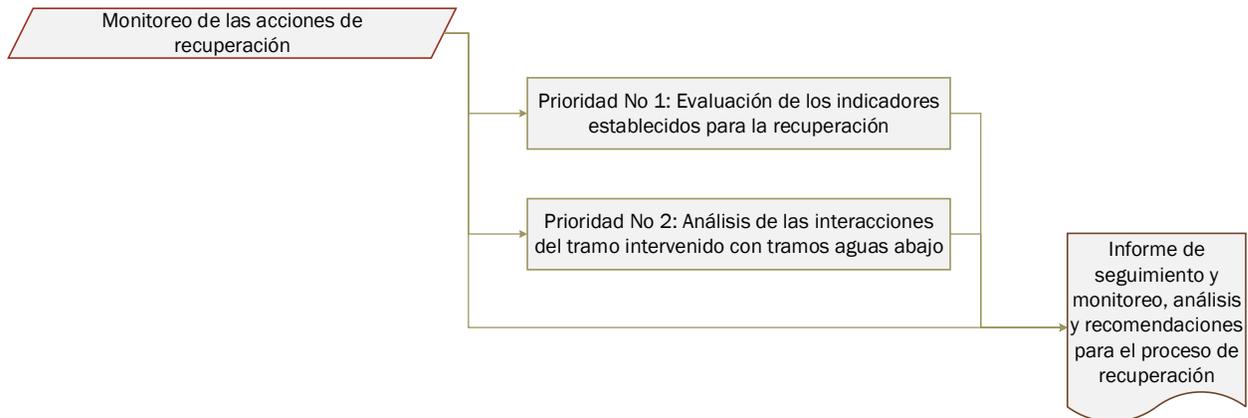
Una vez establecidas las etapas primarias de la recuperación, es posible plantear obras que integren el espacio natural con la comunidad, elaborando diseños paisajísticos y florísticos para constituir un ámbito urbano integrado con la condición natural del cauce. (Nótese que, de acuerdo a las definiciones adoptadas en este trabajo, esto constituirá un proceso de reclamación).

En resumen, para la implementación de las obras de recuperación, es fundamental realizar una valoración de la situación previa pues el proceso de recuperación se definirá una vez se establezcan los costos de las intervenciones requeridas en gestión social, compra de predios, obras de infraestructura, obras de estabilización y recuperación de zonas inestables y obras de recuperación del cordón ripario y labores para la recuperación del hábitat.

## **10.6 Monitoreo De Las Obras De Recuperación**

Los programas de evaluación y seguimiento de los procesos de recuperación, constituyen una parte importante del proceso.

**Figura 25. Proceso de monitoreo de las obras de recuperación**



Fuente: propia

Un programa de seguimiento debe cumplir las siguientes funciones:

- 1) Contar con indicadores que permitan evaluar el éxito de las actuaciones sobre el cauce.
- 2) Considerar las interacciones entre la cuenca y el tramo del cauce que se interviene y los efectos que se podrían producir en los tramos no intervenidos aguas arriba y aguas abajo del sector que se vaya a intervenir.
- 3) Tener en cuenta la variabilidad en el tiempo del comportamiento del sistema. Esto se logra mediante el análisis de la evolución histórica del comportamiento del sistema fluvial y planteando su funcionamiento futuro, mediante simulaciones y planes de seguimiento de las actuaciones desarrolladas.

El monitoreo deberá ser constante y contrastado con los indicadores establecidos en el diagnóstico inicial (línea base).

## 11 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Los procesos de restauración pluvial se proponen con el propósito de propender por el desarrollo sostenible, integrando el entorno urbano al entorno natural para mitigar las afectaciones de políticas inadecuadas para el manejo de los recursos.

De esta forma, la restauración de los cauces permitirá la mejora del hábitat fluvial y recuperación de especies vegetales y animales, lograr el geomorfológico del cauce, reducir el riesgo de inundaciones, recuperar la conectividad longitudinal y transversal del cauce y recuperar los valores sociales, culturales y paisajísticos del río.

Los procesos de recuperación ambiental se constituyen en una herramienta fundamental para compatibilizar la protección ambiental con el aprovechamiento de los recursos que los sistemas fluviales ofrecen a la sociedad.

Para la intervención de los cauces, teniendo en cuenta los criterios de restauración ecológica, es necesario definir el grado de recuperación al cual puede llevarse el cauce intervenido y esto corresponde a una decisión de la autoridad responsable del manejo del recurso apoyada por el grupo interdisciplinario de diseño.

En el documento se presentan una serie de lineamientos técnicos que pueden ser utilizados para la evaluación de los distintos procesos que se dan en un cauce de montaña los cuales permitirán el análisis de las diferentes condiciones que se presentan para proponer obras

de recuperación.

La propuesta metodológica presentada en el documento pretende ofrecer un procedimiento ordenado para afrontar el análisis y solución que representa la recuperación de cauces en zonas de montaña. Cabe anotar que esta metodología puede ser implementada en cauces urbanos en zonas bajas, teniendo en cuenta que los lineamientos en las evaluaciones hidráulicas e hidrológicas serán diferentes, así mismo, deberá tenerse en cuenta las variaciones morfológicas del cauce y las variaciones en la biota presente en el sector de la cuenca que se evalué.

## 12 REFERENCIAS

- Artículo.** (2001). [en línea]. Disponible en: <http://www.extranet.vdot.state.va.us> Virginia.
- Artículo.** (2010). [en línea]. Disponible en: <http://www.dot.state.tx.us> Texas.
- Artículo.** (2013). [en línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/536-plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-23> Colombia
- Artículo.** (2015). [en línea]. Disponible en: US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development. Center: Coastal and Hydraulics Laboratory. Vicksburg, MS.
- Barla,** Rafael Galván. (2006). Glosario ecológico. [en línea]. Disponible en: [http://www.elcastellano.org/glosario\\_ambiental.pdf](http://www.elcastellano.org/glosario_ambiental.pdf) España
- Bozeman,** T Copeland, R.R., D.N. McComas, C.R. Thorne, P.J. Soar, M.M. Jonas and J.P (1999). [en línea]. Disponible en: [http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/wqg/sri/rural\\_pied\\_paper.html](http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/wqg/sri/rural_pied_paper.html). Carolina del Norte.
- Carolina Streams.** (1996) AWRA Wildland Hydrology Symposium Proceedings. Edited By: D.S. Olsen and J.P. Potyondy. AWRA Summer Symposium.
- Cepal,** (1999). Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos, Axel
- Dourojeanni,** Andrei Jouravlev (2002). División de Recursos Naturales e Infraestructura.
- Circular No. 22. PB97-134308.** [en línea]. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics> Washington D.C.
- Clewell,** A. and Aronson, J. (2012). Ecological Restoration. 1st ed. Covelo: Island Press.
- Doll,** B. (1999). Stream restoration. 1st ed. Chapel Hill, N.C.: North Carolina Stream Restoration Institute.
- Doyle,** M.W., K. F. Boyd, and P.B. Skidmore. (1999). River Restoration Channel Design: Back to the Basics of Dominant Discharge. Second International Conference on Natural Channel Systems. Niagara Falls, Canada.
- Drainage manual.** (1983). 1st ed. [Richmond]: Location and Design Division, Virginia Dept. of Highways and Transportation.
- Dunster,** J. and Dunster, K. (1996). Dictionary of natural resource management. 1st ed. Vancouver, BC: UBC Press.
- Fripp.** (2001). Hydraulic Design Of Stream Restoration Projects. Chapter

- Glosario Ambiental.** (2016). [en línea]. Disponible en: <http://www.ecoherencia.es/index.php/seccion-restauracion-ecologica>. Madrid
- Glosario con términos ambientales.** (2010). [en línea]. Disponible en: <http://www.ecoherencia.es/index.php/seccion-restauracion-ecologica> Madrid
- Glosario Ambiental.** (2008) [en línea]. Disponible en: <https://www.crq.gov.co/Documentos/GLOSARIO%20AMBIENTAL/GLOSARIO%20AMBIENTAL.pdf>. Armenia
- Glosario de Riego.** (2015) [en línea]. Disponible en: <http://www.riego.org/glosario/tag/flujo-base/>
- Gordon, N.** (1992). Stream Hydrology: An Introduction For Ecologists. Wiley and Sons, England.
- Gregory, K, J** (2006). The Human Role in Changing River Channels. [en línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/215524372\\_The\\_Human\\_Role\\_in\\_Changing\\_River\\_Channels](https://www.researchgate.net/publication/215524372_The_Human_Role_in_Changing_River_Channels)
- Harman, W.H. et al.** (1999). Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for North
- Hydraulic Design Manual.** (2002). 1st ed. Texas.
- Muñoz, Benito** (2013). Pérdida de Biodiversidad. Responsabilidad y soluciones. [en línea]. Disponible en: <http://historia.bio.ucm.es/rsehn/cont/publis/boletines/195.pdf>. Madrid
- National Engineering Handbook** part 654 (2007). [en línea]. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov> EE.UU.
- Presentación** (2011). [en línea]. Disponible en: <http://www.authorstream.com/Presentation/santiago260608-1270646-restauracion-ecologica/>. Madrid
- Presentación.** (2011). [en línea]. Disponible en: <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/restauracion-ambiental-de-espacios-degradados> Madrid
- RAE.** Real Academia Española.
- TDOT** (2002). Hydraulic Design Manual. Texas Dep. of Transportation.
- US Dep, of Transportation** (1996). Urban Drainage Design Manual. Hydraulic Engineering
- VDOT (2002).** Drainage Manual. Virginia Dep. of Transportation.
- Wohl, E.E. and Merritt, D.** 2005. Prediction of mountain stream morphology. Water Resources Research Volumen 41.