

**INSTRUMENTO PARA LA REDUCCIÓN  
DEL RIESGO DE DESASTRES  
Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO**  
Versión 1.0  
Aplicable a la región andina y valles

# **GUÍA DE ORIENTACIÓN TÉCNICA** para la determinación de **MÁXIMAS CRECIDAS**



*SERVICIO DEPARTAMENTAL DE CUENCAS*



**GOBIERNO AUTÓNOMO  
DEPARTAMENTAL DE  
COCHABAMBA**

## **CRÉDITOS**

Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba  
Secretaría Departamental de los Derechos de la Madre Tierra  
Servicio Departamental de Cuencas

### **Elaboración**

Equipo Técnico del Servicio Departamental de Cuencas (SDC)

### **Aportes**

Oscar Paz  
Patricia Uría

### **Diseño**

Kattia Chopitea

### **Impresión**

Teleioo srl 70544988

### **Contacto**

Servicio Departamental de Cuencas  
Av. Atahualpa (final) Parque Tunari  
Lado DIPROVE  
Cochabamba - Bolivia  
Teléfonos: +591.4.4291095 - +591.4.4290729  
Fax: +591.4.4291095  
contactos@cuencas-cochabamba.com

Esta publicación es posible gracias al Proyecto Reducción del riesgo de desastres de la Cooperación Suiza en Bolivia, ejecutado por HELVETAS Swiss Intercooperation.  
Más información en: [www.rrd.com.bo](http://www.rrd.com.bo)



# Índice

<b>Presentación</b> .....	<b>iii</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PROBLEMÁTICA</b> .....	<b>1</b>
<b>3. BASE LEGAL</b> .....	<b>3</b>
<b>4. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>15</b>
<b>5. ASPECTOS TÉCNICOS</b> .....	<b>20</b>
<b>6. METODOLOGÍA DE LA PROPUESTA TÉCNICA</b> .....	<b>41</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>58</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>60</b>

## Presentación

*En el marco de las diferentes tuiciones que tiene el Servicio Departamental de Cuencas de la Gobernación Departamental de Cochabamba, respecto a MIC (Manejo Integrado de Cuencas), REH (Regulación y Encauzamiento Hídrico), se ha podido desarrollar una propuesta que constituye una guía de orientación técnica para la determinación de máximas crecidas.*

*Esta guía podrá ser empleada por diferentes instancias a nivel de operación y planificación, de planes y proyectos, en municipios y mancomunidades, con el objetivo de precautelar la seguridad y bienestar de la población circundante a los cauces; además de poder optimizar el uso de recursos en función a la planificación con enfoque de prevención, mitigación y resiliencia, a la hora de priorizar gastos e inversiones en zonas propensas a situaciones críticas por los efectos del cambio climático.*

# PROPUESTA DE GUÍA DE ORIENTACIÓN TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DE MÁXIMAS CRECIDAS

## 1. ANTECEDENTES

Las poblaciones que habitan en las áreas de influencia de las torrenteras y cauces principales generalmente son afectadas por desbordes y anegaciones durante el periodo de lluvias, poniendo en riesgo sus vidas e inversiones además de equipamientos colectivos como, infraestructura productiva, infraestructura vial y otros.

La amenaza es producida por el efecto combinado de dos causas, uno climático y el otro socio territorial por los usos inadecuados que ejercen los pobladores de la zona en las tierras circundantes a los ríos.

En este contexto, durante la época de lluvias es donde se genera un permanente estado de alerta en las diferentes poblaciones asentadas frente a los márgenes de los ríos, urge la necesidad de contar con herramientas que permitan afrontar los eventos extremos que cada vez son más frecuentes en el contexto del cambio climático. Por lo que se propone esta guía metodológica para la determinación de máximas crecidas.

La elaboración de la misma, precisa seguir criterios técnicos, hidráulicos, hidrológicos y biofísicos aplicables para la zona andina y valles.

## 2. PROBLEMÁTICA

La falta de instrumentos adecuados en la gestión territorial de los municipios, está ocasionando el desordenado y acelerado avance de la población urbana en zonas de alto riesgo de desbordes e inundación sin contemplar y respetar las Áreas de Protección de Ribera (APR) o Franjas de Seguridad.



Fotografía 1. Muros de canal como parte de la infraestructura privada



Fotografía 2. Invasión a las áreas de protección de riberas



Fotografía 3. Muros de canal como parte de la infraestructura privada.



Fotografía 4. El cauce de la torrentera atraviesa por una sección estrecha por debajo de la vivienda.

Como se puede observar en las ilustraciones no existe respeto a las áreas de protección de ribera y peor aún, los propios muros de la sección de la canalización son usados como fundación de las viviendas, en otros el cauce atraviesa por debajo de la vivienda sin considerar ningún aspecto hidrológico e hidráulico. Ocasionando el estrangulamiento, reflujos y posterior rebalse del río.

Respetar las áreas de protección de ribera es importante debido a que durante la ocurrencia de eventos extremos de lluvia se producen

desbordes de las torrenteras y ríos que ocasionan serios daños al área adyacente como ser pérdida de cultivos, inundaciones, pérdida de infraestructura privada, estancamiento de aguas que se convierten en focos infecciosos, para ello y con propósito de crear mejores condiciones de seguridad, se plantea la presente guía.

Cabe recordar que los habitantes en las cercanías al río, viven hace 10 a 20 años, salvo algunos sectores que por lo general no han sido testigos de los eventos máximos, debido a que habitan la zona recientemente; recordemos que los eventos máximos de precipitación oscilan entre los 50 a 200 años; un ejemplo de referencia sería el diseño de los puentes de hormigón, que deben tener un diseño que considere caudales en una proporción igual o mayor a un periodo de retorno de 50 años.

Por otro lado, se debe considerar que las precipitaciones no son uniformes en intensidad y cantidad anualmente, existiendo la probabilidad de una alta intensidad que conllevaría a mayor caudal con periodos largos mencionados anteriormente.



Fotografía 5. Área productiva en época de estiaje (Colcapirhua)



Fotografía 6. Área productiva en época de lluvias (Colcapirhua).

Como se puede observar en época de estiaje es muy poco probable predecir la magnitud de las inundaciones, pero se puede rescatar los rasgos de la marca de agua de eventos ocurridos en años pasados, las inundaciones se producen por distintos factores, entre los principales se tiene:

- a) El estrangulamiento del río, por prácticas de recuperación en las riberas de los ríos o con fines lucrativos de extensión de terrenos indiscriminadamente lo que provoca la disminución capacidad hidráulica del río ocasionando que los flujos se desvíen o retornen aguas arriba provocando rebalses e inundaciones.
- b) La acumulación del sedimento en el cauce, es otra causa común producto del arrastre del sedimento por medio del transporte del caudal ecológico y eventos máximos, la acumulación del sedimento en el lecho del río es el principal agente de cambio en el eje del

cauce como también en el cambio de la pendiente longitudinal del río provocando zonas planas es decir la disminución de la pendiente del río que es proporcional a la velocidad del flujo.

Los eventos extremos generados por la variabilidad climática y el cambio climático exacerbaban estos dos factores, por lo que las acciones deben considerar estas variables.

### 3. BASE LEGAL

#### Análisis de Normativas Legales

La temática de legislación vigente de áreas de protección de ribera en nuestro medio, se encuentra actualmente en pleno debate, debido a las capacidades que cada instancia tiene como alcance dentro sus competencias, ya sean municipales, departamentales o nacionales. No existiendo un normativa legal vigente que haga relevancia específica en este asunto, convirtiéndose en un conflicto para las autoridades municipales y departamentales, delegando estas atribuciones al Servicio Departamental de Cuencas (SDC), para que, en muchos casos pueda dirimir conflictos que hacen referencia a la implementación de áreas de protección de riberas, entre organizaciones sociales que acuden a esta institución pública dependiente del Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba (GADC).

Con la implementación de las áreas de protección de ribera se disminuye la pérdida de terrenos aptos para la agricultura, se evitan los asentamientos en zonas de riesgo, se reducen las pérdidas económicas por afectación de la infraestructura agrícola y

urbana, se evita la formación de depósitos de escombros y basuras, podrían convertirse en espacios de beneficio comunitario y, sobre todo, se reduce el riesgo de perder vidas humanas. Por ello, es importante crear condiciones para la participación social orientada a la planificación del uso del suelo y la ocupación territorial, a través de la formulación de Plan Territorial de Desarrollo Integral para Vivir Bien.

También es importante considerar determinados criterios técnicos que deben ser tomados en cuenta en el momento de la delimitación de las áreas de protección de ribera, tales como; las crecidas máximas del río cada 10, 50 y 100 años (periodo de retorno); la determinación de caudales adicionales provenientes de cauces adyacentes; y, la topografía del terreno por donde escurrirá el agua.

Las tareas en las áreas de protección de ribera, por tanto, deben ser encaradas de manera coordinada con los comunarios, vecinos, las municipalidades y otras instituciones especializadas en estos trabajos, para ello se deben iniciar tareas de planificación referidas a la definición de límites de áreas de protección de ribera, la planificación del uso del suelo de dichas áreas de protección y su ocupación territorial.

La consolidación de las áreas de protección de ribera supone el reconocimiento legal de estos planes por los municipios, y debe asegurarse de que estas áreas de protección de ribera no se conviertan en depósitos de escombros y basuras, y de asentamientos urbanos.

## Revisión bibliográfica de instrumentos legales

### Constitución política del estado

#### **CAPÍTULO SEGUNDO PRINCIPIOS, VALORES Y FINES DEL ESTADO**

Artículo 9. Son fines y funciones esenciales del Estado, además de los que establece la Constitución y la ley:

6. Promover y garantizar el aprovechamiento responsable y planificado de los recursos naturales, e impulsar su industrialización, a través del desarrollo y del fortalecimiento de la base productiva en sus diferentes dimensiones y niveles, así como la conservación del medio ambiente, para el bienestar de las generaciones actuales y futuras.

#### **TÍTULO III DEBERES**

Artículo 108. Son deberes de las bolivianas y los bolivianos:

1. Conocer, cumplir y hacer cumplir la Constitución y las leyes.

#### **CAPÍTULO OCTAVO DISTRIBUCIÓN DE COMPETENCIAS** **DISTRIBUCIÓN DE COMPETENCIAS Artículo 297.**

I. Las competencias definidas en esta Constitución son:

1. Privativas, aquellas cuya legislación, reglamentación y ejecución no se transfiere ni delega y están reservadas para el nivel central del Estado.

2. Exclusivas, aquellas en las que un nivel de gobierno tiene sobre una determinada materia las facultades legislativa, reglamentaria y ejecutiva, pudiendo transferir y delegar estas dos últimas.

3. Concurrentes, aquellas en las que la legislación corresponde al nivel central del Estado y los otros niveles ejercen simultáneamente las facultades reglamentaria y ejecutiva.

4. Compartidas, aquellas sujetas a una legislación básica de la Asamblea Legislativa Plurinacional cuya legislación de desarrollo corresponde a las entidades territoriales autónomas, de acuerdo a su característica y naturaleza. La reglamentación y ejecución corresponderá a las entidades territoriales autónomas.

5. Toda competencia que no esté incluida en esta Constitución será atribuida al nivel central del Estado, que podrá transferirla o delegarla por Ley.

#### **Artículo 298.**

##### **I. Son competencias privativas del nivel central del Estado:**

20. Política general de Biodiversidad y Medio Ambiente.

##### **II. Son competencias exclusivas del nivel central del Estado:**

7. Política Forestal y régimen general de suelos, recursos forestales y bosques.

##### **Artículo 299. II. Las siguientes competencias se ejercerán de forma concurrente por el nivel central del Estado y las entidades territoriales autónomas:**

1. Preservar, conservar y contribuir a la protección del medio ambiente y fauna silvestre manteniendo el equilibrio ecológico y el control de la contaminación ambiental.

4. Conservación de suelos, recursos forestales y bosques.

11. Protección de cuencas.

##### **Artículo 300. I. Son competencias exclusivas de los gobiernos departamentales autónomos, en su jurisdicción:**

5. Elaboración y ejecución de Planes de Ordenamiento Territorial y de uso de suelos, en coordinación con los planes del nivel central del Estado municipales e indígena originario campesino.

##### **Artículo 302. I. Son competencias exclusivas de los gobiernos municipales autónomos, en su jurisdicción:**

6. Elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial y de uso de suelos, en coordinación con los planes de los niveles centrales del Estado, departamentales e indígenas.

10. Catastro urbano en el ámbito de su jurisdicción en conformidad a los preceptos y parámetros técnicos establecidos para los Gobiernos Municipales.

29. Desarrollo urbano y asentamientos humanos urbanos.

**Artículo 304. I. Las autonomías indígena originario campesinas podrán ejercer las siguientes competencias exclusivas:**

4. Elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial y de uso de suelos, en coordinación con los planes del nivel central del Estado, departamentales, y municipales.

15. Planificación y gestión de la ocupación territorial.

**CAPÍTULO QUINTO RECURSOS HÍDRICOS**

**Artículo 374. I. El Estado protegerá y garantizará el uso prioritario del agua para la vida. Es deber del Estado gestionar, regular, proteger y planificar el uso adecuado y sustentable de los recursos hídricos, con participación social, garantizando el acceso al agua a todos sus habitantes. La ley establecerá las condiciones y limitaciones de todos los usos.**

**Artículo 376. Los recursos hídricos de los ríos, lagos y lagunas que conforman las cuencas hidrográficas, por su potencialidad, por la variedad de recursos naturales que contienen y por ser parte fundamental de los ecosistemas, se consideran recursos estratégicos para el desarrollo y la soberanía boliviana. El Estado evitará acciones en las nacientes y zonas intermedias de los ríos que ocasionen daños a los ecosistemas o disminuyan los caudales, preservará el estado natural y velará por el desarrollo y bienestar de la población.**

**TÍTULO III DESARROLLO RURAL INTEGRAL SUSTENTABLE**

**Artículo 407. Son objetivos de la política de desarrollo rural integral del Estado, en coordinación con las entidades territoriales autónomas y descentralizadas:**

6. Establecer políticas y proyectos de manera sustentable, procurando la conservación y recuperación de suelos.

**Ley del medio ambiente**

La Ley del Medio Ambiente N° 1333, promulgada el 27 de abril de 1992, hace referencia al tema de recursos hídricos, teniendo como objeto la protección y conservación del medioambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población.

En el Capítulo de los Recursos naturales renovables afirma al Estado como instancia que tiene el deber de preservar, conservar, restaurar y promover el aprovechamiento de los recursos naturales renovables. Así mismo el Estado se reserva el derecho de uso de los recursos naturales renovables.

En este mismo compendio sustantivo, se hace referencia a leyes especiales para cada recurso natural, que emergen de la Ley 1333, que permitirán regular su uso, según el Art. 34 que afirma lo siguiente:

## Referencias del Art. 34

**ARTICULO 34°.- Las leyes especiales que se dicten para cada recurso natural, deberán establecer las normas que regulen los distintos modos, condiciones y prioridades de adquirir el derecho de uso de los recursos naturales renovables de dominio público, de acuerdo a características propias de los mismos, potencialidades regionales y aspectos sociales, económicos y culturales.**

Estas leyes especiales, pueden tener carácter departamental y/o municipal, de acuerdo a sus competencias, por ejemplo, la ley de municipalidades, la ley forestal, el reglamento especial para aprovechamiento de agregados, así también las emanadas por la Ley de Autonomías, y tendrían que ser estas instancias las que deben participar.

## Prioridad Nacional

**ARTICULO 37°.- Constituye prioridad nacional la planificación, protección y conservación de las aguas en todos sus estados y el manejo integral y control de las cuencas donde nacen o se encuentran las mismas.**

El manejo de cuencas hidrográficas, por su importancia en el manejo de torrenceras son de prioridad esencial en el ámbito nacional, por tanto, las APRs en cada uno de los cauces son de suma importancia, tal como lo afirma el presente artículo de la Ley del Medio Ambiente.

## Ley de Gestión de Riesgos

**ARTICULO 18°.- (OBLIGACIONES DE INSTITUCIONES PÚBLICAS EN MATERIA DE GESTIÓN DE RIESGOS)**

Inciso f) El Ministerio de Medio Ambiente y Agua, en materia de riesgos deberá:

1. Incorporar la gestión de riesgos en los instrumentos de evaluación y control de calidad ambiental.
2. Promover la inclusión de la gestión de riesgos dentro de los criterios y los instrumentos de implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos y el saneamiento.
3. Incorporar medidas preventivas para la contención de incendios forestales.
4. Por medio de la Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, integrar el cambio climático como transversal de la gestión de riesgos de los diferentes sectores y niveles territoriales, en conformidad a la Ley N° 3000 del 15 de octubre de 2012 Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien.

## Reglamento básico de pre inversión

### CAPÍTULO I

Disposiciones Generales

Artículo 2. Objeto del Reglamento. - El objeto del presente Reglamento es proporcionar los elementos técnicos esenciales para la elaboración del Estudio de Diseño Técnico de Pre inversión, que orienten una adecuada, ordenada y

oportuna programación y ejecución de la inversión pública en el corto y mediano plazo, para mejorar la calidad de la inversión.

## **CAPITULO II ESTUDIOS DE PREINVERSIÓN**

### **Artículo 7. Condiciones Previas a la elaboración del Estudio de Diseño Técnico de Pre - inversión**

Para iniciar la elaboración del Estudio de Diseño Técnico de Pre - inversión, la Entidad Ejecutora deberá elaborar un Informe Técnico de Condiciones Previas, aprobado por la Máxima Autoridad Ejecutiva, a objeto de identificar los factores que afectan o afectarán la viabilidad del proyecto, y que deben ser considerados para el proceso de elaboración del estudio.

#### **A) Informe Técnico de Condiciones Previas**

6) Identificación de posibles impactos ambientales (en caso de existir factores ambientales emergentes de la realización del proyecto).

7) Identificación de posibles riesgos de desastres (en caso de existir factores de riesgos de desastres y adaptación al cambio climático, que afectarán directamente en el proyecto).

### **Reglamento ambiental minero**

El Reglamento Ambiental Minero como parte de la Ley del Medio Ambiente, surge por la explotación de áridos en las cuencas.

Esta reglamentación se traduce en el Decreto Supremo N° 28590 del 17 de Enero del año 2006, promulgado por el entonces presidente constitucional Eduardo Rodríguez Veltze. Los artículos referidos a las áreas de protección de ribera son los siguientes:

### **Plan de Manejo de Áridos en Cuencas**

**ARTICULO 26°.- (Contenido mínimo del Plan de manejo de Áridos en Cuencas o Micro - cuencas, PMAC). El PMAC, deberá contener el siguiente contenido técnico:**

**a) Descripción Geológica y Geomorfológica del lugar a explotar.**

**b) Descripción Litológica de horizontes o capas de material aluvial en cursos de ríos y afluentes del aprovechamiento de Áridos.**

**c) Descripción Hidrológica del río.**

**d) Capacidad de recarga anual de áridos del río en aprovechamiento (m<sup>3</sup>/año).**

**e) Descripción de las áreas Aprovechables contemplando: longitud, ancho y profundidad del aprovechamiento, en base a la información obtenida en el inciso b) anterior.**

El plan de manejo de áridos en cuencas hidrográficas, contempla diferentes exigencias como afirma el articulado anterior, debiendo resaltar la descripción hidrológica, factores importantes que tiene que ver con las APRs que se debe implementar en los márgenes del río en el cual se va a implementar la explotación de áridos.

## Franjas Laterales de Seguridad

**ARTICULO 27°.- (Área del Aprovechamiento). Todo concesionario u operador que realice trabajos de aprovechamiento de áridos, cualquiera sea el equipo o herramienta utilizada, deberá contemplar la protección de los márgenes del río, estableciéndose áreas de protección de ribera, cuyo ancho será definido en el MA o EEIA. Como mínimo se establece el tercio central del ancho del río.**

El área de aprovechamiento donde se realicen los trabajos de explotación de agregados, deberán contemplarse la protección de los márgenes, debiendo tomar en cuenta el ancho del río y destinando una tercera parte de esta distancia a cada margen, aclarando que son distancias mínimas, vale decir que a criterio del profesional que realiza el estudio del plan de manejo debe conservar mayores distancias.

## Señalización permanente

**ARTICULO 29°.- El aprovechamiento de áridos, en zonas de riesgo deberá localizarse de acuerdo al. PMAC y el Plan de Adecuación aprobado en la Licencia Ambiental, siendo obligatoria la señalización permanente de los lugares de riesgo, por parte del concesionario u operador.**

Durante los recorridos e inspecciones de campo que se han realizado para el estudio y consideración de APRs, no se ha podido observar la existencia de señalización o alguna referencia que haga notar las distancias adecuadas o mínimas de las APRs.

## Reglamento ambiental para el aprovechamiento de áridos y agregados

La Ley del Medio Ambiente complementa la explotación de agregados, que tengan que ver indirectamente con las áreas de protección de ribera a través del reglamento que regula el plan de manejo de áridos y agregados en cuencas y micro cuencas y normas técnicas relativas al aprovechamiento de áridos en cauces de ríos y afluentes, de fecha 22 de abril del año 2009. En este reglamento se hacen consideraciones importantes con aspectos relativos a las APRs, de acuerdo a las siguientes afirmaciones:

### Plan de Manejo de Áridos en Cuencas

**ARTÍCULO 25.- (PLAN DE MANEJO DE ÁRIDOS Y AGREGADOS EN CUENCAS O MICROCUENCAS).**

Toda actividad de aprovechamiento de áridos y agregados en cauces de ríos y márgenes, debe adecuar dicha actividad al plan de manejo de áridos y agregados en cuencas o microcuencas establecido por el Gobierno Municipal del área donde se desarrolle la AOP.

**ARTÍCULO 29.- (ÁREA DEL APROVECHAMIENTO).**

Todo autorizado que realice trabajos de aprovechamiento de áridos y agregados, cualquiera sea el equipo o herramienta utilizada, deberá contemplar la protección de los márgenes del río, estableciéndose franjas laterales de seguridad, con un mínimo del tercio central del ancho del río. En caso de meandros el área explotable será el tercio de la curva interior (curva de deposición).

Esta información será definida en el MA o EEIA. Las guías técnicas específicas, elaboradas para cada cuenca o microcuenca en particular, en función de estudios de régimen hidrológico, serán de aplicación preferente para el aprovechamiento de áridos y agregados.

En caso de no existir una guía técnica específica para el aprovechamiento de áridos y agregados, se podrá definir la utilización de los dos tercios laterales de ríos o afluentes de ríos, a través de la Evaluación de Impacto Ambiental (MA, EEIA O PPM-PASA).

**ARTÍCULO 31.- (DISTANCIA MÍNIMA).El aprovechamiento de áridos y agregados, en zonas de riesgo deberá localizarse de acuerdo al PMAC y al Instrumento Ambiental de regulación de Alcance particular aprobado en la Licencia Ambiental, siendo obligatoria la señalización permanente de los lugares de riesgo, por parte del autorizado.**

### Ley de municipalidades

Las competencias municipales en el tema de franjas están en base a los bienes de dominio público que determinan las distancias a aplicarse como distancias al borde de ríos. La ley 2028 rige a partir del 28 de octubre del año 1999. Los artículos de aplicación obligatoria que hacen referencia a las áreas de protección de ribera son los siguientes:

### Bienes de Dominio Público

**Artículo 85.- (Bienes de Dominio Público). Los bienes de dominio público corresponden al Gobierno Municipal y son aquellos**

**destinados al uso irrestricto por parte de la comunidad; son inalienables, imprescriptibles e inembargables, y comprenden:**

### Reglamento de la ley aprovechamiento de explotación de áridos y agregados

Ley 3425 de administración y explotación de áridos y agregados (20 de junio de 2.006)

La Ley promulgada en fecha 20 de junio del 2006, durante el gobierno de Evo Morales Ayma, dicha Ley tiene como objeto, delegar la responsabilidad de la explotación de agregados a los Gobiernos Municipales de cada región donde se realizan actividades de explotación de agregados. Los artículos que directa e indirectamente tiene que ver con el tema de APRs son los siguientes:

### Responsabilidad de los Gobiernos Municipales

**ARTÍCULO 3.- La administración y la regulación de los áridos o agregados, estará a cargo de los Gobiernos Municipales, en coordinación con las organizaciones campesinas y las comunidades colindantes con los ríos.**

**ARTÍCULO 4.- Los Gobiernos Municipales, mediante Ordenanzas Municipales, aprobarán las normas de manejo y conservación de los ríos y las cuencas de su jurisdicción municipal, donde estarán establecidas las normas de explotación de agregados. Estas normas deben estar enmarcadas en la Ley de Medio Ambiente y sus reglamentos.**

Para los ríos y cuencas que abarcan varios municipios, los Gobiernos Municipales de estos municipios de forma conjunta, elaborarán sus planes de manejo y conservación de ríos y cuencas. Los Gobiernos Municipales, en base a la Ley de Medio Ambiente y sus reglamentos, podrán gestionar auditorías ambientales ante las autoridades competentes, de las explotaciones irracionales o irregulares de los áridos. En base a informes técnicos – legales, podrán declarar pausas ecológicas en los ríos que estén afectados que representen riesgos de desastres naturales. De forma obligatoria realizarán obligaciones técnicas y legales de las concesiones de áridos otorgadas a la fecha con informes y conclusiones.

### Recursos para Plan de Manejo de Ríos y Cuencas

**ARTÍCULO 5.- Los Gobiernos Municipales, mediante Ordenanzas Municipales, aprobarán las tasas por la explotación de áridos; estos recursos estarán destinados al plan de manejo de los ríos y cuencas, a la construcción de defensivos y a obras que beneficien a las comunidades colindantes con los ríos.**

### Control Social sobre los Ríos y Cuencas

**ARTÍCULO 7.- Las comunidades colindantes con los ríos o donde se encuentran los agregados, realizarán el control social de cumplimiento de las normas de manejo de los ríos y cuencas, presentando los y las denuncia de irregularidades ante el Honorable Consejo Municipal.**

La presente ley tiene aspectos resaltantes como la de otorgar responsabilidades de control y fiscalización, a las comunidades asentadas en las riberas de los ríos y cuencas donde se realizan actividades de explotación de áridos y agregados. Estas comunidades traducidas en controles sociales, se han convertido en los directos fiscalizadores de las empresas que realizan explotación de agregados.

### La ley forestal y su reglamento

La Nueva Ley Forestal ha sido promulgada el 12 de Julio de 1996 y posteriormente su reglamentación fue sancionada el 21 de diciembre de 1996. Debemos resaltar que la presente ley hace énfasis a las zonas boscosas, es decir en zonas y áreas rurales, en zonas altas y en zonas bajas. Sin embargo, su aplicación se da como referencia para su aplicación en las zonas mencionadas. Veamos los artículos que hacen referencia a las áreas de protección de riberas.

### Clases de Tierras y su Protección Jurídica

**ARTICULO 27°.- La clasificación de tierras realizada a través de los planes de uso del suelo tendrán validez en lo general, mientras no existan los planes de ordenamiento predial que determinen los usos definitivos. La emisión de los certificados de uso del suelo se hará por las oficinas técnicas del Plan de Uso del Suelo dependientes del Sistema de Regulación de Recursos Naturales Renovables (SIRENARE), a través de las Superintendencias Agraria y Forestal, según corresponda.**

Se hace mención al tipo de clasificación de tierras que debe realizarse a través de los planes de uso de suelo de los respectivos gobiernos municipales y su correspondiente homologación en las instancias pertinentes, de esta manera poder tener en forma clara las zonas donde se clasifique de protección de ríos y cuencas como servidumbres ecológicas y su inclusión en los planes de manejo.

### Elaboración de Planes de Manejo Forestal

**ARTICULO 28°.** Para la elaboración de planes de manejo forestal y de ordenamiento predial deberán intervenir profesionales y técnicos en las ciencias forestales, biológicas, agronómicas, y pecuarias, según corresponda.

Para la aprobación y seguimiento de los planes de manejo y planes de ordenamiento predial se aplicarán técnicas de verificación por muestreo. Los profesionales y técnicos que los elaboren o ejecuten son penal y civilmente responsables de conformidad con lo prescrito por el artículo 27° y el párrafo II del artículo 42° de la Ley. Los planes de ordenamiento predial y de manejo forestal en tierras comunitarias de origen, siempre que éstas no están declaradas además como áreas protegidas, se efectuarán tomando en cuenta procesos de consulta participativa que consideren aspectos referidos a los usos y costumbres de los pueblos indígenas, incluyendo sus valores culturales y espirituales.

**ARTICULO 32°.** La clasificación de tierras de protección tomará como criterios la topografía, la pendiente, el grado de

**erosión o susceptibilidad a la erosión, profundidad, calidad del material edáfico, cobertura vegetal, susceptibilidad a inundaciones, factores climáticos u otros factores de degradación o su nivel de exposición a factores de riesgo.**

### Servidumbres Ecológicas

**ARTICULO 35°.** Las servidumbres ecológicas son limitaciones legales a los derechos de uso y aprovechamiento impuestas sobre una propiedad, en razón de la conservación y sostenibilidad de los recursos naturales renovables. Son servidumbres ecológicas legales, entre otras establecidas o a establecerse reglamentariamente, las siguientes:

*a) Las laderas con pendientes superiores al 45 %, salvo los casos en que el profesional responsable de elaborar el plan de ordenamiento predial determine porcentajes inferiores debido a factores específicos de vulnerabilidad o porcentajes superiores siempre que se apliquen técnicas especiales de manejo y conservación de suelos, como surcos a nivel, terrazas y sistemas agroforestales o agrosilvopastoriles.*

*b) Los humedales, pantanos, curichis, bofedales, áreas de afloramiento natural de agua y de recarga, incluyendo 50 metros a la redonda a partir de su periferia. Se exceptúan las áreas de anegamiento temporal, tradicionalmente utilizadas en aprovechamiento agropecuario y forestal.*

*g) En terrenos planos: 10 metros por lado en las riberas de quebradas y arroyos de zonas*

*no erosionables ni inundables; 20 metros por lado en las quebradas y arroyos de zonas erosionables o inundables; 50 metros por lado en las riberas de los ríos en zonas no erosionables o inundables; 100 metros por lado en las riberas de los ríos en zonas erosionables o inundables; 100 metros a la redonda en lagunas y lagos; 10 metros por lado al borde de las vías públicas, a partir del área de retiro, incluyendo las vías férreas.*

*h) En terrenos ondulados o de colinas de las zonas montañosas: 50 metros a partir del borde de los ríos; 10 metros a partir del borde de los arroyos, quebradas o terrazas, para favorecer la deposición de los sedimentos acarreados y la disminución de la velocidad de las aguas.*

*j) Las demás servidumbres ecológicas legales o voluntarias que se establezcan.*

## Ley del servicio nacional de reforma agraria

### Atribuciones del INRA

**ARTICULO 9º El Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, en materia agraria tiene las siguientes atribuciones:**

1. Ejercer tuición sobre el Sistema de Regulación de Recursos Naturales Renovables (SIRENARE) y el Instituto Nacional de Reforma Agraria.
2. Clasificar las tierras según su capacidad de uso mayor, elaborar directrices generales

municipales que deberán cumplir los gobiernos municipales para la aprobación de los planes de uso del suelo y promover la homologación de las ordenanzas municipales que los aprueben, mediante resolución suprema.

3. Aprobar las actividades de conservación, protección de la biodiversidad, investigación o ecoturismo, en tierras privadas, previa solicitud expresa formulada por su propietario estableciendo los procedimientos administrativos al efecto.

4. Evacuar y programar el uso del recurso natural tierra y la aplicación de tecnologías apropiadas, emitiendo normas que los regulen en el marco del manejo integral de cuencas y el desarrollo sostenible.

## Cuadro resumen de análisis normativo jurídico vigente de áreas de protección de riberas

Nº de LEY	LEY Y/O REGLAMENTO	FECHA PROMULGACIÓN	Nº DE ARTÍCULO	LECTURA DE ARTÍCULO	ANCHO DE FRANJA	INSTANCIA COMPETENTE
Ley 2928	Ley de Municipalidades	28 de Octubre de 1999	Art. 85 Bienes de Dominio Público	Los bienes de dominio público corresponden al Gobierno Municipal y son aquellos destinados al uso irrestricto por parte de la comunidad; son inalienables, imprescriptibles e inembargables. Comprenden: Bienes declarados vacantes por autoridad competente en favor del Gobierno Municipal; y <b>Ríos hasta veinticinco (25) metros a cada lado del borde de máxima crecida, riachuelos, torrenteras y quebradas, con sus lechos, aires y taludes hasta su coronamiento.</b>	25 metros desde el borde de la máxima crecida.	Gobierno Autónomo Municipal de la Jurisdicción solicitante.
Ley 1700	Reglamento de la Ley Forestal	21 de Diciembre de 1996	Art. 35 Servidumbre Ecológicas Legales	Las servidumbres ecológicas son limitaciones legales a los derechos de uso y aprovechamiento impuestas sobre una propiedad, en razón de la conservación y sostenibilidad de los recursos naturales renovables. Son servidumbres ecológicas legales, entre otras establecidas o a establecerse reglamentariamente, las siguientes: <b>g) En terrenos planos: 100 metros por lado en las riberas de los ríos en zonas erosionables o inundables. h) En terrenos ondulados o de colinas de las zonas montañosas: 50 metros a partir del borde de los ríos.</b>	100 metros desde el borde del río en zonas planas.	(ABT) Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosque y Tierra.
Ley 1333	Reglamento Ambiental Minero. Decreto Supremo Nº 28590	17 de Enero del 2006	Art. 27 Área de Aprovechamiento. Franjas Laterales de Seguridad	Todo concesionario u operador que realice trabajos de aprovechamiento de áridos, cualquiera sea el equipo o herramienta utilizada, <b>deberá contemplar la protección de los márgenes del río, estableciéndose franjas laterales de seguridad, cuyo ancho será definido en el MA o EEIA. Como mínimo se establece el tercio central del ancho del río.</b>	50 metros desde el borde del río en zonas montañosas.  Se establece como franja de seguridad un tercio del ancho total del río, desde el borde.	Gobierno Autónomo Municipal de la Jurisdicción solicitante.

## 4. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se muestran algunas definiciones o términos que se utilizan en el documento, con el fin de unificar los conceptos para la fácil utilización.

### Cuenca

Extensión de terreno que recoge el agua de lluvia o manantiales, alimentando con ella el caudal de los ríos, arroyos o lagos que se encuentran dentro de él. Es un área delimitada por las partes más altas, lo que da lugar a que sea receptora de aguas de lluvia, escurrimientos y caudales de ríos que se encuentran en partes más altas. El área de la cuenca se mide en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>), pudiéndose expresar también en otras unidades como hectáreas, metros cuadrados, etc.

### Caudal

Es la cantidad o volumen de agua que pasa por la sección transversal de un cauce o canal en una unidad de tiempo, se mide en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s), también puede expresarse en litros por segundo, por minuto, etc.

### Cauce Natural

Sección de terreno que contiene un cuerpo de agua, pudiendo ser este de régimen permanente o temporal, el límite superior del cauce está constituido por el nivel promedio de máximas avenidas o crecientes ordinarias, mientras el límite inferior es el Thalweg del cauce.

### Ríos

Se considera que un río es una corriente de agua permanente que fluye por un cauce desde las tierras altas a las tierras bajas y vierte en el mar o en una región endorreica (río colector) o a otro río (afluente). Estas corrientes se organizan jerárquicamente en redes. Los ríos se diferencian por su envergadura y por la complejidad de su régimen hidrológico.

### Torrenteras

Es un curso de montaña episódico. Es muy sencillo, y presenta tres elementos: la cuenca de recepción, en forma de embudo, el canal de desagüe, por donde circulan las aguas, y el cono de deyección, en la desembocadura. El lecho es torrencial y rocoso, con una fuerte pendiente.

### Perfil transversal

El perfil transversal típico del cauce de un río forma una depresión cóncava con la parte más profunda donde la corriente del río es más fuerte, si el tramo donde se mueve el río es recto, la parte más profunda tenderá a quedar en la parte central de la corriente. Sin embargo, esta situación o concepción teórica sólo se presenta en condiciones ideales que suelen modificarse por numerosos factores como son, principalmente, la pendiente (si es muy escasa tiende a producir meandros, tanto libres o divagantes como ensanchados, con lo cual se desplaza el centro de la corriente hacia la orilla cóncava por la fuerza centrífuga de la corriente de agua) y el caudal, si el río está crecido, es decir, cuando lleva mucho volumen de agua, la corriente es bastante fuerte y puede realizar un

trabajo erosivo muy intenso tanto en las orillas como también el fondo, aunque la pendiente no se haya modificado. Además, en ríos caudalosos la superficie del agua presenta un fuerte abombamiento donde la corriente es más rápida lo cual da origen, a su vez, a una serie de vórtices o remolinos girando en sentido horario hacia la orilla derecha y anti horario en la izquierda.

**En el perfil transversal se distinguen:**

### El canal

Es una incisión en forma de artesa que contiene un río y que ha sido creada por el agua que corre en él, es la zona donde el agua corre con mayor velocidad en el fondo del río y el punto más bajo del lecho.

### Lecho menor

Es el cauce por la que corre el agua de un río en épocas de estiaje, incluye el canal. Sus márgenes están bien definidas, por lo que está delimitado claramente. Presenta una alternancia de zonas hundidas (surcos y pozas) y de fondos altos (umbrales), que pueden llegar a formar islas.

### Lecho mayor

Es el cauce del río cubierto por el agua en época de máximo caudal anual, es una zona que se inunda todos los años. Este lecho ofrece un perfil transversal alomado, debido a los resaltes de ribera que dominan el lecho menor, hasta el punto de que pueden aparecer contrapendientes que aíslan pequeñas depresiones longitudinales.

### Lecho mayor esporádico

Es la zona de inundación de un río en las grandes crecidas. No todos los años se inunda, por lo que está colonizado por la vegetación, frecuentemente está cultivado y hasta se ha construido en él. No se distingue topográficamente de los alrededores.



### Tipos de lecho

Como consecuencia de los procesos de transporte y acumulación se produce el modelado de los lechos de río, tendiendo al equilibrio entre la corriente y el caudal. Distinguimos básicamente dos tipos de lecho: el lecho de erosión y el lecho móvil.

### Lechos de erosión

Son aquellos que se desarrollan sobre roca cristalina, o materiales que la corriente no puede desplazar, con fragmentos grandes. El modelado realizado por el agua en este tipo de lechos es muy escaso, es necesaria la existencia de partículas que ejerzan una labor de abrasión.

### Lechos móviles

Son aquellos cuyo modelado se desarrollan directamente en función de las leyes de la

dinámica fluvial, por lo que su morfología no depende de los medios climáticos.

Su geometría cambia con relativa rapidez. Durante las crecidas existen fenómenos de excavación, mientras que durante los períodos de estiaje se dan fenómenos de acumulación. Dentro de este tipo de lechos distinguimos: los lechos calibrados son los que se caracterizan por tener unas márgenes y una configuración estables, ya que la movilidad se reduce al fondo del canal, sin incidencia de la excavación o la sedimentación lateral. Parte de la cara se sedimenta en el fondo, y en él aparecen pequeñas ondulaciones en sentido transversal a la corriente, o sucesiones de bancos y surcos de mediano tamaño que se van moviendo con la corriente, muy similares a los que aparecen en las playas.

Luego están los lechos meandriformes que son aquellos que están controlados por la dinámica y la geometría de los meandros; los lechos trenzados o anastomosados, que se caracterizan porque dentro de ellos las aguas circulan en brazos elementales que recorren una vertiente y están separados entre sí por bancos emergidos (bancos aluviales). Son propios de las llanuras aluviales de los cursos bajos de los ríos y de los tramos donde la sedimentación es más importante que el transporte del material, y garantizan que la deposición de derrumbes no impedirá el avance de la corriente, ya que buscan rápidamente trayectorias secundarias cuando el lecho principal se colmata.

## Lechos torrenciales

Que combinan elementos morfológicos de los lechos de erosión y los móviles. Se caracterizan por su fuerte pendiente y por los ciclos de profundo estiaje y grandes crecidas, cuando se ponen en movimiento de forma generalizada todos los fragmentos. En la cabecera, los fragmentos evacuados son repuestos por otros que hasta el momento se encontraban en las laderas (sustitución de la carga). Su anchura es variable, y en su perfil longitudinal hay frecuentes rupturas de pendiente, todo ello según la naturaleza de la roca. Al final del recorrido se encuentran los conos de deyección, sobre los cuales aparecen lechos anastomosados.

## Perfil Longitudinal

Este tipo de concepto refleja gráficamente la capacidad erosiva de un río en sus partes principales (superior, media e inferior) a través del estudio de la pendiente del propio río. Indica la relación entre la distancia recorrida por un río desde su nacimiento y la altura relativa de cada punto de dicho perfil. Se mide sobre el thalweg de un río, es decir, sobre la línea que recorre los puntos más bajos del cauce de ese río o del fondo de cauces secos en el caso de torrenteras.

## Ribera

Sección de terreno comprendido entre nivel mínimo de las aguas y el área de protección de riberas crecientes ordinarias, esta área está comprendida dentro el cauce, en el caso de cauces temporales la ribera constituye la totalidad del cauce.

## Eje de cauce

Línea imaginaria que sigue la dirección predominante del flujo de agua, determinado por el Thalweg del cauce.

## Thalweg

Es la línea central de la corriente en la cual el cauce es más profundo y el flujo posee una mayor velocidad. Todas las corrientes naturales poseen un Thalweg. El Thalweg generalmente tiene una tendencia a divagar de un lado al otro lado del cauce y trata de tomar la línea exterior del cauce en las curvas.

## Sinuosidad

Es el índice que representa cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. Se mide por la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce, o Thalweg y la distancia en línea recta entre ellos. Un cauce en línea recta tiene una sinuosidad de 1.0, mientras que se describen los ríos como meándricos cuando la sinuosidad es mayor de 1.5.

## Erosión

Descenso general y progresivo del lecho y márgenes de un cauce como resultado de la erosión a largo plazo, generalmente son debidas a causas antrópicas.

## Erosión hidráulica

El movimiento del agua que circula por el cauce de una corriente de agua produce el desprendimiento y transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado.

En una cañada o río pueden ocurrir dos tipos de erosión general que afectan el cauce:

**1. Erosión lateral que amplía su ancho, aumentando la altura de los taludes.**

**2. Profundización del cauce.**

La erosión en ambos casos depende de las características geotécnicas de materiales del fondo y los taludes, su geometría, pendiente y características del flujo de agua.

## Sedimentación

Es el proceso por el cual el sedimento en movimiento se deposita. Un tipo común de sedimentación ocurre cuando el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo de un río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de agua, caracterizada por su caudal, tirante de agua, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión y otras moléculas en disolución. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que el material transportado se deposite o precipite; o el material existente en el fondo o márgenes del cauce sea erosionado, generalmente asociado a causas antrópicas.

## Nivel de aguas mínimas

Nivel bajo en el cual el cauce se encuentra permanentemente ocupado por el cuerpo de agua, en el caso de los cauces estacionales o temporales, el nivel de aguas mínimas corresponde al Thalweg del cauce.

## Nivel medio de aguas

Nivel promedio alcanzado por la superficie libre de los cuerpos de agua.

## Nivel promedio de máximos avenidas o crecidas ordinarias

Es el promedio de los niveles alcanzados por la superficie libre del cuerpo de agua, considerando todos aquellos niveles que superen el nivel medio de las aguas.

## Nivel de aguas máximas extraordinarias

Nivel que puede alcanzar un cuerpo de agua al transitar sobre él, la Avenida Máxima Extraordinaria, esta avenida se establece de acuerdo a la envergadura, importancia y potencial de daños materiales o personales, que podría originar el desborde del cuerpo de agua.

## Cono de deyección

También llamado cono o abanico aluvial, es una forma de modelado fluvial que en planta se caracteriza por tener una silueta cónica o en abanico y una suave pendiente. Este depósito o de aluviones se generan al final de los valles torrenciales, en las zonas de pie de monte, donde la pendiente de las laderas enlaza con una zona llana.

## Régimen hídrico

El régimen hídrico define el periodo durante el cual el río lleva agua en su cauce. Este dato resulta de gran importancia pues de él depende la disponibilidad de agua para la vegetación ribereña a lo largo del tiempo y,

en función de esta disponibilidad, se desarrollarán en las márgenes diferentes comunidades.

## Régimen hidráulico

El régimen hidráulico del tramo aporta información sobre la velocidad de escurrimiento, las posibilidades de una mayor o menor infiltración del agua en el suelo y la magnitud y frecuencia de las crecidas. Las crecidas a su vez tienen un efecto directo sobre la vegetación y sobre los usos que se pueden desarrollar en el valle, condicionados por la probabilidad de que el río se desborde y produzca daños sobre bienes y personas. Asimismo, las crecidas pueden condicionar el desarrollo de las formaciones vegetales.

## Línea de ribera

La línea de ribera marca la frontera entre la propiedad pública y la propiedad privada, es la línea de intersección entre la superficie del agua en su nivel para la crecida media ordinaria (y/o las más altas aguas en su estado normal) y la superficie de los terrenos aledaños al cauce.

## Franja de seguridad

Son zonas que se encuentran a ambos lados de los ríos que brindan seguridad y protección a la población, contribuyendo a la preservación de los recursos hídricos y favoreciendo la gestión ambiental e interrelación social.

## Eventos extremos

Considerado como un episodio, suceso o evento meteorológico que es raro, o infrecuente, según su distribución estadística.

## Amenazas

Es la probabilidad de un evento de origen natural, socio - natural o antrópico, se concrete y se produzca en un determinado tiempo o en una determinada región.

## Vulnerabilidades

Es la propensión o susceptibilidad de las comunidades, grupos, familias e individuos a sufrir daños o pérdidas vinculadas a las amenazas.

## Reducción del riesgo de desastres

Es un proceso que busca modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes y evitar nuevo riesgo en el territorio a través de “medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos.

## Gestión de riesgos

Es el proceso de planificación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, planes, programas, proyectos y acciones permanentes para la reducción de factores de riesgos de desastre en la sociedad y los sistemas de vida de la Madre Tierra; comprende también el manejo de las situaciones de desastre y/o emergencia, para posterior recuperación, rehabilitación y reconstrucción, con el propósito de contribuir a la seguridad,

bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo integral.

## Cambio Climático

Según la definición de la cumbre de los pueblos, es toda variación global perteneciente al clima del planeta. Se presenta por distintas causas; entre ellas naturales, por acción del ser humano y por factores energéticos. Por lo general se producen a ciertas escalas de tiempo difíciles de medir; pero se enlazan a distintos parámetros de todo el medio ambiente. Estos parámetros son: temperatura, precipitaciones, nubosidad.

## Adaptación al cambio climático

Es la capacidad de adoptar medidas prácticas para protegerse de los daños y perturbaciones probables generadas por el cambio climático y por la variabilidad climática.

## Resiliencia de los sistemas

Es la capacidad de un ecosistema de aguantar choques externos y reorganizarse mientras cambia, para poder retener esencialmente la misma función, estructura, identidad y mecanismos de retroalimentación.

## 5. ASPECTOS TÉCNICOS

### 5.1. Topografía

El objetivo de esta actividad es la generación de un Modelo Digital de Terreno (MDT), básicamente este proceso está compuesto por dos fases:

### 5.1.1. Georeferenciación

Consiste en la generación de una nube de puntos a partir de la mensura con equipos GPS geodésicos, añadiendo una corrección diferencial se obtiene una precisión milimétrica tanto en horizontal como vertical.

### 5.1.2. Levantamiento topográfico:

Esta etapa consiste en el levantamiento de la superficie física contigua a la lámina de agua y si es posible también al interior de esta, normalmente la técnica de levantamiento es la de nube de puntos, considerando los cambios de pendiente y/o accidentes naturales, se debe considerar que cada cierto tramo este levantamiento deberá estar acoplada a los puntos geodésicos generados para su corrección.

## 5.2. Hidrología

Como un insumo para la determinación de APRs en redes de drenaje, a partir de la definición de zonas de inundación se encuentra la Hidrología. Sin embargo, los estudios hidrológicos a partir de modelos engloban un sinnúmero de tipos, los cuales se van adecuando a diferentes variables como ser: La disponibilidad de datos, la resolución temporal y la resolución espacial y por último la experticia del personal para su uso.

El objetivo básico de todo estudio hidrológico es lograr un entendimiento adecuado del comportamiento del ciclo del agua en una determinada región. En el caso del diseño de obras civiles, se quiere analizar el comportamiento de esas obras para condiciones hidrológicas extremas (UNAL).

En general, para lograr su objetivo, un estudio hidrológico utiliza información existente con la cual trata de inferir el comportamiento de los diferentes flujos y almacenamiento en la zona de interés. Normalmente este proceso de inferencia concluye con la selección de un modelo o un conjunto de modelos hidrológicos, que se utilizarán para estimar las condiciones hidrológicas críticas que se requieren para el diseño y reducir la incertidumbre. Los modelos y los valores de caudal estimados serán tan buenos como la calidad de la información utilizada. Posterior a la identificación del tipo y la cantidad de información temporal y espacial disponible, se procesa dicha información y se buscan las metodologías aplicables para los objetivos específicos y de acuerdo con las características de la zona de estudio (UNAL, 1997).

En nuestro medio los modelos hidrológicos más difundidos son aquellos que tienen como base Temez, ya sea elaboradas en hojas de cálculo Excel o las ya programadas como ser el CHAC del CEDEX.

Actualmente el SDC vienen impulsando la formulación de planes directores en las cuencas de la regiones de mizque, zona andina y el eje metropolitano, en el marco de estos planes se pretende definir áreas de riesgo de inundación en base a modelos hidráulicos que considera información topografía e hidrológica, esto surge en función a que en todos los municipios no se tiene definidos estas áreas de riesgo, y por tal motivo se emplazan asentamiento de infraestructura pública y privada sin considerar posibles amenazas.

CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) aplicación informática desarrollada por el CEDEX para la estimación de recursos hídricos mediante modelos precipitación - aportación. Características técnicas: Sistema operativo Microsoft Windows.

## Pasos para un estudio hidrológico

- Recolección, selección y análisis de información (depende del modelo hidrológico).
- Estadística descriptiva de las series hidrometeorológicas.
- Modelación (misma que implica, calibración, validación y simulación)(dependiendo del modelo hidrológico elegido).

### 5.3. Coeficientes de rugosidad (Manning)

El comportamiento del agua de lluvia, en términos generales, puede ser descrito de la siguiente forma: Una parte se evapora, otra discurre por la superficie del suelo (escorrentía o escurrimiento) y otra penetra en el suelo y/o subsuelo (infiltración).

La relación existente entre la cantidad de agua que escurre por la superficie de un terreno y el total del caudal precipitado se llama ESCURRIMIENTO o ESCORRENTÍA.

El coeficiente de escorrentía es una función de factores como cobertura vegetal, permeabilidad, temperatura, duración e intensidad de la precipitación, área y forma de la cuenca, etc.

#### Antecedentes

En el año 1889, el ingeniero irlandés Robert Manning, presentó por primera vez la ecuación Institute of Civil Engineers de Irlanda.

La ecuación en principio fue dada en una forma complicada y luego simplificada a:

$$V = C * R^{2/3} * S^{1/2}$$

Dónde:

- V** es la velocidad media,
- C** el factor de resistencia al flujo
- R** el radio hidráulico
- S** la pendiente.

Esta fue modificada posteriormente por otros y expresada en unidades métricas como:

$$V = (1/n) * R^{2/3} * S^{1/2}$$

(siendo  $n$  el coeficiente de rugosidad Manning).

La ecuación de Manning es el resultado del proceso de un ajuste de curvas, y por tanto es completamente empírica en su naturaleza. Debido a su simplicidad de forma y a los resultados satisfactorios que arroja para aplicaciones prácticas, la fórmula Manning se ha hecho la más usada de todas las fórmulas de flujo uniforme para cálculos de escurrimiento.

#### Determinación del coeficiente de rugosidad Manning

Aplicando la fórmula Manning, la más grande dificultad reside en la determinación del coeficiente de rugosidad  $n$  pues no hay un método exacto de seleccionar un valor  $n$ . Para ingenieros veteranos, esto significa el ejercicio de un profundo juicio de ingeniería y experiencia; para novatos, puede ser no más de una adivinanza, y diferentes individuos obtendrán resultados diferentes.

Para calcular entonces el coeficiente de rugosidad  $n$  se dispone de tablas (como la publicada por el U.S Department of Agriculture en 1955; Chow, 1959) y una serie de fotografías que muestran valores típicos del coeficiente  $n$  para un determinado tipo de canal (Ramser, 1929 y Scobey, 1939).

## VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD $n$

(las cifras en negrilla son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de Canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Canales revestidos o desarmables			
A-1.			
Metal			
a. Superficies lisa de acero			
1. Sin pintar	0,011	<b>0,012</b>	0,014
2. Pintada	0,012	0,013	0,017
b. Corrugado	0,021	0,025	0,030
A-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0,010	0,011	0,013
2. Mortero	0,011	0,013	0,015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0,010	0,012	0,014
2. Cepillada, creosotada	0,011	0,012	0,015
3. Sin Cepillar	0,011	0,013	0,015
4. Láminas con listones	0,012	0,015	0,018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0,010	0,014	0,017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0,011	<b>0,013</b>	0,015
2. Terminado con llana de madera	0,013	0,015	0,016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0,015	0,017	0,020
4. Sin pulir	0,014	0,017	0,020
5. Lanzado, sección buena	0,016	0,019	0,023
6. Lazando, sección ondulada	0,018	0,022	0,025
7. Sobre roca bien excavada	0,017	0,020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0,022	0,027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de:			
1. Piedra labrada, en mortero	0,015	0,017	0,020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0,017	0,020	0,024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0,016	0,020	0,024
4. Mampostería de piedra cementada	0,020	0,025	0,030
5. Piedra Suelta o rip-rap	0,020	0,030	0,035
e. Fondo de gravas con lados de:			
1. Concreto encofrado	0,017	0,020	0,025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0,020	0,023	0,026
3. Piedra suelta o rip-rap	0,023	0,033	0,036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0,011	<b>0,013</b>	0,015
2. En mortero de Cemento	0,012	<b>0,015</b>	0,018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0,017	0,025	0,030
2. Piedra Suelta	0,023	0,032	0,035
h. Bloques de piedra labrados	0,013	0,015	0,017
i. Asfalto			
1. Liso	0,013	0,013	
2. Rugoso	0,016	0,016	
j. Revestimiento vegetal	0,030		0,500

## VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD $n$

(las cifras en negrilla son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de Canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>B. Excavado o dragado</b>			
<b>a. En tierra, recto y uniforme</b>			
1. Limpio, recientemente terminado	0,016	0,018	0,020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0,018	0,022	0,025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0,022	0,025	0,030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0,022	0,027	0,033
<b>b. En tierra, serpenteante y lento</b>			
1. Sin vegetación	0,023	0,025	0,030
2. Pastos, algunas malezas	0,025	0,030	0,033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0,030	0,035	0,040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0,028	0,03	0,035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0,025	0,035	0,040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0,030	0,04	0,050
<b>c. Excavado con pala o dragado</b>			
1. Sin vegetación	0,025	0,028	0,033
2. Matorrales ligeros en las bandas	0,035	0,050	0,060
<b>d. Cortes en roca</b>			
1. Lisos y uniformes	0,025	0,035	0,040
2. Afilados e irregulares	0,035	0,040	0,050
<b>e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar</b>			
1. Malezas densas, tan altas como la prof. de flujo	0,050	0,080	0,120
2. Fondo limpio matorrales en los lados	0,040	0,050	0,080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0,045	0,070	0,110
4. Matorrales denso, nivel alto	0,080	0,100	0,140
<b>C. Corrientes naturales</b>			
<b>C-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente &lt; 100 pies)</b>			
<b>a. Corrientes en planicies</b>			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0,025	0,030	0,033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0,030	0,035	0,040
3. Limpio, serpenteante, algunas pozos y bancos de arena	0,033	0,040	0,045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0,035	0,045	0,050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0,040	0,048	0,055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0,045	0,050	0,060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0,075	0,100	0,150

## VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD $n$

(las cifras en negrilla son los valores generalmente recomendados para el diseño)

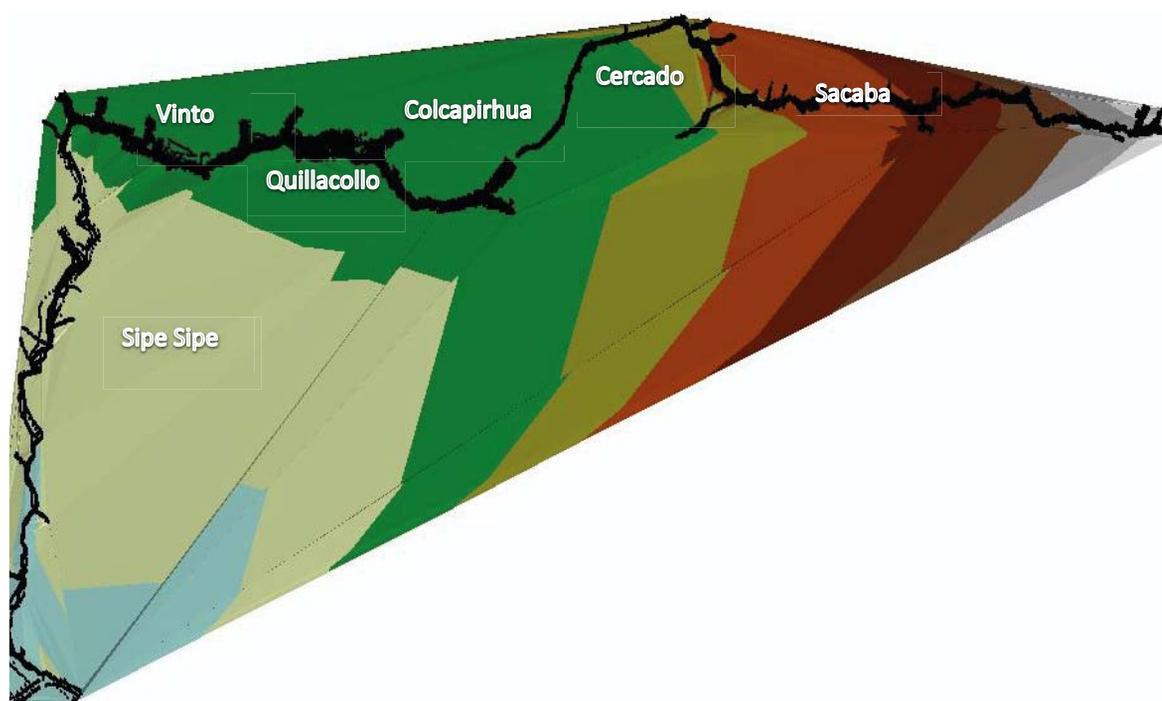
Tipo de Canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0,040	0,050	0,070
C-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. pasto corto	0,025	0,030	0,035
2. pasto alto	0,030	0,035	0,050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0,020	0,030	0,040
2. Cultivos en línea maduros	0,025	0,035	0,045
3. Campos de cultivo maduros	0,030	0,040	0,050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0,035	0,050	0,070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0,035	0,050	0,060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0,040	0,060	0,080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0,045	0,070	0,110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0,070	0,100	0,160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0,110	0,150	0,200
2. Terrenos limpio, con troncos sin retoños	0,030	0,040	0,050
3. Igual que el anterior, pero con gran cantidad de retoños	0,050	0,060	0,080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0,100	0,120	0,160
C-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de $n$ es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0,025		0,060
b. Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

## 5.4. Modelo Hidráulico

### 5.4.1 Modelo Hidráulico 1D

#### Elaboración del TIN

En base a la topografía debe generarse los datos de elevación del terreno en formato vectorial es decir el TIN que nos permitirá modelar inicialmente las superficies heterogéneas del terreno de forma prácticamente idéntica a la realidad del cauce.

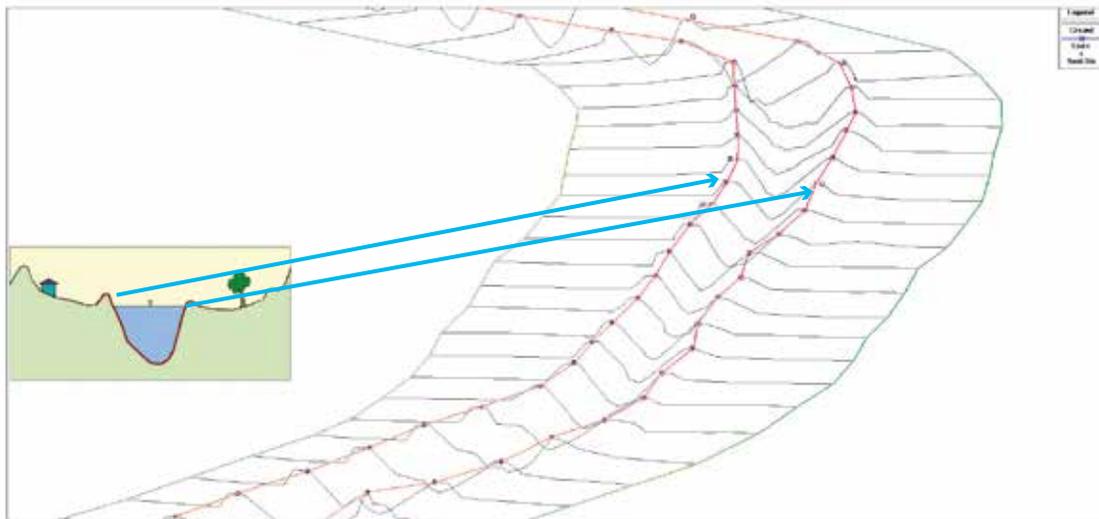


**Ilustración 1. Ejemplo de TIN del cauce del río Rocha desde Sacaba hasta Sipe Sipe**

TIN (Triangular Irregular Network; Red irregular de triángulos). Estructura de datos para la construcción de Modelos digitales del Terreno (MDT), basada en la modelización del relieve a partir de triángulos irregulares que unen los puntos de muestreo de partida (nodos). Generalmente, las estructuras TIN se calculan a partir del algoritmo de Delaunay, resultando una de las mejores formas que existen para representar y trabajar con formas irregulares como la superficie terrestre. Los modelos TIN tienen una enorme ventaja sobre las estructuras de datos raster porque permiten la incorporación de líneas de ruptura de las pendientes (como ríos, taludes, quebradas, etc.), lo cual da lugar a una mayor precisión en el cálculo.

Con el objetivo de determinar las planicies de inundación inicialmente se debe realizar el pre-proceso que consiste en obtener las características geométricas de los cauces a partir del TIN por medio de la aplicación de complementos disponibles en los ambientes de Auto Cad Civil 3D, ARC GIS y otros que exportan archivos de datos espaciales en extensión ".sdf" de la geometría de los cauces a través de las secciones transversales.

A continuación, se muestra un ejemplo del archivo de la Geometría importada en extensión ".sdf"



**Ilustración 2. Vista 3D de la geometría obtenida en el pre-proceso del cauce**

### Ecuaciones básicas de cálculo

La lámina de agua se obtiene de una sección a otra resolviendo la ecuación de la energía mediante un proceso de cálculo iterativo denominada "standard step method". La ecuación de la energía es la siguiente:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

### Ecuación 1

Donde,

Z1, Z2 = cota de la rasante del canal en las secciones (m)

Y1, Y2 = calado o tirante en las secciones (m)

V1, V2 = media de las velocidades, como la relación entre caudal total entre área mojada de la sección (m/s)

a1, a2 = coeficientes de mayoración de velocidad

g = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

he = pérdida de energía (m)

La ecuación y sus componentes pueden representarse gráficamente mediante la siguiente ilustración

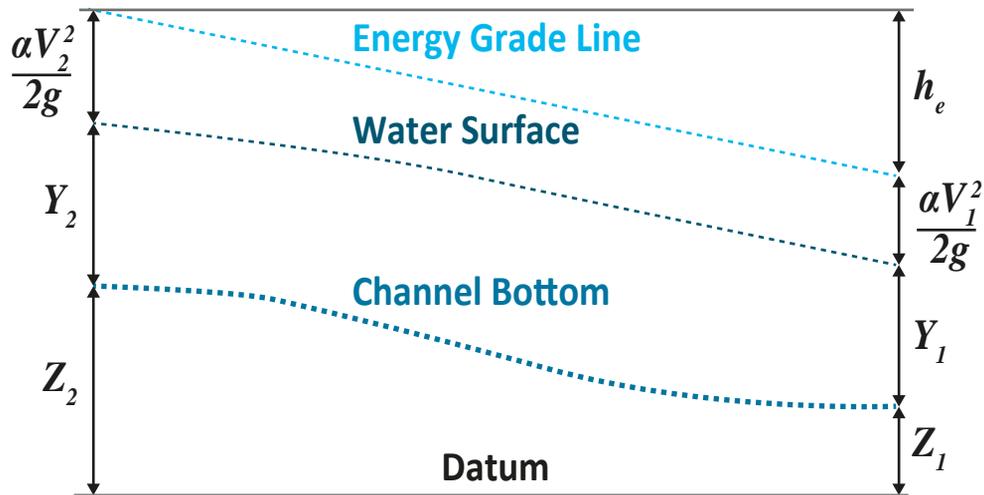


Ilustración 3. Representación de la ecuación de la energía

La pérdida de energía entre dos secciones se compone por pérdidas por fricción y pérdidas por contracción o expansión, conformando la siguiente ecuación de cálculo:

### Ecuación 2

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Donde,

L = distancia entre secciones, como media ponderada en base a caudales circulantes en canal, margen derecho y margen izquierdo (m)  
 $S_f$  = pendiente motriz o de fricción entre dos secciones (m/m)

C = coeficiente de pérdida por expansión o contracción

### Evaluación de las pérdidas por fricción

De la ecuación 2 se obtiene que el cálculo de las pérdidas por fricción se obtienen como producto de la distancia entre secciones y la pendiente motriz o de fricción.

Esta pendiente motriz o de fricción se calcula a partir de la ecuación de Manning mediante la expresión:

$$S_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

### Ecuación 3

Se evalúa esta pérdida por fricción entre secciones mediante la ecuación de la capacidad de transporte media:

$$S_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

### Ecuación 4

Donde,  
K1 y K2 = capacidad de transporte de cada sección o de la parte de la misma con la misma distribución de velocidades.

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

### Ecuación 5

Donde,  
n = coeficiente de rugosidad de Manning  
A = Área mojada (m<sup>2</sup>)  
R = radio hidráulico, obtenido como el cociente de área mojada entre perímetro mojado (m)  
Evaluación de las pérdidas por contracción y expansión  
La ecuación usada por HEC-RAS para determinar las pérdidas por contracción y expansión es la siguiente:

$$h_{ce} = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right|$$

### Ecuación 6

Donde,  
C = coeficiente de contracción y expansión  
Suponiendo contracción cuando el término cinético de la energía aumenta en el sentido del flujo, mientras que supone que se produce expansión al disminuir el término cinético en el sentido del flujo.

### Método computacional del programa HEC RAS

La obtención de la cota de lámina de agua desconocida en una sección se realiza mediante la resolución iterativa de la Ecuación 8 y Ecuación 2

- 1) El programa supone una cota de lámina de agua en la sección aguas arriba (o aguas abajo si el régimen de cálculo es supercrítico).
- 2) Basándose en esa cota de lámina de agua supuesta, determina las correspondientes capacidades de transporte y términos cinéticos.
- 3) Con estos valores obtenidos en el paso 2, calcula la pendiente motriz y resuelve la Ecuación dos.
- 4) Con los valores obtenidos en los pasos 2 y 3, resuelve la Ecuación 1 para la sección 2.
- 5) Compara la solución del paso 4 con la cota de lámina supuesta en el paso 1, repitiendo los pasos 1 a 5 hasta que la comparación arroje diferencias menores a 3mm.

El criterio de suposición de cota de lámina de agua cambia para cada iteración:

**1ª Iteración:** se proyecta el mismo tirante que la sección aguas arriba o abajo (en función si el régimen de cálculo es supercrítico o subcrítico).

**2ª Iteración:** se parte de la cota de lámina de agua asumida más un 70% del error resultante de la iteración primera.

**3ª Iteración y siguientes:** se emplea el método de "secantes", proyectando el ratio de las variaciones de las diferencias entre cotas asumidas y resultantes de las dos anteriores iteraciones.

### Limitaciones del Programa HEC RAS en Flujo Permanente

La computación de un modelo se realiza bajo las siguientes suposiciones:

- Flujo permanente
- Flujo Gradualmente Variado, excepto en estructuras como viaductos, culverts (bóvedas) y vertederos
- Flujo unidimensional
- Pendientes suaves, menores del 10%

Efectivamente, el límite de pendiente menor al 10% se debe al hecho que la ecuación de la energía se computa en realidad como una presión vertical de modo que:

$$H_p = d \cos\theta$$

#### Ecuación 7

Donde,  
 $H_p$  = presión vertical (m)  
 $d$  = tirante perpendicular al fondo del canal (m)  
 $\theta$  = pendiente del canal en grados

Así, para un canal con pendiente inferior al 10% ( $5.71^\circ$ ) el  $\cos(\theta)$  es 0.995 con lo que la energía vertical es casi igual al calado o tirante (su error es de apenas el 0.5%). En cambio, para pendiente mayores esos valores de  $\cos(\theta)$  disminuyen, con lo que se debe dividir el calado o tirante resultante del modelo por ese valor de  $\cos(\theta)$  para obtener el calado o tirante real.

Slope	Degrees	Cos ( $\theta$ )
1:10	5.71	0.995
2:10	11.31	0.981
3:10	16.70	0.958
4:10	21.80	0.929
5:10	26.57	0.894

### Post-Proceso

El Post proceso consiste específicamente en la interpretación espacial de los resultados obtenidos en el modelo hidráulico, es decir el Hec Ras realiza todo el cálculo hidráulico a partir de los datos introducidos de topografía e hidrología, pero para realizar el mapeo de las áreas de inundación o la distribución de velocidades que son resultados del modelo y ser visualizados es prudente usar otros software's como el ArcGIS o AutoCAD u otro software que tenga similares herramientas de importación de archivos con extensión \*.sdf.

#### 5.4.2. Modelo Hidráulico 2D

La modelación (simulación) hidrodinámica y fluviomorfológica en dos dimensiones simula la superficie libre de medios continuos de

geometría irregular (ríos, canales, pequeños embalses) en condiciones de flujo permanente o no permanente donde son inherentes los procesos de flujo helicoidal, reflujo, transporte de sedimentos, migración de meandros entre otros.

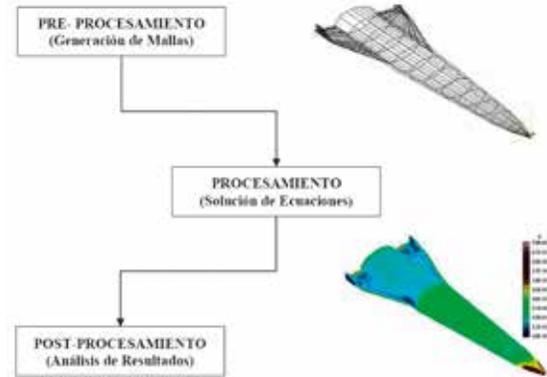
La Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) es un procedimiento numérico que permite simular el comportamiento hidrodinámico, procesos de transporte de sedimentos, erosión lateral de riberas entre algunos otros procesos en medios continuos con el uso de ordenadores. Este procedimiento al no emprender simplificaciones respecto a la geometría, las ecuaciones de flujo (Navier-Stokes) y también prescindir de parámetros empíricos, proporciona resultados más cercanos al comportamiento real de los medios continuos que los procedimientos numéricos convencionales (modelos unidimensionales).

Las etapas abordadas en un análisis por la dinámica de fluidos computacional conllevan:

- *Pre-procesamiento: Etapa donde el medio continuo es discretizado en una red de celdas en las cuales tendrá efecto la simulación numérica.*
- *Procesamiento (modelación numérica): Etapa medular donde tiene efecto la simulación numérica del modelo implementado.*
- *Post Procesamiento (análisis y presentación resultados)*

En la siguiente figura se ilustra el proceso que conlleva una modelación en dos dimensiones.

**Figura 1. Etapas para una simulación hidrodinámica**



### El Pre-procesamiento

Es la etapa inicial del proceso de simulación DFC, donde se desarrolla la malla del medio continuo que se representa por un conjunto de puntos que cubren el dominio del medio continuo a estudiar y donde se efectivizará la solución discreta de las ecuaciones del modelo matemático.

La etapa siguiente es el **Procesamiento** la cual está destinada a efectivizar la solución discreta de las ecuaciones del modelo matemático sobre la red de puntos desarrollada, para tal efecto es necesario de una etapa intermedia donde las ecuaciones diferenciales del modelo matemático sean simplificadas en otras algebraicas caracterizadas por su sencillez.

Finalmente, se encuentra la etapa de **Post-Procesamiento** destinada a la presentación y análisis de los resultados de la simulación. Para alcanzar ese objetivo se prescinde de representaciones gráficas que

permitan visualizar la variación de las variables en su magnitud y dirección en el medio continuo.

Para la simulación hidrodinámica es necesaria la utilización de modelos numéricos computacionales, la existencia de software de modelación es variada dentro de los más recomendados y con los que se ha trabajado están:

- *BASEMENT (gratis) es un modelo numérico Pseudo-Tridimensional desarrollado por el Laboratorio de Hidráulica, Hidrología y Glaciología del Instituto Tecnológico de Zurich el cual simula el comportamiento hidrodinámico y el transporte de sedimentos de medios continuos a superficie libre.*

- *CCHE2D (comercial) es un modelo numérico Pseudo-Tridimensional desarrollado por la Universidad de Mississippi el cual simula el comportamiento hidrodinámico y el transporte de sedimentos de medios continuos a superficie libre.*

Las etapas para el análisis de simulación, para el distinto software son las mismas que fueron descritas con anterioridad.

estudios hidrológicos, estudio de suelos y coeficientes de rugosidad del lecho de los cauces, estos parámetros requieren una cierta precisión que son detallados en acápite anteriores.

En la etapa de **Pre-procesamiento** se realizan los trabajos de elaboración de mallas (triangulares, cuadradas, etc.), como también la elaboración del modelo de elevación digital en base a la topografía realizada, como se muestran en las siguientes imágenes.

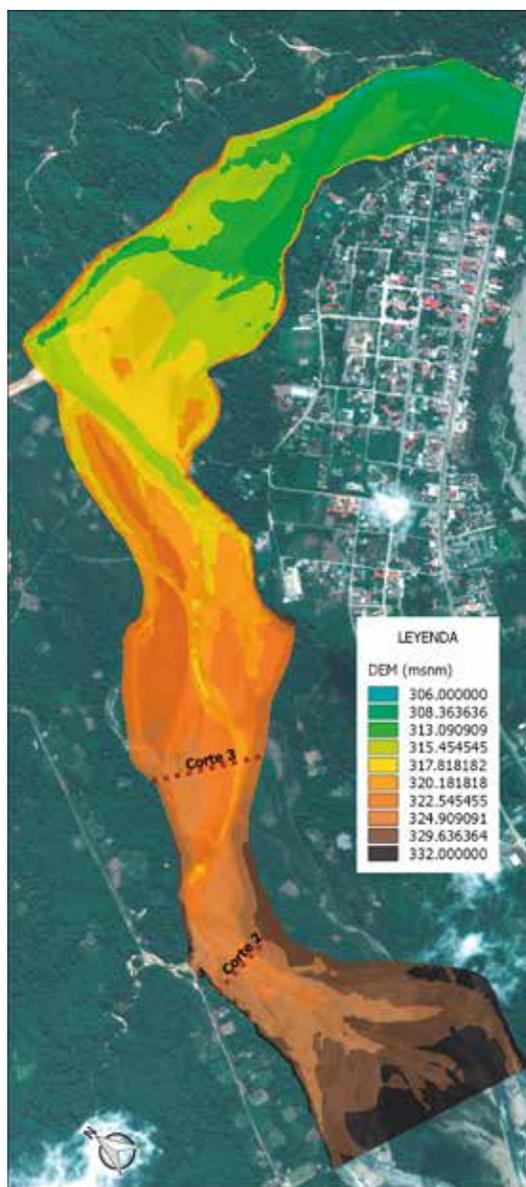
La implementación del modelo hidrodinámico contempla la generación de la malla de celdas o medio discretizado, en la cual se atribuyeron la información relativa a la elevación, condiciones de borde hidrodinámicas y otros parámetros que conciernen a la estabilidad y desarrollo de la convergencia de los resultados. Esta información requerida proviene de los estudios topográficos,

Figura 2. GENERACIÓN DE MALLAS EN CAUCES



Fuente: SDC-UCT, Proyecto "Acondicionamiento hidráulico de emergencia en el río Espíritu Santo, Villa Tunari".

Figura 3. GENERACIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN



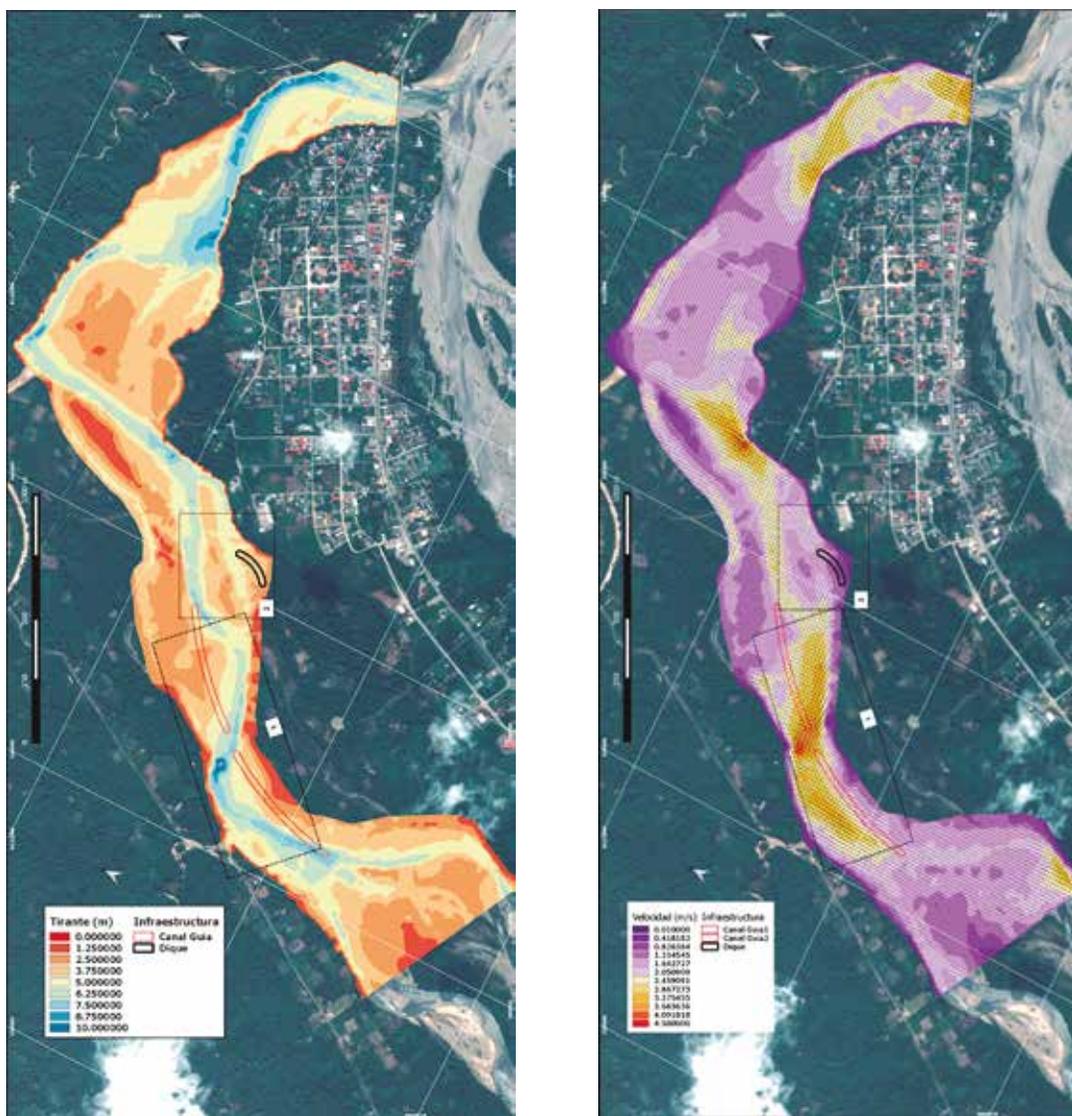
Para la etapa de procesamiento se requieren establecer las condiciones de borde hidráulico, parámetros físicos y adimensionales y el establecimiento del modelo de turbulencia. La descripción de las consideraciones respecto a estos tópicos se presenta a continuación:

- *Parámetros físicos, consisten en la implementación de datos como la resistencia al flujo del lecho del río en base al coeficiente de Manning, constantes físicas como la gravedad, viscosidad cinemática del agua, etc.*
- *Condiciones de borde hidrodinámico conforman el ingreso del escurrimiento que transcurre en el medio continuo a través de la sección por donde emerge el agua (aguas arriba) y el tirante de aguas abajo en la sección donde desaloja el flujo. Esto en base a la hidrología.*
- *Escenarios hipotéticos de simulación, se estudian escenarios de modelación en condiciones naturales y condiciones con intervención.*
- *Calibración del modelo, esto se constata en base al caudal base del río con imágenes satelitales y visitas de campo a la zona de estudio.*

En la etapa de **Post-Procesamiento** se destinada a la presentación y análisis de los resultados de la simulación hidrodinámica de cauces en condiciones naturales y con intervención con escurrimientos de recurrencia indicado en el estudio hidrológico,

la presentación y visualización de los resultados pueden ser presentados en los software's como el ArcGIS y QGIS, dentro de los resultados imprescindibles son: áreas de anegación, vectores de velocidad, tirantes de agua y esfuerzos de corte. Como se aprecian en las siguientes imágenes.

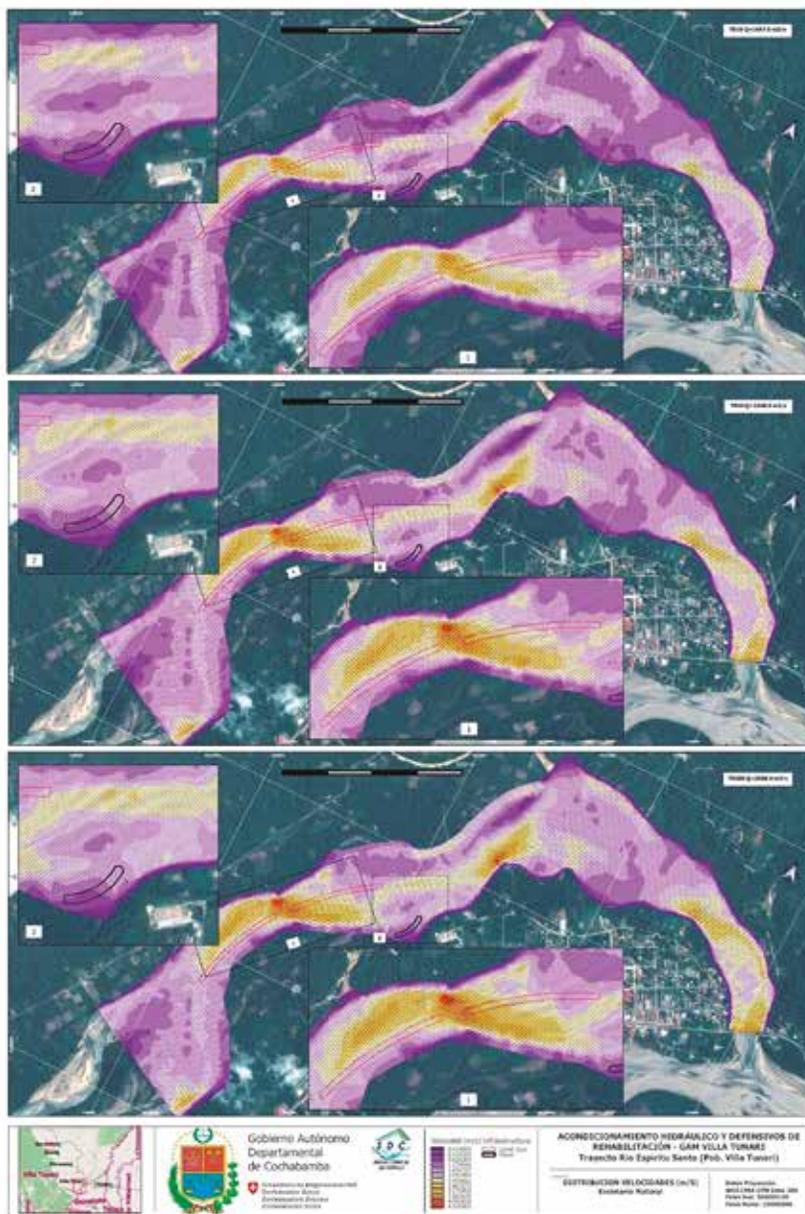
Figura 4. RESULTADOS DE MODELACIÓN HIDRODINÁMICA tirantes y velocidades de flujo



Fuente: SDC-UCT, Proyecto "Acondicionamiento hidráulico de emergencia en el río Espiritu Santo, Villa Tunari".



Figura 6. Mapeo de RESULTADOS DE MODELACIÓN HIDRODINÁMICA



Fuente: SDC-UCT, Proyecto "Acondicionamiento hidráulico de emergencia en el río Espiritu Santo, Villa Tunarí".

## 5.6. Áreas de Protección de Riberas (APRs)

Las APRs, son zonas adyacentes de amortiguamiento a la torrentera que brindan seguridad y protección, en épocas de lluvias no solo a la población, también a la producción agropecuaria, contribuyendo a la preservación de los recursos hídricos, favoreciendo espacios de beneficio social.

## 5.7. Período de retorno (Tr)

Se define como el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de magnitud, puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio (M. Villón, 2002).

El cálculo del periodo de retorno es determinado por los eventos máximos de precipitación, el mismo se requiere para el dimensionamiento de una obra hidráulica en un cauce de río y para determinar el área de protección de ribera.

Para establecer la probabilidad de que un evento ocurra al menos una vez en N años, primero se debe calcular su complemento, o sea, la situación en la que ningún evento con un periodo de recurrencia  $T_r$  años ocurra en N años.

Para ello debemos calcular la probabilidad de ocurrencia de una secuencia de N "fallas" sucesivas, es decir:

Éxito  $X \geq xT$  probabilidad =  $p$   
Falla  $X < xT$  probabilidad =  $1-p$

## 5.8. Período de retorno (T)

Período de retorno es uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a soportar avenidas, como por ejemplo: el vertedero de una presa, los diques para control de inundaciones; o una obra que requiera cruzar un río o arroyo con seguridad, como puede ser un puente.

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los n registros.

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ( $P_{m\acute{a}x}$  o  $Q_{m\acute{a}x}$  en su caso) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor, como se muestra en el Cuadro 1. Con base en las siguientes relaciones:

$$T = (n+1)/m$$

y

$$P = m/(n+1)$$

$T$  = Período de retorno (años).  
 $n$  = Número de años de registro.  
 $m$  = Número de orden.  
 $P$  = Probabilidad.

**Cuadro 1. Ejemplo de cálculo de Períodos de Retorno para eventos máximos anuales de lluvia**

Fecha	Lluvia (mm)	Lluvia ordenada (mm)	Número de orden (m)	Periodo de retorno (T años)	Probabilidad (P%)
1992	51	80	1	17.0	5.88
1993	40	54	2	8.5	11.77
1994	29	51	3	5.7	17.65
1995	40	50	4	4.3	23.53
1996	40	50	5	3.4	29.41
1997	50	45	6	2.8	35.29
1998	54	44.5	7	2.4	41.18
1999	40	40	8	2.1	47.06
2000	40	40	9	1.9	52.94
2001	40	40	10	1.7	58.82
2002	44.5	40	11	1.5	64.71
2003	50	40	12	1.4	70.59
2004	45	40	13	1.3	76.47
2005	33	35	14	1.2	82.35
2006	80	33	15	1.1	88.24
2007	35	29	16	1.1	94.12

El período de retorno para el que debe usarse para realizar el modelo hidráulico varía en función de la importancia de la misma (interés económico, socio-económico, estratégico, turístico).

Para la selección del período de retorno, podría emplearse el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Períodos de retorno para diferentes categorías**

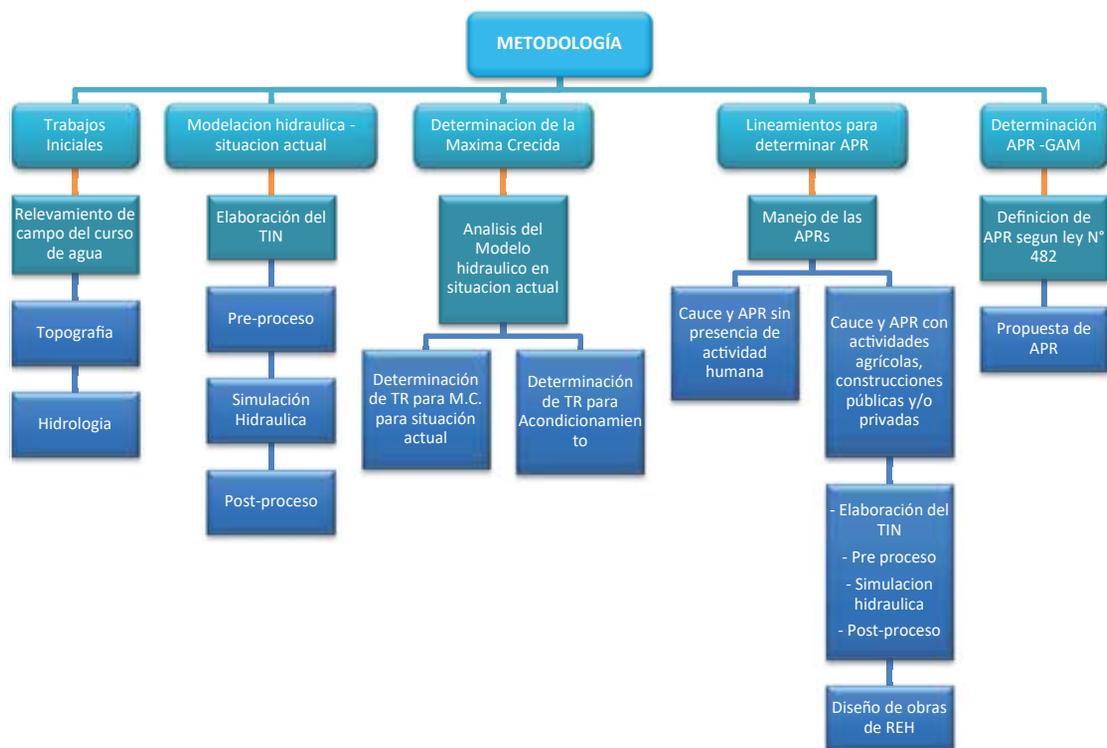
CATEGORÍA	Periodo de retorno recomendado para el modelo hidráulico
Categoría a: Ribera de río agrícola a proteger, con deficiente información hidrológica (pocos datos de precipitación y mala calibración de modelo hidrológico)	100v- 200
Categoría b: Ribera de río agrícola a proteger, con buena información hidrológica (registro completo de datos de precipitación y buena calibración de modelo hidrológico)	75 - 100
Categoría c: Ribera de río urbano a proteger, con deficiente información hidrológica (pocos datos de precipitación y mala calibración de modelo hidrológico)	50 - 75
Categoría d: Ribera de río urbano a proteger, con buena información hidrológica (registro completo de datos de precipitación y buena calibración de modelo hidrológico)	25 - 50

## 6. METODOLOGÍA DE LA PROPUESTA TÉCNICA

En base a una detallada revisión de los métodos existentes en relación con el análisis y cartografía de riesgos de inundaciones, se muestra en el presente estudio una metodología, basada en criterios topográficos, hidrológicos e hidráulicos, que permite determinar las áreas de inundaciones que permiten determinar la máxima crecida bajo

modelos hidráulicos, a partir de la representación de la superficie del terreno, caudales a partir de una hidrología, rugosidad y parámetros dinámicos de flujo.

Figura 7. Metodología de la propuesta



## 6.1. Trabajos iniciales

Como trabajos iniciales se deberá rescatar toda la información existente como también generar información primaria en base a trabajos de campo y de gabinete.

### 6.1.1. Identificación (tipificación) del curso de agua en estudio

Como parte del trabajo inicial para la determinación de máximas crecidas y las áreas

de protección de ribera del curso de agua en estudio, se deberá realizar un relevamiento de campo detallado con los siguientes insumos:

- GPS
- Distanciómetro
- Imagen Satelital actual (DRON o IKONOS de una resolución máxima de 50X50 cm)

El objetivo inicial de este relevamiento, es la identificación detallada de la situación actual del curso de agua, con la toma de puntos e identificación de tramos donde existiesen asentamientos urbanos en cercanías del curso, tramo donde existiese uso de suelo agrícola, obras civiles, obras hidráulicas transversales y longitudinales y por último puntos de avasallamiento del cauce con algún tipo de infraestructura privada.

Dentro de esta tipificación de cauces y riberas se deberán rescatar los siguientes componentes:

#### a. Características intrínsecas del cauce y ribera

**Régimen hídrico**, define el periodo durante el cual el río lleva agua en su cauce pudiendo ser estas:

- *Permanente, son aquellos que transportan agua durante todo el año, pudiendo tener déficit hídrico los años secos siempre que la capa freática se encuentre a escasa profundidad. Estos ríos presentan una vegetación de ribera muy exigente en agua y con elevada capacidad de soportar el encharcamiento en sus raíces.*
- *Intermitente, los ríos se caracterizan por que durante las épocas secas el flujo desaparece.*
- *Efímero, los ríos se caracterizan por que solo tienen flujo en el momento de las lluvias.*

**Régimen hidráulico**, del tramo aporta información sobre la velocidad de desagüe, las posibilidades de una mayor o menor infiltración del agua en el suelo y la magnitud y frecuencia de las crecidas. Las crecidas a su vez tienen un efecto sobre los usos que se pueden desarrollar en el valle, condicionados por la probabilidad de que el río se desborde y produzca daños sobre bienes y personas. El parámetro que mejor define el régimen hidráulico es la pendiente longitudinal, pudiéndose clasificar los tramos fluviales en cuatro tipos:

- *Tranquilos, tienen una pendiente longitudinal baja (0-0,2%). Corresponde a ríos con baja velocidad y escasa turbulencia que cuando se desbordan generan una inundación sin mucha velocidad. Asimismo, se pueden producir sedimentaciones con aportes de finos y mayor presencia de suelos limosos y arcillosos, y cambios en los nutrientes o elementos en suspensión que son reducidos por el agua y una menor cantidad de oxígeno disuelto.*
- *Rápidos, tienen pendiente longitudinal media (0,2-1,5%) con velocidades elevadas en las crecidas extraordinarias, pudiendo causar grandes pérdidas materiales y humanas cuando forman parte del tramo bajo de las cuencas torrenciales o en valles cerrados con elevada actividad urbana o agraria.*
- *Torrenciales, tienen pendiente alta (1,5-6,0%) que corresponden al tramo de transporte de las cuencas*

*torrenciales. La magnitud y la frecuencia de las crecidas ordinarias determinan la dominancia de los arbustos. Las crecidas extraordinarias son muy peligrosas por la elevada capacidad erosiva y de arrastre.*

*- Torrentes, tienen pendiente muy alta (> 6,0%) que suelen formar parte de los tramos altos de las cuencas torrenciales. Presentan una elevada capacidad de transporte sólido en sus crecidas.*

**Vegetación potencial**, corresponde con aquella que se desarrollaría de forma natural en las riberas sin la intervención humana. Es un dato que nos sirve para conocer el grado de regresión de la vegetación actual en las riberas.

Estas se componen de tres formaciones:

- Herbáceas
- Arbustivas
- Arbóreas

## **b. Influencias de las actividades humanas**

La degradación de las riberas está originada por la actividad humana, pues las perturbaciones provocadas por causas naturales forman parte de la dinámica del ecosistema. La degradación puede deberse a acciones sobre las márgenes (afección local) o a cambios en el propio régimen hídrico del tramo (afección funcional).

Los usos que se desarrollan en las márgenes son los principales agentes implicados en el estado de conservación de las riberas cuando el río no ha perdido su funcionalidad.

Estos se han agrupado en cuatro grandes grupos: uso urbano, uso agrícola, uso ganadero y uso forestal. Existen otros tipos de actividades que afectan a las riberas como extracción de áridos, presencia de vertederos, escombros, etc.

- *Uso urbano, la urbanización ocupa en ocasiones las zonas inundables, perdiendo el río parte de su superficie. Esta disminución de la lámina de agua genera una ineficiencia hidráulica, especialmente para la circulación de las avenidas extraordinarias, obligando a crear infraestructuras hidráulicas capaces de transportar los caudales de avenidas en el mínimo espacio posible. Dichas infraestructuras, debido a las limitaciones espaciales generadas, presentan diseños que excluyen la vegetación y especialmente la vegetación leñosa por la disminución de la capacidad hidráulica que lleva asociada. Otro proceso similar genera la concentración de las infraestructuras viales en las márgenes curso de agua, que reducen el espacio de los ríos especialmente en la periferia de las aglomeraciones urbanas. Éstas, además de reducir al río actúan a modo de barrera que impide el acceso al mismo.*

- *Agricultura, la agricultura es uno los más importantes factores de degradación de las riberas en extensión superficial, ya que desde tiempo inmemorial la agricultura se ha localizado principalmente en las zonas adyacentes a los cauces al presentar una orografía suave, una mayor humedad o posibilidad de regar y mejor calidad del suelo. La primera consecuencia directa de la ocupación de los terrenos colindantes a la ribera es la*

*deforestación de la vegetación, lo que provoca un incremento de la erosión en las márgenes y la alteración de la geomorfología del cauce. En otros casos, los cultivos se desarrollan en la llanura de inundación. Aunque a inicialmente esto no causará la degradación de la ribera, los daños por inundación pueden finalizar con la construcción de obras de defensa e incluso la canalización del cauce.*

- *Ganadería, en muchas de nuestras zonas áridas la vegetación de ribera es el único alimento disponible del ganado durante el bochorno, lo que provoca un sobrepastoreo con pérdida de cobertura vegetal y la disminución de biodiversidad. La compactación del suelo debida al pisoteo es otra alteración importante, ya que reduce la infiltración de agua y por consiguiente, aumenta el flujo superficial.*
- *Forestal, comprende los espacios cubiertos de especies arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, de origen natural o procedente de siembra o plantación.*

Deberá de generarse un mapeo de la situación actual del curso de agua en estudio con los datos de campo plasmado en una imagen satelital de alta resolución, este es un insumo importante para reflejar los escenarios para los posteriores estudios y para la toma de decisiones posteriores respecto a las áreas de protección de ribera.

Además, este relevamiento servirá para demarcar el área del levantamiento topográfico del cauce y áreas adyacentes a ser realizado posteriormente.

### 6.1.2. Topografía

Como parte importante del estudio este se subdivide en dos etapas de trabajo de campo y de gabinete.

Para la representación geográfica espacial del cauce del río en estudio se deberá realizar el levantamiento topográfico en el cauce principal, considerando todos sus afluentes y áreas adyacentes para las llanuras de inundación, las secciones transversales de levantamiento deberán ser cada quince a veinte metros con un ancho de franja de levantamiento de seiscientos metros o dependiendo de la zona o criterio técnico, es decir como parámetro inicial deberá ser como mínimo trescientos metros a cada lado del eje del cauce.



Fotografía 7. Levantamiento Topográfico de cauce (río Rocha).



Fotografía 8. Levantamiento Topográfico de taludes y áreas de inundación (río Rocha).

El levantamiento topográfico se realizará sobre el cauce, taludes y en las planicies de inundación en el tramo definido con anterioridad, se deberá realizar el levantamiento con mayor detalle a las obras civiles existentes y taludes para su correcta modelación hidráulica. Deberá de monumentarse BM's (Bancos de Nivel Vertical) a lo largo del cauce de estudio. Además, deberá de geo referenciarse como se indica en el punto 5.1.

Una vez concluido con el trabajo de campo se deberá realizar el procesamiento de datos para la generación del Modelo Digital de Elevación (DEM) para proceder con la modelación hidrodinámica.

### 6.1.3. Hidrología

Para determinar los caudales de transito se deberá realizar el estudio hidrológico de la cuenca del río en estudio.

A continuación, se describe las fases del estudio hidrológico.

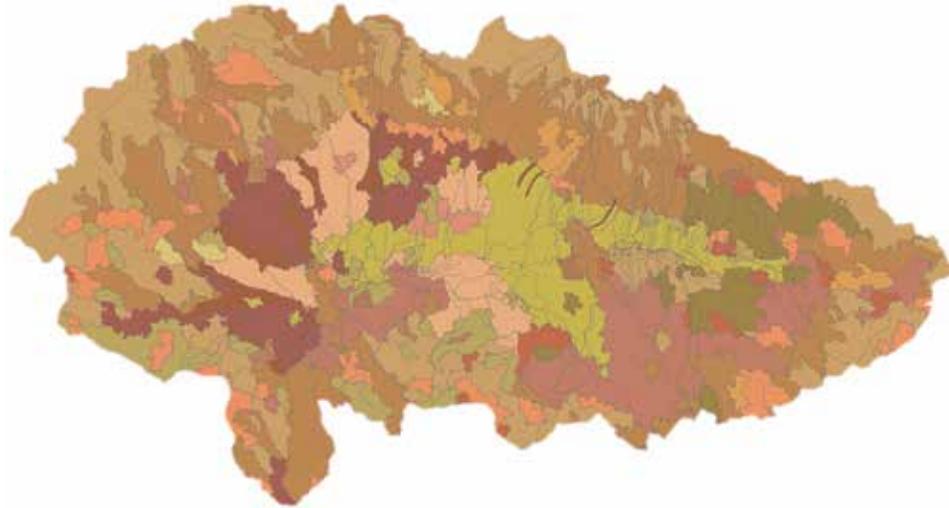
#### a. Fase inicial

En esta primera fase se realizará la recopilación de toda la información necesaria para el estudio. Para llevar a cabo esto se siguió los siguientes pasos:

- *Identificación de la cuenca y de las subcuencas.*
- *Obtención de registros de las estaciones pluviométricas (información de precipitación total mensual y precipitación máxima de 24 horas) cercanas a la cuenca y dentro de la cuenca. Información proveniente del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).*
- *Recopilación de información biofísica, topográfica con apoyo de imágenes satelitales.*

El objetivo es el de contar con una hidrología integral del sector de estudio.

Como ejemplo se ilustra imágenes del estudio hidrológico realizado en la cuenca del río Rocha.

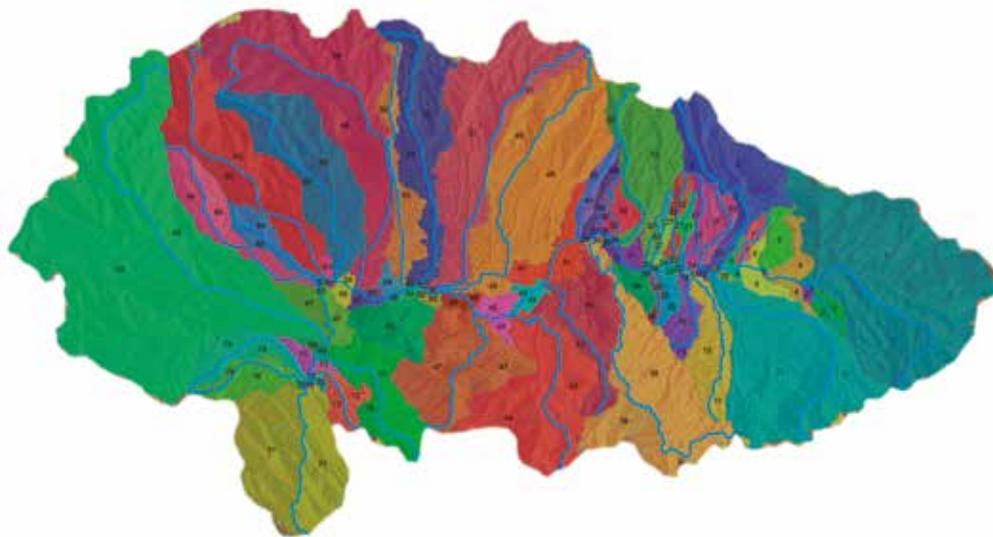


**Ilustración 4. Uso de Suelo de la Cuenca del río Rocha**

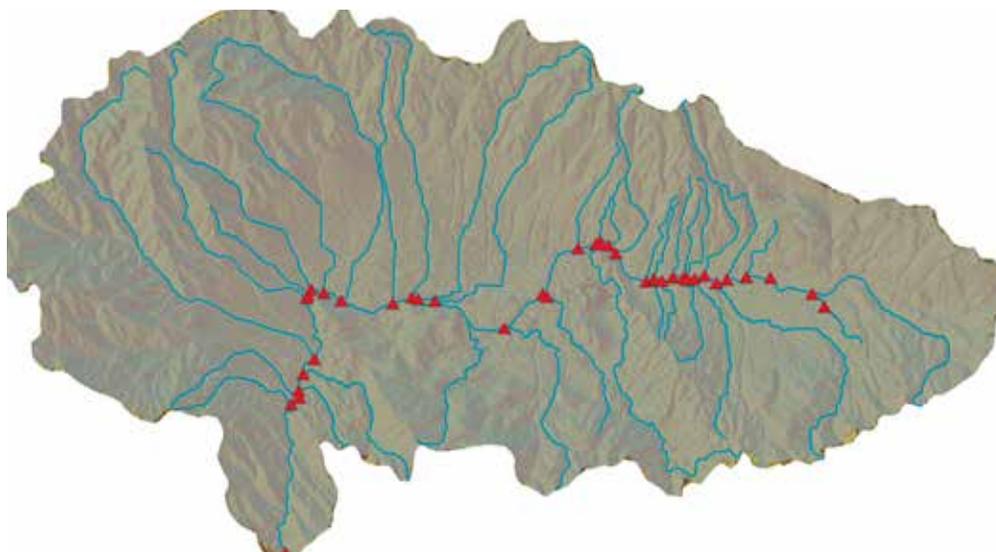


**Ilustración 5. Pendientes de la Cuenca del río Rocha**

Como ejemplo se ilustra imágenes del estudio hidrológico realizado en la cuenca del río Rocha.



**Ilustración 6. Subcuencas de la cuenca del río Rocha y Red de drenaje**



**Ilustración 7. Confluencias principales de la cuenca del río Rocha**

Una vez recopilada toda la información necesaria se inicia su análisis de la manera descrita a continuación:

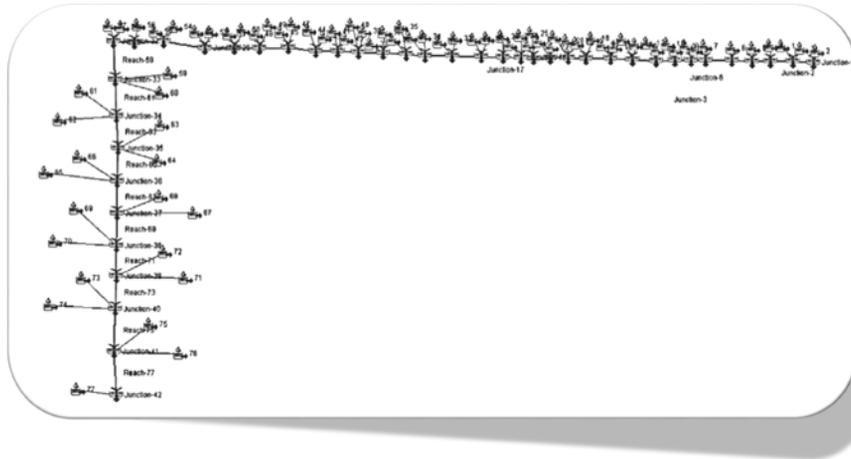
- *Precipitación total mensual.*
- *Detección de datos dudosos, a través de procedimientos gráficos y analíticos.*
- *Identificación de los periodos de datos faltantes en cada estación y sus respectivas estaciones índice.*
- *Análisis de consistencia de datos por medio de la comparación doblemente acumulada.*
- *Relleno de datos por medio de regresiones lineales múltiples a nivel mensual.*
- *Información precipitación máxima mensual.*
- *Detección de datos dudosos, a través de procedimientos gráficos y analíticos.*
- *Cálculo de la precipitación media anual de la cuenca por medio del método de los polígonos de Thiessen.*
- *Cálculo de curvas de variación estacional para cada estación y para la cuenca completa.*
- *Análisis de Máximas avenidas.*
- *Determinación de curvas Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) para cada estación considerada en el estudio.*
- *Elaboración de las tormentas de diseño en las diferentes estaciones para distintos periodos de retorno (2, 10, 20, 50, 100, 200).*
- *Modelación de la cuenca con el modelo HEC-HMS.*
- *Determinación de las subcuencas, para la modelación de los puntos de interés.*
- *División de subcuencas para la modelación hidráulica de todos los puntos de confluencia.*
- *Determinación de los parámetros requeridos por el modelo para las nuevas subcuencas.*
- *Generación de caudales en cada uno de las confluencias.*
- *En función a todo el proceso realizado también se recomienda realizar el incremento en porcentaje de las precipitaciones para simular la incidencia de los efectos del cambio climático.*

## **b. Fase de procesamiento**

Con todos los registros procesados, es decir, las estaciones con los datos rellenados y la información de precipitaciones máximas para 24 horas se procede de la siguiente manera:

- *Precipitación total mensual.*
- *Determinación de los polígonos de Thiessen.*

**Figura 8. Representación del Modelo Hidrológico de la cuenca del río Rocha en software Hec HMS del US Army Corps of Engineers (USACE).**



## 6.2. Modelación Hidráulica situación actual

El alcance de este estudio se enmarca en la simulación del comportamiento hidrodinámico del cauce en análisis en condiciones naturales (situación actual) empleando modelos numéricos unidimensionales o bidimensionales, de tal forma de crear los fenómenos asociados a la complejidad del cauce.

Para la determinación de máximas crecidas de un río se recomienda la utilización de un modelo unidimensional ya que un modelo bidimensional es aún muy complejo, los pasos a seguir para realizar esta simulación son los siguientes:

- *Elaboración del TIN*
- *Pre-Procesamiento*

- *Simulación hidráulica (procesamiento)*
- *Post-procesamiento*

El objetivo inicial de este estudio de simulación es la de generar datos e insumos para la toma de decisiones en cuanto a las áreas de protección de ribera y el acondicionamiento hidráulico del cauce a futuro.

El análisis hidráulico permite determinar:

- *Capacidad hidráulica máxima*
- *Tirantes de agua para diferentes caudales*
- *Velocidades de flujo para diferentes caudales*
- *Llanuras de inundación*
- *Otros parámetros hidráulicos*

Para avenidas extremas con diferentes períodos de retorno, de manera se visualice el comportamiento del flujo de acuerdo a las características morfológicas del cauce.

La existencia de programas de modelación hidráulica en 1D es variada, entre los cuales están: HEC-RAS, MIKE11, SOBEK, ISIS Flow, etc. Pero el que destaca más es el modelo HEC-RAS ya que este modelo ha ido evolucionando con el tiempo y aumentando sus capacidades, el modelo que más se emplea a nivel Nacional es este mismo por lo que se recomienda su utilización para cauces rectilíneos y/o sinuosos.

### 6.2.1. Elaboración del TIN

En base a la topografía debe generarse los datos de elevación del terreno en formato vectorial es decir el TIN que nos permitirá modelar inicialmente las superficies heterogéneas del terreno de forma prácticamente idéntica a la realidad del cauce, Como se ilustra en el punto 5.4.1. Este TIN pueden generarse en los software de extensiones GIS o el Auto Cad Civil 3D.

### 6.2.2. Pre-proceso

Con el objetivo de determinar las planicies de inundación con la implementación del software HEC-RAS, inicialmente se debe realizar el pre-proceso que consiste en obtener las características geométricas de los cauces a partir del TIN por medio de la aplicación de complementos disponibles en los ambientes de Auto Cad Civil 3D, ARC GIS y otros que exportan archivos de datos espaciales en

extensión “.sdf” de la geometría de los cauces a través de las secciones transversales.

TIN (Triangular Irregular Network; Red irregular de triángulos). Estructura de datos para la construcción de Modelos digitales del Terreno (MDT), basada en la modelización del relieve a partir de triángulos irregulares que unen los puntos de muestreo de partida (nodos). Generalmente, las estructuras TIN se calculan a partir del algoritmo de Delaunay, resultando una de las mejores formas que existen para representar y trabajar con formas irregulares como la superficie terrestre. Los modelos TIN tienen una enorme ventaja sobre las estructuras de datos raster porque permiten la incorporación de líneas de ruptura de las pendientes (como ríos, taludes, quebradas, etc.), lo cual da lugar a una mayor precisión en el cálculo.

Programa computacional unidimensional de distribución libre y gratuita que permite realizar los modelos hidráulicos de flujo de agua a través de los cauces que fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Departamento de Defensa del Ejército de los EE.UU. para la gestión de los ríos, puertos y otras obras públicas bajo su jurisdicción; se ha encontrado una amplia aceptación por parte de los ingenieros hidráulicos en todo el mundo desde su lanzamiento público en 1995.  
Spatial Data File

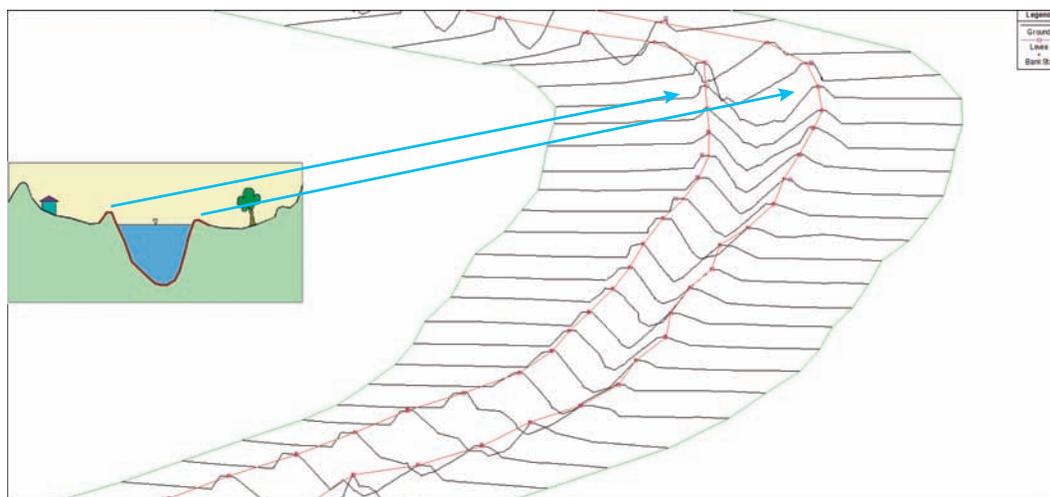


Ilustración 8. Vista 3D de la geometría obtenida en el pre-proceso de un cauce

### 6.2.3. Simulación hidráulica (procesamiento)

Para la etapa de simulación hidráulica se requieren establecer las condiciones de borde hidráulico, parámetros físicos y adimensionales. La descripción de las consideraciones respecto a estos tópicos se presenta a continuación:

Parámetros físicos, consisten en la implementación de datos como la resistencia al flujo del lecho del río en base al coeficiente de Manning, constantes físicas como la gravedad, viscosidad cinemática del agua, etc.

Condiciones de borde hidrodinámico conforman el ingreso del escurrimiento que transcurre en el medio continuo a través de la sección por donde emerge el agua (aguas arriba) y el tirante de aguas abajo en la sección

donde desaloja el flujo. Esto en base a la hidrología.

Calibración del modelo, esto se constata en base al caudal base del río con imágenes satelitales actuales y visitas de campo a la zona de estudio.

#### Información requerida para la simulación

La información básica requerida para la simulación hidráulica es la siguiente:

#### Coefficiente de Rugosidad

La elección del coeficiente de rugosidad ("n" de Manning), debe de realizarse mediante la observación en campo de las características del cauce principal y de los márgenes derecho e izquierdo, los valores de "n" varían según las características de los tramos del río, la elección del valor de Manning dependerá mucho del

criterio técnico y la experiencia del mismo, estos valores de “n” pueden ser obtenidas de la tabla presentada en el punto 5.5.

## Caudales

Los caudales máximos para diferentes periodos de retorno introducidos al modelo serán en base al estudio hidrológico, estos caudales serán: 2, 10, 20, 50, 100, 200 años.

### 6.2.4. Post-Proceso

El Post proceso consiste específicamente en la interpretación espacial de los resultados obtenidos en el modelo hidráulico en condiciones naturales, es decir el Hec Ras realiza todo el cálculo hidráulico a partir de los datos introducidos de topografía e hidrología, pero para realizar el mapeo de las áreas de inundación o la distribución de velocidades que son resultados del modelo y ser visualizados es prudente usar otros software's como el ArcGIS o AutoCAD u otro software que tenga similares herramientas de importación de archivos con extensión \*.sdf.

## 6.3. Determinación de la Máxima Crecida

### 6.3.1. Análisis del modelo hidráulico en situación actual

Teniendo los resultados de la modelación hidráulica para las siguientes variables:

- Tirante máximo de agua
- Velocidades de flujo máximo
- Llanura de inundación

Para diferentes periodos de retorno (2, 10, 20, 50, 100, 200 años), se deberá realizar un análisis exhaustivo de los resultados del modelo hidráulico en situación actual para la definición de APR con acondicionamiento y sin acondicionamiento.

El principal dilema radica en la toma de decisión de cual periodo de retorno adoptar para la definición de la máxima crecida para que posteriormente a esta máxima crecida se instaure la APR.

### 6.3.2. Determinación del periodo de retorno para máximas crecidas para situación actual

Período de retorno es uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a soportar avenidas, como, por ejemplo: el vertedero de una presa, los diques para control de inundaciones; o una obra que requiera cruzar un río o arroyo con seguridad, como puede ser un puente.

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los n registros.

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ( $P_{m\acute{a}x}$  o  $Q_{m\acute{a}x}$  en su caso) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor, como se muestra en el cuadro con base en las siguientes relaciones:

$$T=(n+1)/m$$

y

$$P=m/(n+1)$$

T = Período de retorno (años)

n = Número de años de registro

m = Número de orden

P = Probabilidad

**Cuadro 3. Ejemplo de cálculo de Períodos de Retorno para eventos máximos anuales de lluvia**

Fecha	Lluvia (mm)	Lluvia ordenada (mm)	Número de orden (m)	Periodo de retorno (T años)	Probabilidad (P%)
1992	51	80	1	17.0	5.88
1993	40	54	2	8.5	11.77
1994	29	51	3	5.7	17.65
1995	40	50	4	4.3	23.53
1996	40	50	5	3.4	29.41
1997	50	45	6	2.8	35.29
1998	54	44.5	7	2.4	41.18
1999	40	40	8	2.1	47.06
2000	40	40	9	1.9	52.94
2001	40	40	10	1.7	58.82
2002	44.5	40	11	1.5	64.71
2003	50	40	12	1.4	70.59
2004	45	40	13	1.3	76.47
2005	33	35	14	1.2	82.35
2006	80	33	15	1.1	88.24
2007	35	29	16	1.1	94.12

El período de retorno para el que debe usarse para realizar el modelo hidráulico varía en función de la importancia de la misma (interés económico, socio-económico, estratégico, turístico).

Para la selección del período de retorno, podría usarse el cuadro.

**Cuadro 4. Períodos de retorno para diferentes categorías**

CATEGORÍA	PERIODO DE RETORNO RECOMENDADO PARA EL MODELO HIDRÁULICO
Categoría a: Ribera de río agrícola a proteger, con deficiente información hidrológica (pocos datos de precipitación y mala calibración de modelo hidrológico)	100 - 200
Categoría b: Ribera de río agrícola a proteger, con buena información hidrológica (registro completo de datos de precipitación y buena calibración de modelo hidrológico)	75 - 100
Categoría c: Ribera de río urbano a proteger, con deficiente información hidrológica (pocos datos de precipitación y mala calibración de modelo hidrológico)	50 - 75
Categoría d: Ribera de río urbano a proteger, con buena información hidrológica (registro completo de datos de precipitación y buena calibración de modelo hidrológico)	25 - 50

## 6.4. Lineamientos para la definición de Áreas de Protección de Ribera

### 6.4.1. Espacio físico posterior a las Riberas

Con referencia al espacio físico posterior a la máxima crecida, se tiene referencias de términos alternos como Áreas verdes, Servidumbres ecológicas, Franjas de seguridad, entre otros, pero, no necesariamente buscan el resguardo del cauce del río, tampoco logran que este espacio físico sea respetado por afecciones antrópicas como actividades agrícolas, tenencia y/o posesión de predios e incluso construcciones y otras obras.

En este contexto y con todos los antecedentes descritos en la presente guía, se propone delimitar un espacio físico posterior a la máxima crecida, no necesariamente en favor de las actividades y resguardo del factor antrópico al existir normativa específica para ello, se formula considerar un Área de Protección de Riberas (APR).

### 6.4.2. Áreas de Protección de Riberas

Los fenómenos climáticos y la disponibilidad de información para determinar las máximas crecidas en periodos de retorno óptimos presentarán un sesgo, este factor se debe a adopción de valores en los parámetros de

textura del suelo en la ribera, la presión por actividades humanas formales e informales, el retiro de la cobertura vegetal, entre otros. Es importante considerar a partir de la máxima crecida un Área de Protección de Riberas (APRs) en favor del cuerpo de agua intervenido, en concordancia a la normativa vigente.

### 6.4.3. Manejo de las APRs

Posterior a la determinación de las máximas crecidas y que el municipio correspondiente establezca estas APRs, se encuentran dos posibles escenarios:

#### Cauce y APR sin presencia de actividad humana

Si la APR no presenta construcciones u obras públicas y/o privadas, actividades agrícolas, industriales, o cualquier elemento que no sea parte del medio ambiente, principalmente del suelo, se recomienda realizar actividades que favorezcan la restauración de la cobertura vegetal con la reforestación, establecimiento de cortinas rompevientos, implementación de jardines con especies arbustivas y gramíneas, o cualquier actividad de revegetación.

Se pretende que la restauración de la cobertura vegetal ayude a:

- Consolidar la APR como espacio físico y de respeto al cauce de ríos y torrenteras.
- Minimizar la invasión de APR.
- Establecer el dominio público de las riberas

Y en el tema ambiental:

- Minimizar la erosión hídrica y eólica
- Mejorar la estabilidad del suelo
- Evitar la erosión del suelo
- Reducir el arrastre de sedimentos, basura, etc. al cauce
- Propiciar la colonización natural del ecosistema

#### Cauce y APR con actividades agrícolas, construcciones públicas y/o privadas

Después de determinar la máxima crecida de un río, torrentera u otro cuerpo de agua, el cauce y la APR que presenta actividades agrícolas, construcciones u obras públicas y/o privadas, actividades industriales, propiedades privadas, entre otros; la alternativa recomendable al municipio para minimizar los riesgos por las riadas e inundaciones, será la implementación de la Regulación y Encauzamiento Hidráulico (REH) del río, por medio de trabajos de acondicionamiento hidráulico del cauce que brindará una sección óptima para el flujo continuo y disminuirá y/o evitará el desborde del caudal del río.

Los procedimientos que se deben de realizar para una simulación hidráulica con intervención (acondicionamiento hidráulico) son los siguientes:

- Pre diseño del acondicionamiento
- Elaboración del TIN
- Pre-proceso
- Simulación hidráulica
- Post-proceso

Básicamente son los mismos pasos que se siguen para una simulación hidráulica en situación actual, cuyo análisis hidráulico con la propuesta nos permite determinar:

- Capacidad hidráulica de la sección propuesta
- Tirantes de agua para crecida máxima
- Velocidades de flujo para crecida máxima
- Otros parámetros hidráulicos

Estos resultados además son un insumo primordial para el diseño de las obras propuestas para el acondicionamiento hidráulico.

Estas obras de REH pueden variar según el tipo de materia que se quiera usar para su revestimiento pudiendo ser estas:

- Acondicionamiento hidráulico con revestimiento de HoAo
- Acondicionamiento hidráulico con revestimiento de HoCo
- Acondicionamiento hidráulico con revestimiento de gaviones o colchonetas
- Acondicionamiento hidráulico con la conformación de taludes con material del mismo río

El material a emplearse para el acondicionamiento dependerá mucho de la capacidad económica del municipio, ya que estas obras erogan muchos gastos.

### Pre diseño del acondicionamiento

Se deberá realizar un pre diseño de por lo menos dos alternativas con secciones que puedan transportar el caudal de diseño para el periodo de retorno ya definido.

Este cálculo de sección óptima se podrá realizar mediante planillas excell o software como el HCanal, para definir base, espejo de agua, altura y taludes.

### Elaboración del TIN

En base al terreno natural (condiciones actuales) generado con anterioridad, se deberá generar una nueva superficie con las secciones del pre diseño del acondicionamiento hidráulico. Este TIN pueden generarse en los software de extensiones GIS o el Auto Cad Civil 3D.

Se deberá de generar por lo menos dos superficies con secciones del pre diseño para la simulación hidráulica.

### Pre-proceso

Se sigue los mismos procedimientos del punto 6.2.2, pero la importación de las secciones transversales se las realiza de la nueva superficie con el acondicionamiento hidráulico.

Se deberá realizar el trazado del eje nuevo del acondicionamiento, la pendiente de diseño del nuevo cauce.

## Simulación hidráulica

El objetivo de esta simulación hidráulica con el acondicionamiento hidráulico es la de buscar una sección hidráulica idónea que pueda transportar el caudal de una máxima crecida, reduciendo los riegos de desborde e inundaciones.

Se realizará la simulación hidráulica de las dos secciones tentativas del acondicionamiento hidráulico, para poder optar la sección optima del acondicionamiento.

La información básica requerida para la simulación hidráulica es la siguiente:

- Coeficiente de Rugosidad, dependiendo el revestimiento a utilizar.
- Caudal de máxima crecida, definida con anterioridad.

## Post-proceso

El Post proceso consiste específicamente en la interpretación espacial de los resultados obtenidos en el modelo hidráulico con intervención, es decir el Hec Ras realiza todo el cálculo hidráulico a partir de los datos introducidos de topografía e hidrología, pero para realizar el mapeo de los tirantes de agua o la distribución de velocidades que son resultados del modelo y ser visualizados es prudente usar otros software's como el ArcGIS o AutoCAD u otro software que tenga similares herramientas de importación de archivos con extensión \*.sdf.

Estos resultados pueden ser presentados en formato de plano con carimbo institucional, como se muestra en el ejemplo del punto 5.7.

## Diseño de obras

En base a los datos de la modelación hidráulica y otros estudios (Geotecnia), deberán de diseñarse las obras de REH, con un enfoque de reducción del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático.

## 7. RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Debido a que la delimitación de APRs y la reglamentación del uso del suelo dentro de éstas son aspectos que también competen a los Gobiernos Municipales, se debe comprometer la participación de las autoridades o técnicos ediles durante el proceso, sobre todo en la fase de los Talleres participativos. Ahora bien, no en todos los casos se logró que esto fuera así o que su participación sea constante.
- Por regla general, los pobladores asentados en los márgenes de los ríos y torrenteras de las cuencas seleccionadas presentan una conciencia provisional del riesgo, es decir, que sólo en temporadas de lluvias existe una clara preocupación por la amenaza que representan los desbordes e inundaciones. Así mismo, carecen de conocimientos o prácticas individuales o colectivas que garanticen un manejo sostenible de las APRs. Más aún, se ignora en

gran medida qué son las APRs y cuáles sus beneficios para el medioambiente y las personas.

- Existe una marcada tendencia a la ocupación de los espacios comprendidos dentro de la Franja de Seguridad por parte de los pobladores u otras personas. Esto, en el caso de las áreas rurales, implica el uso de las tierras con fines agrícolas y pecuarios y eventualmente la construcción de viviendas. En zonas más urbanas, supone el loteamiento y construcción de viviendas en forma acelerada, caótica y no reglamentada.
- Existe un vacío o confusión legal en lo relacionado a las APRs y la reglamentación del uso del suelo en éstas. Esto se debe sobre todo a la ambigüedad de la normativa vigente o a la existencia de más de una reglamentación al respecto.
- Existe también numerosos conflictos en torno a la tenencia o derecho propietario de terrenos comprendidos dentro de las APRs. Estos conflictos se dan entre los propietarios "originales" de dichos predios, y personas que tratan de establecerse dentro del lecho del río, el cual cada vez es más grande e impreciso debido a que las inundaciones destruyen terrenos agrícolas convirtiéndolos en pedregales que luego son abandonados por los campesinos.
- Al respecto, se trata de generar demandas estructuradas y capacidad propositiva en la población mediante el uso de instrumentos de trabajo que posibiliten la

reflexión compartida entre técnicos y población sobre las causas y las consecuencias sociales, técnicas, económicas, políticas y ambientales de la ocupación de las APRs. Dichos instrumentos deberán ser dinámicos y de fácil comprensión para los pobladores, que permitan la inclusión y relación de una o más variables.

- De acuerdo a la legislación descrita anteriormente, los Gobiernos Municipales deben encarar normativas municipales, a través de Ordenanzas Municipales, consensuadas entre técnicos entendidos y los actores sociales que tienen que ver con actividades agropecuarias y de viviendas propias, dentro lo que son consideradas las APRs.

## GLOSARIO

<b>GADC</b>	<i>Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba</i>
<b>SDC</b>	<i>Servicio Departamental de Cuencas</i>
<b>PMOT</b>	<i>Planes Municipales de Ordenamiento Territorial</i>
<b>APR</b>	<i>Áreas de Protección de Ribera</i>
<b>RAM</b>	<i>Regla Ambiental Minera</i>
<b>PMAC</b>	<i>Plan de manejo de Áridos en Cuencas o Micro cuencas</i>
<b>MA</b>	<i>Manifiesto Ambiental</i>
<b>EEIA</b>	<i>Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental</i>
<b>AOP</b>	<i>Actividad, Obra o Proyecto</i>
<b>IRAP</b>	<i>Instrumento Ambiental de regulación Particular</i>
<b>PPM</b>	<i>Programa de Prevención, Mitigación</i>
<b>PASA</b>	<i>Programa de Apoyo a la Seguridad Alimentaria</i>
<b>SIRENARE</b>	<i>Sistema de Regulación de Recursos Naturales Renovables</i>
<b>SAF</b>	<i>Superintendencias Agraria y Forestal</i>
<b>ABT</b>	<i>Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosque y Tierra</i>
<b>GAMC</b>	<i>Gobierno Autónomo Municipal Cochabamba</i>
<b>INRA</b>	<i>Instituto Nacional de Reforma Agraria</i>
<b>MDT</b>	<i>Modelo Digital de Terreno</i>
<b>GPS</b>	<i>Sistema de Posicionamiento Global</i>
<b>CEDEX</b>	<i>Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas</i>
<b>CHAC</b>	<i>Cálculo Hirdrometeorológico de Aportaciones y Crecidas</i>
<b>ICEI</b>	<i>Institute of Civil Engineers de Irlanda</i>
<b>WEAP</b>	<i>Water Evaluation an Planning System</i>
<b>TIN</b>	<i>Triangular Irregular Network</i>
<b>SDF</b>	<i>Spacial Data File</i>
<b>DFC</b>	<i>Dinámica de Fluidos Computacional</i>
<b>IDF</b>	<i>Intensidad, Duración y Frecuencia</i>
<b>MDT</b>	<i>Modelos Digitales de Terreno</i>



## PROPUESTA DE GUÍA DE ORIENTACIÓN TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DE MÁXIMAS CRECIDAS

Instrumento para la reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático

Desarrollado por :  
Servicio Departamental de Cuencas - SDC



Av. Atahuallpa s/n - lado DIPROVE

(591) 4 4291095 - (591) 4 4290729

[www.cuencas-cochabamba.com](http://www.cuencas-cochabamba.com)

Servicio Departamental de Cuencas



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Cooperación Suiza en Bolivia**

*Reducción del riesgo de desastres*



**HELVETAS**  
Swiss Intercooperation