

Diseño de ESTRUCTURAS DE CORRECCIÓN DE TORRENTES Y RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Gian Franco Morassutti F.



**Diseño de
ESTRUCTURAS DE
CORRECCIÓN DE
TORRENTES Y RETENCIÓN
DE SEDIMENTOS**

Gian Franco Morassutti F.
Ingeniero Civil

edü[®]

Conocimiento a su alcance

BOGOTÁ - MÉXICO, DF

Morassutti Fabris, Gian Franco Antonio

Diseño de estructuras de corrección de torrentes y retención de sedimentos / Gian Franco Antonio Morassutti Fabris. -- Bogotá : Ediciones de la U, 2020

562 p. ; 24 cm.

ISBN 978-958-792-183-0

e-ISBN 978-958-792-184-7

1. Ingeniería hidráulica 2. Cálculo de gastos de diseño 3. Aludes torrenciales 4. Control y estabilización 5. Presas I. Tít.

627 cd

Área: Ingeniería hidráulica

Primera edición: Bogotá, Colombia, mayo de 2020

ISBN. 978-958-792-183-0

© Gian Franco Antonio Morassutti Fabris

© Ediciones de la U - Carrera 27 # 27-43 - Tel. (+57-1) 3203510 - 3203499

www.edicionesdelau.com - E-mail: editor@edicionesdelau.com

Bogotá, Colombia

Ediciones de la U es una empresa editorial que, con una visión moderna y estratégica de las tecnologías, desarrolla, promueve, distribuye y comercializa contenidos, herramientas de formación, libros técnicos y profesionales, e-books, e-learning o aprendizaje en línea, realizados por autores con amplia experiencia en las diferentes áreas profesionales e investigativas, para brindar a nuestros usuarios soluciones útiles y prácticas que contribuyan al dominio de sus campos de trabajo y a su mejor desempeño en un mundo global, cambiante y cada vez más competitivo.

Coordinación editorial: Adriana Gutiérrez M.

Carátula: Ediciones de la U

Impresión: DGP Editores SAS

Calle 63 No. 70 D - 34, Pbx. (571) 7217756

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro y otros medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

Gian Franco Morassutti F.

Ingeniero Civil. Opción Hidráulica. Universidad Central de Venezuela (1985). Cursos de Postgrado en Ingeniería Hidráulica. Universidad Central de Venezuela (1986-1989).

Profesor de Mecánica de Fluidos, Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela (1989–1999). Profesor de Mecánica de Fluidos, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela (2004–2005). Profesor de Obras Hidráulicas, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela (2007–2018).

Fundador y Director de G.F.M. Ingeniería C.A., empresa dedicada a estudios, proyectos de Ingeniería Hidráulica e Inspección de Obras Civiles. Valencia, Venezuela (1995- Presente). Asesor Técnico en el Área de Ingeniería Hidráulica para el Instituto de Vialidad del Estado Carabobo (INVIAL), Valencia, Venezuela (2001–2009). Asesor Técnico en el Área de Ingeniería Hidráulica y Construcción de Obras Hidráulicas para la Corporación para la Recuperación y Desarrollo del Estado Vargas (CORPOVARGAS) (2001–2007). Asesor Técnico en el Área de Ingeniería Hidráulica para el Consorcio FerroCentro – Inspección del proyecto y la ejecución del Ferrocarril Tramo La Encrucijada – Puerto Cabello (I.A.F.E. – Instituto Autónomo Ferrocarriles del Estado) (2003–2005).

Ponente de Cursos y Conferencias sobre el tema de la Necesidad de las Obras Hidráulicas con especial énfasis en Sistemas de Drenaje Urbano, Drenaje Vial, Protección de Márgenes de Cauces Naturales y Estructuras de Control de Erosión y Retención de Sedimentos.

Ponente del Curso de Diseño de Estructuras de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos en:

- Curso de Ocho (8) horas, dictado como Curso Pre-Congreso para el VIII Congreso Iberoamericano de Control de Erosión y Sedimentos – Cartagena, Colombia, Agosto 2016.
- Curso de veinticuatro (24) horas, dictado en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Instituto de Ciencia y Tecnología del Agua, Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima - Perú, Julio 2017.
- Curso de Ocho (8) horas, dictado como Curso Pre-Congreso para el XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Buenos Aires, Argentina, Septiembre 2018.
- Curso de Ocho (8) horas, dictado como Curso Pre-Congreso para el IX Congreso Iberoamericano de Control de Erosión y Sedimentos – Santiago de Chile, Chile, Septiembre 2018.

GANADOR DEL PREMIO MACCAFERRI DE HIDRÁULICA APLICADA A GAVIONES, por el artículo "*Propuesta de medidas Estructurales para la Mitigación de Riesgo de Inundaciones de la Ciudad de Trujillo, Perú*". Documento preparado y expuesto para el XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Buenos Aires, Argentina, Septiembre 2018.

Correo: gfmorassutti@gmail.com

El agua deshace los montes y rellena los valles
y quisiera reducir la tierra en perfecta esfericidad,
si ella pudiera...

Leonardo da Vinci

Cuando trates con el agua, consulta primero la experiencia
y después la razón, la experimentación no yerra nunca,
solo nuestro juicio se equivoca, al anticipar resultados
que luego la experiencia no confirma

Leonardo da Vinci

Cuando trates con el agua,
consulta primero la práctica
y luego la teoría.

Leonardo da Vinci

Dedico este manual a mi familia, a mi esposa María Luisa,
a mis hijas María Luisa y María Gabriela y a mi hijo Gian Franco,
por ser fuente de inspiración y por ser el motivo para tratar de ser
cada día mejor y humildemente poder dar el ejemplo.

A mis padres por haberme enseñado la necesidad
de ir siempre en búsqueda de la excelencia.

A las personas que de una u otra forma han influenciado en mi vida,
dándome los mejores consejos, guiándome y tratando
de hacer de mí, una persona de bien... ellos saben quienes son...

Cuando miro atrás y recuerdo mi vida,
las mayores alegrías son las vividas con la familia.

Mi familia, mi esposa y mis tres hijos,
son el mejor regalo que pudo darme Dios y la vida.

Gracias a todos.

Agradecimientos

A lo largo de los años que estuve en Corpovargas, tuve la oportunidad de compartir e intercambiar ideas con diversos profesionales, todos ellos de mi gran aprecio desde el punto de vista personal y profesional, a todos ellos mi especial agradecimiento por formar un gran equipo de trabajo.

Mi agradecimiento a:

Los ingenieros Luis E. Franceschi A., José Ignacio Sanabria y Juan José Bolinaga I. (†), mis profesores y mentores, pero en especial mi agradecimiento a ellos por la oportunidad que me dieron de ingresar a la oficina de PROHIDRA S.C. siendo un recién graduado en el año 1985 y entrar en el mundo de la ingeniería hidráulica. Su ejemplo de profesionalismo y honestidad, lo he tenido como motor de vida.

Mi profesor el Ing. José Luis López del Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad Central de Venezuela, por sus consejos y recomendaciones en los diversos aspectos analizados en los torrentes del Estado Vargas y en especial por su tiempo en la revisión de este manual.

El Ing. Mario Mengual por sus oportunas y acertadas recomendaciones. De igual forma mi agradecimiento al Ing. Federico Valencia por sus valiosos comentarios en la redacción de diversos conceptos.

El Ing. Luis Miguel Suárez V., que además de sus oportunas recomendaciones a lo largo de los años que estuve en Corpovargas, es el autor del libro *"Presas de Control de Torrentes y Retención de Sedimentos"*, escrito en el año 1992, hace más de 20 años, y cuya motivación fue el deslave del Río Limón en Maracay en el año 1987. De este libro nacen los criterios técnicos y conocimientos con que me inicié en este tema y que sirvieron de base para el diseño y construcción de la mayoría de las presas de retención de sedimentos del Estado Vargas y en especial, es el punto de partida para la realización de este libro.

Los ingenieros Roberto Coali y Antonio Manica del Instituto di Sistemazione Montana della Provincia del Trento (ISMPT), Italia, con quienes en el año 2003 tuve la oportunidad de intercambiar ideas y me transmitieron una cantidad importante de criterios y conocimientos con base en su experiencia en el ISMPT, el cual cuenta con más de cien (100) años de experiencia en control de torrentes.

Al Ing. Alfonso Palma (†) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Gobierno de España (CEDEX), con quien en el mismo año 2003, tuve la oportunidad de intercambiar ideas y conceptos para fijar los criterios del Proyecto de Control de Torrentes de la Cuenca del Río San Julián.

Mi agradecimiento muy especial al General (G.N.) Ing. Alejandro Volta T., Presidente de Corpovargas, por haberme dado la oportunidad de trabajar en la recuperación del Estado Vargas. Su firmeza y determinación en la dirección de Corpovargas fue la clave para el logro de los objetivos trazados y el éxito de la gestión. ¡Gracias por haber confiado en mí! creo que hicimos historia.

A mi amigo el Ing. José V. Heredia T., por ser el responsable de haberme llevado al Estado Vargas a finales del año 2000, bajo la premisa de realizar una simple evaluación hidráulica y geotécnica de la vialidad Caraballeda – Los Caracas, afectada luego del deslave de diciembre de 1999, y habernos quedado trabajando durante siete años en el control de torrentes y en la recuperación del Estado Vargas y adquirir esta maravillosa experiencia.

A mi amigo el Teniente - Coronel G.N. (R) Ing. José Gregorio Quijada S., Gerente General del Plan Vargas 2005, por su apoyo y confianza en el diseño e inspección de las obras de control de torrentes ejecutadas en el Estado Vargas.

Al Ing. Gerardo Fracassi, Gerente Técnico de Maccaferri - Brasil, y al Ing. Jaime Durán da Silva, Gerente del Departamento de Investigación y Desarrollo, por el apoyo técnico y en especial por la cortesía de permitirme utilizar fotos y figuras que le dan un valor agregado a este manual. Al Ing. Antonio Gallovich, Gerente Técnico de Maccaferri – Venezuela, por su apoyo incondicional y recomendaciones en la construcción de las obras y en el desarrollo de la denominada “Escuela de Muros” de gaviones realizadas en el Estado Vargas.

Mi reconocimiento muy especial a mis exalumnos y hoy en día Ingenieros Mauricio Romanello y Beatriz Haro, quienes tuvieron la paciencia de soportarme en la elaboración de su tesis de grado, de la cual se han establecido algunos criterios de diseño que se incluyen en esta obra. Adicionalmente, mi agradecimiento por su paciencia en la revisión de los ejemplos que se incluyen al final del libro.

De igual forma mi agradecimiento a mis exalumnos y hoy en día ingenieros Benito Vacca, Rosa De Jesús, Zhandra López, Yulimar Aular y Karla Briceño, por su paciencia en la elaboración y revisión de los cálculos de los ejemplos y en las figuras que forman parte de este libro.

Mi reconocimiento a todos los que han sido y son mis alumnos, pues su afán de aprender, son el motor y la razón de este manual.

Gian Franco A. Morassutti F.
Valencia, Noviembre de 2018

Prefacio

Los flujos torrenciales catastróficos ocurridos el 15 y 16 de diciembre de 1999, en el Estado Vargas en Venezuela, generaron lo que puede ser catalogado como el desastre más importante del siglo XX en este país. Considerando el alto volumen de sedimentos y de bloques de rocas transportados, el evento de 1999 ha sido clasificado como el flujo torrencial más grande inducido por lluvias entre todos aquellos que han sido documentados a nivel mundial.

Posteriormente, en febrero de 2005, ocurrió una tormenta de características similares, aunque de menor magnitud que la de diciembre de 1999, pero que ocasionó daños y pérdidas importantes en los desarrollos urbanos ubicados en las márgenes de los cauces fluviales del Estado Vargas y que puso a prueba algunas de las estructuras de retención que se había construido en Vargas hasta ese momento, y que, afortunadamente, tuvieron un comportamiento satisfactorio.

En vista de los continuos y extremos eventos meteorológicos que han venido ocurriendo a nivel mundial, teniendo como característica importante las altas precipitaciones, así como la ocurrencia de flujo de lodos y piedras que ha traído como consecuencia la desestabilización geomorfológica de los cauces fluviales y de los taludes de las vertientes de las cuencas hidrográficas, este manual tiene como objetivo dar a conocer los conceptos fundamentales del flujo torrencial y sus diversas formas de control, de manera que sirva como referencia y de experiencia para eventuales controles de torrentes en otras áreas geográficas.

A lo largo de mi carrera profesional dentro de la Ingeniería Hidráulica, he tenido el honor y la oportunidad de participar en diversos proyectos que siempre tienen como objetivo fundamental, tal y como indica Bolinaga (Bolinaga, J.J., 1979): *“evitar, en la medida de lo posible, que las aguas pluviales causen daños a las personas o a las propiedades ante eventuales desbordes de los cauces fluviales”*. Sin embargo, en el caso de los riesgos que se originan por la ocurrencia de aludes torrenciales, el término *“evitar”* es prácticamente imposible de cumplir, pues estos riesgos no pueden ser eliminados y son difíciles de mitigar, es por ello que las estructuras de corrección de torrentes y retención de sedimentos se pueden denominar ***“estructuras de mitigación del riesgo”***.

Mis estudios y mi pasión por el control de torrentes tiene origen en el Evento de Vargas de diciembre de 1999, cuando tuve la oportunidad de participar como Asesor Técnico, Proyectista e Inspector en la Corporación para la Recuperación y el Desarrollo del Es-

tado Vargas (CORPOVARGAS), en las diversas obras que se proyectaron y construyeron en el Estado Vargas a partir del año 2001 hasta el año 2007. Sin embargo, mi mayor motivación fue luego del recorrido realizado a finales del año 2000, y darme cuenta de las consecuencias del deslave ocurrido y las afectaciones a los habitantes del Estado Vargas, así como la pérdida de familiares y seres queridos, sus viviendas y gran parte de su vida.

Sin embargo, mi mayor motivación fue ese espíritu de lucha del venezolano y en especial de los habitantes del Estado Vargas que, en aquel momento, luego de sufrir los embates inclementes de la naturaleza, siguieron con fe y optimismo, bajo la premisa de reconstruir su vida.

Las lecciones aprendidas en Vargas, tanto desde el punto de vista técnico, como desde el punto de vista personal y humano, motivaron la elaboración de este manual, para que eventos como el ocurrido en Vargas en diciembre de 1999 o en febrero de 2005, queden en el recuerdo, y que, con las sugerencias y recomendaciones de diseño que se han establecido en este manual, se puedan mitigar los efectos de estas crecidas y así proteger a los habitantes y propiedades asentados en las riberas de los cauces fluviales ubicados en el piedemonte de las serranías.

De acuerdo con la experiencia a lo largo de los años de estudio del fenómeno torrencial y el diseño de las obras de control de torrentes, así como en el estudio de la ingeniería hidráulica en general, considero que siempre es necesario cubrir una primera etapa donde se realice una cuidadosa caracterización conceptual de cada uno de los elementos que intervienen en el problema, en este caso el de la dinámica del flujo torrencial, sus orígenes y consecuencias, seguido de una segunda etapa que permita fijar los criterios conceptuales de las obras de control y estabilización, para finalmente proponer soluciones mediante la elaboración de los cálculos necesarios hasta obtener el dimensionamiento idóneo de estas estructuras desde el punto de vista técnico y económico.

De esta manera, el lector irá progresivamente construyendo una amplia base de conceptos y criterios que lo habilitará para comprender a cabalidad todos los elementos hidráulicos y estructurales de las obras de control de torrentes de la manera más acertada posible, complementados por una serie de ejemplos y anécdotas que servirán para ampliar los criterios de diseño, pues tal y como en algún momento afirmó Leonardo Da Vinci *“Cuando trates con el agua, consulta primero la práctica y luego la teoría”*.

El desarrollo de este libro tiene como objetivo el estudio de las técnicas y elementos necesarios y disponibles para la corrección y estabilización de torrentes con la finalidad de regular el flujo de agua y los sedimentos transportados, mediante estructuras de retención o estructuras de control a lo largo del cauce, que permitan, en la medida de lo posible, el control de las erosiones y socavaciones que se puedan producir, así como el transporte de sedimentos hacia aguas abajo.

La finalidad de este **Manual de Diseño de Estructuras de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos**, se ha basado en la emisión de conceptos de la manera más

práctica posible, para que sea un texto de diseño para profesionales de la ingeniería, así como estudiantes que se inicien en este maravilloso mundo de la hidráulica, la hidráulica fluvial y en especial en la del tratamiento de control de torrentes.

Se ha incluido una importante cantidad de figuras y fotografías, con el fin de ilustrar, con mayor claridad, lo que se pretende explicar con palabras o ecuaciones.

El libro se ha organizado en diez (10) capítulos cuyo tratamiento se hace como se describe a continuación.

En el Capítulo 1 se hace una breve introducción a la corrección de torrentes, para así iniciar al lector en el tema fundamental de este manual.

En el Capítulo 2 se presentan los conceptos generales de cada uno de los elementos que intervienen en la geomorfología de los torrentes, desde la precipitación, erosión, formación de torrentes y un aparte de clasificación de fallas, hasta llegar al flujo de lodos y piedras.

El Capítulo 3 se ha dedicado al cálculo de los gastos máximos a partir de la descripción de los diferentes elementos que intervienen en el estudio hidrológico de la cuenca donde se pretende realizar el control de torrentes. Este capítulo se ha incluido con la finalidad de que el lector refresque los conocimientos de hidrología, a través de los procedimientos propuestos y pueda obtener los gastos líquidos provenientes del estudio hidrológico, para luego adentrarse en las metodologías de cálculo de gastos sólidos que se describen en el Capítulo 6.

El Capítulo 4 presenta una descripción de los aludes torrenciales, en donde se presenta una conceptualización de los diversos tipos de fluidos, el concepto de flujos de lodos y piedras, su composición, hasta llegar a los diversos tipos de flujos torrenciales.

El Capítulo 5 se dedica al control y estabilización de torrentes, desde su concepción, pasando por los métodos estabilizantes y conceptualizando las presas de retención de sedimentos, tanto las presas cerradas como las presas abiertas.

El Capítulo 6 se dedica al cálculo de los parámetros sedimentológicos que intervienen en el flujo torrencial, para calcular el gasto sólido y el volumen de sedimentos que pueden ser transportados por una crecida, análisis de la pendiente de compensación y pendiente de equilibrio, ubicación estratégica de las presas a lo largo del cauce, etapas del funcionamiento de las presas luego de su construcción y se termina con una ilustración de una simulación del flujo torrencial.

El Capítulo 7 se dedica al cálculo hidráulico de los parámetros que intervienen en una presa de retención de sedimentos, desde el cálculo del vertedero, característica de la lámina vertiente, cálculo de socavación al pie de la presa y dimensionamiento del dissipador de energía.

En el Capítulo 8 se presentan y describen las fuerzas que actúan sobre una presa de gravedad, así como los diferentes casos de carga que puedan actuar sobre una presa, para luego definir su dimensionamiento.

En el Capítulo 9 se presenta y describen las fuerzas que actúan sobre una presa de gravedad construida en gaviones, así como los diferentes casos de carga que puedan actuar sobre una presa, para luego definir su dimensionamiento.

En el Capítulo 10 se presentan los diferentes criterios para establecer las fuerzas que actúan sobre una presa abierta y los criterios de cálculo para su dimensionamiento.

La sección final corresponde a las referencias bibliográficas, que contiene una lista seleccionada de textos, libros, manuales, documentos y trabajos de investigación, que han servido como elemento de apoyo para la elaboración de este manual.

Finalmente, el propósito fundamental de esta obra, es contribuir a transmitir mis limitados conocimientos, con base en el estudio del tema y la poca o mucha experiencia obtenida a lo largo de los años de trabajo, si lo logro, aunque sea parcialmente, me sentiré satisfecho.

Gian Franco A. Morassutti F.

Valencia, Noviembre de 2019

Tabla de contenido

Prefacio	13
Capítulo 1. La corrección de torrentes.....	25
1.1. INTRODUCCIÓN	27
1.2. EL FLUJO TORRENCIAL.....	30
1.3. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DEL GEO-DINAMISMO TORRENCIAL	31
1.4. PLANIFICACIÓN Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN.....	34
1.4.1. Medidas estructurales.....	34
1.4.2. Medidas no estructurales	35
1.5. OBJETIVO DEL CONTROL Y LA ESTABILIZACIÓN DE TORRENTES	35
1.6. ACCIONES COMPLEMENTARIAS PARA LOS SISTEMAS DE CONTROL Y ESTABILIZACIÓN DE TORRENTES	37
1.7. CONSIDERACIONES FINALES.....	42
Capítulo 2. Conceptos generales.....	43
2.1. INTRODUCCIÓN	45
2.2. PRECIPITACIÓN	46
2.3. EROSIÓN	47
2.4. INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA	51
2.5. FORMACIÓN DE CURSOS DE AGUA	52
2.6. CAUCES NATURALES O CURSOS DE AGUA	54
2.7. PROCESO DE FORMACIÓN DE UN TORRENTE	60
2.7.1. Clasificación de los torrentes.....	61
2.7.1.1. Torrentes depositantes.....	62
2.7.1.2. Torrentes socavantes.....	62
2.8. CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE FALLAS DE TALUDES.....	62
2.8.1. Desprendimientos.....	63
2.8.2. Derrumbes	64
2.8.2.1. Derrumbes planares.....	64
2.8.2.2. Derrumbes rotacionales	65
2.8.2.3. Desparramamiento lateral y falla progresiva	66
2.8.2.4. Deslizamientos de suelos y roca.....	67
2.8.3. Repteo	67
2.8.4. Avalanchas	68
2.8.5. Flujo de suelos y rocas	69
2.9. LOS FLUJOS DE LODOS Y PIEDRAS.....	69
2.10. CONSIDERACIONES FINALES	70

Capítulo 3. Cálculo de los gastos de diseño	73
3.1. INTRODUCCIÓN	75
3.2. CICLO HIDROLÓGICO	76
3.3. MODIFICACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO	78
3.4. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA NECESARIA PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS HIDRAULICAS.....	79
3.5. CUENCA HIDROGRÁFICA.....	80
3.5.1. Área de la cuenca.....	82
3.5.2. Divisoria de aguas	82
3.5.2.1. Trazado de divisorias de cuencas naturales.....	82
3.5.2.2. Trazado de divisorias de cuencas urbanas	83
3.5.3. Perfil y pendiente del cauce	84
3.6. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	88
3.7. FORMA DE LA CUENCA	94
3.8. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN UNA CUENCA	96
3.9. ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	98
3.10. CURVAS DE INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA.....	101
3.11. MÉTODO DE GUMBEL.....	101
3.12. GRÁFICAS DE PROBABILIDAD PARA INTERPOLACIÓN O EXTRAPOLACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS	111
3.13. DETERMINACIÓN DE LA TORMENTA DE DISEÑO	115
3.14. MÉTODOS CONVENCIONALES UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE GASTOS MÁXIMOS.....	115
3.15. MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS	117
3.16. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE GASTOS MÁXIMOS RECOMENDADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS	118
3.16.1. Método racional.....	118
3.16.1.1. Intensidad de la lluvia	121
3.16.1.2. Coeficiente de escorrentía.....	122
3.16.1.3. Ventajas y limitaciones del método racional	127
3.17. HIETOGRAMA DE DISEÑO.....	129
3.17.1. Método de los bloques alternos.....	129
3.18. TRÁNSITO DE CRECIENTES	137
3.18.1. Introducción.....	137
3.18.2. Conceptos básicos.....	138
3.18.3. Tránsito mediante el Método de Muskingum.....	141
3.18.4. Tránsito mediante el Método de Muskingum - Cunge.....	144
3.19. MÉTODO DEL ÁREA EFECTIVA.....	150
3.19.1. Descripción conceptual del método del área efectiva.....	150
3.19.2. Evolución del método del área efectiva.....	151
3.19.2.1. Método del área efectiva, versión 1	152
3.19.2.2. Método del área efectiva, versión 2	152
3.19.2.3. Método del área efectiva, versión 3	153
3.19.3. Análisis comparativo de las versiones del método del área efectiva	154
3.19.4. Pasos a seguir para la obtención del gasto máximo mediante el método del área efectiva	156

3.19.5. Consideraciones finales	163
3.20. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	163
3.21. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE UNA CUENCA.....	164
3.21.1. Cálculo del gasto máximo mediante el método racional.....	167
3.21.1.1. Cuenca "A".....	167
3.21.1.2. Cuenca "B".....	168
3.21.2. Cálculo del gasto máximo mediante el método del área efectiva.....	169
3.21.2.1. Cuenca "A".....	169
3.21.2.2. Cuenca "B".....	188
3.22. CONSIDERACIONES FINALES	193
Capítulo 4. Los aludes torrenciales	195
4.1. INTRODUCCIÓN	197
4.2. CONCEPTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS PARA LA HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS DE ALUDES TORRENCIALES	198
4.2.1. Tipos de Fluidos.....	198
4.2.1.1. Fluido newtoniano	199
4.2.1.2. Fluido no newtoniano	201
4.2.1.2.1. Fluido Plástico de Bingham.....	201
4.2.1.2.2. Fluido Pseudoplástico y Dilatante	202
4.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE AVALANCHAS O FLUJO DE ESCOMBROS	204
4.3.1. Etapas del flujo	204
4.3.1.1. Formación del flujo de escombros	205
4.3.1.2. Transporte.....	205
4.3.1.3. Sedimentación	205
4.3.2. Movimiento de la carga de fondo	205
4.3.3. Fricción entre el flujo y la superficie del terreno	206
4.3.4. Caudales del flujo	206
4.3.5. Tamaño y distribución granulométrica de los sedimentos.....	207
4.3.6. Concentración de sedimentos.....	208
4.4. CONCEPTO DE FLUJO DE LODOS Y PIEDRAS	208
4.4.1. Composición de flujos de lodos y piedras.....	209
4.4.2. Factores que influyen en el tipo de flujo.....	212
4.4.3. Algunas consideraciones sobre flujo de lodos y escombros.....	213
4.4.4. El transporte de grandes bloques	219
4.4.5. deslizamientos en forma de flujos con carácter destructivo.....	219
4.4.5.1. Avalanchas.....	221
4.5. TIPOS PRINCIPALES DE FLUJO DE LODOS Y PIEDRAS	224
4.5.1. Flujos de agua ordinario	224
4.5.2. Flujos de lodo.....	225
4.5.3. Flujos hiperconcentrados	226
4.5.4. Flujos de detritos (<i>debris flows</i>).....	227
4.6. CONSIDERACIONES SOBRE LOS ALUDES TORRENCIALES.....	230
Capítulo 5. Control y estabilización de torrentes	231
5.1. ACCIONES CONTRA LA INESTABILIDAD HIDROGEOLÓGICA.....	233

5.2. ACCIONES CORRECTIVAS EN LOS TORRENTES	237
5.3. METODOS ESTABILIZANTES.....	239
5.4. PRESAS DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS.....	242
5.4.1. Tipos de presas de retención de sedimentos	243
5.4.1.1. Presas cerradas.....	245
5.4.1.2. Presas cerradas con pasos de agua	246
5.4.1.3. Presas abiertas.....	248
5.4.1.4. Algunas consideraciones sobre las presas abiertas.....	252
5.5. TRAVIASAS O UMBRALES DE FONDO	255
5.5. PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA EL CONTROL DE TORRENTES	263
5.6. ALGUNAS CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS.....	265
5.7. SISTEMA DE BARRERAS DE REDES DE ANILLOS FLEXIBLES	272
Capítulo 6. Cálculo de parámetros sedimentológicos.....	277
6.1. ORIGEN Y TRANSPORTE DE LOS SEDIMENTOS.....	279
6.2. CÁLCULO DEL GASTO SÓLIDO.....	280
6.2.1. Estimación de los gastos de lodos y piedras por el método de Takahashi	282
6.2.2. Estimación de los volúmenes de sedimentos por el Método de Takahashi.....	284
6.3. CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE LA CANALIZACIÓN.....	288
6.3.1. Método de Meyer – Peter & Müller	288
6.4. PENDIENTE DE COMPENSACIÓN	290
6.5. ESTIMACIÓN DE LA PENDIENTE DE ESTABILIZACIÓN DEL CAUCE.....	292
6.5.1. Estimación de la pendiente de equilibrio por el método del esfuerzo cortante crítico.....	293
6.5.2. Método de degradación y acorazamiento.....	295
6.5.2.1. Conceptos generales.....	295
6.5.2.2. Análisis del descenso por degradación y acorazamiento del fondo del cauce	298
6.6. UBICACIÓN RELATIVA DE LAS PRESAS	303
6.7. ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO.....	305
6.7.1. Funcionamiento antes de la colmatación	306
6.7.2. Funcionamiento después de la colmatación.....	308
6.7.3. Algunas consideraciones sobre la ubicación de las presas	309
6.8. SIMULACIÓN DEL FLUJO TORRENCIAL	311
6.8.1. Simulación mediante modelo matemático del flujo de lodos y piedras (modelo matemático FLO – 2D).....	312
6.8.1.1. Simulación de la situación actual	315
6.8.1.2. Caso 1. Presas vacías (sin sedimentos) sin canalización	317
6.8.1.3. Caso 2. Presas vacías (sin sedimentos) con canalización.....	318
6.8.1.4. Caso 3. Presas sedimentadas sin canalización	319
6.8.1.5. Caso 4. Presas sedimentadas con canalización.....	320
6.8.1.6. Caso 5. Canalización sin presas.....	321
6.8.2. Conclusiones.....	322
6.8.3. Consideraciones finales	322

Capítulo 7. Cálculo de parámetros hidráulicos	323
7.1. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE RETENCIÓN	325
7.1.1. Generalidades	325
7.1.2. Criterios para el diseño	325
7.1.2.1. Capacidad del vertedero.....	326
7.1.2.2. Disipación de la energía.....	330
7.1.2.3. Lámina vertiente.....	330
7.1.2.4. Socavación al pie de la presa.....	333
7.1.2.5. Disipadores de energía.....	335
7.2. ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DE LA SOCAVACIÓN AL PIE DE LAS PRESAS	346
7.3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LAS CANALIZACIONES PARA CONTROL DE TORRENTES	348
7.4. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS CAUCES	350
7.5. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DEL AGUA.....	351
Capítulo 8. Presas de gravedad.....	355
8.1. GENERALIDADES	357
8.2. FUERZAS ACTUANTES.....	359
8.2.1. Fuerzas desestabilizantes.....	360
8.2.1.1. Empuje horizontal del agua en el parámetro de aguas arriba.....	361
8.2.1.2. Empuje del sedimento en el paramento de aguas arriba.....	362
8.2.1.3. Sub-presiones	364
8.2.1.4. Fuerzas sísmicas en la presa y en el embalse.....	364
8.2.1.5. Empuje de olas y cuerpos flotantes en el parámetro de aguas arriba ...	365
8.2.1.6. Fuerza de succión sobre el paramento de aguas abajo	365
8.2.1.7. Fuerza de roce en el paramento de aguas abajo	366
8.2.2. Fuerzas estabilizantes.....	366
8.2.2.1. Peso propio de la presa	367
8.2.2.2. Fuerzas estabilizantes del agua.....	368
8.2.2.3. Fuerzas estabilizantes de los sedimentos	372
8.3. CASOS DE CARGA.....	373
8.3.1. Caso de carga A	373
8.3.2. Caso de carga B.....	374
8.3.3. Caso de carga C.....	378
8.3.4. Análisis de los casos de carga	379
8.3.5. Impacto del flujo de lodos y piedras	381
8.4. CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD	385
8.4.1. Volcamiento	385
8.4.2. Deslizamiento.....	386
8.4.3. Deslizamiento sobre una junta	389
8.4.4. Verificación de las tensiones transmitidas al terreno.....	392
8.5. DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.....	398
8.5.1. Sección transversal más conveniente	400
8.5.2. Predimensionamiento de la estructura	403
8.5.2.1. Ancho del vertedero y relación entre la altura y la base.....	403

8.5.2.2. Cargas admisibles en la fundación	404
8.5.2.3. Dimensionamiento de las alas de la presa.....	406
8.6. ALGUNAS RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS	407
8.7. CONSIDERACIONES FINALES.....	409
Capítulo 9. Presas de gaviones	411
9.1. GENERALIDADES	413
9.2. LOS GAVIONES.....	413
9.2.1. Introduccion	413
9.2.2. Tipos de gaviones.....	414
9.2.2.1. Gaviones tipo caja.....	414
9.2.2.2. Gaviones tipo saco.....	416
9.2.2.3. Gaviones tipo colchón reno	417
9.3. LOS COMPONENTES DE LOS GAVIONES.....	419
9.3.1. La malla y el gavión	419
9.3.1.1. El alambre.....	419
9.3.1.2. La malla	422
9.3.1.3. El material de relleno.....	424
9.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS GAVIONES	424
9.4.1. Ventajas de la utilización de gaviones.....	424
9.4.1.1. Flexibilidad.....	425
9.4.1.2. Permeabilidad.....	427
9.4.1.3. Monoliticidad y durabilidad	428
9.4.1.4. De bajo impacto ambiental	428
9.4.1.5. Practicidad y versatilidad.....	430
9.4.1.6. Alto impacto social.....	430
9.4.1.7. Económicas.....	431
9.4.2. Principales tipos de deterioros en gaviones.....	432
9.4.2.1. Impacto mecánico.....	432
9.4.2.2. Abrasión	432
9.4.2.3. Corrosión	432
9.4.2.4. Vandalismo.....	433
9.5. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS GAVIONES	433
9.5.1. Gaviones caja	434
9.5.2. Recomendaciones para el llenado de las cestas con el material pétreo ..	438
9.6. DIMENSIONAMIENTO DE PRESAS DE GAVIONES.....	439
9.6.1. Formas de la sección transversal.....	439
9.6.1.1. Escalonada aguas abajo.....	439
9.6.1.2. Escalonada aguas arriba	440
9.6.1.3. Escalonada en ambos paramentos.....	441
9.7. FUERZAS ACTUANTES.....	441
9.7.1. Fuerzas desestabilizantes	442
9.7.1.1. Empuje horizontal del agua en el parámetro de aguas arriba	443
9.7.1.2. Empuje horizontal de sedimentos.....	443
9.7.1.3. Sub-presiones.....	445
9.7.1.4. Otras fuerzas desestabilizantes.....	447

9.7.2. Fuerzas estabilizantes	448
9.7.2.1. Peso propio de la presa de gaviones.....	448
9.7.2.2. Fuerzas estabilizantes del agua	451
9.7.2.3. Fuerzas estabilizantes de los sedimentos	454
9.8. CASOS DE CARGAS	455
9.8.1. Caso de carga A.....	455
9.8.2. Caso de carga B	456
9.8.2.1. Caso de carga B1. Empuje de sedimento saturado	457
9.8.2.2. Caso de carga B.2. Empuje hidrostático más empuje de sedimento sumergido.....	459
9.8.2.3. Caso de carga B.3. Empuje hidrostático más empuje de sedimento saturado.....	460
9.8.3. Caso de carga C	461
9.8.4. Análisis de los casos de carga.....	462
9.8.5. Impacto del flujo de lodos y piedras	463
9.8.6. Combinaciones de cargas	465
9.9. CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD	466
9.9.1. Volcamiento	466
9.9.2. Deslizamiento.....	467
9.9.3. Deslizamiento en las juntas.....	468
9.9.3.1. Fuerzas verticales.....	470
9.9.3.2. Fuerzas horizontales.....	470
9.10. VERIFICACIÓN DE LAS ALAS DE LA PRESA	472
9.11. VERIFICACIÓN DE LAS TENSIONES TRANSMITIDAS AL TERRENO.....	472
9.12. PROTECCIÓN ANTE ARRASTRE DE PARTÍCULAS EN EL SUELO DE LA FUNDACIÓN	476
9.13. ALGUNAS RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS.....	478
9.14. CONSIDERACIONES FINALES	481
Capítulo 10. Presas abiertas	483
10.1. GENERALIDADES	485
10.2. TIPOS DE PRESAS ABIERTAS	485
10.2.1. Presa abierta tipo “peine” de concreto armado	485
10.2.2. Presa tipo “peine” de concreto armado, con viga longitudinal de amarre	488
10.2.3. Presa abierta de concreto ciclópeo	489
10.2.4. Presa tipo “rastrillo”.....	489
10.2.5. Presa de gaviones con mechinales.....	490
10.2.6. Presa de gaviones con ventanas	492
10.2.7. Presa abiertas de gaviones.....	492
10.2.8. Presa abiertas con rejas de retención.....	495
10.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	496
10.4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO	497
10.4.1. Presa abierta tipo “peine” de concreto armado.....	497
10.4.1.1. Fuerzas despreciadas	498
10.4.1.2. Fuerzas actuantes sobre la presa	499

10.4.1.3. Cálculo de la estabilidad	506
10.4.2. Presa tipo "peine" de concreto armado, con viga longitudinal de amarre	508
10.4.3. Consideraciones finales	522
Referencias bibliográficas.....	523

Capítulo 1

La corrección de torrentes

1.1. INTRODUCCIÓN

La presencia de fenómenos naturales forma parte integral del proceso de la evolución de la tierra y han acompañado al ser humano a lo largo de su existencia. Estos eventos son difíciles de afrontar por el escaso control que se puede tener sobre ellos, aún con los avances tecnológicos que se puedan tener para estudiarlos o eventualmente predecirlos.

La presencia del hombre en el medio ambiente, sus actividades e infraestructura, históricamente se han ido extendiendo progresivamente hacia las zonas de las cuencas y en particular hacia las riberas o márgenes de los ríos.

Estas actividades se han desarrollado tanto en las zonas superiores de la cuenca, así como en las márgenes de los ríos y en especial en las planicies inundables ubicadas en las partes medias y bajas de la cuenca, por ser las áreas propicias, desde el punto de vista topográfico, para los desarrollos urbanos.

La mayoría de los pueblos y ciudades que conocemos hoy, se han desarrollado en áreas que han sido habitadas desde tiempos muy antiguos; siendo las riberas de los ríos, los lugares favoritos para los asentamientos humanos, debido a la disponibilidad de agua y la fertilidad de la tierra para la agricultura.

Con el trascurso de los años la relación "*Hombre - Cursos de Agua*" se ha ido desarrollando debido al incremento poblacional e industrial y de las rutas de comunicación, requeridas para el intercambio económico y social.

Actualmente resulta difícil ignorar los problemas de inundaciones y zonas bajas, así como la necesidad de proteger carreteras, vías férreas, construcciones industriales y fundamentalmente los centros poblados, siempre teniendo presente que el curso de agua natural es una entidad viviente, en continuo desarrollo, que se deberá proteger en todo lo posible.

A través de la historia, los asentamientos urbanos se han desarrollado en las riberas de los ríos. Con su presencia, el hombre ha interferido, en varias oportunidades, negativamente en el funcionamiento natural del ciclo hidrológico y en la dinámica biológica y en especial la geomorfológica de los ríos y sus cuencas contribuyentes. En varias ocasiones, la ocupación del territorio y los impactos originados por el hombre son tan importantes, que se han originado situaciones extremas que han generado catástrofes que involucran cuantiosas pérdidas económicas y humanas.

Ahora bien, también es cierto que la naturaleza ha ofrecido a la humanidad innumerables áreas para el desarrollo urbano, pues la erosión de las cuencas de los ríos y su posterior deposición en los piedemontes de las laderas, ha formado áreas idóneas para estos desarrollos.

Sobre la base de lo anterior, es imprescindible iniciar con los conceptos fundamentales de la hidráulica de cauces naturales. Dependiendo de sus características hidráulicas, las corrientes naturales se pueden dividir en ríos y torrentes.

Los ríos se caracterizan por tener caudales importantes incluso en épocas de estiaje. El curso de agua es alimentado por una extensa red de afluentes con aportes superficiales y contribuciones por la escorrentía subsuperficial. El perfil longitudinal suele ser constante con pendientes generalmente inferiores al 5% y velocidades de flujo inferiores a los 4 o 5 m/s.

Por su parte, los torrentes son cursos de agua que escurren por zonas de montaña con altas pendientes que generalmente están por encima del 5% y con unas velocidades superiores a los 5 m/s en el momento de la ocurrencia de las crecidas. Los gastos que escurren por estos tramos, debido a sus velocidades, tiene un gran potencial erosivo, arrastran materiales hacia las cuencas medias o bajas.

En vista de que en los torrentes se generan altas velocidades y por ende, les da la capacidad erosiva y de arrastre de materiales, los torrentes tienen un importante potencial destructivo, producto de la gran energía del flujo, la cual a su vez proviene principalmente de la elevada pendiente de los cauces y de la presencia de materiales sólidos transportados por la corriente, los cuales, junto con el agua, pueden causar enormes daños al alcanzar las planicies aguas abajo, donde normalmente se concentran las actividades humanas, sean desarrollos urbanos o desarrollos agrícolas, o de cualquier índole.

En otras palabras se puede indicar que estos torrentes o ríos de montaña, al llegar al pie de monte, sufren un cambio brusco en su pendiente y gradiente hidráulico, por lo cual, en época de crecientes tienden a depositar sus arrastres sólidos para formar lo que se conoce como el abanico aluvial del río o también denominado cono de deyección.

La falta de terrenos adecuados para urbanizar, ha hecho que numerosas ciudades y poblaciones se asienten sobre las laderas y abanicos aluviales de los ríos de montaña. Los deslizamientos, los flujos de detritos o aludes torrenciales, y las inundaciones, ocurren natural y frecuentemente en estos ambientes, amenazando gravemente los desarrollos urbanos allí asentados. Es por estas razones que la ocupación de los abanicos aluviales tiene que ir acompañada de medidas de control y mitigación contra la amenaza torrencial.

Se entiende por alud torrencial o deslave, como aquellos flujos con altas concentraciones de sedimentos que se generan en las cuencas montañosas, cuyo origen está asociado a la ocurrencia de deslizamientos durante lluvias prolongadas y de alta intensidad, y que pueden estar conformados por agua, barro, rocas, y grandes restos de vegetación, así como por todo tipo de desperdicios y arrastres de materiales fabricados por el hombre. Los tamaños de los sedimentos arrastrados varían desde micrones, como los limos y las arcillas, pasando por los cantos rodados de varios centímetros, hasta varios metros de diámetro, como los grandes peñones o rocas. (López J.L., 2005).

Foto 1.1. Vista de la garganta y del abanico aluvional de la cuenca del Río Cerro Grande luego del evento de Diciembre de 1999 en el Estado Vargas, Venezuela. (Foto cortesía Ing. José Luis López)



La corrección de torrentes tiene como finalidad controlar el gran potencial destructivo de estos aludes torrenciales o deslaves, producto de la energía del flujo proveniente principalmente de la elevada pendiente de los cauces de características torrenciales y de la presencia de materiales sólidos transportados por la corriente, los cuales, junto con el agua, pueden causar enormes daños al alcanzar las planicies ubicadas aguas abajo, donde normalmente se concentran las actividades y la infraestructura humana (ciudades, carreteras, cultivos, etc.).

Foto 1.2. Vista de la garganta y del abanico aluvional de la cuenca del Río San Julián luego de la construcción de las presas y la canalización en 2006 en el Estado Vargas, Venezuela. (Foto cortesía Ing. José Luis López)



Como consecuencia de la ocurrencia de las tormentas en la cuenca o el deshielo, los cursos de agua aumentan de caudal y se producen crecidas extraordinarias, pudiéndose generar los desbordes sobre las márgenes adyacentes del río, muchas ellas invadidas por el hombre, y provocando, con mayor frecuencia, catástrofes que involucran pérdidas de vidas humanas y económicas cuantiosas. La memoria del agua es tal que por más que durante años no se haya manifestado, al cabo del tiempo hace presencia tratando de recobrar sus territorios.

1.2. EL FLUJO TORRENCIAL

Las cuencas vertientes de montaña constituyen unidades de estudio y gestión. Lo primero porque en ellas se pueden analizar los ciclos del agua y de los sedimentos enmarcados directamente en su territorio, que adquieren la máxima relevancia cuando sucede el fenómeno del geo-dinamismo torrencial, causado por las precipitaciones torrenciales extremas, fusiones repentinas del manto de nieve o desprendimientos de aludes. Lo segundo porque la cuenca se encuentra normalmente poblada y sus habitantes necesitan de sus recursos para desarrollarse.

En los sistemas montañosos se desarrollan diversos procesos geodinámicos que determinan el modelado del paisaje y afectan los asentamientos humanos y las actividades socioeconómicas. Estos procesos geodinámicos se pueden considerar fenómenos de formación geológica y geomorfológica reciente que determina una inestabilidad tanto real como potencial que lo caracteriza. Esta inestabilidad es aumentada con la inserción de la actividad antrópica, lo que deriva en la aceleración de algunos procesos amenazantes o propiciando la aparición de otros como son la torrencialidad, la erosión y las inundaciones (Unesco, 2008).

Los sistemas montañosos se caracterizan por presentar un elevado potencial hidrográvitario dado por su altura y sus grandes pendientes, frentes de condensación de gran actividad localizados a diferentes niveles de las cordilleras, así como por la ocurrencia de sustratos fracturados frecuentemente cubiertos por formaciones superficiales inestables, tales como esquistos meteorizados, suelos residuales o capas vegetales, que en conjunto son fáciles de arrastrar y transportar hacia abajo por agentes como el agua (Unesco, 2008).

La propensión a la torrencialidad de las vertientes montañosas es una respuesta a la precipitación que se manifiesta en la forma de una concentración rápida en los escurrimientos, que unido a los movimientos en masa de material arrastrado de las laderas de las montañas y la concentración de los escurrimientos en los cauces, puede acelerar la ocurrencia de flujos torrenciales.

Un flujo torrencial es definido como una inundación de corta duración con un elevado pico de descarga y que sigue poco después de la ocurrencia de una tormenta de características extraordinarias con alta precipitación. Puede recibir diversos nombres, los cuales dependen principalmente de las características de cada evento en particular.

Los flujos torrenciales son eventos que pueden producirse en un lapso de horas después de una lluvia muy fuerte y que llegan a causar un elevado número de afectaciones, sean estas vidas humanas, así como cuantiosos daños en la propiedad, por la dificultad para tomar medidas de prevención. Se caracterizan por su elevado daño potencial, ocurrencia repentina, alta recurrencia, magnitud variable y amplia ocurrencia en diversos puntos geográficos de la tierra, afectando grandes y pequeñas áreas urbanas.

Los factores condicionantes para la generación de aludes torrenciales en la fisiografía montañosa se desarrollan en regiones donde confluyan las siguientes características: