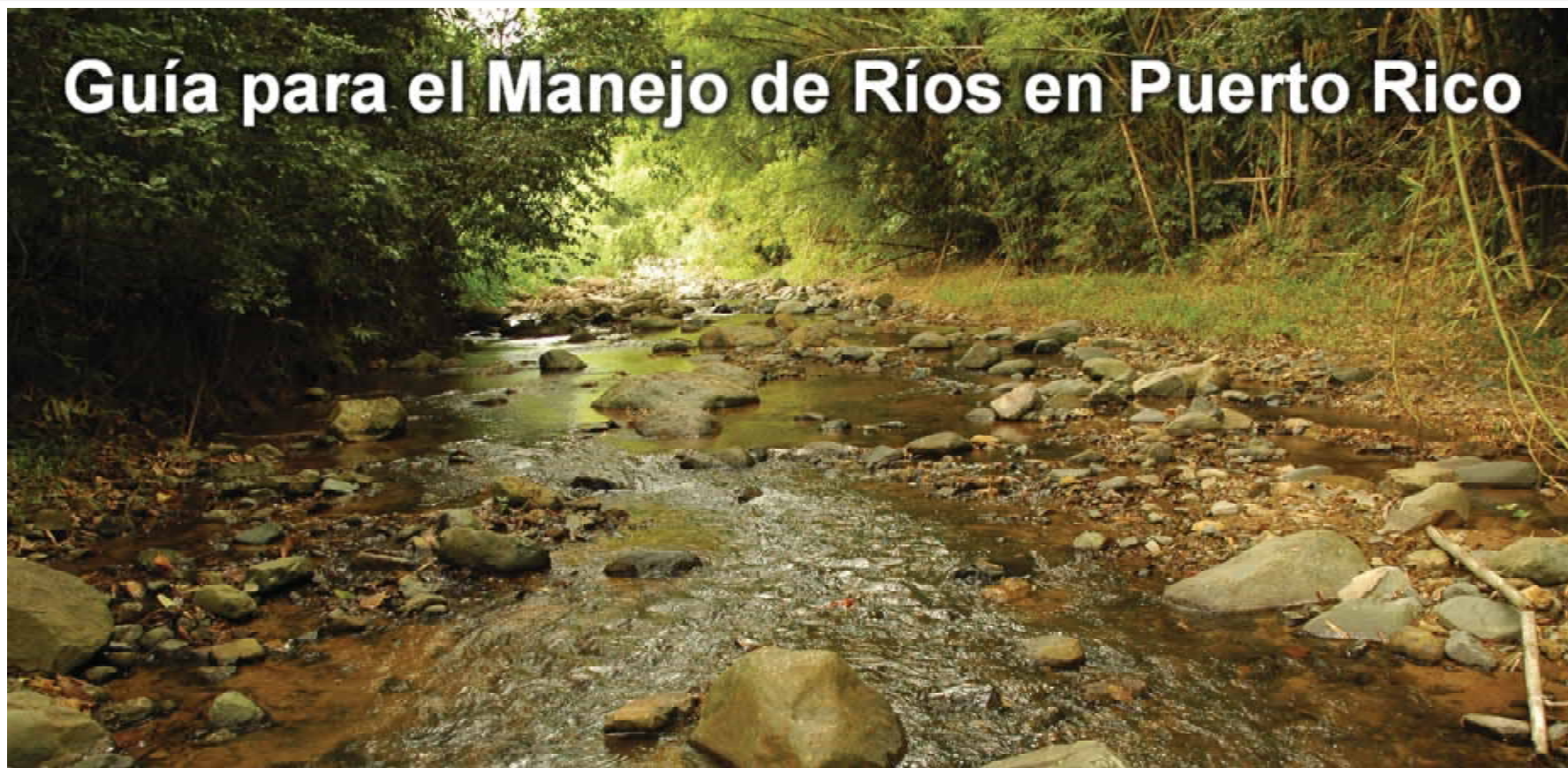


Guía para el Manejo de Ríos en Puerto Rico



Preparado por:

Gregory L. Morris, P.E., Ph.D

Juan Portalatín, P.E.

Rebecca de Jesús, Bióloga

Marielys Ramos, BSCE

Tayra Toledo

Documento preparado bajo contrato entre la División de Monitoreo del Plan de Aguas del DRNA y Gregory L. Morris Engineering, San Juan.

© Gregory L. Morris y
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

Tabla de Contenido

Prefacio	v	Evaporación y evapotranspiración	4.6
Abreviaciones	vi	Hidrogramas	4.7
Capítulo 1. Introducción	1.1	Infiltración y escorrentía	4.8
Propósito	1.1	Análisis de duración	4.10
Necesidad	1.1	Criterios de diseño	4.12
Organización	1.2	Balance entre río y acuífero	4.13
Capítulo 2. La Cuenca	2.1	Medición de flujo	4.14
Concepto de la cuenca	2.2	Crecidas máximas	4.16
Ciclo hidrológico	2.3	Variabilidad de flujo	4.18
Geología	2.4	Flujos mínimos	4.19
Capítulo 3. Geomorfología Fluvial	3.1	Rendimiento seguro	4.20
Componentes de un río	3.2	Capítulo 5. Transporte de sedimento	5.1
Cauce y planicie	3.3	Erosión	5.2
Atrincheramiento	3.4	Rendimiento de sedimentos	5.4
Meandros y sinuosidad	3.7	Características de los sedimentos	5.5
Meandros, charcas y rápidos	3.8	Coraza	5.8
Migración de ríos	3.9	Velocidad de asentamiento	5.9
Estabilidad de río	3.12	Muestreo del lecho del río	5.10
Balance Lane	3.14	Movimiento Inicial de sedimentos	5.12
Clasificación de río	3.15	Variabilidad en tasa de transporte	5.14
Capítulo 4. Hidrología	4.1	Capítulo 6. Características biológicas	6.1
Balance de agua	4.2	Cadenas alimentarias	6.2
La lluvia	4.3	Organismos acuáticos	6.5

Capítulo 7. Calidad de agua	7.1
Concepto de contaminantes	7.2
Sedimentos en suspensión	7.3
 Capítulo 8. Aspectos legales y reglamentarios	 8.1
Definición de río y quebrada	8.2
Acciones de Protección bajo el Plan de Agua	8.3
Ley Núm. 49 del 3 de enero de 2003	8.4
Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación	8.6
Permisos del Cuerpo de Ingenieros	8.8
 Capítulo 9. Alternativas de manejo	 9.1
Limpieza de río	9.2
Extracción de arena y grava	9.3
Protección de riberas	9.7
Enfoque de manejo de las inundaciones	9.12
Canalizaciones	9.14
Puentes	9.18
Atarjeas	9.20
Represas	9.22
Tomas	9.24
Protección de la zona de cauce mayor	9.25
 Capítulo 10. Casos estudiados	 10.1
Río Inabón	10.2
Río Sabana	10.4
Río Mameyes	10.6
 Referencias	 R.1

Prefacio

Esta guía está orientada a mejorar el manejo de los recursos de agua de Puerto Rico. Los ríos y quebradas son una parte única de nuestro paisaje y merecen un cuidado especial. El enfoque de la guía está orientado hacia el desarrollo socioeconómico y la protección ambiental puedan ser compatibles y sostenibles, siempre y cuando se diseñen y manejen las obras con sabiduría y entendimiento.

Los cuerpos de agua, junto con su ambiente ribereño, son las zonas de mayor riqueza ecológica en la Isla. Además, éstos son tanto áreas de hábitat y corredores de migración de especies nativas acuáticas. Los ríos y sus embalses suplen aproximadamente el 80% del agua potable en Puerto Rico (el resto se suple por pozos)

y por consiguiente, mantener su calidad e integridad es esencial a la salud humana. Los ríos y embalses son nuestras fuentes de agua y todo lo que hacemos en ellos eventualmente se refleja en el agua que consumimos.

Los ríos también pueden representar riesgos a la sociedad cuando se construye en zonas inundables o en zonas expuestas a procesos naturales de erosión de ribera. Muchas de las actividades humanas aumentan estos riesgos por el manejo inadecuado del río y por invadir las zonas de alto riesgo sin tomar las debidas precauciones.

Pese a su importancia, encontramos que en Puerto Rico no se maneja el entorno fluvial y

sus riberas de una forma adecuada, haciendo mucho daño a su ecología, restando su utilidad a la sociedad y causando daños a nuestra infraestructura por estar mal ubicada o mal diseñada. Una barrera migratoria en un punto puede eliminar las especies nativas en toda la cuenca aguas arriba. Estos problemas, en su mayoría, son el resultado de la falta de conocimiento y concientización.

Esta “Guía para el Manejo de Ríos” ha sido preparada con el propósito de mejorar el entendimiento de los aspectos hidrológicos, morfológicos y ecológicos de los ríos. Un mejor entendimiento de este recurso resultará en un manejo más consciente para el bienestar socioeconómico y ecológico.

Abreviaciones

Agencias:

AAA	Autoridad de Acueductos y Alcantarillados
AEE	Autoridad de Energía Eléctrica
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
DRNA	Departamento de Recursos Naturales y Ambientales
EE.UU.	Estados Unidos
EPA	Agencia de Protección Ambiental
FEMA	Agencia Federal para el Manejo de Emergencias
FWS	Servicio de Pesca y Vida Silvestre
JCA	Junta de Calidad Ambiental
JP	Junta de Planificación de Puerto Rico
NFIP	Programa Nacional de Seguros Contra Inundaciones
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

USACE	Cuerpo de Ingenieros de los estados Unidos
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
SHPO	Oficina Estatal de Conservación Histórica (State Historic Preservation Office)

Unidades:

°C	Grados Celsius
cm	Centímetros
d	Día
hr	Horas
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
km ²	Kilómetros cuadrados
l	Litros
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
mg	Miligramos

mgd	Millones de galón por día
mi	Millas
mi ²	Millas cuadradas
min	Minutos
mm	Milímetros
N	Newtons
pcs	Pies cúbicos por segundo
ppm	Partículas por millón
pulgs	Pulgadas
s	Segundos
s ²	Segundos al cuadrado
t	Toneladas (1,000 kg)
µm	Micrómetro
µs	Microsiemens

Variables:

A	Área de cuenca
BOD ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
d	Diámetro de partícula

D	Profundidad del agua	s	Pendiente
E _P	Evaporación de plato	S _{er}	Sedimento erosionado
E _T	Evapotranspiración	S _{exp}	Sedimento exportado
F*	Valor crítico del coeficiente Shields	s _R	Pendiente del río
I _R	Intervalo de recurrencia	s _V	Pendiente del valle
K _P	Coeficiente de plato	t	Tiempo
L _C	Longitud del canal	TDS	Total de sólidos disueltos
L _V	Longitud del valle	ΔS	Almacenaje del acuífero
P	Precipitación	ω	Velocidad de asentamiento
PET	Evapotranspiración potencial	ρ _s	Densidad de los sedimentos
PMP	Precipitación máxima probable	ρ _w	Densidad del agua
P _O	Probabilidad de ocurrencia	μ	Viscosidad dinámica
Q	Flujo	τ ₀	Fuerza que ejerce el agua sobre el lecho del río
Q ₉₀	Caudal excedido el 90% del tiempo	γ	Peso específico del agua
Q ₉₅	Caudal excedido el 95% del tiempo	γ _s	Peso específico del sedimento
Q ₉₈	Caudal excedido el 98% del tiempo		
Q ₉₉	Caudal excedido el 99% del tiempo		
Q _m	Caudal promedio		
R	Precipitación anual promedio		
R _h	Radio hidráulico		
S	Sinuosidad		

Capítulo 1

Introducción

Propósito

El propósito de esta guía es proveer información fundamental sobre las características de los ríos de Puerto Rico, con el fin de mejorar su aprovechamiento, para sostener sus funciones ambientales y minimizar los riesgos a viviendas e infraestructura. El objetivo es mejorar las intervenciones de la sociedad en los sistemas fluviales para lograr un futuro sustentable.

Nuestros patrones de manejo del ambiente influyen, no sólo en nuestras vidas, sino también en la de futuras generaciones. Es necesario aplicar sabiduría, para lograr alcanzar un desarrollo socio-económico sin perder los recursos y valores ambientales.

A pesar de que esta guía se refiere a “ríos”, se debe tener en cuenta que los conceptos son igualmente aplicables a “quebradas”. De hecho, no existe una regla estándar para aplicar la nomenclatura de “río” o “quebrada” a un cuerpo fluvial y muchos de los ríos en Puerto Rico serían denominados como “quebrada” si éstos estuvieran localizados en el Amazona, por ejemplo. Hablamos de los ríos como un sistema fluvial y los mismos principios de hidrología, hidráulica y morfología son aplicables a ambos.

En Puerto Rico, la diferencia principal corresponde a su trato bajo ley y reglamento, según se discute en el Capítulo 8.

Necesidad

Esta guía surge de la necesidad de atender las consecuencias de las intervenciones adversas que han acontecido hasta el momento en los ríos de Puerto Rico. Ejemplos de estas conse-

cuencias incluyen daños a vivienda e infraestructura (**Ilustración 1.1**), pérdida de hábitat para organismos acuáticos (**Ilustración 1.2**), obras de control de inundación que tienen altos costos de mantenimiento y construcción de tomas que son ambientalmente dañinas y tienen problemas de sedimentación. Estas consecuencias adversas se pueden evitar adoptando estrategias adecuadas para el manejo de ríos.



Ilustración 1.1: Daños causados a viviendas por migración de meandro en Río Turabo, Caguas.



Ilustración 1.2: Canalización Río Portugués, Ponce, pérdida de hábitat y barrera migratoria.

Organización

Se ha organizado esta guía de la siguiente manera:

La cuenca

La primera sección explica el concepto de la cuenca hidrográfica y su relación al río e incluye algunas de las características geológicas importantes para determinar las características de los ríos.

Geomorfología Fluvial

El agua representa la mayor fuerza natural responsable de la modificación de la superficie de la tierra. Esta erosiona las montañas y crea depósitos de sedimentos.

Es necesario entender el rol de los ríos dentro de los procesos geológicos para poder manejarlos de una manera sabia. El manejo de los sistemas fluviales de forma contraria a los procesos naturales y a las fuerzas geomorfológicas genera muchos problemas y altos costos de mantenimiento. La vida acuática también depende de la configuración geomorfológica natural del río para sostener sus migraciones y sus ciclos de vida. En esta sección se presenta la configuración y las características físicas (morfológicas) de los ríos de Puerto Rico.

Hidrología

Los ríos conducen flujos de escorrentía pluvial, además de la fracción del drenaje de los acuíferos que mantiene el flujo base en los cauces. La magnitud y variabilidad de estos flujos, en combinación con el entorno geológico, son responsables de establecer las características físicas (morfológicas) de cada tramo de río y los límites de sus inundaciones.

Conocer los flujos mínimos es importante ya que los ríos principales de Puerto Rico son aprovechados para el suministro de agua a la sociedad. El análisis de flujos mínimos es necesario para poder predecir cuánta agua se puede suplir durante una sequía.

Sedimentación

El agua es el principal agente que erosiona la tierra. Una de las funciones principales de los ríos en el ciclo geológico es el transporte del material erosionado hacia la costa. Es necesario entender los procesos de transporte del material geológico para lograr patrones sustentables de aprovechamiento, particularmente en relación al diseño y manejo de los embalses cuya utilidad se limita por su tendencia a atrapar estos sedimentos.

Características Biológicas

Las especies nativas cada día enfrentan una mayor dificultad para subsistir frente a los cambios hechos por el ser humano. Muchos de los daños causados por los humanos pueden ser evitados con medidas adecuadas de diseño y manejo. Esta sección discute las características

ecológicas y los daños ocasionados por diversas actividades humanas.

Calidad del Agua

En esta sección se discuten brevemente los múltiples aspectos de la calidad del agua y su impacto sobre los organismos que dependen del agua.

Aspectos Legales y Reglamentarios

La sección de aspectos legales presenta varias definiciones legales y reglamentarias relevantes al manejo de los ríos que son discutidas en términos de las características y los procesos naturales.

Estrategias de Manejo

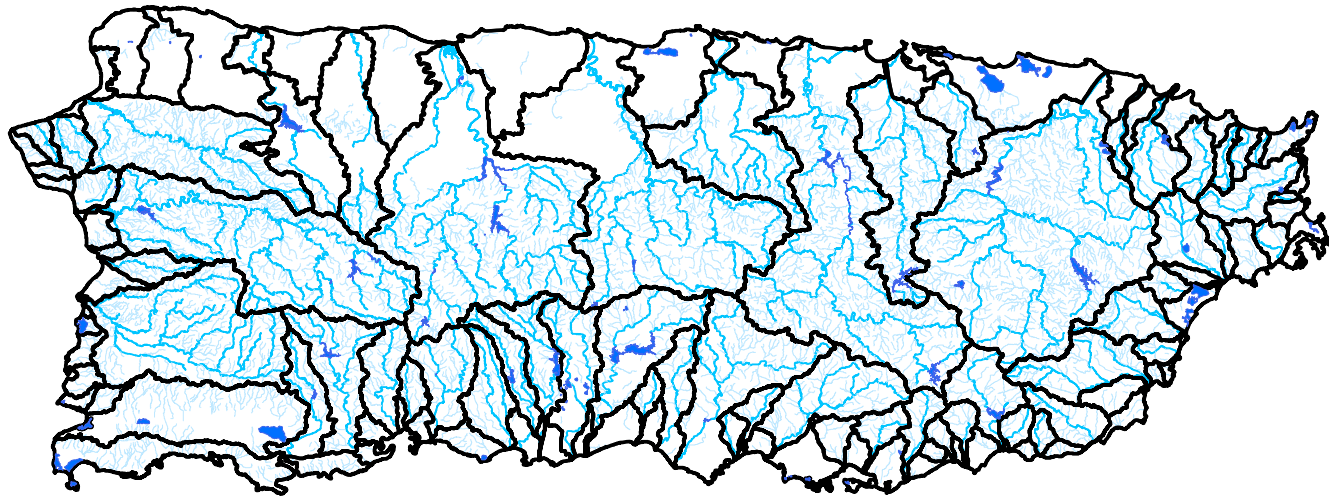
Esta sección examina las acciones de manejo que típicamente afectan a los ríos y presenta alternativas que son más sustentables en términos de minimizar las consecuencias adversas al ambiente y a la sociedad.

Casos Estudiados

La última sección presenta el estudio de algunos casos sobre problemas en el manejo de ríos.

Capítulo 2

La cuenca



Contenido

1. Concepto de la cuenca
2. El ciclo hidrológico
3. Geología

Introducción

Las características de un río se definen principalmente por los aspectos fisiográficos y climatológicos de la cuenca. Los factores importantes a considerar en las cuencas incluyen su tamaño, la pendiente, precipitación, geología y uso de terrenos. El entendimiento y el manejo efectivo de los ríos dependen en gran medida de la comprensión de las cuencas y de sus características.

Concepto de la cuenca

La cuenca hidrográfica consiste de todos los terrenos que drenan a un punto de interés. La topografía del terreno define los límites de la cuenca. Los toques de las montañas son el punto divisorio entre los terrenos que drenan hacia la cuenca de interés y los terrenos que corresponden a las cuencas adyacentes. La **Ilustración 2.1** muestra un ejemplo del límite de una cuenca hidrográfica.

Las características de la cuenca son responsables de determinar el volu-

men y la calidad del agua en el río, así como también la cantidad y las características de los sedimentos transportados. Por ejemplo, la cuenca tributaria al embalse Carraízo incluye la ciudad de Caguas, y por consiguiente, las actividades en Caguas y sus alrededores influyen en la calidad del agua en ese embalse.

Se puede definir una cuenca con referencia a cualquier punto en el río y según se recorre a lo largo del río en dirección aguas abajo, el área de

cuenca aumenta. El área total de la cuenca de una quebrada o río incluye todos los terrenos aguas arriba de su punto de desembocadura. En el caso de un río que es tributario a otro río, la cuenca del río menor se define partiendo del punto de su desembocadura en el río principal, mientras que la cuenca del río principal consiste de su propia cuenca más las cuencas de todos sus tributarios.

El volumen y la calidad del agua en el río están directamente relacionados a las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca.

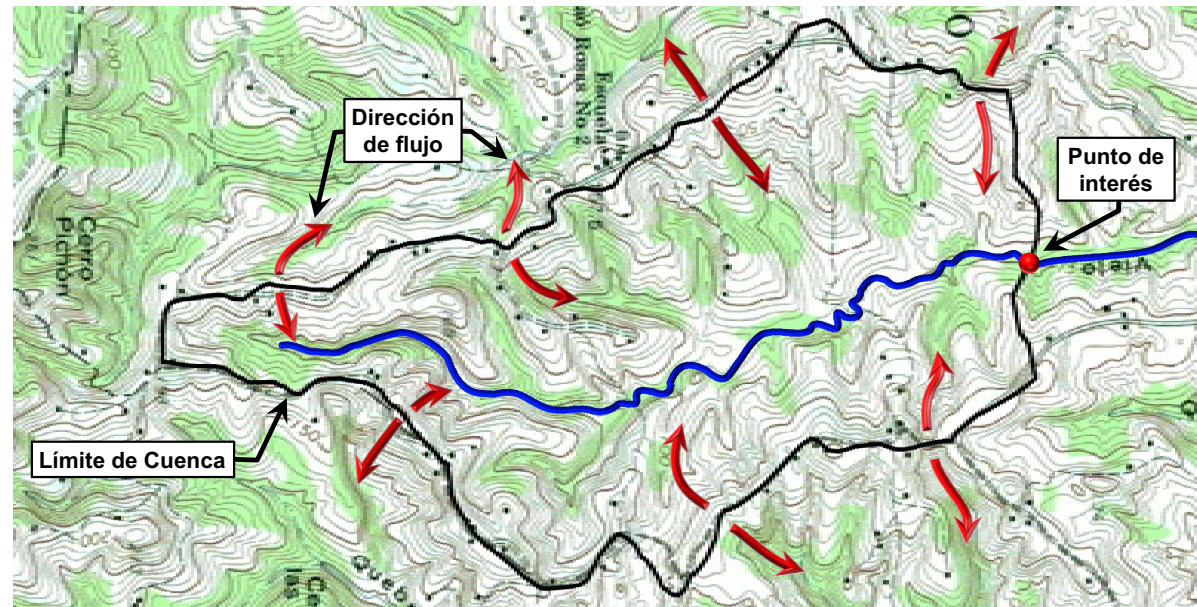


Ilustración 2.1: Límites de cuenca.

Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un proceso continuo que representa el movimiento del agua. El agua sube a la atmósfera al evaporarse de la superficie de diferentes cuerpos de agua, principalmente los océanos, y por la evaporación y transpiración de las plantas (evapotranspiración). El vapor sube a la atmósfera, donde al reducir su temperatura se condensa para crear nubes. Luego el agua se precipita en forma de lluvia, nieve o granizo, cae a la superficie de la tierra y es dirigida

hacia los océanos por la escorrentía e infiltración. De esta manera se completa el ciclo.

Se puede construir un balance de agua representando cada componente de este ciclo en diferentes escalas, desde una cuenca pequeña hasta una escala mundial. Los volúmenes de agua asociados con el ciclo del agua en Puerto Rico se muestran en la **Ilustración 2.2**.

Los volúmenes del flujo en cada componente del ciclo de agua son muy variables y por consiguiente el balance de agua solamente da una representación general y descriptiva. Para analizar fenómenos como las inundaciones o la disponibilidad del agua para un uso en particular, es esencial estudiar los componentes con mucho mayor detalle utilizando datos registrados diarios o hasta de cada 15 minutos en el caso de las crecidas.



Ilustración 2.2: Ciclo hidrológico para un año promedio en Puerto Rico.

El ciclo hidrológico es el motor principal en el proceso de erosionar las rocas y desgastar las montañas. Los sedimentos erosionados son transportados al mar a través de los ríos.

Los flujos en cada componente del ciclo son variables (diariamente y anualmente), especialmente la lluvia y escorrentía pluvial.

Geología

Las arenas en muchas playas de Puerto Rico y en las demás islas caribeñas no consisten de los minerales de las montañas, sino del carbonato de calcio que compone los caracoles, arrecifes y algas coralinas.

El afloramiento de la roca basáltica es muy común en los ríos de Puerto Rico. Los puntos de afloramiento crean controles estructurales que limitan la migración vertical del lecho del río.

Para entender el comportamiento de los ríos, es necesario entender algunos conceptos básicos sobre las rocas de su lecho. Tanto los sólidos disueltos como los sedimentos que transportan las aguas provienen del desgaste de estas piedras por el agua.

La roca basáltica

Hace aproximadamente 60 millones de años (5 millones de años después de la extinción de los dinosaurios), la acción volcánica empezó a levantar roca ígnea del fondo del mar para dar comienzo a la formación de lo que hoy día llamamos la Isla de Puerto Rico.

La roca que fue levantada del fondo del mar para formar las Antillas es el basalto, una roca oscura, pesada, y que contiene poco sílice. A diferencia de las Antillas, los continentes están formados principalmente de granito, una roca más liviana que el basalto, menos oscura y de alto contenido de sílice. La **Ilustración 2.3** muestra una comparación entre granito y basalto.

De todos los minerales en la roca, el sílice es el más resistente a la disolución con el agua. El desgaste de granito deja como residuo una cantidad significativa de sílice, por lo que el lecho de los ríos y las playas continen-

tales consisten principalmente de cristales de sílice, una arena blanca. En contraste, en Puerto Rico, el desgaste de las montañas basálticas produce principalmente arcillas y minerales oscuros más susceptibles al desgaste químico por el agua. Por lo tanto, el desgaste de la Cordillera Central no produce mucho material de tamaño de arena.

La roca caliza

Parte de la Isla quedó a poca profundidad por debajo del mar durante millones de años, produciendo miles de pies de espesor en depósitos de cali-



Ilustración 2.3: Comparación de basalto y granito. En el granito es fácilmente visible la estructura cristalina, contrario al basalto.

za. Esto sucedió como consecuencia del crecimiento de corales, moluscos, ciertas especies de algas marinas, erizos, y otros tipos de vida marina que forman esqueletos de carbonato de calcio. Se conoce la edad de las formaciones debido a los diferentes fósiles de organismos marinos encontrados. La sección geológica presentada en la **Ilustración 2.4** muestra que el espesor de las formaciones de caliza depositadas por encima de la roca ígnea llega a más de 5,500 pies en la costa norte (Renken, et al. 2000).

La caliza es la roca predominante a lo largo de la costa norte, al oeste de San Juan. La **Ilustración 2.5** presenta la afloración de caliza en forma de mogote, típicos de la costa norte. Una característica de la roca caliza es que se disuelve con el agua de lluvia que se infiltra a través del suelo, desgastando la piedra y a la vez formando cavidades, cavernas y sumideros. La generación del dióxido de carbono (CO_2) por el proceso de respiración de organismos dentro del suelo contribuye en acidificar el agua, de este modo acelerando la disolución de la roca caliza.

Donde la escorrentía pluvial descarga directamente hacia un sumidero, las actividades en su cuenca influyen directamente en la calidad de las aguas del acuífero. El agua de los pozos se suple sin haber pasado por un proceso de filtración, su único tratamiento es la aplicación de cloro como desin-

fectante. Un estudio reciente (junio, 2009) muestra que hay sobre 200 sumideros en la costa norte que reciben la escorrentía superficial de aproximadamente 39.4 km^2 de terrenos urbanizados.

Los depósitos aluviales

Al desbordar sus aguas sobre el terreno durante las crecidas, los ríos depositan sedimentos finos y de esta manera crean su planicie inundable con suelos llanos y fértiles. La **Ilustración**



Ilustración 2.5: Los mogotes son formaciones cársticas típicas en el área norte.

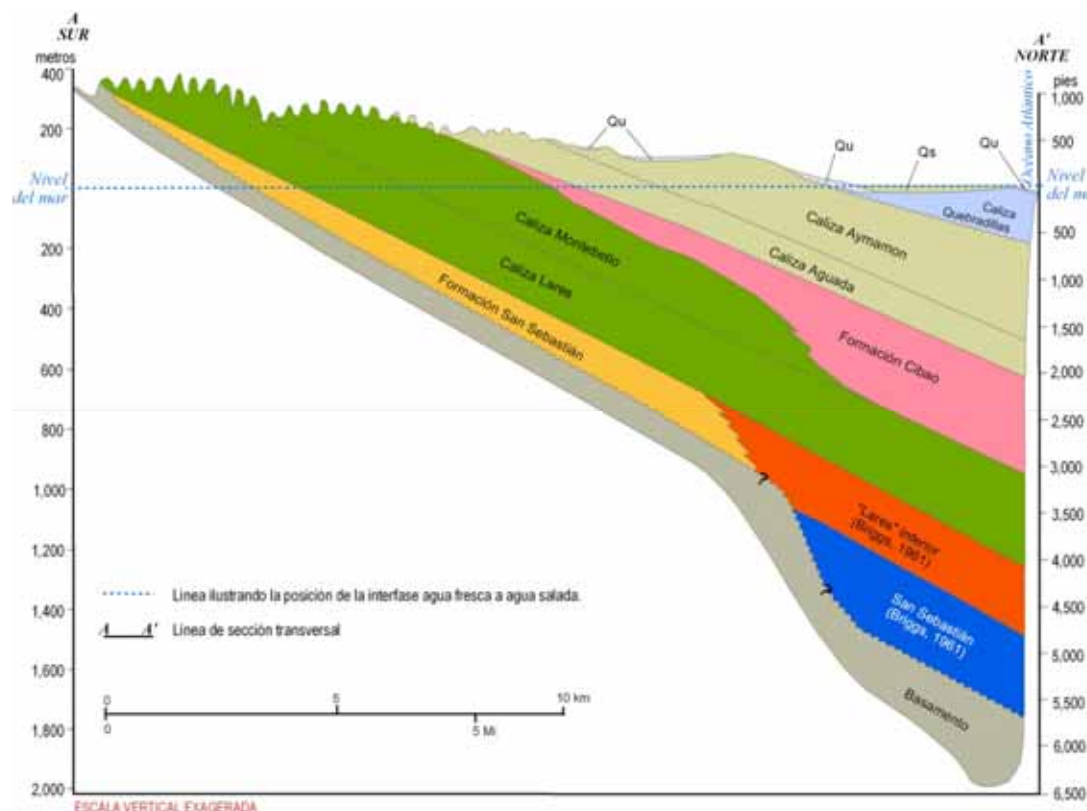


Ilustración 2.4: Sección geológica de la Costa Norte de Puerto Rico.

2.6 muestra la extensión de los depósitos aluviales principales en Puerto Rico. Todos los ríos cuentan con algunos depósitos aluviales a lo largo de sus riberas.

Durante el último glacial máximo, hace unos 20,000 años, el nivel del mar estaba a unos 130 metros (400 pies) por debajo del nivel actual debido a que una gran parte del volumen de agua del mar se encontraba atrapada en los glaciales continentales, cuyo espesor alcanzaba más de dos millas. La **Ilustración 2.7** muestra el incremento en el nivel del mar durante los pasados 20,000 años. En aquel entonces, la Isla de Puerto Rico tenía el doble de su tamaño actual y se extendía hasta la Isla Virgen Gorda (**Ilustración 2.8**). Al derretirse esta masa de hielo, se elevó el nivel de mar hasta llegar al nivel actual y los ríos llenaron sus valles sumergidos

Los depósitos aluviales de la costas de Puerto Rico son fuentes importantes de abasto de aguas utilizadas para fines municipales y agrícolas.

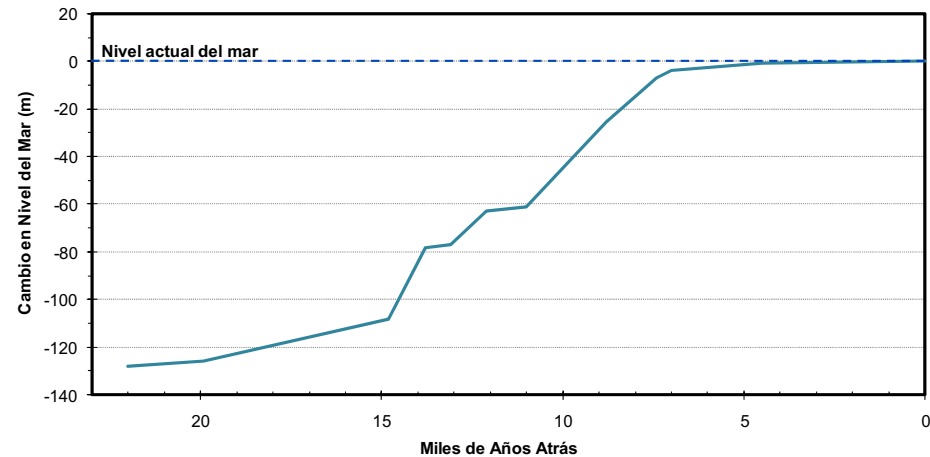


Ilustración 2.7: Historial del nivel del mar durante los últimos 20,000 años.

con los sedimentos que hoy día forman las planicies aluviales y costeras.

Los suelos aluviales se originan principalmente del proceso de erosión de la Cordillera Central, donde predomina la roca basáltica. En nuestro clima húmedo, el basalto experimenta un

cambio químico por meteorización y produce mucha arcilla. La arcilla es erosionada del suelo y transportada por los ríos para luego ser depositada sobre las planicies inundables durante las crecidas. La arcilla no es como la arena, que es simplemente un fragmento de roca que antes fue más

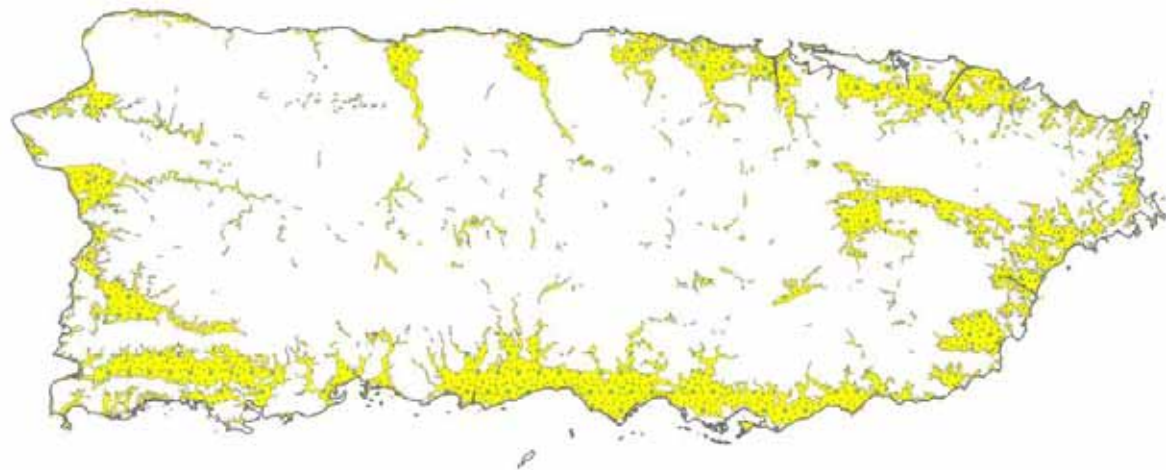


Ilustración 2.6: Depósitos aluviales de Puerto Rico.



Ilustración 2.8: Extensión de Puerto Rico durante la era glacial (hace 20,000 años).

grande, sino que es un compuesto mineral. Los granos individuales de arcilla son tan pequeños que apenas se sedimentan en el agua y las fuerzas electrostáticas entre las partículas son mayores que la fuerza de gravedad. Estas fuerzas electrostáticas provocan que la arcilla sea “pegajosa” o cohesiva. La **Ilustración 2.9** muestra la cohesividad de la arcilla.

El contenido de arcilla es un factor importante para reducir la tasa de erosión del suelo en las riberas de los ríos, ya que su cohesividad hace que ésta sea resistente a la erosión. En la costa sur, donde el clima es más seco, el proceso de meteorización química no es tan completo como los procesos de meteorización física. Esto resulta en suelos más arenosos y, por lo tanto, las riberas de los ríos en las planicies inundables son más erosionables que los de la costa norte.



Ilustración 2.9: Cohesividad de la arcilla.

Los suelos en las planicies inundables de la costa sur tienen menor contenido de arcilla en comparación con las planicies inundables de la costa norte, por lo que el potencial de erosión de las riberas es mayor.

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 3

Geomorfología fluvial



Río Culebrinas a la altura de la PR-110, Moca

Contenido

- | | |
|--------------------------------|--------------------------|
| 1. Componentes de un río | 6. Migración de ríos |
| 2. Cauce y planicie inundable | 7. Estabilidad del río |
| 3. Atrincheramiento | 8. Balance Lane |
| 4. Meandros y sinuosidad | 9. Clasificación de ríos |
| 5. Meandros, charcas y rápidos | |

Introducción

La geomorfología es el estudio de los procesos que forman los patrones que observamos en la superficie de la tierra. La geomorfología fluvial se enfoca particularmente en el comportamiento de los ríos y es de mucha importancia para los biólogos e ingenieros, porque tanto el hábitat acuático como las obras de ingeniería están influenciados por las interacciones entre las fuerzas hidráulicas del río y los materiales geológicos.

Componentes de un río

La **Ilustración 3.1** muestra, de forma esquemática, varios de los componentes típicos de los ríos, vistos desde una perspectiva en planta y seccional.

La corriente predominante en los ríos se alterna de lado a lado, creando así curvas o “meandros”. En el exterior de cada meandro hay una charca profunda excavada y mantenida por la socavación durante crecidas. El interior de cada meandro corresponde a una zona de deposición de sedimentos y la creación de una barra de punta.

La parte exterior de un meandro siempre se caracteriza por ser un área profunda, contrario a la parte interior, que se caracteriza por ser un área de deposición de sedimentos.

Existen también otro tipo de barras, laterales y centrales. Las barras centrales son depósitos de sedimentos que forman pequeñas islas y las barras laterales se localizan en los extremos del cauce activo. El tramo más recto entre cada meandro corresponde a una zona de flujo menos profundo e incluye zonas de rápidos caracterizados por velocidades altas y de poca profundidad.

Una línea imaginaria que sigue el punto de mayor profundidad a lo largo del río se llama el “thalweg” y se mueve regularmente de un lado al otro, siguiendo los meandros. Al trazar el perfil del fondo del río, se debe trazar el “thalweg”.

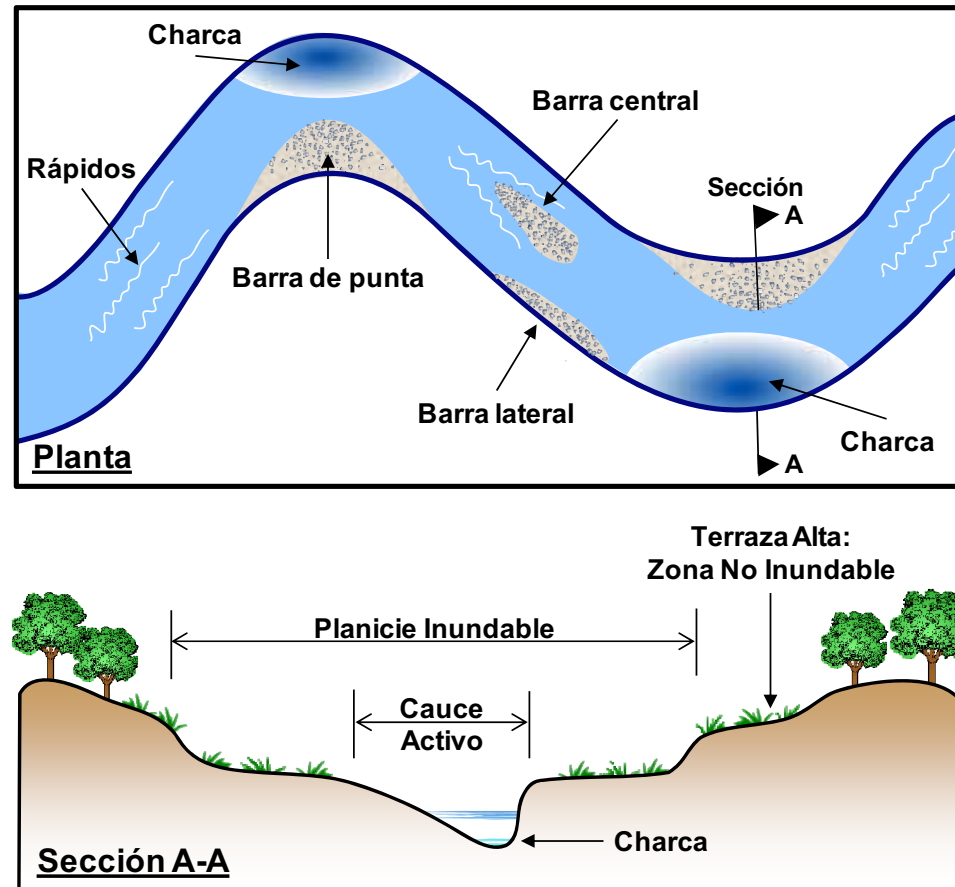


Ilustración 3.1: Componentes de un río.

Cauce y planicie inundable

Los ríos transportan un flujo altamente variable y, en Puerto Rico, el flujo máximo es típicamente más de mil veces mayor que el flujo mínimo. Por ejemplo, en el Río Grande de Manatí, a la altura de Ciales (estación USGS 50035000), el flujo disminuyó a 9 pcs durante la sequía de 1994 a 1995; mientras que, a consecuencia del huracán Hortense en septiembre de 1996, su flujo llegó a 128,000 pcs, equivalente a más de 10,000 veces el flujo mínimo.

Para manejar esta variabilidad en el flujo, los ríos han desarrollado una configuración de “cauce” y “planicie inundable” (Ilustración 3.2). Tanto el cauce como la planicie inundable son esenciales para el transporte del agua de escorrentía producida por la precipitación de su cuenca.

El cauce corresponde al área donde el flujo es suficiente para movilizar ocasionalmente las arenas y las piedras

en su lecho y en las barras y así prevenir el crecimiento de vegetación permanente. El cauce es creado y mantenido por las fuerzas hidráulicas y el tamaño de los cauces naturales típicamente corresponde al caudal cuyo intervalo de recurrencia es de 1.5 años. Esto se refiere al caudal “cauce lleno” que, en ríos naturales, corresponde al punto en que el río empieza a desbordar sobre su planicie inundable.

La planicie inundable recibe flujo infrecuente, con velocidades y profundidades bajas. Por lo tanto, puede mantener vegetación terrestre permanente. Se puede conceptualizar la planicie inundable como una “válvula de escape” que permite que la energía hidráulica de la crecida sea disipada mediante el aumento del área inundada. De lo contrario, esta energía quedaría concentrada en el cauce, donde aumentaría la tasa de erosión del cauce y sus riberas.

En Puerto Rico, los ríos han sido altamente intervenidos y su morfología refleja, no la condición de ríos naturales, sino de ríos en proceso de ajuste en respuesta a los cambios hechos por la sociedad, tales como:

1. La remoción de arena y grava de su lecho por actividades de extracción o por quedar atrapadas en embalses.
2. Cambios en la intensidad de las crecidas debido a canalizaciones aguas arriba, embalses o desarrollos.
3. Cambios en la configuración del cauce debido a canalizaciones y “limpiezas”.
4. Pérdida de la planicie inundable debido al relleno para el desarrollo, que dirige los flujos hacia el cauce.

Los ríos tienen dos elementos, cauce y planicie inundable.

Los ríos definen el tamaño de su cauce mediante la erosión y deposición de sedimentos.

En los ríos intervenidos, el cauce puede haberse ampliado o profundizado como consecuencia de acciones humanas. En estos casos, el caudal de desborde ya no corresponde al evento de 1.5 años.

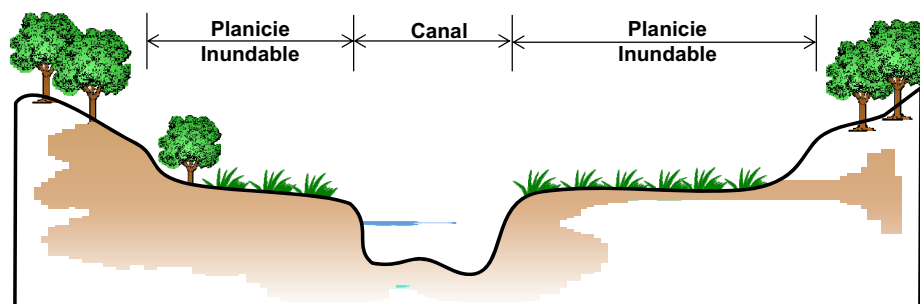


Ilustración 3.2: Configuración de canal y planicie inundable.

Atrincheramiento

Las extracciones de material del lecho de un río promueven atrincheramiento y socavación, afectando directamente las estructuras a lo largo del río.

El mayor grado de socavación en las pilas-tras de los puentes ocurre durante crecidas. La zona socavada durante el caudal máximo puede rellenarse con material según va disminuyendo el flujo.

El proceso de atrincheramiento se refiere a la reducción en el nivel del lecho de un río, ya sea por el proceso de erosión o por la extracción del material del lecho. Casi todos los ríos en Puerto Rico están afectados por el problema de atrincheramiento que ha sido ocasionado por actividades de extracción de material, por proyectos de canalización, por embalses que atrapan sedimentos y por el aumento de las crecidas como consecuencia de la impermeabilización de los terrenos. El atrincheramiento en el río principal también inicia el proceso de atrincheramiento en todos sus tributarios y de esta manera crea problemas en los tributarios que no han tenido intervención directa alguna.

El proceso y los efectos de atrincheramiento son fácilmente visibles en puentes, donde quedan expuestos los cabezales de las pilas-tras o los estribos, según se muestra en la **Ilustración 3.3**. En la **Ilustración 3.4** se puede apreciar la exposición de pilas-tras que nos indica que este tramo de río está siendo afectado por el proceso de atrincheramiento.

El atrincheramiento puede ser manejado localmente por controles estructurales. El afloramiento de roca en el fondo del río es un control natural, mientras que obras estructurales como represas, puentes vados, tabla-

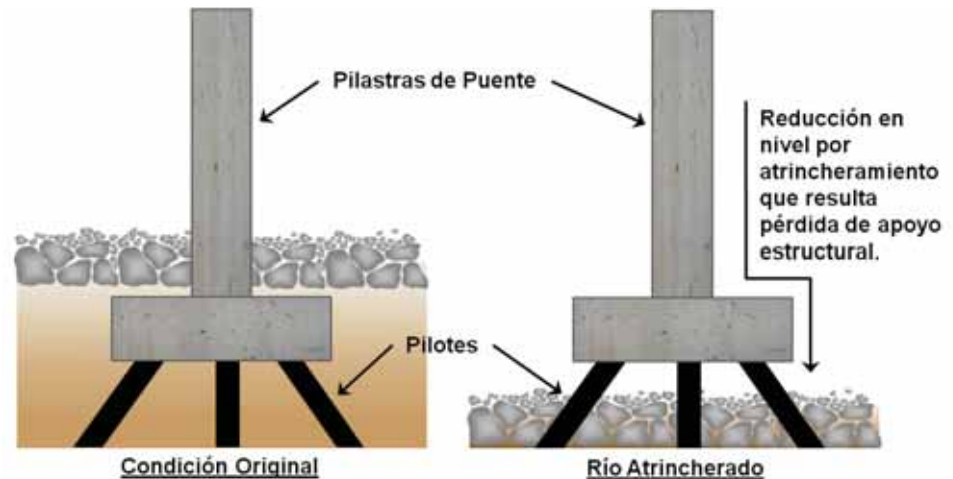


Ilustración 3.3: Indicador de atrincheramiento.



Ilustración 3.4: Pilas-tras expuestas del puente de la PR-22 en Bayamón.

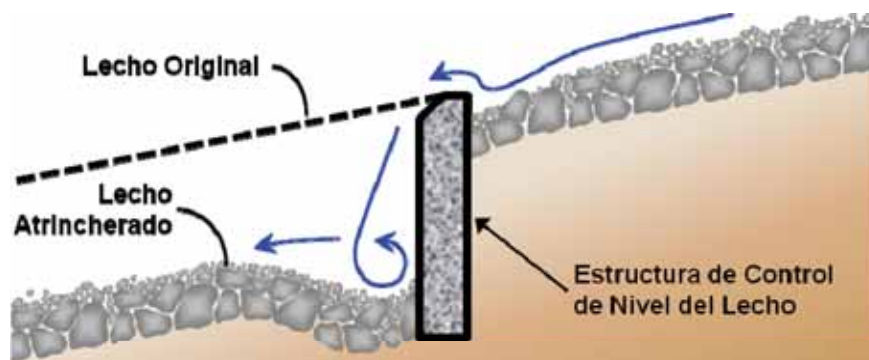


Ilustración 3.5: Control artificial para prevenir atrincheramiento.

estacados u otras estructuras pueden ejercer un control artificial (**Ilustración 3.5**). Este efecto puede ocurrir aún en estructuras no diseñadas con este propósito, como los puentes vados (**Ilustración 3.6**). Al remover tales estructuras para remplazarlas con un puente convencional, se remueve el control artificial y el proceso de atrincheramiento avanza aguas arriba rápidamente por el proceso llamado "head cutting" o erosión retrogresiva.

En la condición natural, el río empieza a desbordar y a dispersar su energía hidráulica sobre su planicie inundable cuando se excede el caudal del evento de aproximadamente 1.5 años de recurrencia. Sin embargo, el proceso de atrincheramiento aumenta la capacidad hidráulica del cauce, atrapando la energía de la crecida y, por consiguiente, aumentando las fuerzas erosivas dentro del cauce. Esto provoca que el río se atrinche aún más.



Ilustración 3.6: Puente vado de la carretera PR-3 en Salinas, mostrando proceso de atrincheramiento aguas abajo.

Las riberas de un río atrincherado se caracterizan por taludes altos e inestables. El atrincheramiento es un proceso de desestabilización del río que resulta en daños a la propiedad privada y pública. Esta situación requiere acciones remediativas costosas y en muchas ocasiones las correcciones son poco efectivas y ambientalmente dañinas.

La evolución geomorfológica del río lo lleva hacia una condición de estabilidad. La respuesta de un río a un proceso de atrincheramiento es de restablecer su forma natural, pero con un nivel base más bajo. Esto ocurre mediante la erosión de las riberas para ganar el ancho necesario y así establecer su patrón de cauce y planicie inundable nuevamente. Este proceso se muestra en la **Ilustración 3.7**.

El atrincheramiento excesivo en el río propicia el fallo de las estructuras cuando éstas no se diseñan para esa condición.

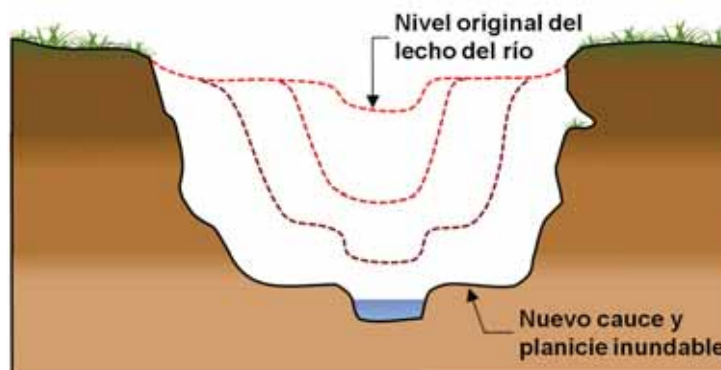


Ilustración 3.7: Evolución de atrincheramiento.

En la **Ilustración 3.8** se muestra la evolución de un río atrincherado en Colorado. En la foto se puede apre-

ciar la antigua planicie inundable y la creación de un nuevo cauce con su planicie inundable.

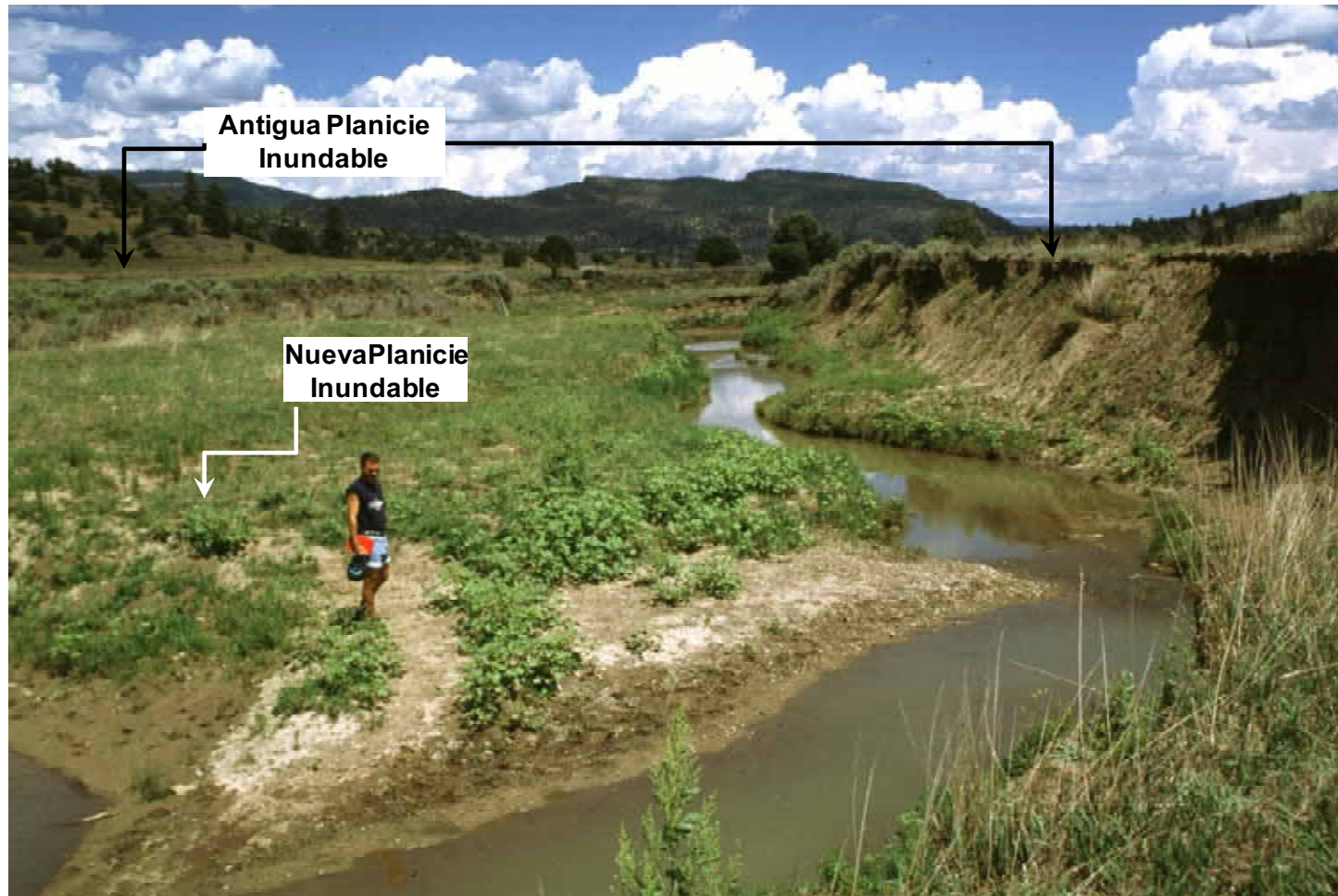


Ilustración 3.8: Evolución de un río atrincherado en Colorado.

Meandros y sinuosidad

Los ríos naturales nunca fluyen en línea recta, a menos que su curso esté confinado por controles estructurales, geológicos o humanos. Aún dentro de canalizaciones, los ríos intentan restablecer su patrón meándrico.

El interior del meandro de un río generalmente contiene una barra de punta expuesta al aire durante flujos bajos. Esta barra es un lugar de deposición de sedimento, mientras que el exterior de cada curva coincide con la zona de mayor fuerza hidráulica. Esto resulta

en la socavación y erosión de la ribera.

En la zona de cabecera con alta pendiente, la configuración es más bien una serie escalonada de charcos y saltos. En zonas llanas de poca pendiente, especialmente según el río se acerca al mar, el patrón meándrico es más pronunciado, el río se profundiza y las barras expuestas pueden desaparecer debido a la profundidad del agua.

La sinuosidad es una medida del grado del desarrollo de meandros, y representa la razón entre la distancia a lo largo del valle (L_V) y la distancia a lo largo de un río (L_R). La sinuosidad también se puede calcular utilizando la razón de la pendiente del río (s_R) y del valle (s_V):

$$S = \frac{L_R}{L_V} = \frac{s_R}{s_V}$$

La sinuosidad aumenta según disminuye la pendiente, siendo menos en las montañas y mayor en la costa. La **Ilustración 3.9** muestra una representación gráfica de la definición de sinuosidad.

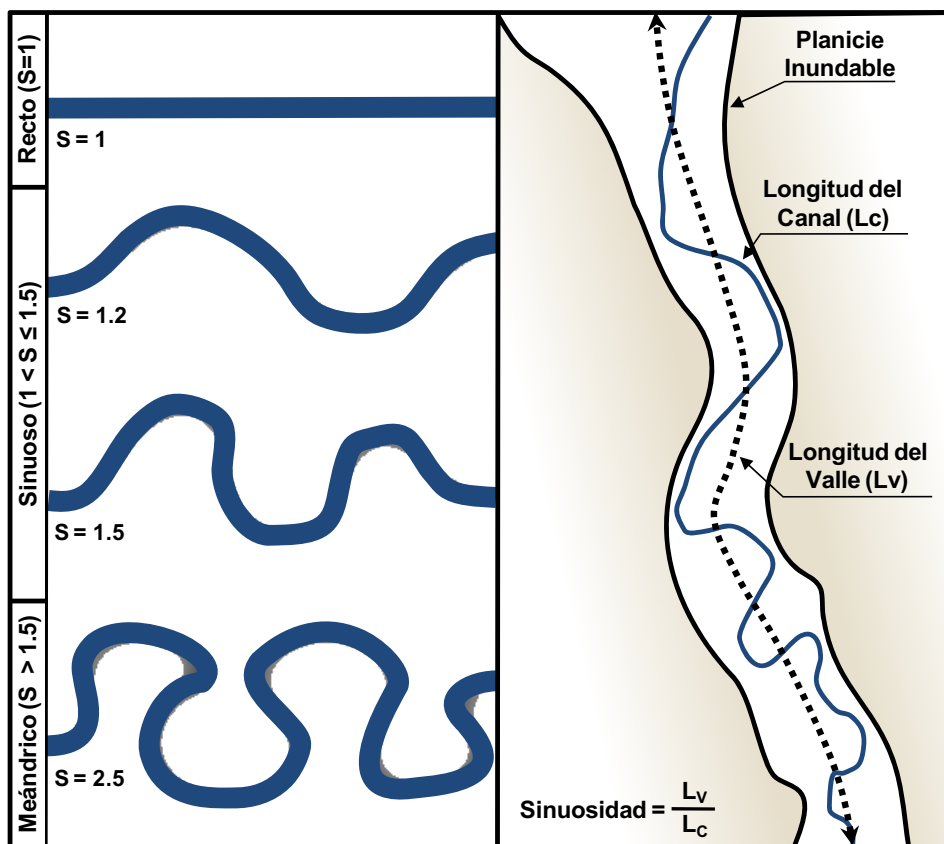


Ilustración 3.9: Sinuosidad.

Meandros, charcas y rápidos

La fuerza hidráulica se concentra en el exterior de los meandros causando socavación y promoviendo la migración lateral del mismo.

El diagrama en la **Ilustración 3.10** muestra patrones típicos de flujo que se desarrollan en los ríos asociados con sus meandros. Cada curva desvía el flujo y establece una corriente helicoidal que tiene el patrón presentado en la sección transversal A-A de la **Ilustración 3.10**, en combinación con el flujo en dirección aguas abajo. Este patrón de flujo causa la socavación al pie del talud, creando así charcas profundas, erosionando el exterior del meandro y ocasionando su migración lateral. En contraste, el interior de la curva es una zona de deposición de sedimento, caracterizada por menor velocidad del flujo y la formación de una barra de punta.

Entre cada curva existe una sección llana donde el “thalweg” del río cruza de un lado al otro. Este tramo generalmente no recibe mucha fuerza hidráulica en las riberas y es más estable que las zonas de curvatura.

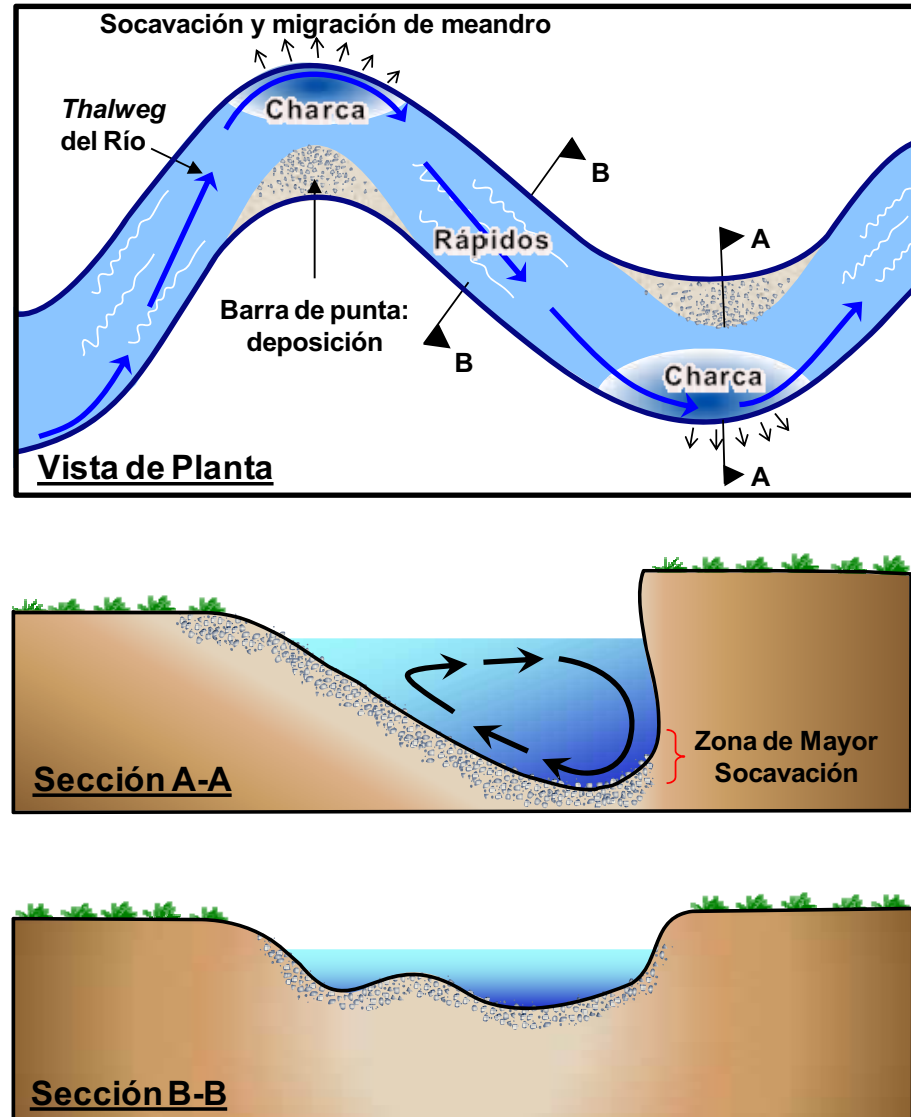


Ilustración 3.10: Sección de un meandro señalando proceso de socavación y de colapso de la ribera y relleno de la barra de punta.

Migración de ríos

El término “río aluvial” se refiere a un río que corre sobre materiales no consolidados que pueden ser erosionados y re-depositados por la acción hidráulica. El patrón del río, su sinuosidad y su sección transversal, son determinados por la interacción del río con su lecho movable. Los ríos aluviales son dinámicos y se mueven lateralmente.

En Puerto Rico hay una gran carga de sedimentos en suspensión y los meandros abandonados se llenan con sedimentos y vegetación en un periodo de sólo décadas. Sin embargo, en otras áreas del mundo, estos lagos

pueden permanecer durante siglos. La foto aérea en la **Ilustración 3.11** muestra parte del cauce abandonado del Río Grande de Manatí.

En la **Ilustración 3.12** se muestra la migración de un meandro del Río Turabo que ha causado la pérdida de varias casas de la Urbanización Villa del Rey (**Ilustración 3.13**). En Puerto Rico existen muchos lugares donde han ocurrido, y ocurren al presente, daños a la propiedad como consecuencia de la migración lateral de los ríos (proceso natural) y la falta de planificación.



Ilustración 3.11: Meandro abandonado en Río Grande de Manatí.



Ilustración 3.12: Historial de la evolución lateral de un meandro en Río Turabo durante los últimos 70 años.



Ilustración 3.13: Casas en Urbanización Villa del Rey destruidas por migración de meandro en Río Turabo.

El proceso de socavación del exterior de la curva puede hacer que el meandro crezca hasta que se corte, dejando abandonado el meandro viejo, el cual se convierte en lago.

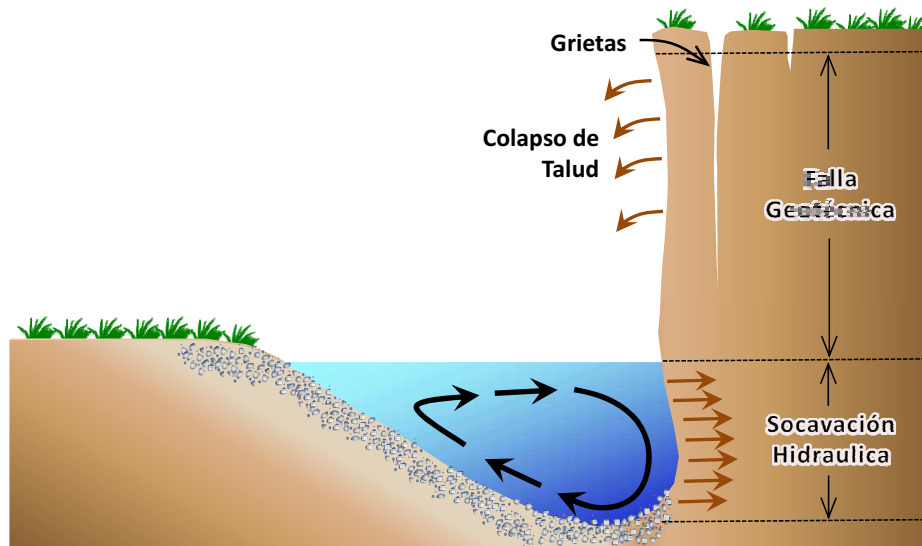


Ilustración 3.14: Proceso típico de erosión de meandro.

El proceso de erosión de un meandro típicamente ocurre por los dos procesos presentados en la **Ilustración 3.14**:

1. La fuerza hidráulica del agua erosiona el pie del talud.
2. La parte superior del talud se cae a consecuencia de una falla geotécnica, la **Ilustración 3.15** una zona de erosión activa.

Los meandros tienden a migrar en dirección aguas abajo debido a que la zona de mayor erosión se encuentra al final de la curva del meandro en dirección aguas abajo, según se aprecia en la **Ilustración 3.15**.



Ilustración 3.15: Talud erosionado por migración de meandro en Río Canóvanas.

La tasa de migración lateral del cauce depende de la frecuencia de crecidas grandes y la resistencia de la ribera. La tasa de erosión se acelera por actividades humanas, incluyendo la extracción de materiales del lecho del río (que aumenta la altura de la ribera), la urbanización de terrenos aguas arriba (que aumenta el caudal máximo, por lo tanto, la fuerza hidráulica, a la vez reduce la producción de sedimentos cuando el proceso de urbanización se completa) y las canalizaciones (que aumentan el caudal al eliminar el almacenaje sobre la planicie inundable).

El patrón meándrico de los ríos aluviales se altera al encontrarse con una estructura fija, como una pared de roca natural (**Ilustración 3.16**) o con estructuras hechas por el hombre. Cuando un meandro se encuentra con un control estructural en forma de pared, el río tiende a seguir moviéndose a lo largo de la cara de la estructura fija, trasladando su punto de ataque en la dirección aguas abajo. Este proceso produce un modo de falla que se puede observar en obras de control de erosión de ribera. Se construye la obra de protección en el punto de ataque, pero el río sigue trasladando su meandro aguas abajo hasta que pasa la zona protegida y se erosiona la ribera aguas abajo. Por tal razón, es mejor emplear técnicas de control enfocadas en manejar las fuerzas hidráulicas en el meandro, en vez de aplicar un parcho en un punto en particular.

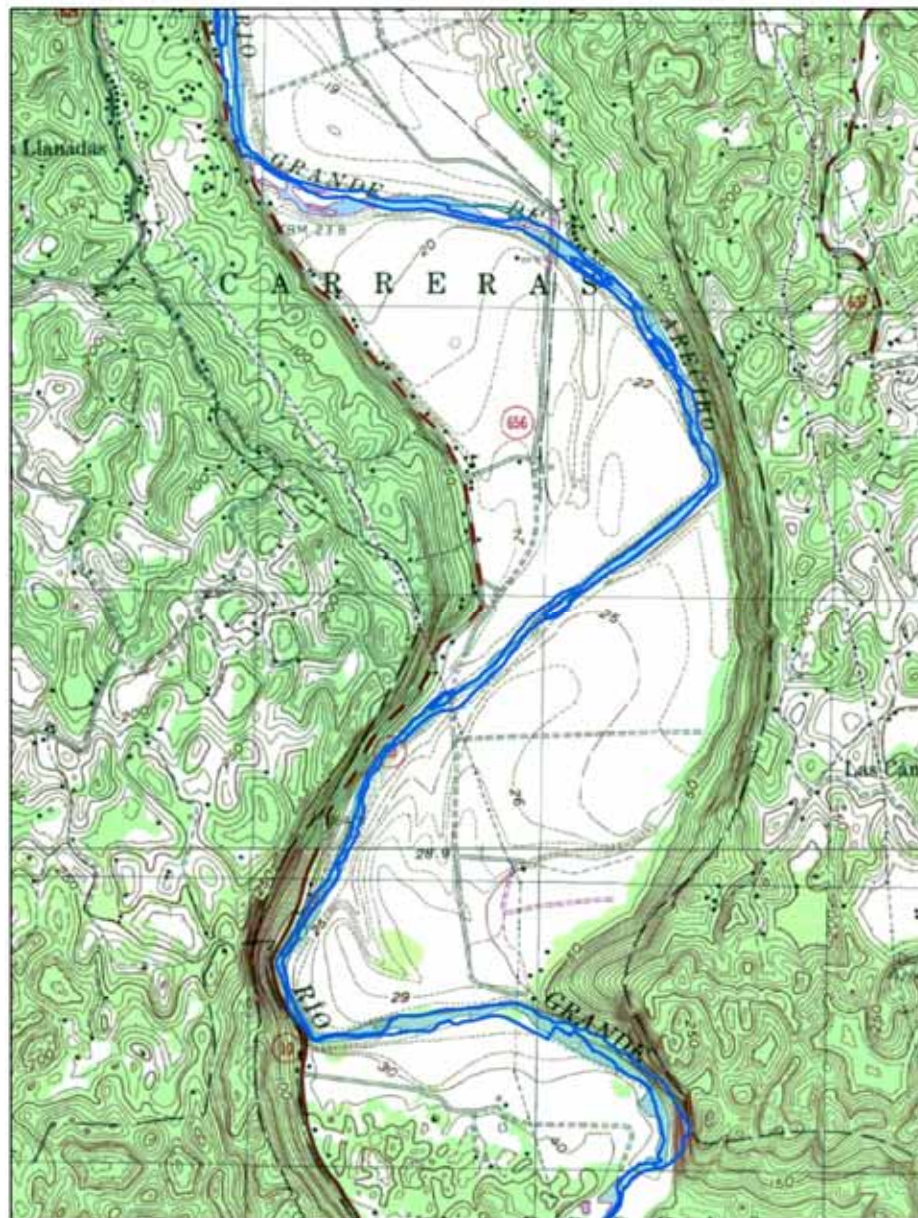


Ilustración 3.16: Reflexión de meandro en Río Grande de Arecibo por una pared de roca.

Estabilidad del río

Un río estable es capaz de transportar la carga de sedimentos disponible bajo el régimen de flujo actual sin alterar su patrón de flujo, su sección o perfil y sin que su lecho esté sujeto a procesos de agradación o atrinchamiento

La estabilidad de un río no implica que el río no se mueva lateralmente dentro de su zona de meandro, sino que su sección y su perfil son constantes. La **Ilustración 3.17** muestra el movimiento lateral de un río estable, donde su sección transversal se mantiene constante. La erosión en el exterior del meandro es compensada por el depósito de sedimento en la barra de punta localizada en el interior del meandro.

Muchas personas piensan que una canalización en hormigón representa un río estable, lo que es totalmente incorrecto. Las canalizaciones en hormigón previenen la migración lateral del río. Sin embargo, los canales creados por las canalizaciones son mayores que los cauces de 1.5 años



Ilustración 3.18: Canalización inestable debido a la acumulación de sedimentos, Río Yagüez, Mayagüez.

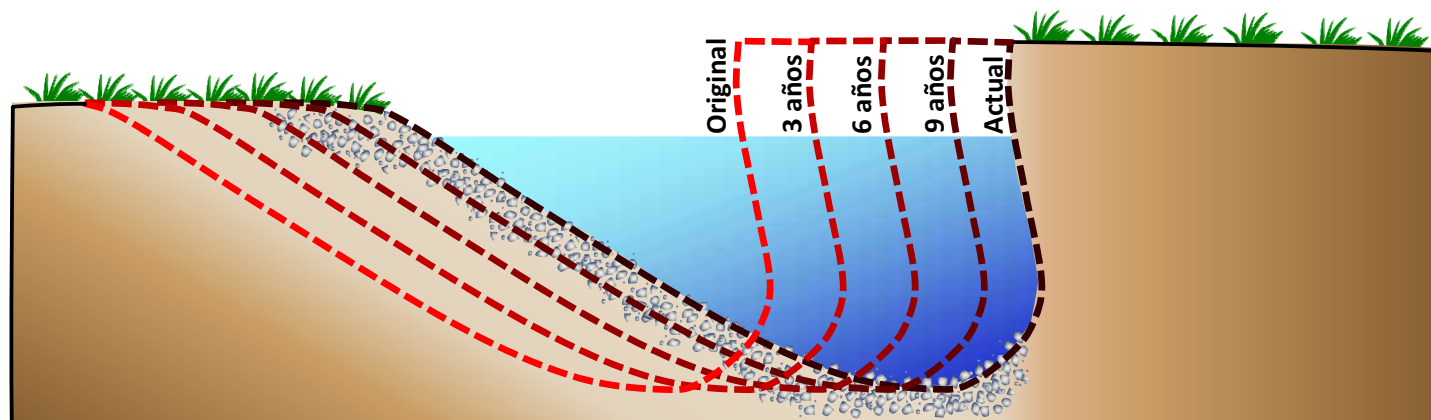


Ilustración 3.17: Migración de meandro.

de recurrencia que representa el tamaño que el río puede mantener limpio por los procesos naturales. Este incremento en la sección transversal provoca una reducción en la capacidad de transporte de sedimentos que resulta en la acumulación de material a lo largo de la canalización. La **Ilustración 3.18** muestra un ejemplo de esta situación. Debido a que las fuerzas naturales no pueden mantener la sección limpia, no es un cauce estable.

Los ríos tratan de restablecer su estabilidad dentro de las canalizaciones, definiendo su cauce y creando pequeñas planicies inundables. La transición en la sección de una canalización con el tiempo se muestra en la **Ilustración 3.19**. Debido a que no fueron diseñadas bajo el concepto de una obra estable, las canalizaciones requieren de mantenimiento continuo para preservar su sección transversal. Además, los sedimentos atrapados en la canalización ya no llegan a los tra-

mos del río aguas abajo, fomentando así el proceso de atrincheramiento y la aceleración de la tasa de erosión en el cauce de las riberas aguas abajo de la canalización.

Para diseñar canalizaciones estables, es necesario incorporar los conocimientos actuales referentes al comportamiento de ríos y utilizar secciones transversales cónsonas con el concepto del patrón de cauce y planicie inundable en los ríos naturales.

Los ríos canalizados no son estables ya que funcionan como trampas de sedimentos. La sección transversal cambia con el tiempo haciendo el tramo canalizado inestable y estableciendo la necesidad para mantenimiento perpetuo.

La ingeniería hidráulica puede diseñar canalizaciones estables. Para esto se requiere un enfoque diferente al tradicional.

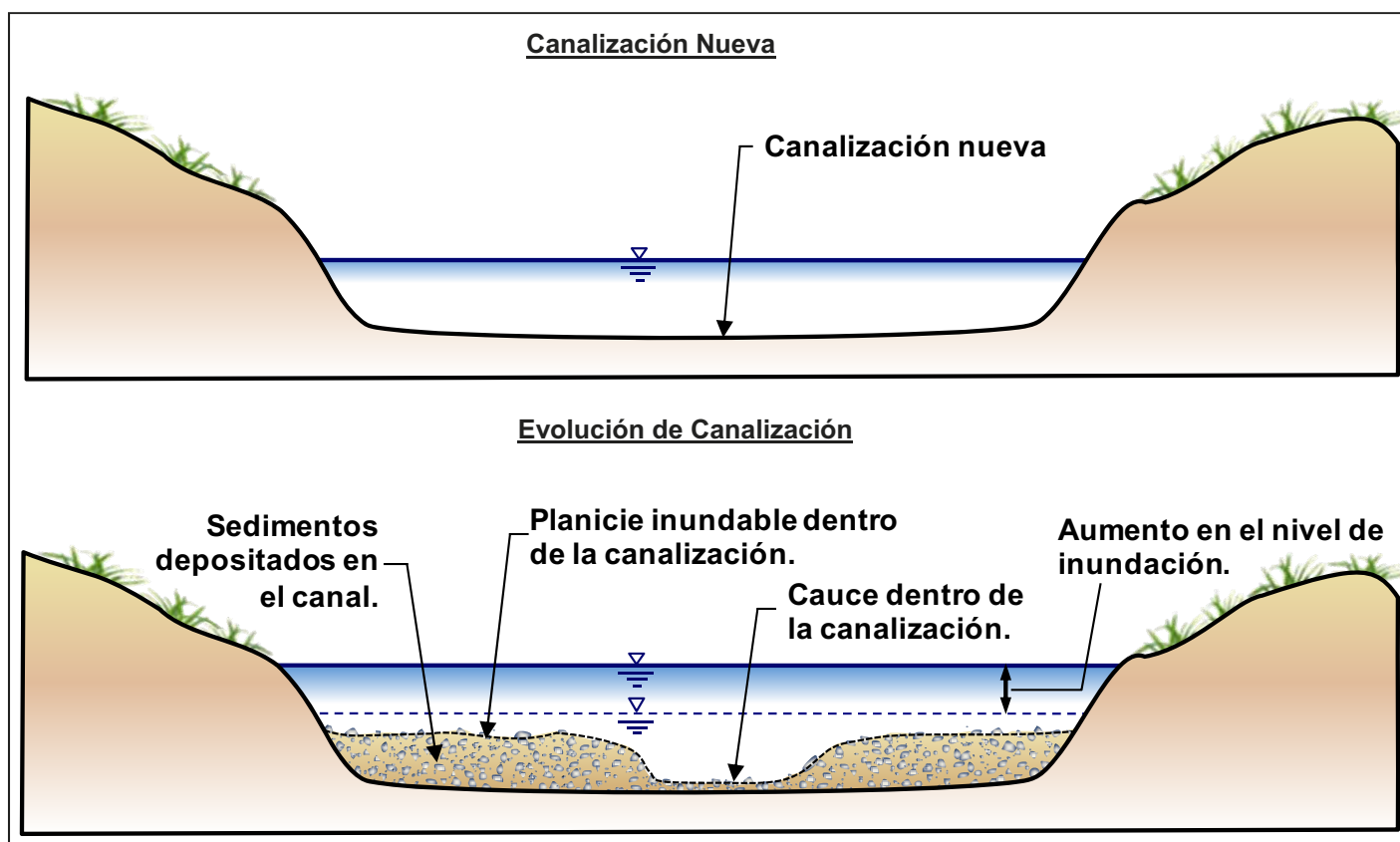


Ilustración 3.19: Transición de una canalización con el tiempo por la acumulación.

Balance de Lane

La tendencia de un río a sufrir desestabilización como consecuencia de la agradación o degradación (atrincheramiento) de su lecho está controlada por cuatro variables principales: caudal, pendiente hidráulica, tamaño y carga de sedimento grueso disponible en el río. El efecto de estos factores en el río se presenta de forma gráfica en la **Ilustración 3.20**, según conceptualizado por el “Balance de Lane” (Lane, 1955).

Un aumento en la pendiente o en el flujo aumenta la energía hidráulica, lo

que aumenta el transporte de sedimento y la socavación del fondo, produciendo una tendencia de atrincheramiento. Por el contrario, una reducción de la pendiente o del flujo reduce la capacidad del río para transportar sedimento y promueve la acumulación de sedimentos en el lecho del río.

De igual forma, al aumentar el volumen o el tamaño de sedimento entrando al tramo de río se promueve la tendencia a acumular sedimentos y subir el nivel del lecho, mientras que al reducir el volumen o tamaño de sedi-

mentos entrando a un tramo, ocurre atrincheramiento.

Al analizar el balance, es necesario recordar que las crecidas son los caudales importantes para el transporte de sedimentos y que los sedimentos de importancia son los que corresponden a la carga de arrastre. Los flujos bajos son insuficientes para movilizar el sedimento en el lecho del río y los sedimentos finos son transportados sin interacción significativa con el lecho.

Cambios en el manejo y los usos de la cuenca afectan directamente la geomorfología del río.

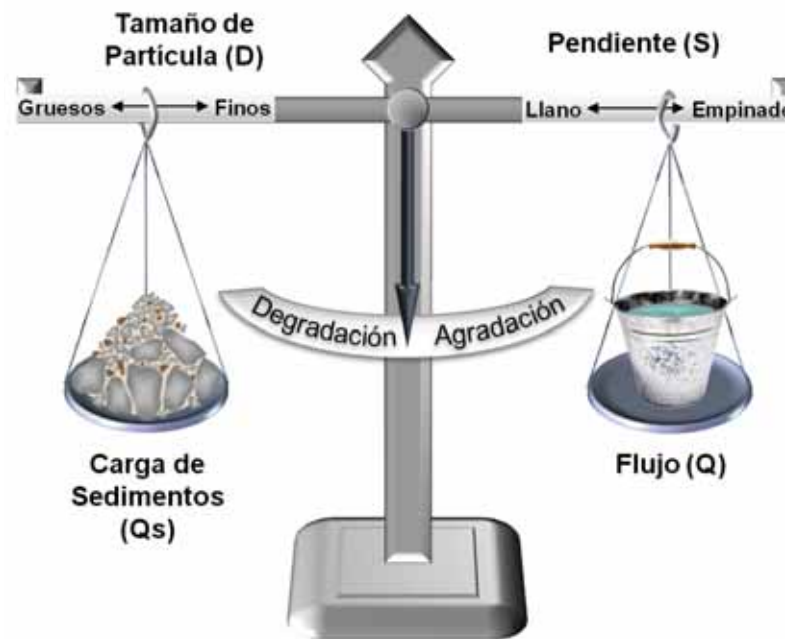


Ilustración 3.20: Balance de Lane.

Clasificación de ríos

Existen varios sistemas de clasificación de ríos. En esta sección se describen dos sistemas complementarios que son muy útiles y de uso común y pueden utilizarse para ríos en Puerto Rico. Los dos sistemas son el de “orden de río” y el método de clasificación de Rosgen. En general, al presentar estudios de ríos o quebradas para la evaluación del DNRA se debe indicar la clasificación Rosgen para el tramo de estudio, tanto para trabajos de ingeniería como en estudios biológicos. Esto permite un mejor entendimiento del sistema fluvial.

Orden de río

El “orden de río” es una manera de clasificar el río, dependiendo de su ubicación dentro de la red de drenaje. El método le asigna el número uno al

tributario más pequeño. La combinación de dos tributarios de orden uno crean un tributario de orden dos. De igual modo, la unión de dos tributarios de orden dos forman un tributario de orden tres. Esto sigue hasta llegar al mar, según la **Ilustración 3.21**. Se debe utilizar el mapa topográfico 1:20,000 del USGS para este propósito.

Clasificación Rosgen

El sistema de clasificación desarrollado por Rosgen (Rosgen, 1994 y Rosgen, 1996) se basa en características geomórficas. El sistema toma en consideración los siguientes factores:

- Pendiente del valle.

- Configuración geométrica del río en planta (*planform*).
- Tamaño del material del lecho.
- Grado de atrincheramiento.

Este sistema de clasificación ha ganado aceptación por varias razones, entre ellas:

- El sistema es relativamente fácil de aplicar y no tiene un alto nivel de dependencia en la interpretación de las características geomórficas, facilitando su uso para una variedad de disciplinas, incluyendo biólogos e ingenieros.
- Provee un sistema para describir las características del río o quebrada de forma consistente.

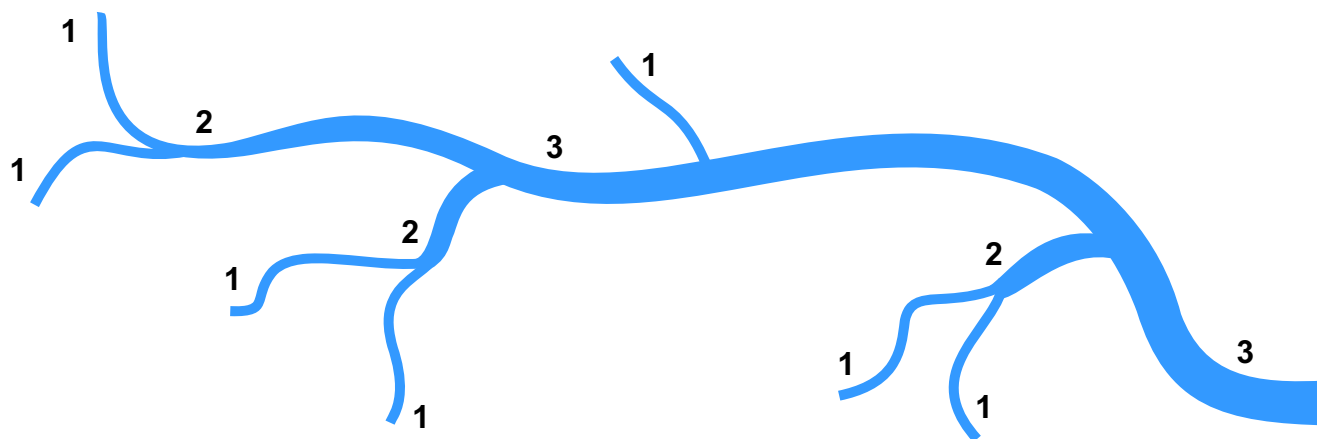


Ilustración 3.21: Sistema de clasificación por orden de río.

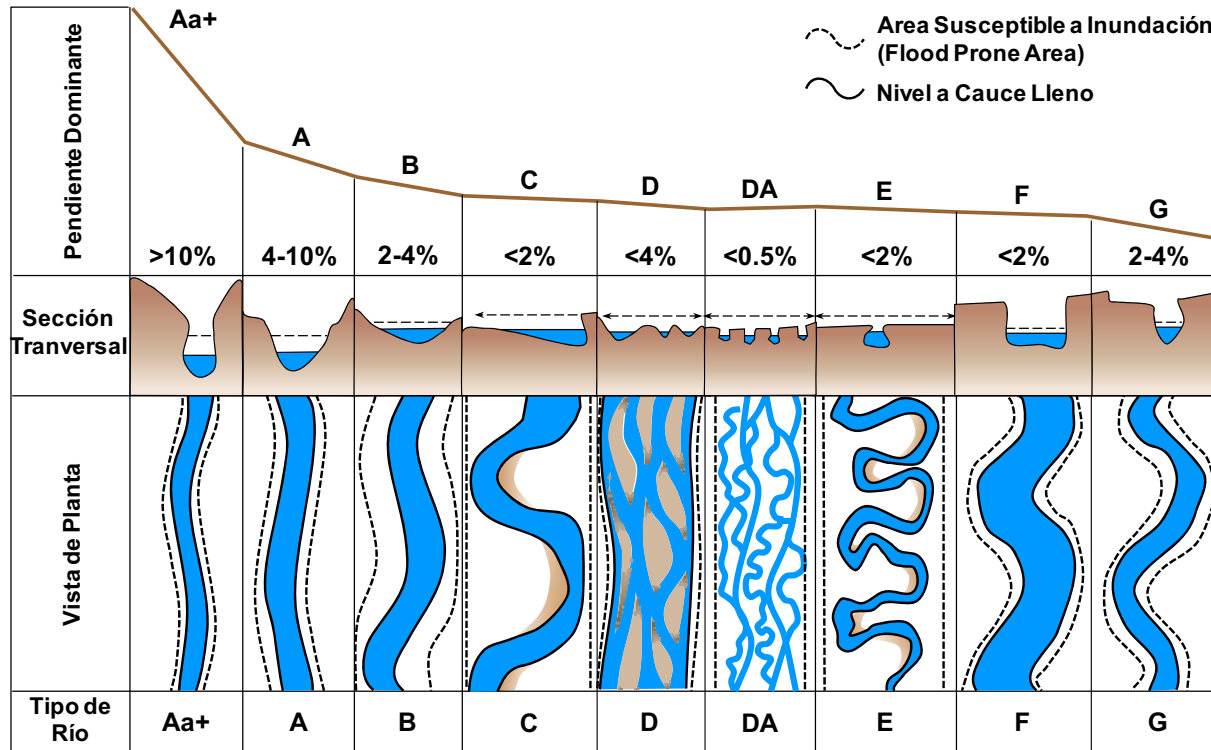


Ilustración 3.22: Sistema de clasificación Rosgen.

Tabla 3.1: Clasificación Rosgen por tamaño de material del lecho.

Número	Tamaño del material del lecho
1	Roca sólida (<i>bedrock</i>)
2	Bolos (<i>boulders</i>), día > 256 mm
3	Pedruzcos (<i>cobbles</i>), 64-256 mm
4	Grava (<i>gravel</i>), 2 – 64 mm
5	Arena (<i>sand</i>), 0.062 – 2.0 mm
6	Limo y Arcilla (<i>silt & clay</i>), <0.062 mm

- Puede predecir ciertos patrones de comportamiento de un río en base a su clasificación. El comportamiento de un río se puede utilizar para predecir el comportamiento de otro río cuando poseen la misma clasificación.

El sistema Rosgen asigna una clasificación a base de letra y número, en donde el número se refiere al tamaño de sedimento y la letra se refiere a las demás características. En la **Ilustración 3.22**. Una versión más detallada está disponible en formato *PDF* en el

sitio web: http://www.wildlandhydrology.com/assets/ARM_5-3.pdf

Los tamaños del material del lecho que corresponden a cada clase se presentan en la **Tabla 3.1** y las características generales de las letras se presentan en la **Tabla 3.2**.

Las **Ilustraciones 3.23, 3.24 y 3.25** son fotos de ejemplos de ríos en Puerto Rico con su clasificación Rosgen.

La información aquí presentada es una forma muy simplificada de presentar el sistema de clasificación Rosgen con el propósito de proveer un idea de su aplicación a los ríos de Puerto Rico. Para utilizar este sistema de clasificación se debe recurrir a referencias más detalladas disponibles en el Internet. Más información está accesible en los sitios web: http://www.epa.gov/watertrain/stream_class/ ó http://www.fgmorph.com/fg_4_25.php

Tabla 3.2: Relación general de clasificación del sistema Rosgen por letra

Letra	Pendiente del Valle	Características
A	>4%	Típicamente ríos o quebradas de zona de cabecera.
B	2-4%	Típicamente, ríos de valles altos con planicie inundable relativamente estrecha.
C	<2%	Típicamente, ríos de valles anchos con planicie inundable ancha.
D	<4%	Río trenzado; alta carga de sedimento en relación a la capacidad de transporte hidráulico. No hay un buen ejemplo de un río trenzado en Puerto Rico.
E	<2%	Río meándrico, característica de zonas de muy baja pendiente, alto grado de sinuosidad. En Puerto Rico, ocurre solamente en la costa, pero también puede ocurrir en valles llanos a cualquier elevación. Por ejemplo, es relativamente común en el altiplano de los Andes.
F	<2%	Río atrincherado.
G	2-4%	Cárcava (<i>gully</i>), profundamente atrincherado y muy poco desarrollo de planicie inundable.



Ilustración 3.24: Río Blanco, Naguabo (C-5).



Ilustración 3.23: Río Blanco, Naguabo (A-1).



Ilustración 3.25: Río Mameyes, Luquillo (B-2).

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 4

Hidrología



Contenido

- | | |
|---------------------------------|----------------------------|
| 1. Balance de agua | 9. Medición del flujo |
| 2. La lluvia | 10. Crecidas máximas |
| 3. Evapotranspiración | 11. Variabilidad del flujo |
| 4. Hidrogramas | 12. Flujos mínimos |
| 5. Infiltración y escorrentía | 13. Rendimiento seguro |
| 6. Análisis de duración | |
| 7. Criterio de diseño | |
| 8. Balance entre río y acuífero | |

Introducción

El término “hidrología” se refiere al estudio de las propiedades, la distribución y la circulación del agua, incluyendo las aguas superficiales, subterráneas y atmosféricas. Un aspecto importante desde el punto de vista del manejo del recurso es determinar el caudal máximo de las crecidas y el flujo mínimo disponible durante periodos secos.

Balance de agua

En Puerto Rico, a pesar de su pequeño tamaño, hay una gran diversidad de condiciones hidrológicas. La diversidad se aprecia al construir balances hidrológicos (balances de agua) en diferentes cuencas de la Isla. Estos balances hidrológicos incluyen precipitación (P), evapotranspiración (ET) y descarga (Q). Con estos parámetros se puede determinar el cambio en almacenaje del acuífero (ΔS) mediante la siguiente relación:

$$\Delta S = P - ET - Q$$

La **Tabla 4.1** muestra balances de agua para diferentes cuencas en el norte de la Isla.

En general, aproximadamente la mitad del agua de lluvia en Puerto Rico regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración. El restante se divide entre escorrentía superficial y recarga al acuífero. En la zona caliza hay áreas sin escorrentía superficial y toda el agua no evaporada entra al acuífero.

Tabla 4.1: Balances de agua para cuencas en el norte de la Isla en pulgadas al año (Giusti & Bennet, 1976).

Río	(P)	(ET)	(Q)	(ΔS)	
Roca Volcánica	Río Guajataca U/S	87	49	34	+4
	Río Camuy U/S	87	49	38	0
	Río Criminales U/S	87	49	44	-6
	Río Tanamá U/S	88	49	36	+3
	Río Grande de Arecibo D/S Dos Bocas	93	47	43	+3
	Río Cialitos	91	48	38	+5
	Río Grande de Manatí U/S	100	45	50	+5
	Río Inabón	88	49	47	-8
	Río Cibuco U/S	93	47	41	+5
	Río Mavilla	96	46	68	-18
Caliza	Quebrada de los Cedros	68	46	1	+21
	Río Guajataca hasta Embalse Guajataca	88	49	30	+9
	Río Guajataca D/S	80	48	22	+10
	Río Camuy D/S	83	49	33	+1
	Río Tanamá D/S	82	49	22	+11
	Río Grande de Arecibo D/S	73	47	0.6	+25
	Canal Sur	52	41	2	+9
	Caño Tiburones	52	41	83	-72
	Río Grande de Manatí D/S	73	47	34	-8
	Laguna Tortuguero	68	46	20	+2
	Río Cibuco D/S	80	48	35	-3
	Río Lajas	82	48	43	-9

U/S: aguas arriba

D/S: aguas abajo

El balance de agua describe las condiciones promedio y no es representativo de la variabilidad en las condiciones anuales.

La lluvia

La combinación de vientos alisios que traen consigo mucha humedad y el efecto orográfico de las montañas provocan que las lluvias en las islas caribeñas sean muy variables. En Puerto Rico, la lluvia promedio de 70 pulgadas anuales a nivel isla incluye variaciones desde 30 pulgadas al año en Guánica, hasta 180 pulgadas al año en la cima de El Yunque.

El patrón de lluvia en Puerto Rico es controlado, en gran medida, por las montañas que tienen elevaciones de hasta 3,350 pies de altura. El aire húmedo, al encontrarse con las montañas, sube, se enfría, se condensa la humedad y se precipita en forma de lluvia. Al bajar al otro lado de la cordillera el aire ya no está saturado con agua y, por lo tanto la costa sur recibe aproximadamente la mitad de la lluvia anual que recibe la costa norte (**Ilustración 4.1**).

La variación geográfica en la lluvia se presenta utilizando un mapa de isoyetas que presenta líneas de igual profundidad de precipitación (**Ilustración 4.1**). También se pueden preparar mapas de isoyetas para eventos particulares, como el mapa de la profundidad de lluvia asociada al huracán Georges presentado en la **Ilustración 4.2**.

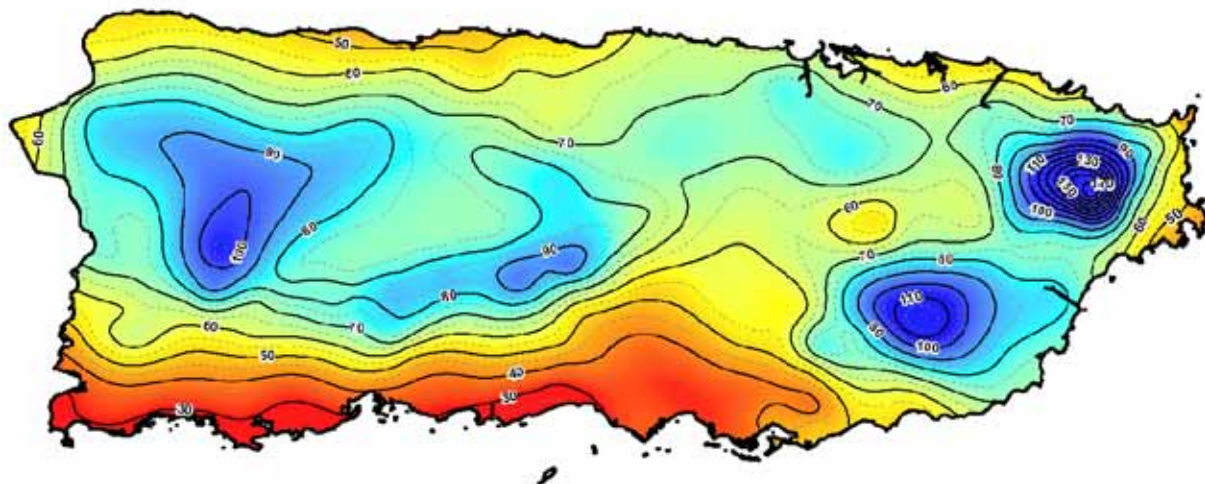


Ilustración 4.1: Precipitación anual promedio en Puerto Rico (en pulgadas), preparado con datos de lluvia hasta el 2006.

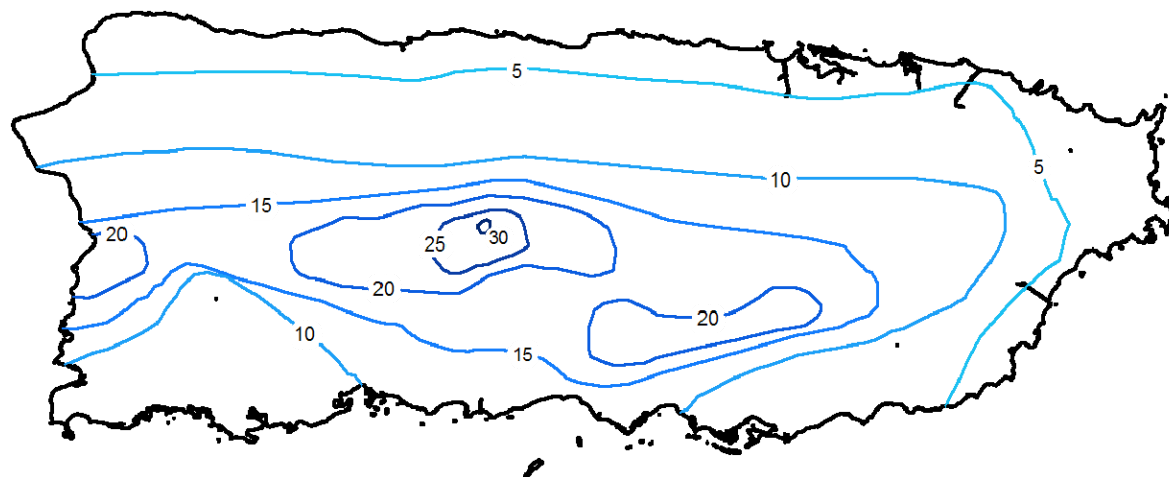


Ilustración 4.2: Mapa de lluvia asociada al Huracán Georges (en pulgadas), septiembre 22 de 1998, modificado del NOAA.

Variabilidad en la lluvia

Al calcular valores promedio de los parámetros hidrológicos se presenta un panorama general. Sin embargo, para analizar los eventos de mayor preocupación, como las crecidas, sequías y flujos mínimos, es necesario cuantificar la alta variabilidad que existe en el entorno hidrológico. Por ejemplo, al graficar la lluvia de Gurabo durante 50 años (**Ilustración 4.3**) se puede apreciar que la lluvia anual ha variado desde un 50% del promedio

en el año 1967, hasta el 180% del promedio en el año 1970. La variación en el caudal de los ríos es aún más marcada.

Las zonas húmedas de Puerto Rico reciben lluvia todos los meses del año. Los meses más secos son de enero a marzo. Durante este periodo los niveles en los embalses bajan, este déficit de agua se satisface con las lluvias en abril y mayo. De no llegar lluvias suficientes en abril y mayo, generalmente resulta en sequía y racionamiento del

agua durante el verano, hasta llegar los meses más húmedos desde septiembre hasta noviembre. Sin embargo, en cualquier año en particular, la lluvia puede tener variaciones marcadas del promedio.

Los datos de lluvia mensual de Gurabo se muestran en la **Ilustración 4.4**, comparando el promedio con los años de lluvia mínima y máxima. Gurabo está localizado en la parte central de la cuenca del Río Grande de Loíza y es afluente al embalse Carraízo. La

A pesar de que la costa sur es más seca que la costa norte, ambas pueden sufrir lluvias intensas de huracanes y sufrir las inundaciones correspondientes.

La variabilidad de lluvia entre el área norte y sur de Puerto Rico es causada por el efecto de las montañas en los vientos alisios y el fenómeno de “sombra de lluvia”

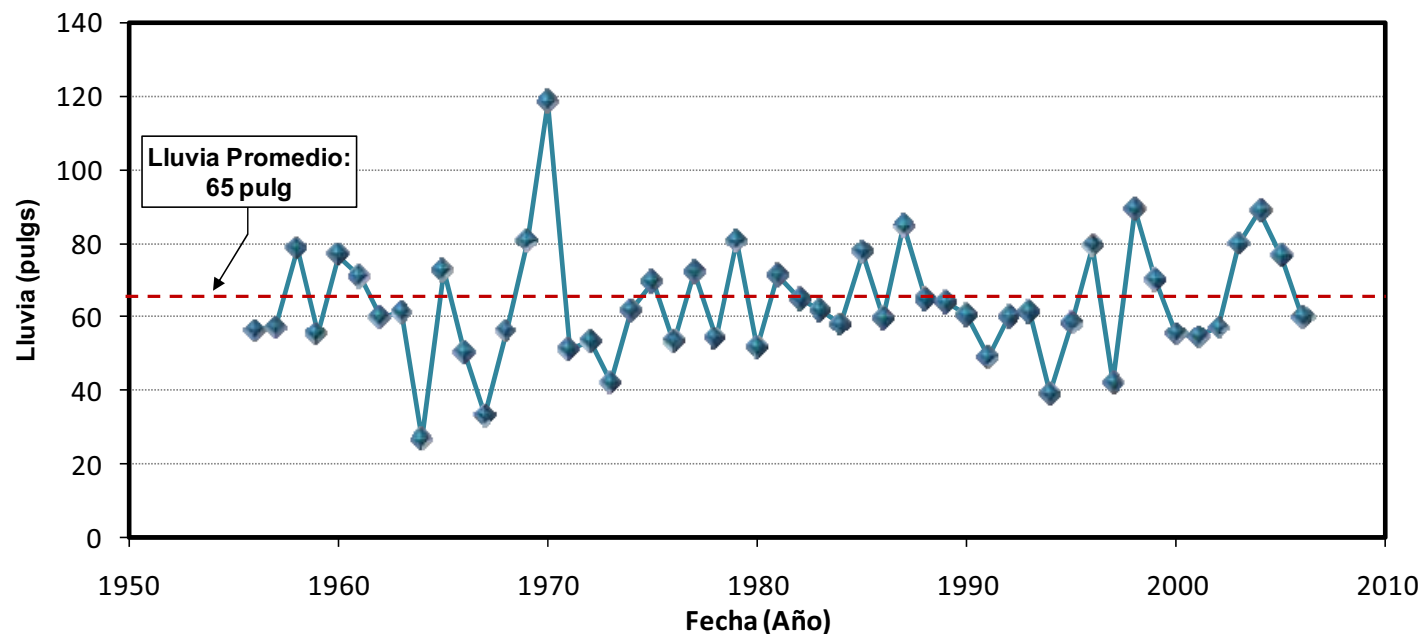


Ilustración 4.3: Variabilidad de lluvia anual en la estación Gurabo, 1956-2006.

sequía de 1967 ha sido la más severa que ha ocurrido en esa cuenca, no hubo agua suficiente para llenar el embalse Carraízo en todo el año. Según datos de escorrentía del USGS, la segunda sequía de mayor intensidad en la cuenca de Río Loíza lo fue la de los años 1994 y 1995. El

año con mayor lluvia fue 1970 y correspondió a una de las inundaciones más fuertes que han afectado la cuenca del Río Grande de Loíza.

Debido a la variabilidad de la lluvia y a la importancia de los fenómenos resultantes de estas variaciones, como las

inundaciones y sequías, es muy importante analizar los eventos extremos como base esencial para el diseño de obras hidráulicas.

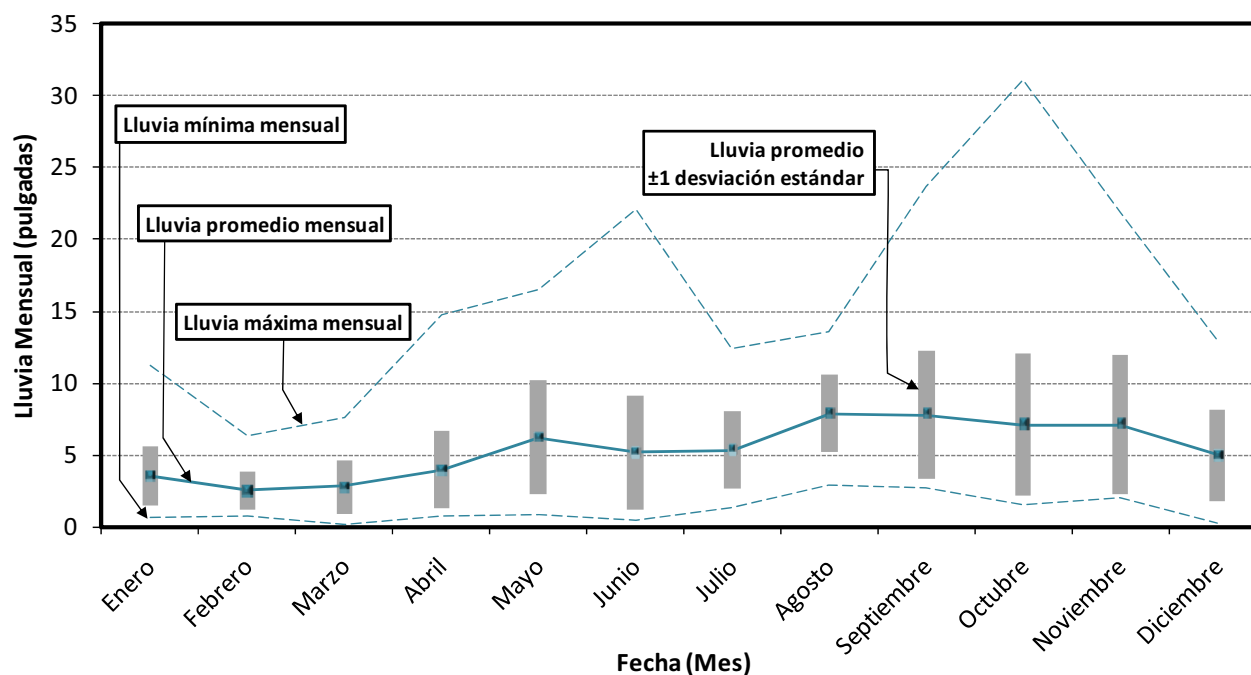


Ilustración 4.4: Lluvia mensual en la estación de Gurabo (1956-2006), comparando la lluvia mensual promedio con los valores máximos y mínimos registrados por mes. También señala la variabilidad en la lluvia mensual.

Los eventos extremos de precipitación o sequía se utilizan como base para el diseño de obras hidráulicas.

Evaporación y evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación del suelo la superficie de la vegetación mas el agua transpirada por las plantas.

Parte del agua que cae a la tierra regresa a la atmósfera como evaporación en la superficie de vegetación o suelo. El agua que penetra el suelo puede entrar a las raíces de las plantas y ser transportada hacia las hojas donde regresa a la atmósfera por el proceso de transpiración. La suma de la evaporación de la superficie del suelo y cuerpos de agua y la transpiración por la vegetación se denomina "evapotranspiración." En las áreas de Puerto Rico con una cobertura densa de bosque, aproximadamente la mitad de la lluvia regresa a la atmósfera por evapotranspiración.

La evaporación de la superficie del agua se mide utilizando un tanque de evaporación (**Ilustración 4.5**). El patrón de cambio estacional en la evaporación del tanque se presenta en la **Ilustración 4.6**. La evaporación del tanque es aproximadamente 20% mayor que en un cuerpo de agua, como lo es un lago o embalse, debido a la calefacción del agua en el tanque y otros factores. La evaporación de las superficies de las plantas puede exceder la evaporación de tanque, ya que la superficie de las hojas puede ser cuatro veces el área superficial del suelo, y puede capturar y evaporar agua de varios eventos de lluvia en un solo día. En Puerto Rico se evapotranspira aproximadamente la mitad de la lluvia, el agua regresa a la at-

mosfera sin generar escorrentía pluvial o recargar los acuíferos.

La tasa de transpiración potencial de las plantas sigue un patrón similar a la

evaporación del tanque, pero la transpiración actual puede ser mucho menor que la potencial debido a la deficiencia de agua en el suelo.



Ilustración 4.5: Tanque para medir la evaporación del agua.

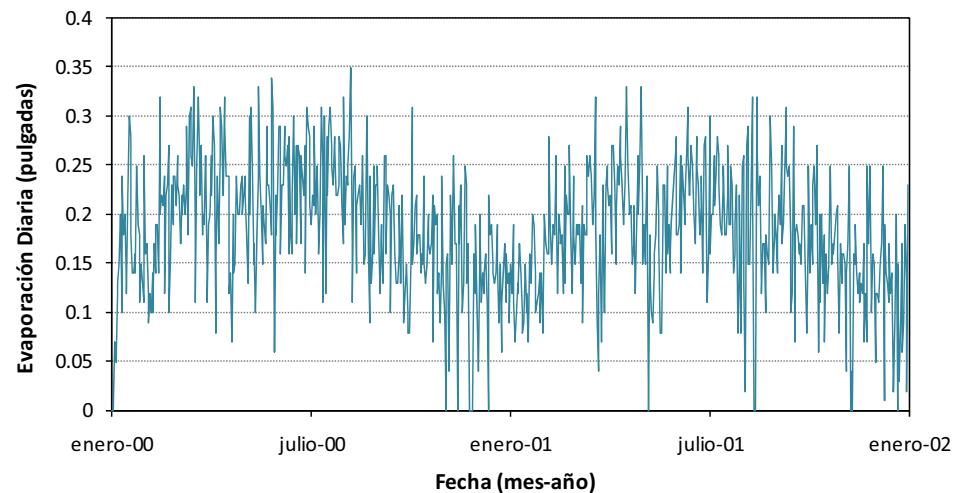


Ilustración 4.6: Evaporación de tanque, estación de Isabela.

Hidrogramas

Un hidrograma es una gráfica que representa la variación del flujo en el tiempo. El hidrograma en la **Ilustración 4.7** muestra el flujo en el Río Espíritu Santo durante un periodo de 18 horas y señala un incremento en el flujo como respuesta a un evento de lluvia. En este punto, la cuenca tiene un área de captación de 8.6 mi², incluyendo drenaje de la ladera este de El Yunque. Al examinar la gráfica, se pueden apreciar las siguientes características típicas de los hidrogramas de crecidas:

- El aumento rápido en el flujo, según llega el agua de lluvia al

río, referido frecuentemente como el “golpe de agua.”

- Hay una reducción gradual en el flujo según disminuye la contribución de la escorrentía superficial, esto se denomina la recesión de la crecida.

La porción de flujo que se mantiene en el río luego de un evento de lluvia corresponde al flujo base. Este flujo es mantenido por el agua que drena del suelo y del acuífero. Los periodos de sequía reducen el nivel de agua en el acuífero y, de esta manera, producen una disminución en el flujo base del río.

En las costas de Puerto Rico, las crecidas pueden ocurrir un par de horas más tarde del pico del evento de lluvia. Esto se debe al tiempo que le toma al agua viajar desde la parte superior de la cuenca hasta la parte inferior.

Es común calcular hidrogramas para diferentes usos de terrenos e intensidades de lluvia, éstos se utilizan para determinar el impacto que tendría un cambio propuesto en el uso del terreno sobre la magnitud de las crecidas resultantes así como también para el diseño de obras de ingeniería.

Los hidrogramas se utilizan para representar gráficamente la variabilidad en el flujo del agua con el tiempo.

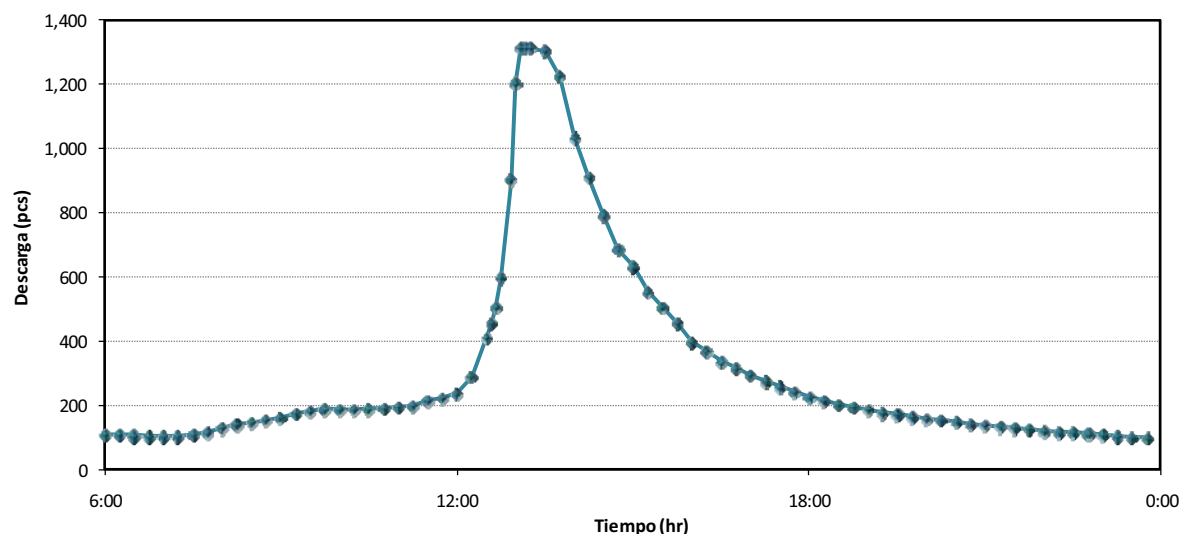


Ilustración 4.7: Hidrograma de la estación del USGS Río Espíritu Santo (50063800).

Infiltración y escorrentía

La lluvia que llega al suelo se puede infiltrar o se puede escurrir sobre la superficie como escorrentía superficial, hasta llegar a una quebrada, un río y eventualmente al mar. El porcentaje de la lluvia que se convierte en escorrentía superficial es determinado por cuatro factores principales: (1) intensidad y duración de la lluvia, (2) capacidad del suelo para infiltrar agua, (3) condición de humedad antecedente y (4) uso del terreno.

La tasa de infiltración de un suelo influye directamente en la cantidad de escorrentía que se genera. Mientras mayor sea la tasa de infiltración, menor será la generación de escorrentía.

- Intensidad y duración de la lluvia. Según aumenta la intensidad de lluvia, aumenta a su vez el porcentaje de lluvia que sobrepasa la capacidad del suelo para infiltrar agua, y por lo tanto, aumenta el volumen de la escorrentía superficial.
- Tipo de suelo. La capacidad de los suelos de infiltrar agua es altamente variable (**Tabla 4.2**). Un suelo arenoso en la costa puede infiltrar más de 20 pulgadas/hora y no genera escorrentía pluvial, aún en las lluvias de mayor intensidad. Sin embargo, los suelos en Puerto Rico comúnmente infiltran menos de un par de pulgadas por hora.

Los tipos de suelo se agrupan en cuatro categorías, de acuerdo a su poten-

cial de generar escorrentía y se clasifican como A, B, C y D. Los suelos en la categoría A (suelos arenosos) tienen un bajo potencial de producir escorrentía debido a su alta tasa de infiltración. Por el contrario, los suelos en el grupo D tienen una baja tasa de infiltración, por lo que su potencial de generar escorrentía es alto. La **Tabla 4.2** muestra la diferencia en tasas de infiltración para los diferentes grupos de suelo hidrológico.

- Condición de humedad antecedente. La capacidad del suelo de infiltrar agua depende de la cantidad de lluvia que haya caído anteriormente, ya que, según la lluvia satura el suelo, reduce la capacidad para almacenar el agua de la

lluvia siguiente. Se calcula el estado de la humedad antecedente utilizando la lluvia de 5 días previos.

- Uso del terreno. El uso del terreno tiene un impacto significativo sobre la escorrentía. Un suelo arenoso con un material impermeable (estacionamiento, edificio, etc.) por encima no va tener capacidad de infiltrar agua. Además, también surgen diferencias importantes de acuerdo a la clase de vegetación o actividad agrícola y el porcentaje de suelo con cobertura vegetal.

El caudal de escorrentía y la magnitud de las crecidas aumentan a conse-

Tabla 4.2: Tasas de infiltración de algunos suelos en Puerto Rico.

Grupo hidrológico	Infiltración (pulg/hora)
A	6-20
B	2-6
C	0.6-2
D	0.06-0.2

cuencia de cambios en el uso del terreno, tales como deforestación para uso agrícola o impermeabilización para uso urbano, siendo este último el que produce incrementos más severos. La **Ilustración 4.8** muestra hidrogramas de flujo para diversos usos del terreno, señalando los cambios que acompañan diferentes intervenciones humanas.

La impermeabilización de los terrenos para uso urbano produce un aumento en el caudal por dos procesos. Primero, el cambio del uso del terreno a actividades urbana impermeabiliza parte de los suelos con hormigón y asfalto, y las restantes áreas verdes

son de suelos compactados con una capacidad de infiltración muy limitada. Esto provoca un aumento en el volumen de escorrentía. En adición, los terrenos urbanizados eliminan las depresiones en los terrenos que acumulaban agua previo al desarrollo. Otro factor es el incremento en la velocidad de la escorrentía. Las superficies impermeables tienen un coeficiente de rugosidad hidráulica mucho menor que los terrenos naturales y proveen una menor resistencia al movimiento del agua.

El resultado es que, en una cuenca de 50 cuerdas cuyo tamaño es aproximado al de una urbanización de 250 ca-

sas, el cambio de bosque a desarrollo urbano puede aumentar el caudal de la escorrentía máxima en un 100%. Este aumento tiene consecuencias adversas aguas abajo incluyendo mayores inundaciones y mayor socavación de los cauces naturales. Otro impacto puede ser una disminución en la recarga al acuífero.

Los impactos adversos en los procesos hidrológicos causados por los desarrollos se pueden minimizar o eliminar con diferentes sistemas de detención y adoptando sistemas de manejo de drenaje en base a conceptos de desarrollo con bajo impacto.

La impermeabilización del terreno para uso urbano es la actividad que más influye en el incremento del volumen de escorrentía.

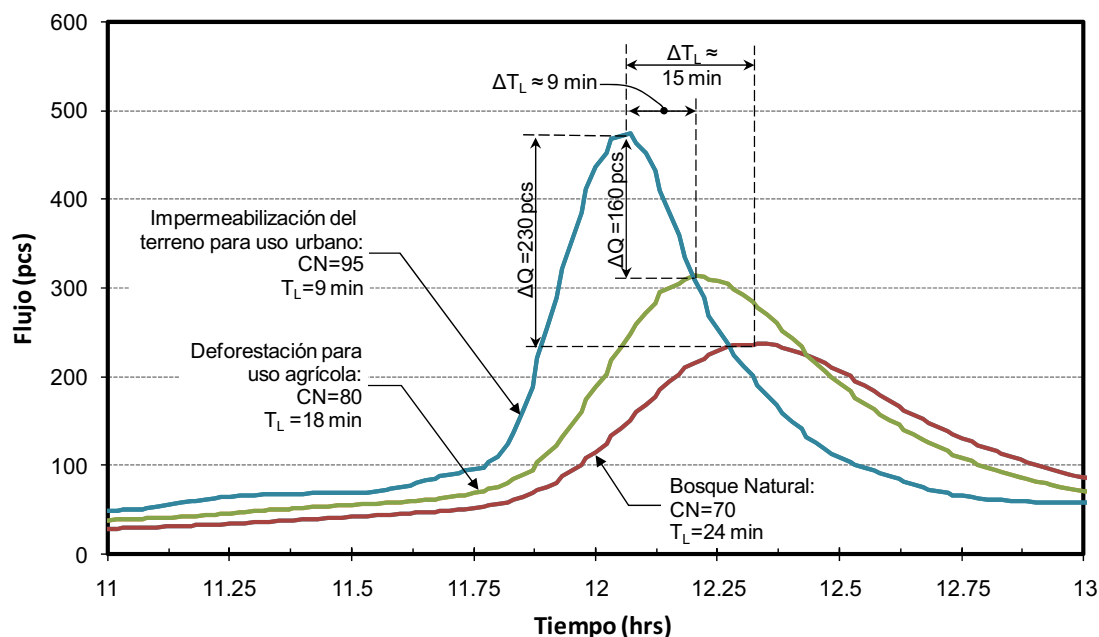


Ilustración 4.8: Modificación de hidrograma por cambios en el uso del terreno en un área de 50 cuerdas utilizando los métodos presentados en el Reporte Técnico Núm. 55 para estudios hidrológicos.

Análisis de duración

Para analizar eventos hidrológicos extremos, se calcula la profundidad de lluvia o caudal del río para diferentes duraciones de tiempo. Por ejemplo, cuatro pulgadas de lluvia no son tan significativas si ocurren en un período de 24 horas, pero si tal precipitación ocurre en una sola hora sería una lluvia extremadamente intensa y puede ocasionar crecidas en cuencas de tamaño mediano. Los datos de lluvia máxima que son necesarios para cal-

cular el caudal de las crecidas son obtenidos de la publicación NOAA Atlas #14 (http://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pr/pr_pfds.html).

La **Tabla 4.3** ilustra datos de intensidad y duración de lluvia para dos sitios en Puerto Rico. La **Ilustración 4.9** compara datos de lluvias máximas registrados en Puerto Rico con las lluvias máximas en los Estados Unidos y en el mundo entero.

Probabilidad de ocurrencia

Sociedades en diferentes partes del mundo se adaptan a las condiciones normales de su entorno, pero los eventos extremos pueden ocasionar muchos daños y sufrimiento. La severidad de un evento extremo se expresa por la probabilidad de ocurrir un evento de igual o mayor magnitud.

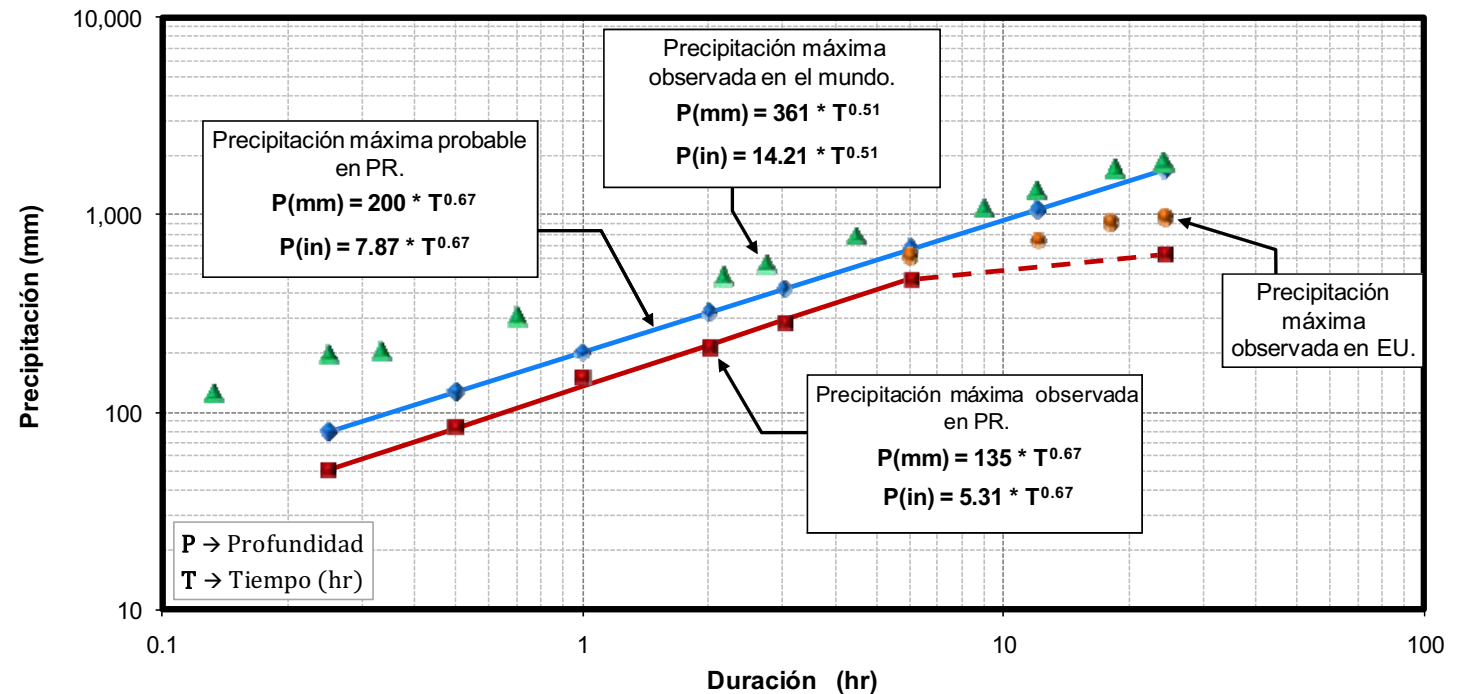


Ilustración 4.9: Comparación de profundidades de lluvia para diferentes duraciones en Puerto Rico, Estados Unidos y a nivel mundial.

Es común expresar la probabilidad de ocurrencia en términos de intervalo de recurrencia en años. Por lo tanto, se entiende que un "evento de 100 años" es más severo que un "evento de 10 años." Este concepto se puede aplicar tanto a las inundaciones como a las sequías.

En realidad el cálculo de recurrencia se determina utilizando la probabilidad anual. Una probabilidad de ocurrir de 1% al año se expresa comúnmente como el evento de 100 años de recurrencia, y el evento con un 2% de probabilidad anual es el evento de 50 años de recurrencia. Hay una relación inversa entre probabilidad anual (P_O) e intervalo de recurrencia (I_R):

$$I_R = 1 \div P_O$$

Hay que recordar que, al decir un "evento de 100 años", no se implica que va a ocurrir solamente una vez cada 100 años. Esto se debe a que las probabilidades anuales son independientes y el "evento de 100 años" puede ocurrir en dos años consecutivos o hasta dos veces en el mismo año.

En el caso de inundaciones, el cálculo de la probabilidad de recurrencia se hace con los datos de las mayores crecidas ocurridas en cada año. En la **Ilustración 4.10** se muestran los datos anuales de la estación de aforo del Río Grande de Manatí.

Tabla 4.3: Intensidad de lluvia por intervalo de recurrencia.

Duración, horas	San Juan		Ponce	
	10 años	100 años	10 años	100 años
0.5	1.6	1.9	1.7	2.2
1	2.4	2.9	2.6	3.3
2	3.2	4.1	3.4	4.6
3	3.6	4.8	3.8	5.4
6	4.8	6.8	4.8	7.4
12	6.0	9.2	6.0	10.4
24	7.3	11.7	7.4	13.6

Fuente: NOAA Atlas #14

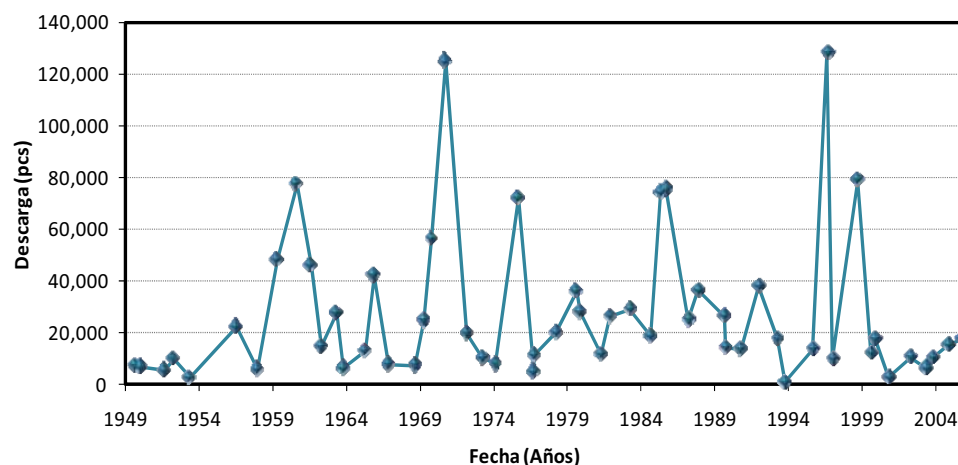


Ilustración 4.10: Caudales máximos anuales de la estación del USGS 50035000 de Río Grande de Manatí en Ciales.

A mayor intervalo de recurrencia, mayor la severidad del evento y menor la probabilidad de ocurrencia anual.

Criterios de diseño

La precipitación PMP se utiliza para diseñar obras hidráulicas cuyo fallo podría ocasionar pérdidas catastróficas de vida y propiedad.

Las obras hidráulicas no se diseñan para manejar los eventos mas extremos posibles, sino para lograr un balance entre el costo de la obra y los riesgos. Por ejemplo, las Normas de Diseño de la Junta de Planificación (Junta de Planificación, 1975) establecen que las tuberías de drenaje pluvial en las calles de las urbanizaciones deben ser diseñadas para manejar, como mínimo, un evento con una recurrencia de 10 años. También se hace claro que la tubería constituye el sistema “menor” de drenaje pluvial, es decir, un sistema solamente para manejar los eventos menores. Las calles y cunetas constituyen el sistema de drenaje “mayor” para manejar la escorrentía durante eventos grandes.

La lógica detrás de este concepto es que si una o dos veces por década hay escorrentía pluvial corriendo por las calles, en exceso de lo que puede manejar el sistema pluvial (tuberías), que esto no represente un problema. El patrón y pendiente de las calles deben ser capaces de dirigir las aguas superficiales hacia un cuerpo de agua receptor sin inundar a ninguna edificación. Sin embargo, si se depende de una tubería para manejar el flujo de los eventos mayores, un diseño para la lluvia de 10 años no es adecuado. Por esta razón, los pluviales dedicados para recoger escorrentía de cuencas exteriores a un proyecto (offsite),

ó en zonas interiores de un proyecto sin drenaje superficial, se diseñan para los eventos de 100 años.

En Puerto Rico, las obras hidráulicas mayores (puentes, atarjeas, etc.) deben proveer un nivel de protección mínimo de 100 años. Sin embargo, en el diseño de obras cuyo fallo puede ocasionar cuantiosos daños y pérdida de vidas, se utiliza un estándar aún más estricto. Por ejemplo, los vertederos hidráulicos de los embalses más recientes son diseñados para manejar el evento de Precipitación Máxima Probable (PMP).

Precipitación máxima probable

La Precipitación Máxima Probable es la precipitación máxima que podría ocurrir bajo la condición de la “tormenta perfecta”. En la mayor parte de Puerto Rico esta precipitación corresponde a unas 40 o 45 pulgadas de lluvia en 24 horas, aproximadamente 3 veces la lluvia de un evento de 100 años. Estimados de la intensidad de los eventos PMP son presentados en la publicación TP-42, *US Department of Commerce*, 1961.

Balance entre río y acuífero

El balance entre el río y el acuífero depende de varios factores. La **Ilustración 4.11** muestra cómo un río en según fluye hacia la costa puede perder agua hacia el acuífero mediante filtración a través de su lecho en la zona alta de la planicie inundable y puede ganar flujo por la descarga del acuífero según se acerca a la costa interceptando el tope del acuífero.

En los valles de las zonas húmedas de la Isla el agua en las rocas típica-

mente drena hacia los ríos y, por consiguiente, el flujo en el río aumenta en dirección aguas abajo. Sin embargo, en las zonas secas de la costa sur los ríos pueden alimentar el acuífero y su flujo puede disminuir en dirección aguas abajo hasta que el río se seca.

De esta forma los ríos en la costa sur representan una fuente de recarga al acuífero, como se muestra en la sección A de la **Ilustración 4.11**. Por el contrario, donde el nivel del acuífero

es superior al fondo del río, el acuífero descargará hacia el río (sección B de la **Ilustración 4.11**).

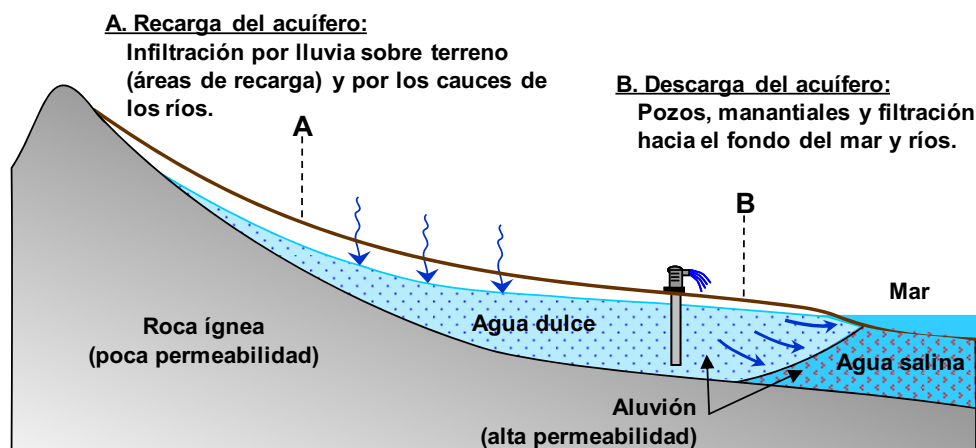
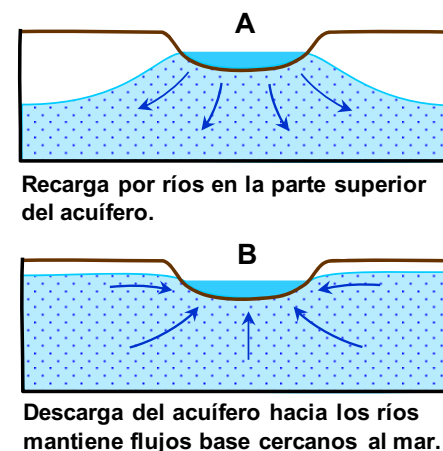


Ilustración 4.11: Interacción entre río y acuífero típico del área sur de Puerto Rico.

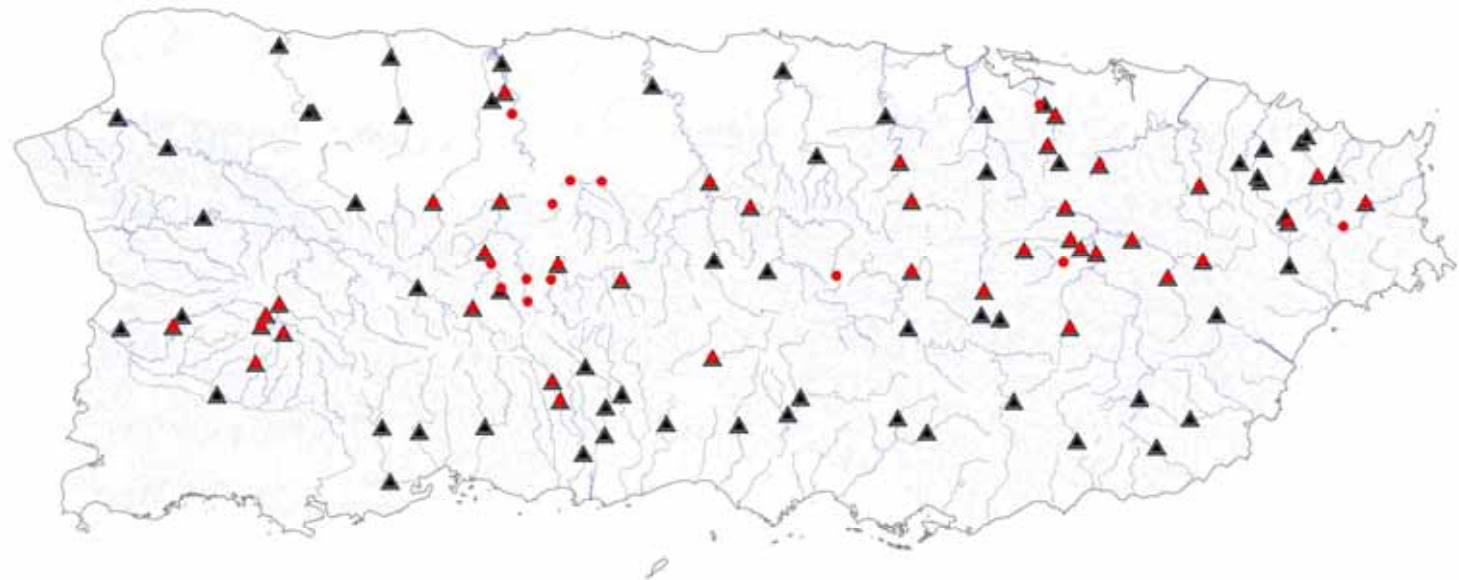


Medición del flujo

El flujo de agua superficial en Puerto Rico se registra en estaciones de aforo operadas por el USGS. Las primeras estaciones fueron instaladas en el 1959 y actualmente hay 224 estaciones de aforo en toda la Isla (**Ilustración 4.12**). Algunas de estas estaciones también recopilan datos de

calidad de agua y concentración de sedimentos en suspensión. Varias estaciones han sido establecidas para estudios especiales, como las estaciones de medición de sedimentos en la cuenca del Río Grande de Loíza que fueron instaladas en la década de los 90's y actualmente están fuera de ser-

vicio después de recopilar varios años de datos. Otras estaciones operan a largo plazo para detectar posibles cambios en los patrones hidrológicos y para coleccionar datos de sequías y crecidas.



Leyenda

Estaciones de Aforo del USGS

- + de 3 años de datos de sedimentos
- ▲ + de 10 años de datos de descarga

Ilustración 4.12: Estaciones de aforo del USGS con más de 10 años de datos de flujo y estaciones con más de 3 años de datos de sedimentos.

El caudal del río varía con el nivel del agua, que es medido por las estaciones de aforo continuamente para calcular el caudal. La relación entre caudal y nivel no es constante porque el nivel y la configuración del fondo del río pueden cambiar con el tiempo, particularmente a consecuencia de crecidas. Por lo tanto, se hacen aforos a mano regularmente para actualizar la relación nivel-caudal. En el caso de crecidas grandes, no se puede medir el flujo directamente. Para extender la relación caudal-nivel a los flujos máximos se utilizan modelos hidráulicos.

En Puerto Rico, las estaciones de aforo utilizan un tanque de nitrógeno

conectado a un tubo que desemboca por debajo del agua en el punto de medición. El tanque pasa un flujo muy lento para mantener el tubo lleno de gas y un transductor mide la presión del gas. Según sube el nivel del agua, más presión hay sobre el gas. El transductor registra esta presión y, por consiguiente, el nivel del agua. Un colector de datos registra la información y lo descarga hacia la computadora central vía antena satélite. Todo el sistema funciona con energía de un panel solar y batería. La **Ilustración 4.13** muestra una estación de aforo del USGS y la **Ilustración 4.14** muestra un esquema con sus componentes.

Los datos crudos informados por la estación requieren verificación. Es necesario hacer ajustes de acuerdo al cambio en la relación nivel-caudal antes de publicar los datos en forma final. Como resultado, los datos preliminares pueden ser diferentes a los publicados. Los datos del USGS están disponibles en la página web: <http://nwis.waterdata.usgs.gov/pr/nwis/sw>.

La Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) también registra datos del flujo que entra a su sistema de embalses. Estos flujos se calculan a base de un balance de agua y no por estaciones de aforo.



Ilustración 4.13: Estación de aforo del USGS en Río Tanamá.

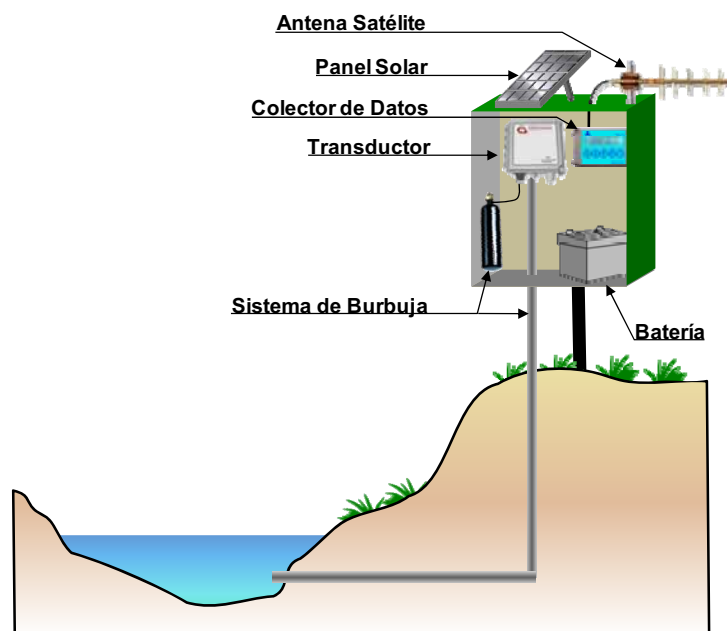


Ilustración 4.14: Diagrama de estación de aforo del USGS.

Crecidas máximas

Es importante conocer la magnitud de las crecidas máximas, en particular la del evento de 100 años debido a que representa la inundación base para el diseño de estructuras y la delimitación de zonas inundables.

Los métodos comúnmente utilizados en Puerto Rico para calcular caudales máximos son los siguientes: el análisis de frecuencia, el modelo hidrológico y el método racional.

El análisis de frecuencia utiliza datos de flujo medidos en una estación de aforo para determinar el caudal pico. El Boletín 17B (IACWD, 1982) presenta una guía para este tipo de análisis. El Boletín 17B recomienda el uso de la distribución estadística tipo “Log Pearson III.” Una gráfica de este tipo se presenta en la **Ilustración 4.15**. Hay diversos programas de computadora que implementan los métodos provistos en el Boletín 17B, entre los cuales se encuentran el HEC-SSP (Statistical Software Package) del Cuerpo de Ingenieros, disponible en la siguiente página web: www.hec.usace.army.mil/software/hec-ssp.

El análisis de frecuencia es el método más confiable para determinar los caudales máximos, sin embargo, sólo se puede aplicar en puntos de estaciones de aforo que cuenten con más

de 10 años de datos, según se recomienda en el Boletín 17B.

De existir una estación de aforo con muchos datos y la necesidad de estimar el caudal de crecida en otra localización en el mismo río, se pueden trasladar los valores de la estación de aforo hacia otro punto mediante la aplicación de una relación regional.

El método del modelo hidrológico es el más complejo por la información que se requiere para prepararlo. Esta información se enumera a continuación:

1. El área de cuenca.
2. La profundidad de lluvia y su distribución en el tiempo.
3. Las características hidrológicas del terreno basadas en el tipo de suelo y su uso.
4. La condición de humedad antecedente.
5. El tiempo que requiere el agua para escurrirse hacia el punto de estudio, compuesto del tiempo de concentración de cada sub-cuenca y el tiempo de viaje a lo largo del río hacia el punto de análisis.

Existen numerosos programas de computadora que realizan el análisis hidrológico en la ausencia de una es-

tación de aforo. Estos incluyen el HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros, el TR-20 o el TR-55 del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) y varios programas comerciales.

El método racional (Maidment, 1993) es muy utilizado por su simplicidad. Se aplica a cuencas con áreas de drenaje menores de 150 cuerdas. La ecuación del método racional relaciona el flujo [Q (pcs)] con el área de drenaje [A (mi²)], intensidad de lluvia [I (pulg/hr)] y un coeficiente de rugosidad [C] según se presenta a continuación:

$$Q = C I A$$

Existen dos métodos más sencillos para estimar caudales máximos. Estos se utilizan para cotejar fácilmente la razonabilidad del valor calculado mediante los métodos antes mencionados. Estos métodos de estimación se describen a continuación:

1. Ecuación de regresión regional. La ecuación regional establece una relación entre varios aspectos físicos de la cuenca y el caudal máximo.

En Puerto Rico, diversos estudios han demostrado que los parámetros más influyentes para determi-

nar flujo es el área de la cuenca y la lluvia anual promedio, ambos datos se pueden obtener fácilmente. El USGS ha preparado tres estudios que han desarrollado ecuaciones para determinar flujos pico en Puerto Rico, el más reciente de éstos (Ramos-Gínes, 1999) presenta ecuaciones que incluyen el parámetro de profundidad de la roca en adición al área de cuenca y lluvia anual promedio. El parámetro de la profundidad de la roca no es fácilmente accesible por lo que hace que la ecuación sea menos práctica de utilizar. A este estudio le precede López y otros (1979), y presenta ecuaciones en función de área y lluvia anual promedio, las cuales se muestran a continuación:

- $Q_{10} = 3.72 A^{0.822} * R^{1.29}$
- $Q_{25} = 25.7 A^{0.826} * R^{0.953}$
- $Q_{50} = 89.9 A^{0.83} * R^{0.734}$
- $Q_{100} = 268 A^{0.832} * R^{0.531}$

Se puede obtener una mejor precisión al añadir otros parámetros, pero los datos adicionales frecuentemente no están disponibles.

2. Gráfica de descargas máximas.

El valor de las crecidas máximas registradas en estaciones del USGS en Puerto Rico se presenta en la **Ilustración 4.16**. Esta gráfica también se puede utilizar para confirmar visualmente la razona-

bilidad de un estimado de caudal máximo.

La crecida de 100 años se utiliza como un estándar de protección urbana porque los gobiernos acordaron que es un nivel de protección “adecuado” y “alcanzable.” Los mapas de los límites de la crecida de los 100 años y la reglamentación federal y estatal para la construcción en zonas con riesgo a inundaciones reconocen el evento de 100 años como el nivel mínimo de protección a proveer. Sin embargo, el concepto de sustentabilidad reconoce que un fallo no debe conllevar consecuencias catastróficas. En la construcción de diques o represas en donde el desborde sobre su tope puede ocasionar su falla, se utiliza un evento de mayor magnitud.

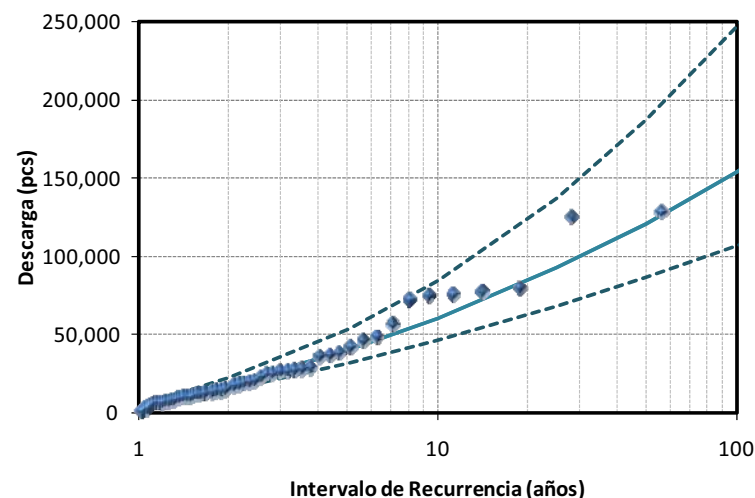


Ilustración 4.15: Distribución Log Pearson III para Río Grande de Manatí, estación 50035000 del USGS.

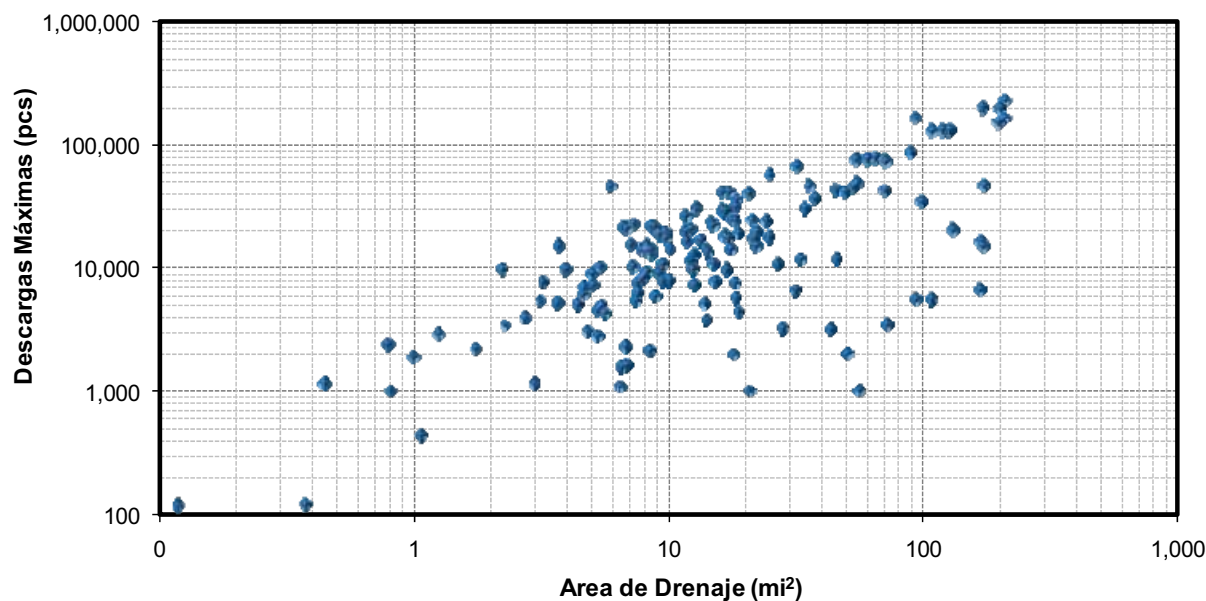


Ilustración 4.16: Descargas máximas en Puerto Rico reportadas en las estaciones del USGS.

Variabilidad del flujo

El flujo en los ríos es continuamente variable y en Puerto Rico el caudal máximo de 100 años es típicamente más de 1,000 veces el caudal mínimo. En la **Ilustración 4.17** y la **Ilustración 4.18** se muestra la variabilidad del flujo en una estación de aforo utilizando los datos continuos y los datos promedios diarios y anuales. Siempre se debe tener en mente que, cuando se calcula un valor promedio, se pierde parte de la información.

Por ejemplo, en el caso de una crecida, el caudal máximo del día se pierde al calcular el flujo promedio diario (**Ilustración 4.17**). Por lo tanto, el USGS provee por separado los valores de los caudales máximos.

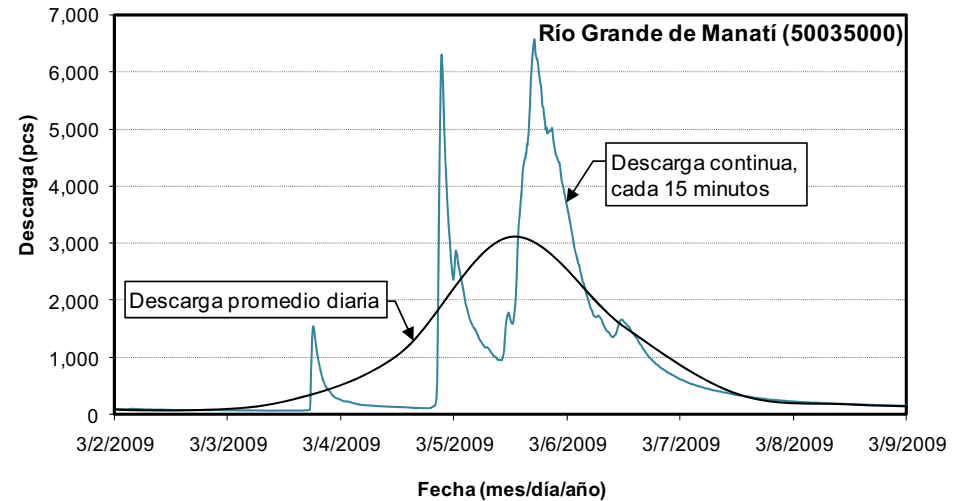


Ilustración 4.17: Variabilidad continua en descarga.

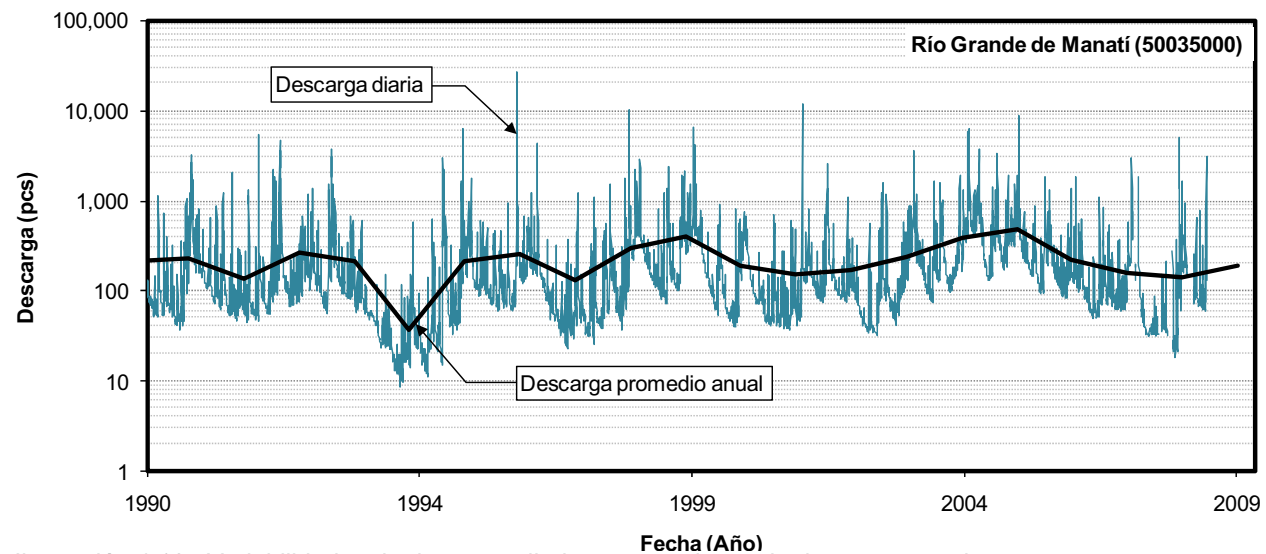


Ilustración 4.18: Variabilidad en la descarga diaria comparada con la descarga anual.

Flujos mínimos

Durante periodos de estiaje, cuando los ríos tienen un flujo mínimo, hay muy poca variación en el flujo y se utilizan valores de flujo promedio diario para determinar los flujos mínimos. De tener datos de una estación de aforo disponible, se determina el flujo mínimo ordenando los datos diarios en secuencia de mínimo a máximo y calculando directamente el porciento de los días de excedencia de flujo. Puede presentarse los datos ordenados en forma de gráfica, según se muestra en la **Ilustración 4.19**.

Donde no existe una estación de aforo cercana se puede estimar los flujos mínimos con diferentes excedentes

por medio de las siguientes ecuaciones (Morris, 2009):

- $Q_m = 9.869 * 10^{-04} * A^{1.075} * R^{1.787}$
- $Q_{90} = 3.127 * 10^{-06} * A^{0.986} * R^{2.756}$
- $Q_{95} = 8.958 * 10^{-07} * A^{1.016} * R^{2.966}$
- $Q_{98} = 2.237 * 10^{-07} * A^{1.057} * R^{3.200}$
- $Q_{99} = 1.237 * 10^{-07} * A^{1.059} * R^{3.307}$

Estas ecuaciones son aplicables a cuencas con áreas de captación mayores a una milla cuadrada y son aplicables solamente a tramos de ríos que no contribuyen sustancialmente a

la recarga del acuífero o que no tienen un impacto significativo por la extracción de agua por tomas o represas aguas arriba.

En un río donde existen datos de una estación de aforo se pueden aplicar las ecuaciones tanto a la estación de aforo como a cualquier otro punto de interés a lo largo del río. La razón entre estos dos valores representa el coeficiente que se aplicará a los datos de aforo para trasladar los datos al punto de interés. De no contar con una estación de aforo razonablemente cerca, se pueden utilizar las ecuaciones para estimar los flujos mínimos directamente.

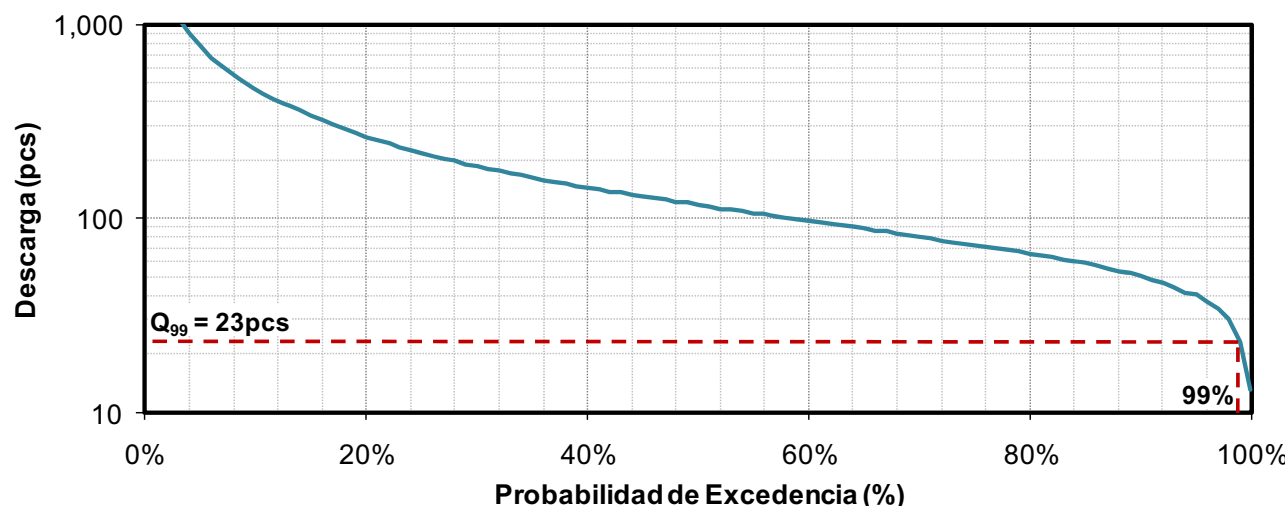


Ilustración 4.19: Ordenamiento de flujos diarios para determinar flujos mínimos utilizando los datos de la estación de aforo 50035000 del USGS del Río Grande de Manatí.

Rendimiento seguro

El rendimiento seguro es el caudal del agua que se puede extraer de forma sustentable de una fuente de abasto con un nivel de confiabilidad específica. Hay diferentes maneras para calcular rendimiento seguro y es imprescindible especificar el nivel de confiabilidad.

Para el abasto municipal en Puerto Rico, se utiliza un nivel de confiabilidad para suplir el abasto el 99% del tiempo. Es decir, solamente el 1% de los días el flujo disponible será menor que el rendimiento seguro. Este 1%

corresponde a los días en el que el sistema de abasto estará bajo racionamiento.

El concepto de sostenibilidad tiene tres implicaciones desde el punto de vista del rendimiento seguro.

1. La tasa de extracción no debe disminuir la disponibilidad del recurso a largo plazo.
2. La extracción no debe causar daño irreparable al ambiente y, particularmente, a la vida acuática que

pueda depender también del caudal del agua.

3. El caudal de agua para usuarios municipales debe estar disponible el 99% del tiempo y, para el porcentaje restante, debe establecerse un racionamiento que no cree una situación de crisis para los usuarios.

Es decir, en un evento de racionamiento no es factible dejar la planta de filtración fuera de operación. Esta premisa debe considerarse en el

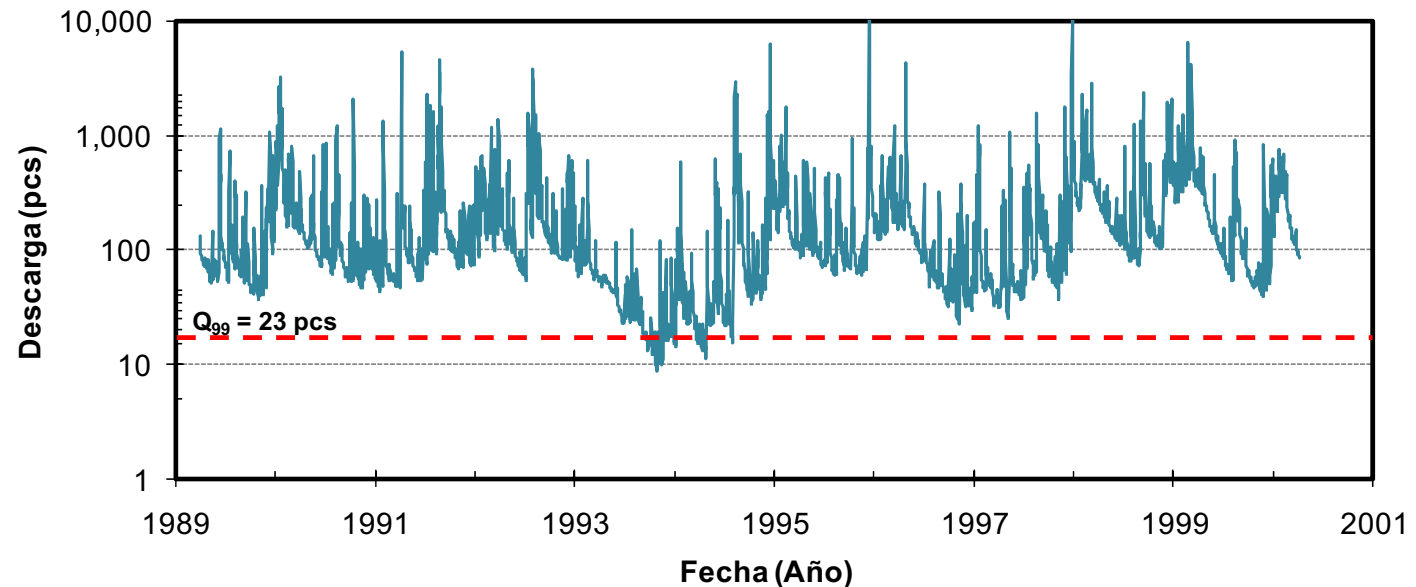


Ilustración 4.20: Datos de flujo diario para la estación 50035000 en Río Grande de Manatí.

cálculo de rendimiento seguro para evitar el sobreestimado de éste.

En el caso de un río, el rendimiento seguro se puede calcular a base de los flujos diarios, siempre y cuando los datos incluyan años de sequía fuerte. La **Ilustración 4.20** muestra los datos diarios de una estación de aforo, señalando el flujo excedido el 99% del tiempo en una gráfica tipo semilogarítmica.

Para determinar el rendimiento seguro de un embalse es necesario proveer un volumen de reserva para prevenir su vaciado total en un evento de se-

quía mayor al analizado. El embalse siempre debe ser capaz de proveer al menos el 70% de su rendimiento seguro durante periodos de racionamiento para asegurar el continuo funcionamiento de la planta de filtración.

En embalses, el rendimiento seguro se calcula mediante la preparación de un balance de agua. Durante periodos de mucho caudal el embalse se llena y, cuando se reduce el flujo, se mantiene su rendimiento mediante la extracción del agua almacenada y la disminución de su nivel. Este ciclo de llenado y vaciado del embalse ocasiona sus variaciones en nivel. El rendi-

miento seguro de un embalse depende del volumen de almacenaje disponible y la relación entre volumen y rendimiento se presenta en forma de una curva, como la presentada en la **Ilustración 4.21**.

Con el tiempo, tanto el volumen como su rendimiento seguro disminuyen debido a la acumulación de sedimentos dentro del embalse. Por consiguiente, los embalses en donde no existe una manera práctica para el control de la sedimentación, a largo plazo, no son considerados una fuente de abasto de agua sustentable.

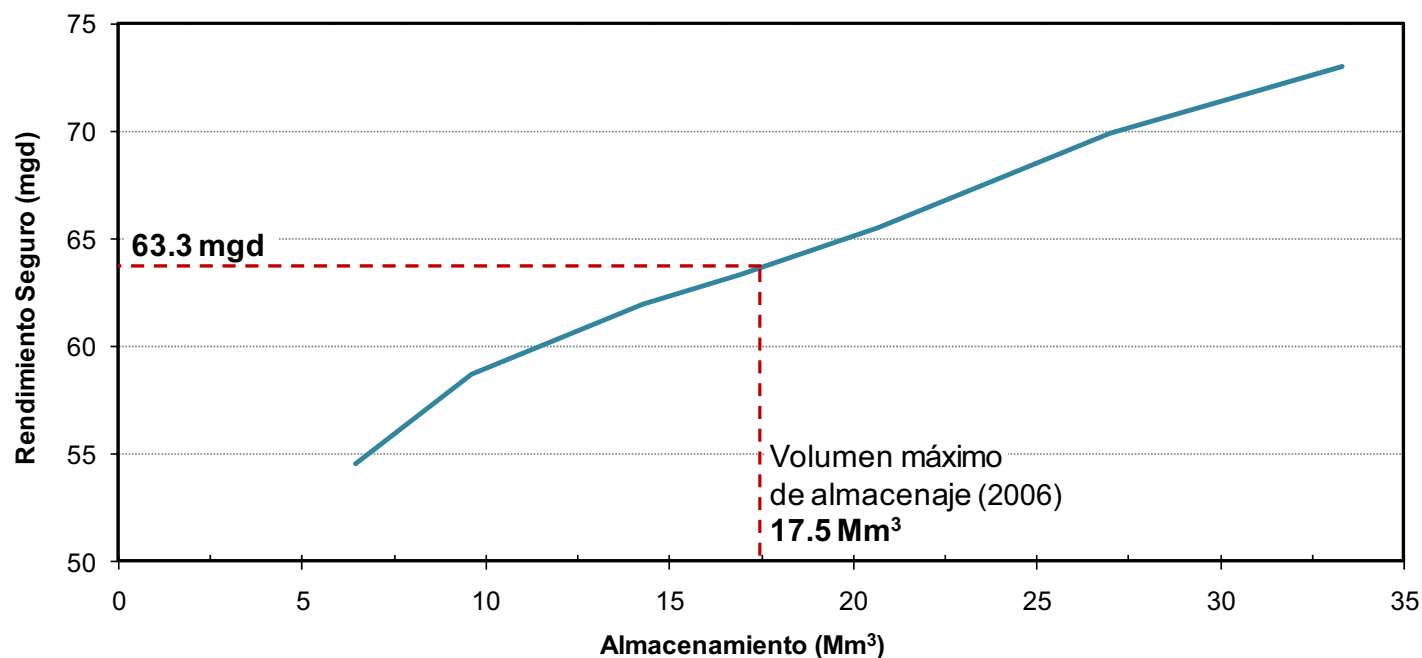


Ilustración 4.21: Relación de almacenaje-rendimiento seguro para el embalse Carraízo, Este embalse está perdiendo su capacidad a una tasa de 300,000 m³ por año.

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 5

Transporte de sedimentos



Contenido

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Erosión | 7. Movimiento inicial de sedimentos |
| 2. Rendimiento de sedimentos | 8. Variabilidad en tasa de transporte |
| 3. Características de los sedimentos | |
| 4. Coraza | |
| 5. Velocidad de asentamiento | |
| 6. Muestreo del lecho del río | |

Introducción

El agua desgasta las montañas mediante el proceso de disolución química y erosión física. Los ríos transportan la roca en forma de sólidos disueltos y también en forma de sedimento (material no disuelto). Los sedimentos se acumulan en los embalses, interfiere con las tomas de agua, tiene impactos sobre los ecosistemas de agua dulce y de la zona costanera, incluyendo los arrecifes de coral, y representa una pérdida de suelo para los agricultores. No es posible entender la función de un río y lograr su manejo adecuado sin entender el transporte de sedimento.

Erosión

El proceso de meteorización representa el desgaste de la roca por procesos químicos y físicos, lo que resulta en la creación de suelo, un material no consolidado. El término “erosión” se refiere al desplazamiento de las partículas del suelo por las fuerzas de la naturaleza, como agua y viento, pero sin especificar su distancia de transporte. En Puerto Rico, el agente principal de la erosión es el agua.

El proceso de erosión puede ser iniciado por el impacto de gotas de lluvia

sobre el suelo y el subsiguiente desprendimiento de sus partículas (**Ilustración 5.1**). El flujo del agua también ocasiona el desprendimiento de partículas del suelo. La vegetación reduce la tasa de erosión dramáticamente por varios mecanismos:

- Amortigua la energía de las gotas de lluvia.
- La grama, hojas y otros materiales en el suelo impiden el contacto directo del flujo superficial con el suelo.

- Atrapa partículas de sedimentos llevadas por la escorrentía superficial.
- La materia orgánica en el suelo propicia la conglomeración de partículas de suelo, haciéndolo más resistente a la erosión.

El comportamiento general de la erosión del suelo por el impacto de gotas de lluvia según aumenta la cobertura vegetal del suelo se presenta en la **Ilustración 5.2**, señalando la efectivi-



Ilustración 5.1: Desprendimiento de partículas de suelo producido por el impacto de gotas de lluvia.

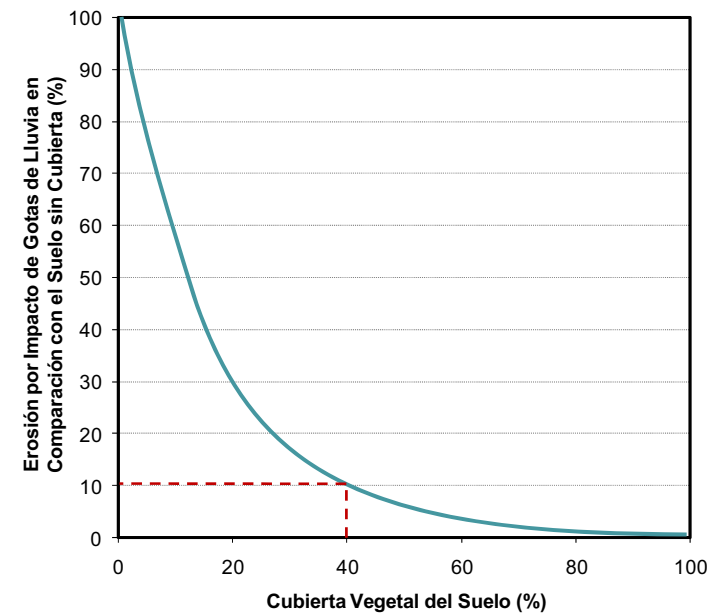


Ilustración 5.2: Comportamiento de la erosión del suelo por el impacto de gotas de lluvia según aumenta la cubierta vegetal.

dad de la vegetación en proteger el suelo.

Actividades agrícolas como el arado remueven la capa vegetal del suelo, haciéndolo más susceptible a la erosión. Sin embargo, la profundidad del arado típicamente no pasa de un pie y el alto contenido de materia orgánica aumenta la resistencia a la erosión, por lo que el suelo mantiene su estructura. El ciclo agrícola también

favorece que la vegetación crezca rápidamente y limite el tiempo que el suelo está expuesto sin ninguna protección.

En contraste, la construcción ocasiona una tasa de erosión mucho mayor debido a que, no sólo remueve la vegetación, sino que también elimina la estructura del suelo, ya que trae a la superficie suelos profundos con bajo o ningún contenido de materia orgánica.

Además, el suelo puede quedar expuesto al impacto directo de la lluvia por muchos meses.

La **Tabla 5.1** muestra diferentes tasas de erosión representativas de diversos usos de terreno. La tasa de erosión y transporte de sedimento se mide en términos de la masa de sedimentos y no del volumen. Una conversión aproximada de peso a volumen se presenta en la **Tabla 5.2**.

Tabla 5.1: Tasas de erosión representativas de diversos usos del terreno (Morris and Fan, 1997).

Uso de Terreno	Tasa de Erosión (t/km ² /año)	Tasa de Erosión Relativa (Bosque=1)
Bosque	24	1
Pasto	240	10
Agricultura	4,800	200
Construcción	48,000	2,000

Tabla 5.2: Conversión de volumen de sedimentos a peso seco (Morris and Fan, 1997).

Material	Gravedad Específica	Densidad (kg/m ³)
Agua	1.00	1,000
Basalto Sólido	3.01	3,001
Caliza Sólida	2.64	2,610
Grava o Arena Suelta	1.68	1,680
Suelo Típico	1.60	1,600
Sedimentos Sumergidos en Embalses ^A	1.00	1,000

^A Peso seco del sedimento, valor típico para embalses en Puerto Rico.

Rendimiento de sedimento

La cantidad de sedimento que pasa por un punto en el río se denomina como el "rendimiento de sedimento" de la cuenca tributaria al punto de análisis. La **Ilustración 5.3** presenta tasas de rendimiento de sedimento en Puerto Rico basado en datos de embalses y estaciones de aforo de sedimentos en suspensión.

Parte del suelo erosionado es trasladado distancias cortas antes de asentarse nuevamente o puede quedar depositado en la planicie inundable.

Por lo tanto, el rendimiento de sedimento siempre es menor que la tasa de erosión. La razón de estos valores se denomina la "razón de entrega de sedimentos" (*sediment delivery ratio*), y es la razón entre sedimento exportado (S_{EXP}) y sedimento erosionado (S_{ER}), según se define en la siguiente ecuación:

$$\text{Razón de Entrega} = \frac{S_{exp}}{S_{er}}$$

No es práctico medir la tasa de erosión, por esta razón se determina utilizando ecuaciones que brindan un aproximado de este valor. Según el flujo se mueve en dirección aguas abajo, aumentan las oportunidades para que parte de los sedimentos queden atrapados. Esto ocasiona que, generalmente, el rendimiento específico de sedimento (rendimiento por área de terreno) tienda a reducirse según aumenta el tamaño de la cuenca. Este comportamiento se puede apreciar levemente en la **Ilustración 5.3**.

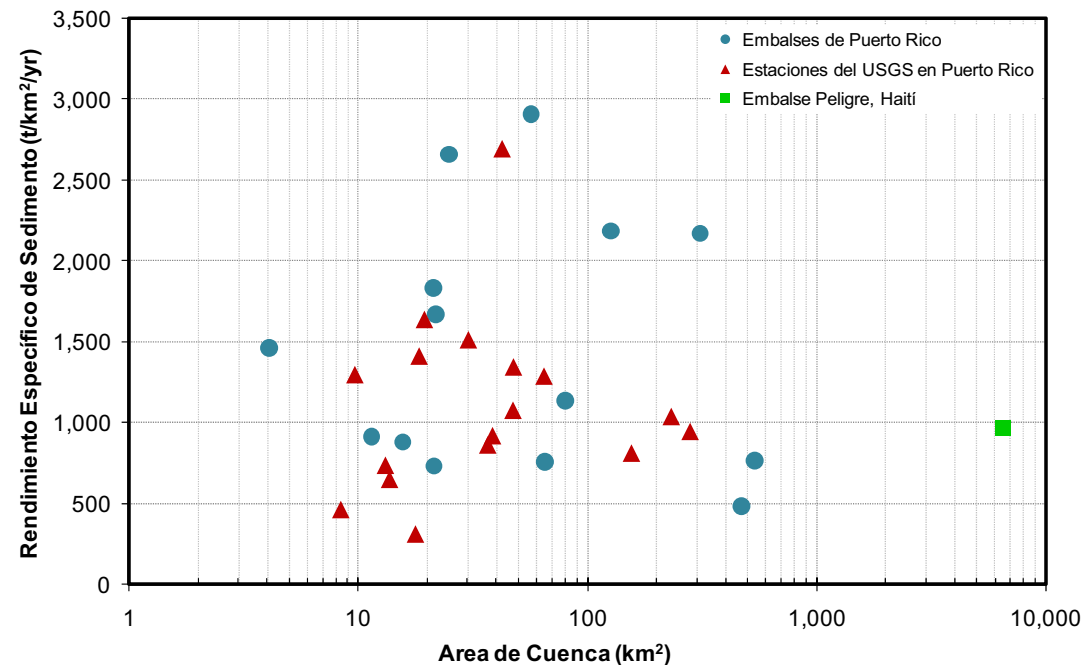


Ilustración 5.3: Rendimiento específico de sedimento, Puerto Rico y Haití.

Características de los sedimentos

Clasificación por diámetro

Los sedimentos se pueden clasificar por su tamaño, expresado como diámetro nominal. La **Tabla 5.3** muestra la clasificación de sedimentos por tamaño. Dentro de las clasificaciones presentadas en la tabla, los sedimentos se agrupan en dos categorías: sedimentos finos y sedimentos gruesos. Los sedimentos finos son aquellos dentro de la categoría de limos y arcilla y las categorías restantes (bolos, pedruscos, gravillas y arena) se agrupan bajo los sedimentos gruesos.

Dentro de la clasificación de sedimentos gruesos hay una gran diferencia en la tasa de transporte. Debido a su tamaño, la arena es mucho más fácil de transportar que las gravas y otros sedimentos de mayor diámetro.

Las arenas y gravas se clasifican por su tamaño utilizando un análisis de tamices. En esta prueba se ciernen los sedimentos a través de dos series de tamices enumerados, una serie para arenas y otra para gravas. Para la serie de tamices utilizados para clasificar arena, el número representa la cantidad de aperturas por pulgada lineal y se colocan en forma ascendente: #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200 y bandeja. Mientras que para la

Tabla 5.3: Clasificación de sedimento por tamaño.

Tipo de Sedimento		Tamaño	Diámetro (mm)	
			Max.	Min.
Sedimentos Gruesos	Bolos (Boulders)	Muy Grande	4,096	2,048
		Grande	2,048	1,024
		Mediano	1,024	512
		Pequeño	512	256
	Pedruscos (Cobbles)	Grande	256	128
		Pequeño	128	64
	Gravilla (Gravel)	Muy Grueso	64	32
		Grueso	32	16
		Mediano	16	8
		Fino	8	4
		Muy Fino	4	2
	Arena (Sand)	Muy Grueso	2	1
		Grueso	1	0.5
		Mediano	0.5	0.25
		Fino	0.25	0.125
Muy Fino		0.125	0.063	
Sedimentos Finos	Limo (Silt)	Grueso	0.063	0.031
		Mediano	0.031	0.016
		Fino	0.016	0.008
		Muy Fino	0.008	0.004
	Arcilla (Clay)	Grueso	0.004	0.002
		Mediano	0.002	0.001
		Fino	0.001	0.0005

Más del 90% de las descargas de sedimentos en los ríos de Puerto Rico consiste en limo y arcilla resultante de la erosión de los suelos.

serie de tamices utilizados para las gravas, el número indica el tamaño de diámetro de las aperturas de la malla y se colocan en orden descendente: 1½ pulg., 1 pulg., ¾ pulg., ½ pulg., 3/8 pulg., #4, #8 y bandeja. Los sedimentos se colocan inicialmente en el tamiz de mayor tamaño de apertura. Luego van cayendo al tamiz siguiente hasta quedar retenidos en el tamiz cuyo

diámetro de apertura es menor que el diámetro de partícula. Para determinar el porcentaje de material que corresponde a cada tamaño, se pesa el material retenido en cada tamiz y se compara con el peso total de la muestra. Con los datos obtenidos se construye una gráfica de clasificación de sedimentos como la que se presenta en la **Ilustración 5.4**.

El método de tamices no es viable para los sedimentos finos por lo diminuto que es su diámetro. Para este tipo de sedimentos, el tamaño se determina en base a su velocidad de sedimentación en el agua. Se mide, no su tamaño actual, sino el diámetro de una esfera con la misma velocidad de sedimentación.

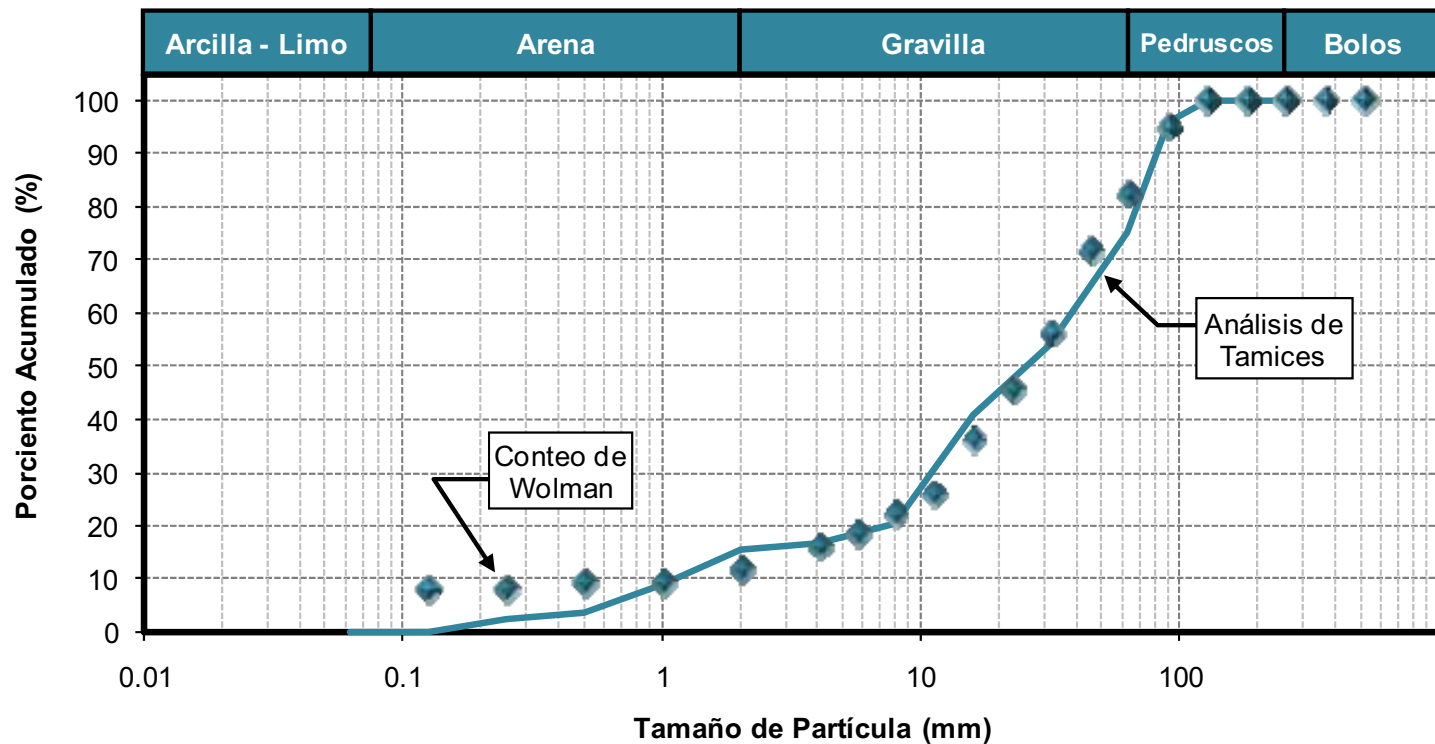


Ilustración 5.4: Curva de clasificación de sedimentos por tamaño de granos.

Clasificación por método de transporte

Los sedimentos se pueden clasificar por su modo de transporte. Existen dos modos de transporte: los sólidos en suspensión y la carga de arrastre. Los sólidos en suspensión se mantienen suspendidos en la columna de

agua solamente por la turbulencia, mientras que la carga de arrastre consiste en partículas de mayor diámetro que son transportadas por la acción de rodar o por una serie de brincos sobre el lecho.

La **Ilustración 5.5** identifica de forma esquemática la clasificación de sedi-

mentos por modo de transporte. Los sedimentos de tamaño de arena, que son transportados como carga de arrastre con flujos menores, pueden ser transportados como sedimentos en suspensión cuando el caudal y la energía turbulenta del flujo aumentan durante una crecida.



Ilustración 5.5: Clasificación de sedimentos por modo de transporte.

Coraza

En un lecho con una variación sustancial en el tamaño de sus sedimentos, los flujos menores transportan los granos finos, mientras que los granos de mayor tamaño no se mueven. Este proceso lleva a que la capa superficial

esté compuesta mayormente por sedimentos gruesos (**Ilustración 5.6**). Esta capa se denomina como coraza y protege de las fuerzas del flujo a los granos de menor diámetro que quedan atrapados debajo. De esta forma,

el transporte de sedimento de arrastre puede ser muy bajo hasta que ocurra una crecida grande que deshaga la coraza e inicie el movimiento de todo el lecho.

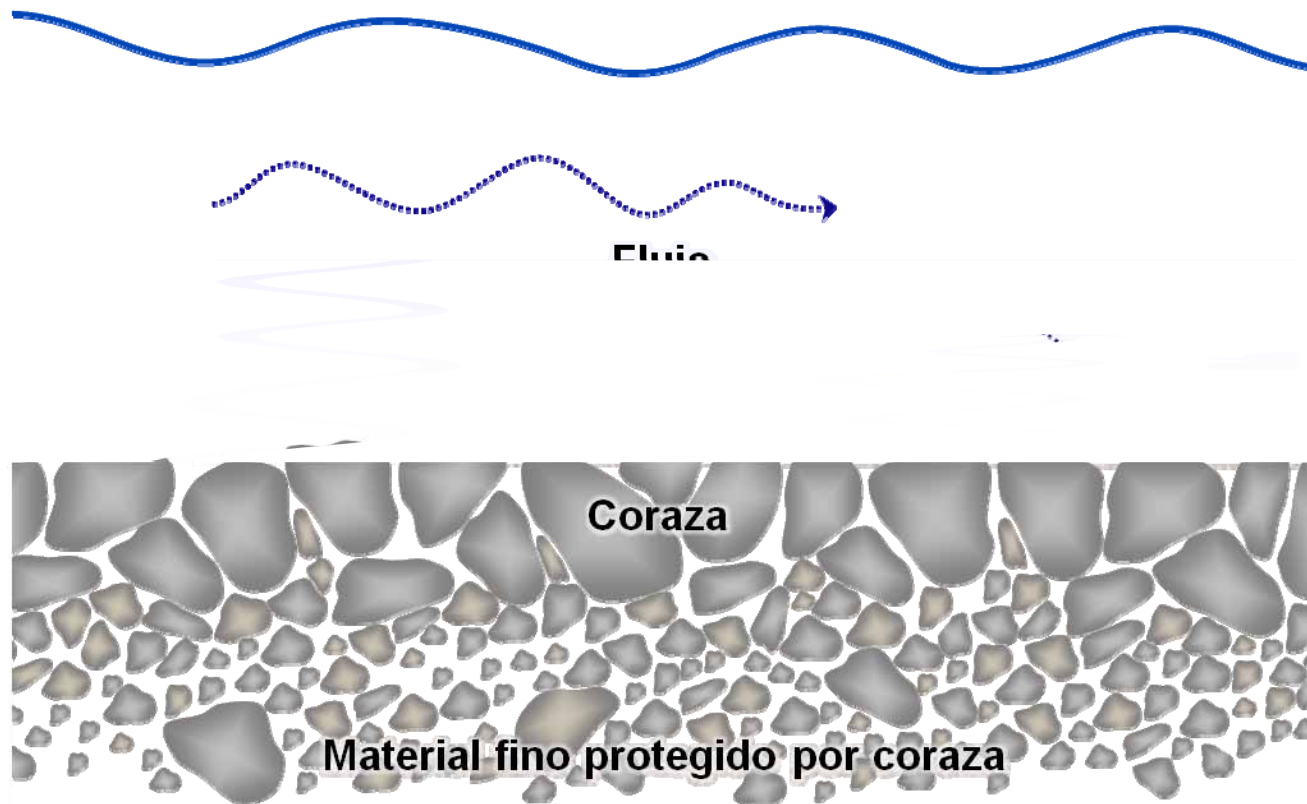


Ilustración 5.6: La coraza protege el material más fino atrapado debajo.

Velocidad de asentamiento

La velocidad de asentamiento es el factor primario determinante del comportamiento de los sedimentos en un fluido. Esta velocidad depende de ciertas características de los sedimentos, tales como su tamaño, forma y densidad. También depende de algunas características del fluido, como su temperatura, salinidad y concentración de sedimentos (que afectan la densidad y viscosidad del fluido).

El término velocidad de asentamiento se utiliza cuando se están analizando los sedimentos finos (sedimentos en suspensión). La velocidad de asentamiento se puede calcular utilizando la ecuación desarrollada por Rubey (1931). Esta determina la velocidad de asentamiento [ω (m/s)] en función de la densidad de los sedimentos [ρ_s (kg/m³)], la densidad del agua [ρ_w (kg/m³)], el diámetro de partícula [d (m)] y

la viscosidad dinámica [μ (0.001N-s/m²)]:

$$\omega = \frac{[(1,636 (\rho_s - \rho_w) d^3 + 9\mu^2)^{0.5} - 3\mu]}{(500d)}$$

Esta ecuación, que se presenta de forma gráfica en la **Ilustración 5.7**.

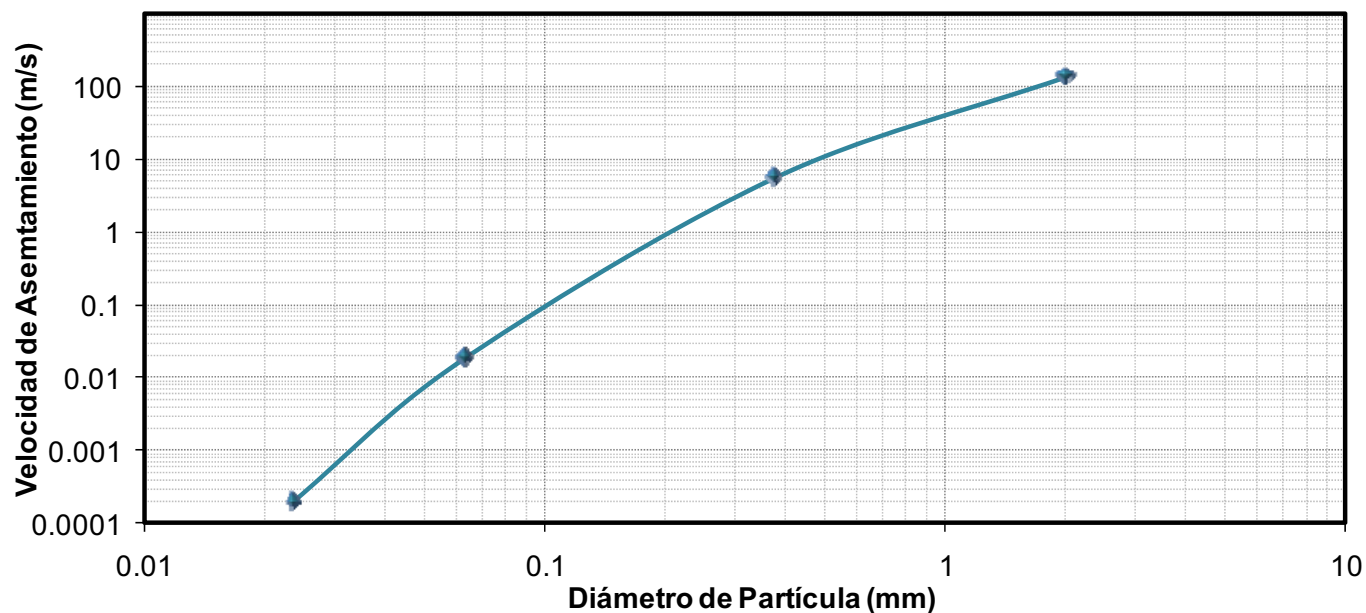


Ilustración 5.7: Curva de velocidad de asentamiento.

Muestreo del lecho del río

El lecho del río contiene una variedad de tamaños de sedimentos y los resultados de un análisis de granulometría dependen tanto de la localización de la muestra como del desempeño de los procedimientos de campo o laboratorio. Esta sección presenta algunas estrategias de muestreo que permiten obtener datos representativos de un tramo de río.

El tipo de estrategia a utilizar depende primordialmente del propósito. Por ejemplo, si está interesado en conocer las actividades biológicas que solamente existen en ciertas áreas del río, su estrategia de muestreo debe ajustarse a escoger las áreas de interés.

Típicamente, se determina la granulometría del lecho para: (1) calcular el caudal que puede iniciar el movimiento de partículas, (2) para proveer datos a un modelo de transporte de sedimento y (3) para determinar la permeabilidad o el valor económico del material. En todas estas situaciones, el objetivo es determinar un tamaño representativo de todo el sedimento en este tramo del río.

La mayoría de los lechos de los ríos de Puerto Rico no contienen mucha arena. Las excepciones son los tramos cercanos a la costa, donde hay poca pendiente para transportar gravas, o los ríos que drenan formacio-

nes graníticas que producen mucha arena. Por lo tanto, los sedimentos típicamente son muestreados y medidos en el campo por el método "Wolman".

Conteo "Wolman"

El método "Wolman" requiere que se visite el río durante periodos de flujo bajo para seleccionar los sedimentos de las barras expuestas. El procedimiento normal es medir el tamaño de las piedras en el campo, en vez de transportar grandes cantidades de éstas al laboratorio. En cada lugar de muestreo se debe seleccionar y medir un mínimo de 60 piedras, clasificándolas según el tamaño de su eje intermedio. La **Tabla 5.4** presenta un

ejemplo de esta clasificación. Al escoger una piedra de río se pueden definir tres ejes: (A) el eje más largo, (B) el eje intermedio y (C) el eje más corto. El eje intermedio, el eje "B" en la **Ilustración 5.8**, representa el diámetro de la piedra y corresponde al tamaño que pasaría por un tamiz, lo cual se puede medir con una escala.

Al analizar el tamaño de los sedimentos, es esencial escoger una muestra representativa. Esto requiere que se cumpla con los siguientes dos conceptos:

1. Debido a la variación en el tamaño de los sedimentos, es necesario seleccionar muestras de una zona que sea representativa de la

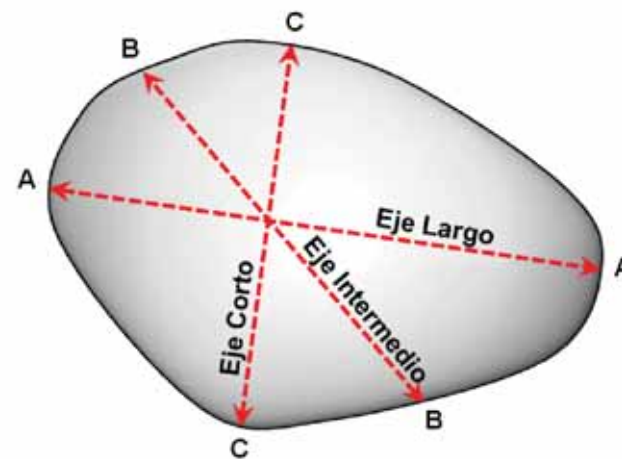


Ilustración 5.8: Eje intermedio de una roca.

totalidad del lecho. Por ejemplo, el límite aguas arriba de las barras típicamente contiene sedimentos de mayor diámetro, mientras que los sedimentos al final de las barras son de un diámetro menor. Para Puerto Rico, se recomienda que se escojan muestras a lo largo de toda la barra.

Debido a que algunas barras pueden tener una predominancia de sedimentos de diferentes tamaños, es importante muestrear más de una barra.

2. Es esencial que cada piedra se escoja al azar. Es imposible escoger granos al azar si se mira al suelo para escoger la muestra. Por consiguiente, se debe seleccionar cada piedra estrictamente sin mirar. Un método sencillo es caminar un paso, mirar al lado para no poder ver su mano y bajar un lápiz o palito delgado perpendicular hasta tocar un grano con su punta. De esta manera se puede seleccionar cada grano a medir al azar.

Tabla 5.4: Formato de tabulación para el conteo "Wolman."

Diámetro de Partícula (mm)		Conteo	Conteo Acumulativo	% Acumulado
Desde (Retenido)	Hasta (Pasando)			
2	4	4	4	5%
4	5.7	2	6	8%
5.7	8	3	9	12%
8	11.3	3	12	16%
11.3	16	9	21	28%
16	22.6	8	29	39%
22.6	32	9	38	51%
32	45	13	51	68%
45	64	9	60	80%
64	90	11	71	95%
90	128	4	75	100%
128	180	--	--	100%

Movimiento inicial del sedimento

Las piedras en el lecho del río son movilizadas por el flujo del agua. Es importante conocer el tamaño mínimo de piedras que no serán movilizadas por el flujo del agua. Este es el tamaño mínimo que se utiliza para seleccionar piedras inmóviles para el diseño de obras de protección de ríos y de restauración. Conocer el tamaño de piedras que el flujo moviliza también ayuda a determinar el caudal necesario para movilizar y limpiar los sedimentos finos que se acumulan en le-

chos de grava y piedras entre los espacios de las partículas, un proceso ecológicamente importante.

Hay varias maneras de calcular el tamaño de sedimento que se moviliza bajo un régimen de flujo en particular. A continuación se presenta una simplificación del método de Shields utilizando valores de coeficientes aplicables a ríos en Puerto Rico. La relación de Shields representa la razón entre las fuerzas que producen el mo-

vimiento y las fuerzas que resisten el movimiento de una partícula de sedimento.

La fuerza del agua sobre el lecho. Primero es necesario calcular la fuerza que el agua ejerce sobre el lecho del río (τ_0 en Newtons/m²), conocido como "fuerza cortante" (*bed shear stress* ó *tractive force*). Esto se calcula como el producto del peso específico del agua [γ (kg m/s²)], la pendiente

El tamaño mayor de piedras encontrado en el lecho del río es un índice del tamaño de piedra que el río es capaz de movilizar.

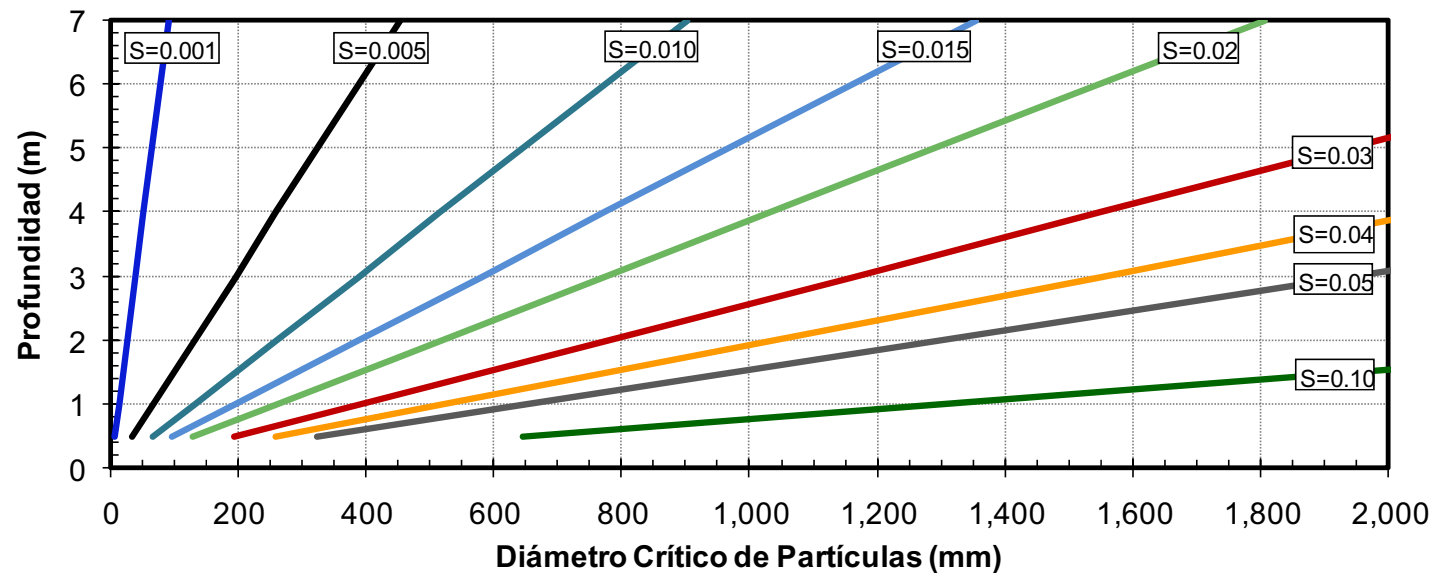


Ilustración 5.9: Diámetro crítico en función de profundidad y pendiente (s).

del río $[s]$ y el radio hidráulico $[R_h]$ (el cual se aproxima como la profundidad del agua $[D \text{ (m)}]$ para ríos relativamente anchos en relación a su profundidad), utilizando la siguiente ecuación:

$$\tau_0 = \gamma R_h s \approx \gamma D s$$

El peso específico del agua $[\gamma]$ es el producto de la masa y la aceleración gravitacional. Para un metro cúbico de agua el valor es $\gamma = (1,000 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) = 9,810 \text{ N}$. Por ejemplo, con 3 m de profundidad de flujo y una pendiente de río $s = 0.015$ (1.5 %), se puede calcular la fuerza cortante como:

$$\begin{aligned}\tau_0 &= \gamma D s \\ &= (9,810) (3) (0.015) \\ &= 441 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

El valor crítico del coeficiente Shields $[F^*]$ corresponde a la condición cuando el flujo apenas inicia el movimiento del sedimento de un tamaño en específico y se calcula por la siguiente forma:

$$F^* = \frac{\tau_0 d^2}{(\gamma_s - \gamma) d^3} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d}$$

En esta ecuación, d = diámetro d_{50} del sedimento (mm), γ_s = peso específico del sedimento y F^* = valor crítico del coeficiente Shields (se puede utilizar $F^* = 0.047$). Utilizando un peso específico de $2,650 \text{ kg/m}^3$ para sedimento, la ecuación se puede simplificar a:

$$\begin{aligned}d &= \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) F^*} = \frac{\tau_0}{0.760} \\ &= 12,900 D s\end{aligned}$$

Esta ecuación se presenta de forma gráfica en la **Ilustración 5.9**.

Este cálculo del punto de inicio del movimiento de sedimentos en un río es aproximado y puede tener un error de hasta 25% en el diámetro.

Las fuerzas cortantes no son constantes en el fondo del río, ya que son mayores en el exterior de las curvas. Por lo tanto, habrán zonas de mayor fuerza cortante que la calculada para la condición promedio del río.

Una segunda consideración es la variación en el tamaño de los sedimentos. La presencia de coraza puede inhibir el movimiento hasta que se deshace. Debido a que las piedras de mayor tamaño tienen la tendencia de proteger los sedimentos más pequeños en un lecho de tamaños mixtos, el diámetro d_{80} puede ser más apropiado que el d_{50} normalmente utilizado.

En el diseño de obras también hay que considerar que las rocas grandes utilizadas en una obra de protección pueden ser desplazadas por socavación, aún cuando son inmóviles con respecto a la fuerza cortante.

Variabilidad en tasa de transporte

El transporte de sedimento es altamente variable a través del tiempo. Esta variabilidad es evidente al presentar gráficamente la descarga acumulativa de sedimentos a través del tiempo para las estaciones de aforo en el Río Valenciano (5005400) y el Río Toa Vaca (50110900), según se muestra en la **Ilustraciones 5.10 y 5.11** respectivamente. En general, gran parte del sedimento se transporta en sólo pocos días del total de años de muestreo. En la estación del Río Valenciano (5005400), el 50% de los sedimentos fue transportado en sólo 7 días de un total de 19 años. En la estación del Río Toa Vaca se reflejan dos eventos importantes, el huracán Hortense (9/10/1996) y el huracán Georges (9/22/1998). Durante estos dos eventos se transportó aproximadamente el 50% del total de los sedimentos transportados durante 17 años.

El muestreo de sedimentos es muy complicado, de todos los parámetros a medir en los ríos, es el más difícil de determinar con precisión. El problema es que la concentración de sedimentos en suspensión de los ríos caribeños puede variar desde 10 mg/l en flujos bajos hasta 10,000 mg/l en flujos altos. Además, la concentración puede variar de un lado del río a otro y con la profundidad. En flujos moderados, los sedimentos en suspensión

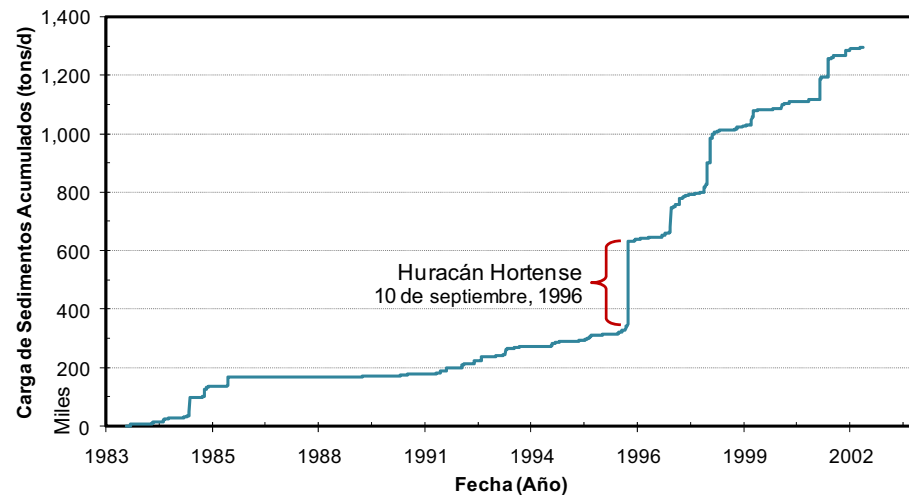


Ilustración 5.10: Descarga acumulativa de sedimentos para la estación del USGS 5005400 en Río Valenciano.

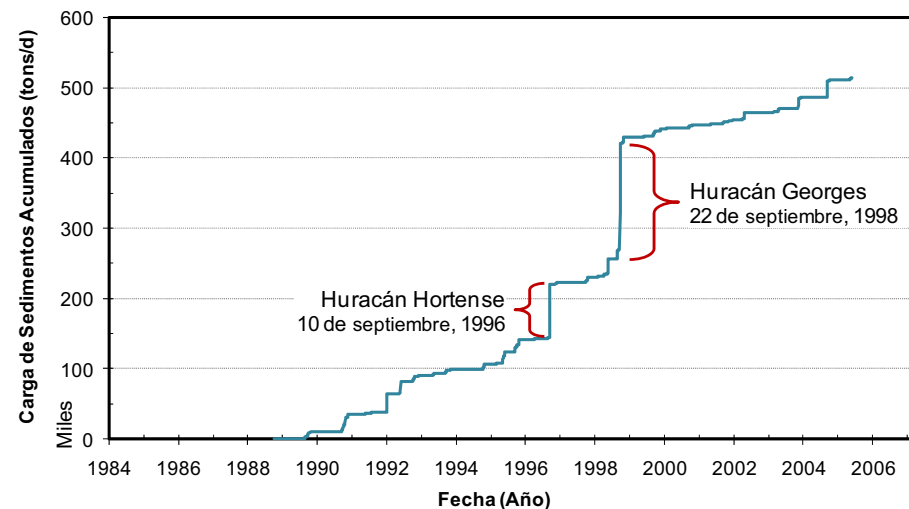


Ilustración 5.11: Descarga acumulativa de sedimentos para la estación del USGS 50110900 en Río Toa Vaca.

consisten solamente de limo y arcilla, cuya concentración es relativamente constante en toda la columna de agua. Sin embargo, la turbulencia de flujos altos puede levantar arena y grava del lecho y transportarlos en suspensión, provocando una variabilidad en la concentración a lo largo de la columna de agua. Todos estos factores complican la medición de sedimentos y la hacen costosa.

Las mediciones de flujo son relativamente económicas en comparación a los de sedimentos. Además, en Puerto Rico hay muchos años de datos de caudal para la gran mayoría de los ríos. Por consiguiente, para estimar el rendimiento y el patrón de descarga de sedimentos en periodos largos de tiempo, la metodología aceptada es preparar una relación entre caudal y concentración de sedimentos utilizan-

do varios años de datos y aplicar esa relación a la serie total de datos de flujo. Un ejemplo de esta relación de concentración de sedimentos vs. flujo (*sediment rating curve*) se muestra en la **Ilustración 5.12**. La relación de concentración de sedimentos vs. flujo se caracteriza por tener una alta variabilidad, y un mismo caudal puede experimentar un amplio rango de concentración de sedimentos.

Al preparar la curva concentración-descarga, es necesario asegurarse de que la relación utilizada reproduce la carga de sedimento correcta durante el período de datos. Esto se hace al aplicar la ecuación desarrollada a los datos originales para recalcular la carga total. Si la ecuación no reproduce la carga total correctamente, es necesario ajustarla para producir la carga actual. Además, se debe cotejar que

la ecuación balancea el estimado de la carga entre los eventos menores y los eventos mayores. El uso de una ecuación desarrollada por un método de regresión no va a generar el resultado apropiado y requiere ajuste manual. De igual forma, es necesario utilizar con frecuencia una curva en dos segmentos, ya que la concentración no sigue en aumento exponencial con el caudal. El buen juicio y sentido común son elementos necesarios para calcular el caudal de sedimentos.

El transporte de sedimento de la carga de arrastre en la mayoría de los ríos de Puerto Rico es muy difícil de medir debido al tamaño de los sedimentos que se transportan. Por esta razón, se estima el transporte de carga de arrastre como un porcentaje de la carga de sedimentos en suspensión o mediante modelación de la tasa de

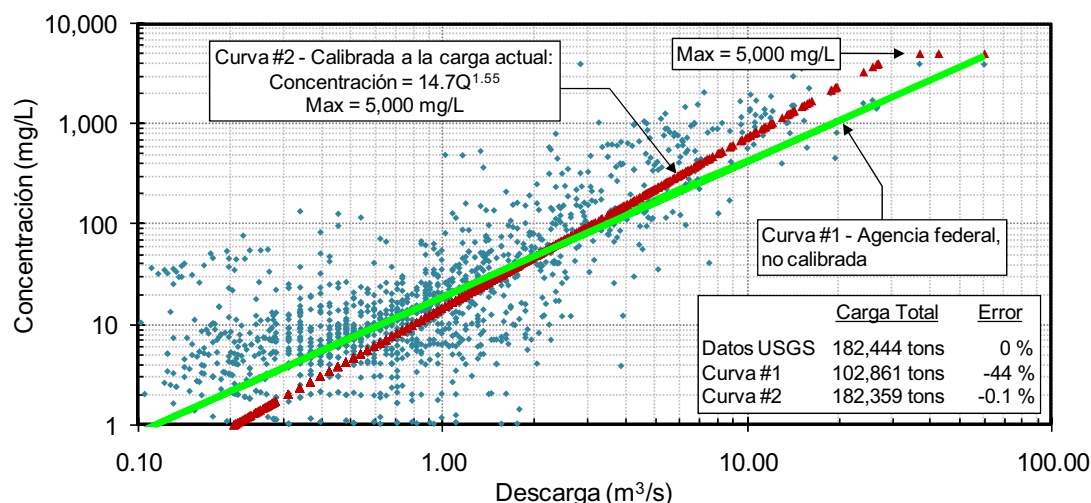


Ilustración 5.12: Relación de descarga de sedimentos vs. flujo para la estación de aforo en el Río Fajardo, (50071000).

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 6

Características biológicas



Contenido

- Cadenas alimentarias
- Organismos acuáticos

Introducción

Los ríos y quebradas de Puerto Rico cuentan con una comunidad nativa compuesta mayormente por peces y crustáceos, además de otros organismos menos estudiados como insectos, moluscos y algas. En comparación con los ríos continentales, la comunidad acuática en Puerto Rico es poco diversa debido a la extensión limitada de sus cuencas ya que se encuentra físicamente lejos de nuevas fuentes de colonización. La mayoría de la fauna acuática nativa migra entre el río y el mar durante diferentes etapas de su vida. Debido a que los organismos migratorios no necesariamente regresan al río de origen, esta estrategia de vida permite que la mayoría de las especies se distribuyan de manera uniforme a lo largo de toda la Isla. Además, debido a esta estrategia de vida, garantizar la conectividad a lo largo de toda la cuenca hidrográfica que resulta particularmente importante para mantener la diversidad existente.

Cadenas alimentarias

Terminología

Cadena alimentaria. Es una forma de describir la transferencia de energía desde los productores hasta los diferentes niveles de consumidores.

Niveles tróficos. Indica la posición de un organismo dentro de la cadena alimentaria. En específico, describe qué come la especie y quién se come a la especie.

Productores primarios. También conocidos como autótrofos, estos organismos utilizan la energía solar para transformar sustancias inorgánicas en biomasa orgánica que sirve de alimento a otras especies.

Perifiton. Son algas que crecen encima de las rocas y la madera en el río.

Herbívoros. Aquellos organismos que consumen productores primarios.

Autótrofo. Se refiere a la producción de materia orgánica dentro del sistema fluvial, por ejemplo, por las algas y diatomeas.

Alóctono. Se refiere a aquel material que proviene de otro lugar. Ejemplos de material alóctono en los ríos incluye la hojarasca y madera que proviene de los árboles adyacentes.

Trituradores. En el ecosistema acuático se conocen como trituradores a aquellos organismos que se alimentan de material orgánico alóctono y, en el proceso, lo van cortando y disminuyendo en tamaño.

Coletores. Se refiere a aquellos organismos que se alimentan de material orgánico fino que se encuentra en

la columna de agua o en el sustrato del fondo.

Depredadores. Se refiere a organismos que se alimentan de otros organismos (carnívoros).

Omnívoros. Se refiere a organismos que pueden alimentarse de varias fuentes, de acuerdo a su disponibilidad.

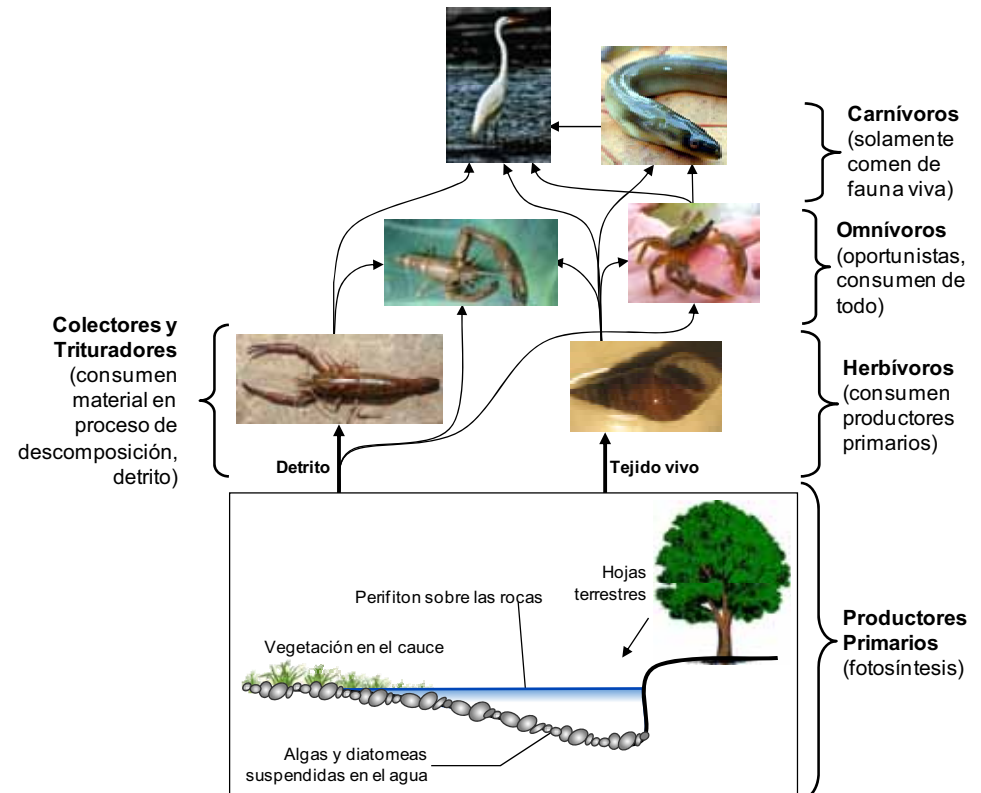


Ilustración 6.1: Cadena alimentaria básica de los ecosistemas acuáticos como ejemplos de organismos en Puerto Rico.

dad. Ejemplos incluyen varios camarones, cangrejos y los seres humanos.

Cadenas alimentarias en ecosistemas acuáticos

En la **Ilustración 6.1** se describe la cadena alimentaria básica de los ecosistemas acuáticos. En general, la energía solar es transformada en biomasa por los productores primarios dentro del río (ejemplo algas) y por la vegetación terrestre fuera del río cuya hojarasca cae en el agua. De esta manera, el río es alimentado con energía solar terrestre. Los herbívoros consumen los productores primarios acuáticos, mientras que los trituradores y colectores consumen la materia orgánica generada por los productores primarios fuera del río. Los depredadores acuáticos, como los peces, consumen a estos organismos, dado que son el tope de la cadena alimentaria dentro del agua. Los organismos que habitan dentro del agua pueden ser consumidos por depredadores terrestres, como las aves, transmitiendo la energía solar fuera del ambiente acuático.

Las características ecológicas a lo largo de un río se pueden describir bajo el concepto del *Río como uno Continuo (Ilustración 6.2)*. Esta es una teoría que desarrolló Robin L. Vanootte para el 1980 y que, según estudios recientes, se puede aplicar a ríos en Puerto Rico (Greathouse y

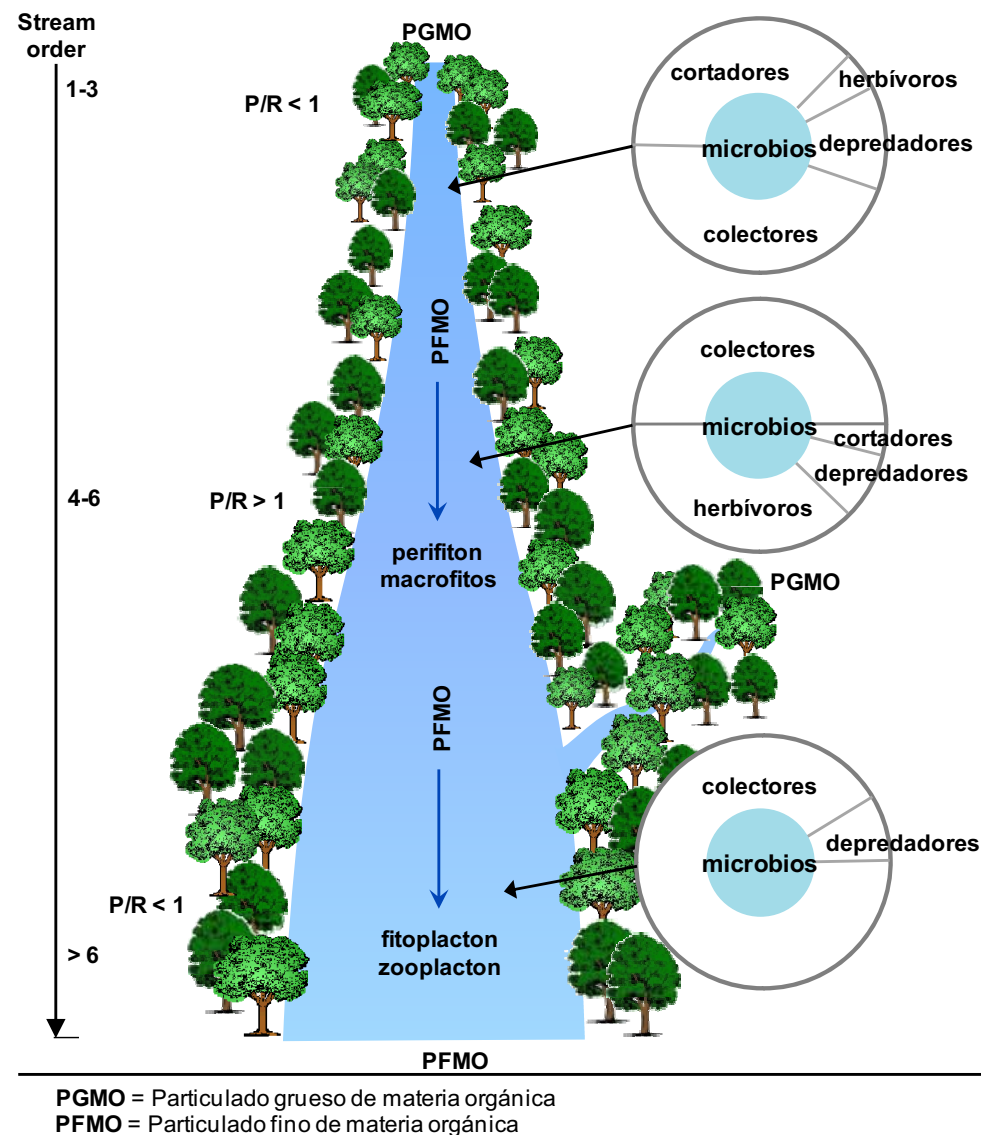


Ilustración 6.2: Diagrama del concepto del *Río como uno continuo*.

Pringle 2006). La teoría explica los patrones físico-químicos del río a lo largo de un gradiente longitudinal, desde las cabeceras hasta los tramos más anchos y cercanos a la costa. Este gradiente longitudinal promueve diferencias en los recursos alimenticios disponibles y, por lo tanto, propicia diferencias en las funciones tróficas de los organismos presentes en las distintas partes del río.

Por ejemplo, en las quebradas de cabecera hay una abundancia de material orgánico particulado proveniente de la vegetación ribereña. Esto ocurre porque son quebradas pequeñas, la vegetación ribereña cubre todo el ancho del cauce, la entrada de luz es limitada y hay mucha hojarasca que cae en el cauce. Por lo tanto, en estas quebradas observamos organismos trituradores y colectores. Los organismos trituradores cortan y se alimentan de partículas grandes que caen al agua, como hojarasca y pedazos de madera. Cuando los trituradores procesan este material, hacen disponible material orgánico más pequeño del cual se alimentan los colectores.

En la zona del medio de una cuenca hay mayor entrada de luz, por consiguiente, hay un aumento en la productividad primaria y habrá menos carga de hojas terrestres en relación a la superficie del agua. Por lo tanto, en estos tramos se observan más organismos herbívoros que se alimentan de plantas y perifiton. También se

observan más organismos colectores o filtradores que se aprovechan de la materia orgánica que viene de aguas arriba.

En los ríos anchos mas cercanos a la costa hay plena entrada de luz y el insumo de los árboles en las riberas es muy reducido. Hay entrada de luz pero también hay más entrada de sedimento y mayor profundidad. Esto limita la productividad primaria y, por lo tanto, los organismos que se encuentran en estas áreas son mayormente colectores y filtradores que agarran toda la materia orgánica que proviene de aguas arriba. Los depredadores se distribuyen a lo largo de todo el río.

El concepto antes descrito resalta la importancia de mantener la conectividad en una cuenca hidrográfica y nos demuestra que dicha conectividad no sólo es esencial para permitir los patrones migratorios de la fauna nativa, sino también para conservar las redes tróficas a lo largo del río. Cabe señalar que la energía transmitida a través de dichas redes tróficas no se limita al río, sino que también trasciende al ambiente terrestre, ya que aves, reptiles, anfibios e insectos que habitan en las riberas se alimentan de la fauna acuática.

Organismos acuáticos

Los ríos y quebradas de Puerto Rico cuentan con una comunidad nativa compuesta mayormente de peces y crustáceos, además de otros organismos menos estudiados como insectos, moluscos y algas. En comparación con los ríos continentales, la comunidad acuática en Puerto Rico es poco diversa debido a la extensión limitada de sus cuencas y a que se encuentra físicamente lejos de nuevas fuentes de colonización (Covich 2006).

La mayoría de la fauna acuática nativa migra entre el río y el mar durante diferentes etapas de su vida. Debido a que los organismos migratorios no necesariamente regresan al río de origen, esta estrategia de vida permite que la mayoría de las especies se distribuyan de manera uniforme a lo largo de toda la Isla (Ramírez 2004). Además, debido a esta estrategia de vida, el mantener la conectividad migratoria a lo largo de toda la cuenca hidrográfica resulta particularmente importante para mantener la diversidad. Otra razón importante para mantener la conectividad radica en mantener el flujo de alimento entre las cabeceras y las zonas de planicie costera, incluyendo el estuario.

En Puerto Rico, la presencia de barreras determina en gran medida la comunidad acuática en diferentes partes

del río (Kwak 2007), lo que implica que las barreras construidas por el hombre, como por ejemplo las represas, controlan la distribución de especies a lo largo de la red de drenaje. Al representar una barrera física a la migración, las represas grandes eliminan las especies nativas migratorias de la cuenca aguas arriba de la barrera.

Productores primarios

Los mayores grupos de autótrofos en los cuerpos de agua dulce consisten de las plantas macrófitas, el fitoplancton suspendido en la columna de agua y el perifiton en el bentos (Allan 1994). Este último ocurre sobre piedras y otros sustratos (**Ilustración 6.3**) y se compone mayormente de algas y diatomeas. Las diatomeas



Ilustración 6.3: Perifiton sobre rocas (Provista por Sophia Burgos).

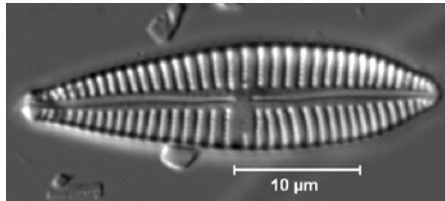


Ilustración 6.4: Diatomea del género *Gomphonema* (Provista por Brynne Brian).

son protistas fotosintéticos que, además de producir alimento, son útiles indicadores biológicos ya que son muy sensibles a la contaminación del agua. Por ejemplo, *Gomphonema* sp (Ilustración 6.4) sólo se encuentra en aguas limpias y claras. Entre los factores que pueden afectar las poblaciones de productores primarios se

encuentran la luz, la temperatura, las corrientes, las crecidas, la química del agua y su consumo por otras especies.

Fauna acuática

En Puerto Rico, la fauna acuática se caracteriza por una dominancia de especies de peces, camarones y caracoles nativos. Todos los peces, camarones y hasta algunos tipos de caracoles se caracterizan por migrar a lo largo de la cuenca durante su desarrollo y por pasar parte de su vida en el mar y parte de su vida en los ríos.

El patrón de migración mas común en Puerto Rico migración se denomina

anfidromía (Ilustración 6.5) y corresponde a especies que pasan su etapa adulta en agua dulce, sus larvas migran hasta el estuario para permanecer en el mar hasta su etapa juvenil y luego regresan como adultos al río donde se reproducen.

Existe también otro tipo de migración, la catadromía, en la cual la especie migra como adulto hasta el mar para allí desovar. La catadromía es menos común, y únicamente en Puerto Rico se ha informado en la anguila (*Anguilla rostrata*).

Además de peces, camarones y caracoles, en nuestros ríos podemos encontrar también cangrejos e insectos

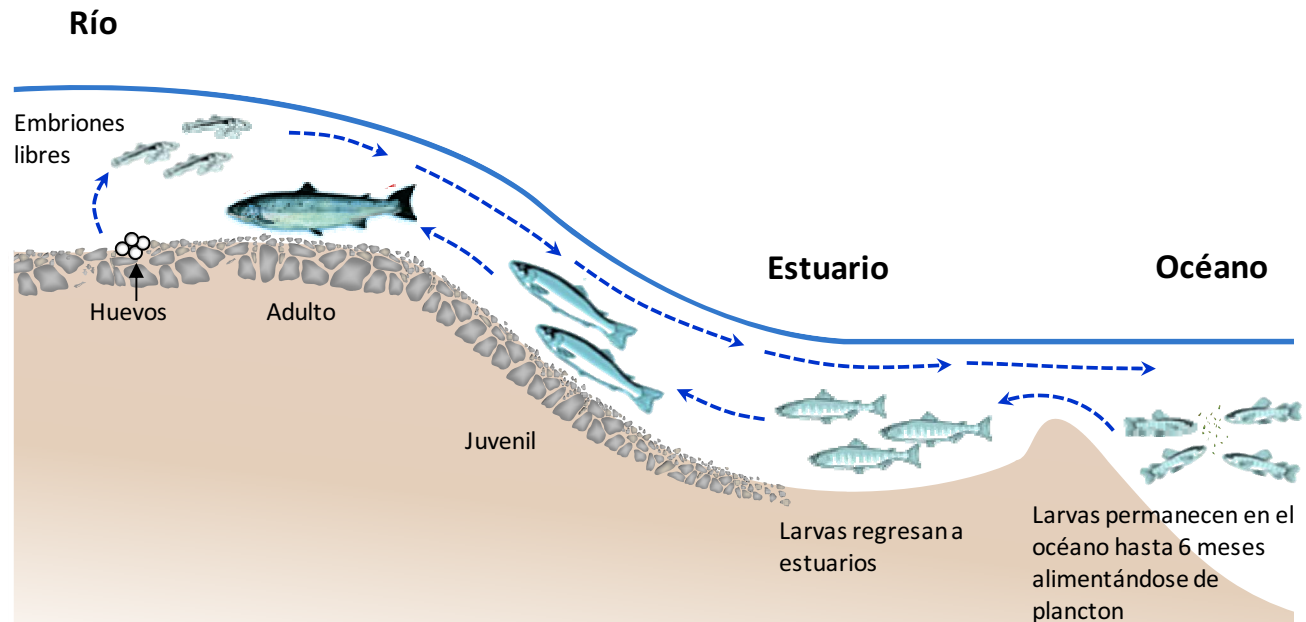


Ilustración 6.5: Migración de organismos anfídromos.

acuáticos. Cada una de estas especies juega un papel importante en el ecosistema y ocupa un lugar importante en la cadena alimentaria acuática y ribereña. A continuación una breve descripción de cada uno de estos grupos.

Insectos acuáticos

En los ríos podemos encontrar varias especies de insectos, ya sea en su etapa larval acuática o como adultos semi-acuáticos. Los insectos acuáticos son esenciales en la cadena alimentaria ya que enlazan la materia orgánica, autótrofa (por producción primaria) y autóctona (proveniente del ambiente terrestre) con los peces y otros depredadores mayores. Se alimentan además de material suspendido en la columna de agua, algas y otros organismos acuáticos.

La mayoría de estos insectos se ubica en el bentos o fondo del cuerpo de agua y se asocia al sustrato (piedras, pedazos de madera, vegetación macrófita y las raíces fibrosas de la vegetación ribereña). Estos organismos no migran hacia el mar como los peces y camarones, sin embargo, la mayoría vive parte de su vida en agua y parte en tierra.

Pueden tener un ciclo de vida completo en el agua, holometábolos, o tener un ciclo de vida parcial, hemimetábolos. En el caso de los holometábolos, el insecto deposita el huevo del cual sale una larva morfológicamente dife-

rente al adulto. Esa larva lleva a cabo una metamorfosis en pupa para finalmente emerger como un insecto terrestre o semiacuático. Por otro lado, en los hemimetábolos, el adulto deposita los huevos en el agua y de allí sale una larva morfológicamente similar al adulto. La larva luego emerge y continúa el ciclo descrito. Estos organismos son importantes indicadores biológicos ya que se encuentran en todos los cuerpos de agua dulce, independientemente de si existen o no represas aguas abajo.

En Puerto Rico, los insectos en los ecosistemas acuáticos se han estudiado poco, pero las especies reportadas hasta ahora pertenecen a los órdenes Ephemeroptera (**Ilustración 6.6**), Odonata, Hemiptera, Diptera, Coleoptera y Trichoptera.



Ilustración 6.6: Insecto del orden *Ephemeroptera*.

Caracoles

En Puerto Rico existen tanto almejas como gastrópodos acuáticos. A pesar de que son relativamente abundantes, estos organismos han sido poco estudiados en la Isla. Se sabe que las almejas se caracterizan por formar colonias enterradas en el fondo de aguas de flujo lento y con sustrato arenoso o lodoso (Grana 2008). Se pueden encontrar en áreas de flujo rápido cuando hay acumulación de sedimento en el fondo. Son filtradoras y algunas especies toleran aguas eutróficas por la abundancia de alimento. Entre las especies nativas se destaca la almeja de uña (*Eupera portoricensis*) por ser endémica de Puerto Rico. La almeja asiática o cestillo dorado (*Corbicula fluminea*) es un exótico que se está convirtiendo en una plaga en la Isla y tiene la capacidad de colonizar tomas de agua y taparlas (Grana 2008).

Los gastrópodos acuáticos en Puerto Rico son un grupo relativamente abundante y diverso. Van desde los herbívoros hasta los depredadores. Muchos tienen hábitos anfibios y permanecen durante el día sumergidos en el agua, pero en la noche salen de ella a buscar alimento (Grana 2008).

Otras especies, sin embargo, pasan toda su vida sumergidas. Los miembros de la familia Neritidae, como por ejemplo el caracol burgao *Neritina virginea*, son gastrópodos migratorios anfidromos (Torres Marrero y Villa-

nueva Colón 2006). Al igual que nuestros camarones y peces, éstos necesitan bajar al estuario a reproducirse. Los juveniles suben entonces río arriba. La mayoría de las especies prefiere aguas lénticas y limpias, aunque varias son naturales de aguas estancadas eutroficadas. Especies de gastrópodos, como la *Biomphalaria glabrata*, la *Thiara granifera* (Ilustración 6.7) y la *Thiara tuberculata*, entre otras, pueden ser vectores intermedios de parásitos y patógenos causantes de enfermedades como la bilarzia, especialmente cuando viven en aguas que reciben descargas de aguas negras o donde se permite el paso de ganado (Grana 2008).



Ilustración 6.7: Gastrópodo de la especie *Thiara granifera*.

Comunidad de crustáceos

Los camarones son los organismos más abundantes en los ríos y quebradas de la Isla. Al igual que la mayoría de nuestros peces, estos organismos son migratorios anfidromos, por lo que necesitan migrar al mar o a los estuarios para completar su ciclo de vida. Luego, al acercarse a la adultez, los

juveniles migran río arriba. Algunos se alimentan de materia orgánica fina y, por lo tanto, ayudan a filtrar la columna de agua. Los camarones más grandes, conocidos como langostinos, suelen ser omnívoros oportunistas, depredadores o carroñeros y se consideran importantes para actividades pesqueras. Según estudios recientes, los camarones exóticos, como el langostino australiano *Cherax quadricarinatus*, son poco abundantes en la Isla (Kwak 2007). La presencia de éstos, sin embargo, representa una posible amenaza para los camarones nativos.

Otros crustáceos importantes en los ríos de Puerto Rico son los cangrejos. Estos organismos son omnívoros y sirven de alimento a muchas especies terrestres y ribereñas. Prefieren las aguas lénticas y los ambientes húmedos, cenagosos y cubiertos de vegetación (Grana 2008). El cangrejo nativo más común es la buruquena o el juey de agua dulce.

A continuación, una breve descripción de las familias de crustáceos presentes en la Isla y las especies nativas características.

- Familia Atyidae

Son los que conocemos comúnmente como guábaras o chágarras; también incluye al camarón salpiche o chirripí. Son anádromos; los adultos viven en ríos y quebradas, mientras que las larvas migran hacia los estuarios y

permanecen allí hasta su etapa juvenil para migrar nuevamente aguas arriba en los ríos. Se alimentan en general filtrando partículas de la columna de agua y también colectando detrito del fondo. Se caracterizan por tener patas modificadas para agarrar partículas en la columna de agua y el bentos. Especies nativas de esta familia incluyen: *Atya innocens*, *Atya lanipes* (Ilustración 6.8), *Atya scabra*, *Jonga serra*, *Micratya poeyi*, *Potimirrim americana*, *Potimirrim mexicana*, *Xiphocaris elongata* y *Typhlatya monae*. Esta última especie se caracteriza por vivir en cuevas que tengan sistemas de agua subterránea como las de Isla de Mona y Guánica.



Ilustración 6.8: *Atya scabra*.

- Familia Palaemonidae

Incluye los langostinos y otros camarones de quelas grandes. Al igual que las otras familias, los adultos están activos de día y de

noche en ríos y quebradas, generalmente en áreas de flujo de agua lento. Las larvas migran hacia los estuarios y permanecen allí hasta su etapa juvenil, cuando migran nuevamente aguas arriba. Son omnívoros y pueden ser depredadores. En esta familia se encuentran las siguientes especies nativas: *Macrobrachium*



Ilustración 6.9: *Macrobrachium carcinus*.

acanthurus, *Macrobrachium carcinus*, *Macrobrachium crenulatum*, *Macrobrachium faustinum* (Ilustración 6.9), *Macrobrachium heterochirus* y *Paleomonom pandaliformes*. Esta última especie había sido reportada sólo en ambientes salobres de la Isla, pero recientemente se reportó en quebradas de montaña en la cuenca del Río Piedras.

- Familia Pseudothelphusidae

Incluye la buruquena (*Epilobocera sinuatifrons*, (Ilustración 6.10) que es una especie endémica, que habita en el fondo de ríos, quebradas y en la zona terrestre adyacente a ríos y quebradas.

Los adultos viven en o cerca de cuerpos de agua dulce. Los juveniles viven en quebradas y se encuentran comúnmente en sitios donde se acumula el detrito. Los



Ilustración 6.10: Buruquena.

adultos son mayormente terrestres y nocturnos.

- Familia Portunidae:

Incluye el cangrejo azul *Callinectes sapidus*, una especie encontrada mayormente en aguas salobres y quebradas costeras.

- Familia Sesarmidae:

Incluye al cangrejo de humedal *Armases roberti*, mayormente asociado a aguas salobres y a humedales y quebradas perennes y temporales de las planicies costeras.

Comunidad de peces

Todos los peces nativos en Puerto Rico son migratorios anfidromos, excepto la anguila (*Anguilla rostrata*) que es de migración catádroma.

Según estudios recientes (Kwak 2007), la distribución de peces nativos en la Isla se caracteriza por tener una mayor riqueza, densidad, biomasa y diversidad asociada a ríos y quebradas costeras. Por el contrario, la riqueza, densidad y biomasa de las especies de peces introducidas es mayor en las regiones montañosas. Dichos hallazgos reflejan, entre otras cosas, el efecto de obstrucciones mayores en las rutas migratorias de peces nativos a causa de represas grandes u otras obstrucciones.

En nuestra Isla, existen muchas especies de peces de origen marino o estuarino que utilizan los ecosistemas de agua dulce de forma ocasional y que, por consiguiente, podrían ser encontrados en los ríos y quebradas costeras. Sin embargo, existen sólo seis especies de peces nativos que habitan gran parte de su vida en agua dulce. Dichas especies son las siguientes, comenzando desde la más común, hasta la menos común: Saga (*Awaous tajasica*), Olivo ó Cetí (*Sicydium plumieri*), Dajao (*Agonostomus monticola*), Guabina (*Gobiomorus dormitor*), Anguila (*Anguilla rostrata*) y Morón (*Eleotris pisonis*).

Entre los peces exóticos más comunes en la Isla se encuentran el gupi (*Poecilia reticulata*) la cola de espada *Xiphophorus hellerii*, el gupi *Poecilia sphenops* y la tilapia *Oreochromis mossambicus* (Kwak 2007).

A continuación una descripción de los peces nativos de nuestros cuerpos de agua dulce.

- *Agonostomus monticola* (Mugilidae)

Nombre común: Dajao
(Ilustración 6.11)

Hábitat: Es una especie pelágica y anfídroma que se puede encontrar en ríos, estuarios y en el mar.

Distribución: Es una especie de distribución amplia en la Isla y se puede encontrar a lo largo de toda la cuenca hidrográfica, desde los estuarios hasta las cabeceras, salvo que existan represas que bloqueen el movimiento de la especie. También se ha informado en Carolina del Norte, Florida, Louisiana, Texas, Colombia, Venezuela y en las Antillas.

Biología: Son anfídromos y son los únicos de su grupo taxonómico que pasan toda su vida adulta en agua dulce. Tienden a ser solitarios, pero pueden formar cardúmenes dispersos a elevaciones bajas, tienen la capacidad de realizar brinco para sobrepasar barreras menores, como por ejemplo represas pequeñas en las tomas de aguas. Es una especie omnívora.



Ilustración 6.11: Dajao, *Agonostomus monticola* (Provista por Beverly Yoshioka. FWS).

- *Anguilla rostrata* (Anguillidae)

Nombre común: Anguila
(Ilustración 6.12)

Hábitat: Es una especie demersal y catádruma que se puede encontrar en ríos, estuarios y en el mar.

Distribución: Es una especie de distribución común en la Isla y puede encontrarse a lo largo de toda la cuenca hidrográfica, desde los estuarios hasta la montaña, y en ocasiones se puede encontrar también en lagunas y embalses. Esto se debe, en parte, a que tiene la capacidad de escalar paredes como las de una cascada. También se ha informado a lo largo de todos los Estados Unidos, cerca de la costa Atlántica de Canadá y través de las Antillas, hasta Trinidad.

Biología: Suele encontrarse en ríos y quebradas de flujo permanente. Tiende a esconderse durante el día bajo los bancos de los ríos, asociada a raíces y vegeta-



Ilustración 6.12: *Anguilla rostrata* (Anguillidae) (Provista por Beverly Yoshioka. FWS).

ción y en pozas profundas. Es carnívora y se alimenta de macroinvertebrados acuáticos y algunos peces durante la noche. Migra en otoño al Mar de Sargazo en el medio del Océano Atlántico para desovar.

- *Awaous tajasica* (Gobiidae)

Nombre común: Saga
(Ilustración 6.13)

Hábitat: Es una especie demersal y anfídroma, que se puede encontrar en agua dulce, estuarios y el ambiente marino.

Distribución: Se ha informado en todo Puerto Rico, incluyendo Vieques, en su mayoría en la zona de agua dulce cerca a los estuarios y en estanques de agua dulce. Se encuentra mayormente en aguas salobres y en quebradas intermitentes. Se ha informado también en Sur América, Centro América y las Antillas.

Biología: Se encuentra comúnmente asociada a lugares con



Ilustración 6.13: Saga, *Awaous tajasica* (provista por Beverly Yoshioka. FWS).

fondo arenoso. Tiene agallas especializadas que le permiten escalar barreras que a otras especies les bloquearía el paso (Kwak 2007). A pesar de que hay poca información sobre la especie, se cree que es omnívora.

- *Eleotris pisonis* (Eleotridae)

Nombre común: Morón
(Ilustración 6.14)

Hábitat: Es una especie demersal, que habita tanto en quebradas como en aguas salobres y el ambiente marino.

Distribución: A pesar de que se ha informado a través de toda la Isla en las planicies cerca de los estuarios y aguas costeras, esta especie es poco común y se restringe bastante por elevación, gradiente y distancia al estuario (Alonso, Kwak). También se ha informado en Bermuda, las Bahamas, Carolina del Sur, el Golfo de México en los Estados Unidos y en el sureste de Brazil.



Ilustración 6.14: Morón, *Eleotris pisonis* (Obtenida de investigacion.izt.uam.mx/ocl/Peces/Fotos/).

Biología: Su biología es poco conocida. Se encuentra asociado a raíces en los bancos, en quebradas con fondo poco profundo, que sean arenosos o fangosos y de flujo lento (Alonso, Kwak). Se ha visto comúnmente en quebradas tributarias de estuarios. Se alimenta de larvas de insectos, cangrejos, camarones y peces pequeños. Se cree que puede ser una especie omnívora.

- *Gobiomorus dormitor* (Eleotridae)

Nombre común: Guabina
(Ilustración 6.15)

Hábitat: Es una especie demersal, que habita tanto en quebradas como en aguas salobres y el ambiente marino.

Distribución: Se encuentra ampliamente distribuido en los ríos de planicies y en los ríos que ubican al pie de las montañas. También se puede encontrar en embalses.



Ilustración 6.15: Guabina, *Gobiomorus dormitor* (Provista por Beverly Yoshioka. FWS).

Biología: Habita en quebradas amplias, de substrato mediano, con agua clara y en movimiento. Se puede encontrar en el fondo, asociado a troncos, hojarasca, piedras o cualquier material que le permita camuflajearse. Es carnívora y depende de su coloración críptica para esconderse y capturar a sus presas, que suelen ser peces más pequeños y crustáceos. Aunque se ha informado individuos que pasan todo su ciclo de vida en agua dulce, la mayoría lleva a cabo anfidromía (Beverly, Alonso, Kwak).

- *Sicydium plumieri* (Gobiidae)

Nombre común: Olivo, Cetí
(Ilustración 6.16)

Hábitat: Es una especie demersal, anfidroma, que habita tanto en quebradas como en aguas salobres y el ambiente marino.

Distribución: Es abundante en los ríos Grande de Añasco, Grande de Manatí, Espíritu Santo, Mameyes, Sabana y Blanco. Se en-



Ilustración 6.16: Olivo o Cetí, *Sicydium plumieri* (Provista por Beverly Yoshioka. FWS).

cuentra también, aunque en menor cantidad, en los ríos Guanajibo, Culebrinas, Guajataca, Bayamón, Grande de Arecibo, Cañas, La Plata y Grande de Loíza. También se ha informado en Centro América.

Biología: Es común en quebradas rocosas. Contiene aletas modificadas que funcionan como chupetes y que le permiten agarrarse a rocas y subir superficies bien empinadas, mientras se encuentren húmedas. Es por esto que dicha especie se puede encontrar en ríos de cabecera, sobre cascadas y es más comúnmente observado en lugares de gradiente empinado. Se alimenta de las algas sobre las rocas. (Alonso, Beverly, Kwak).

Capítulo 7

Calidad del agua



Contenido

1. Concepto de contaminantes
2. Descripción de contaminantes

Introducción

El agua dulce de Puerto Rico contiene minerales inorgánicos y sustancias orgánicas, esto es una condición natural. Estos minerales son esenciales para la vida de los organismos, así como los nutrientes que llegan a las plantas transportados por el agua. Por consiguiente, la presencia de minerales o químicos orgánicos disueltos en el agua no se considera contaminante. Sin embargo, las actividades humanas han introducido sustancias nuevas y han aumentado las concentraciones de otras, hasta amenazar la vida acuática y la utilidad del agua como fuente potable.

Concepto de contaminantes

Las aguas se consideran contaminadas cuando tienen una concentración excesiva de una sustancia que inhibe de manera significativa su uso ecológico o antropogénico. Además, en el caso de aguas muy puras, una reducción en su pureza por factores exógenos se considera contaminación, a pesar de que las aguas sigan con una calidad adecuada para muchos usos.

En Puerto Rico, la JCA es la agencia responsable de establecer métricas de calidad de agua. Estas métricas, a su vez, deben cumplir con los estándares federales establecidos por la EPA.

La concentración de un contaminante se mide en términos de su masa en proporción al volumen del agua (por ejemplo, miligramos de contaminante por litro de agua, mg/l). Esto es aproximadamente equivalente a “partes por millón” (ppm).

En Puerto Rico, las estaciones de rastreo del USGS son la fuente principal de datos de calidad de los cuerpos de agua. También pueden existir estudios especiales hechos por agencias federales y estatales, por universidades y, en ciertas circunstancias, por el sector privado. Las agencias responsables de la calidad del agua potable son la AAA y el Departamento de Salud. Estas trabajan conjunta-

mente con la EPA, que es la agencia federal encargada de establecer los estándares de calidad a nivel nacional, tanto para el agua potable como para los cuerpos de agua naturales.

Al presente, hay 62 estaciones del USGS en Puerto Rico que recolectan datos de calidad. Típicamente se recolecta y se analiza una muestra cada uno o dos meses.

Bioacumulación se refiere al proceso de aumentar la concentración de contaminantes en los tejidos de las plantas y animales. Es decir, ciertos minerales o compuestos orgánicos pueden quedarse atrapados en los tejidos, resultando en concentraciones miles de veces mayores que la concentración en el agua. Este proceso provoca que ciertas sustancias se vuelvan altamente tóxicas, a pesar de encontrarse en concentraciones muy bajas en el ambiente. Uno de los ejemplos más conocidos es el plaguicida DDT, cuyo uso fue prohibido hace décadas en los EE.UU. Este contaminante se acumula en el tejido de muchos organismos, incluyendo el tejido humano. De hecho, puede aparecer en concentraciones peligrosas en la leche materna. Por otra parte, el DDT ocasionó que los pelicanos estuvieran en peligro de extinción debido a que, al comer peces contaminados, sus huevos eran tan débiles que se rompían.

Entre los organismos susceptibles a problemas de bioacumulación se encuentran:

1. Los organismos que filtran grandes cantidades de agua para obtener su alimentación, tales como las ostras.
2. Los organismos que ocupan los niveles superiores de la cadena alimentaria. Esto se debe a que el proceso de bioacumulación dentro de su propio tejido se hace más agudo al estar consumiendo organismos cuyos tejidos ya tienen un nivel inicial de bioacumulación.

Descripción de contaminantes

Sedimentos en suspensión

Los sedimentos en suspensión constituyen el mayor contaminante en términos de su masa. Por ejemplo, la concentración promedio de sedimentos en suspensión que llega al embalse Carraízo es de aproximadamente 750 mg/l, mientras que la concentración total de todas las sustancias disueltas, incluyendo las naturales y los contaminantes, son de aproximadamente 250 mg/l. Sin embargo, la concentración de sedimento en suspensión es altamente variable, siendo tan baja como 10 mg/l durante flujos bajos y tan alta como 10,000 mg/l durante las crecidas. Los sedimentos en suspensión son el contaminante con mayor variabilidad en su concentración, mientras que la concentración de las sustancias disueltas se mantiene relativamente constante.

Ciertas actividades humanas tienen el efecto de incrementar la concentración de sedimentos en suspensión de los cuerpos de agua. Algunos ejemplos de dichas actividades son la deforestación y los disturbios al suelo, incluyendo el sobre-pastoreo, las actividades agrícolas y la construcción.

El exceso en las concentraciones de sedimentos en suspensión puede tener

impactos sustanciales adversos al ambiente.

- En su condición natural, los ríos de Puerto Rico son cuerpos de agua con un fondo limpio de sedimentos finos y los espacios libres entre las piedras del fondo del río representan un hábitat importante para insectos y pequeños crustáceos. Estos constituyen un componente importante de la cadena alimentaria. Al llenar los espacios con sedimentos, se pierde un hábitat importante y cambia a un ambiente que ya no favorece las especies nativas (**Ilustración 7.1**).
- Los sedimentos aumentan la turbidez del agua, tanto en los ríos como en la zona costera, e interrumpen la luz solar. En el caso de los arrecifes de corales, los sedimentos se depositan sobre los organismos y pueden ocasionar su muerte.
- Una alta concentración de sedimentos en el agua puede interferir con la transferencia de oxígeno por las branquias de peces y camarones y así provocar la muerte de éstos.

- Los niveles altos de sedimentos en suspensión representan la erosión del suelo de la cuenca, y llevan consigo nutrientes que promueven el crecimiento de microbios que consumen el oxígeno y hacen el río inhabitable para las especies nativas.
- Los sedimentos en suspensión son responsables del problema de sedimentación de los embalses. Además, sus altas concentraciones, no sólo dificultan el tratamiento de agua potable, sino que también pueden hacer imposible tratarla adecuadamente y pueden requerir que la producción de agua sea suspendida durante las crecidas.

Los sedimentos suspendidos representan el mayor contaminante de los cuerpos de agua en Puerto Rico y tienen impactos adversos significativos sobre el ambiente de agua dulce, las aguas costeras y la infraestructura del agua potable.



Ilustración 7.1: Hábitat natural enterrado por la acumulación de sedimentos finos en el cauce de Río Turabo.

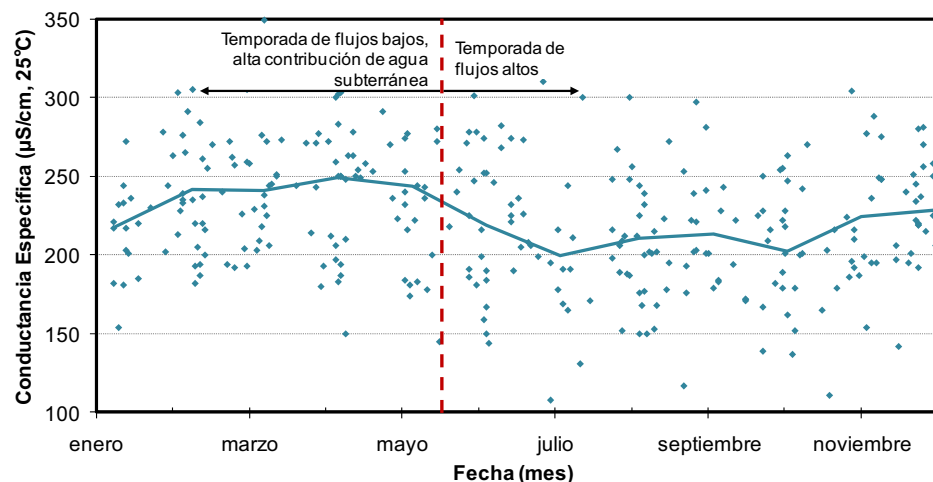


Ilustración 7.2: Variabilidad mensual en la conductividad para la estación de aforo en el Río Grande de Loíza (50055000).

Sólidos disueltos

El agua es muy reactiva y disuelve las piedras. Las calizas son poco resistentes a la acción del agua y su disolución produce sumideros, mogotes y cuevas. Las rocas ígneas son mucho más resistentes a la disolución y su resistencia varía de acuerdo a su composición mineral. De los minerales, el sílice es el más resistente.

Las concentraciones de los minerales en el agua dependen de varios factores, incluyendo las características de las rocas y el tiempo que el agua esté en contacto con éstas. La concentración de minerales en las aguas subterráneas típicamente es mayor que en las aguas superficiales debido a que el agua subterránea tiene mayor tiempo de contacto con las piedras. La concentración de minerales y otros

constituyentes del agua también depende de factores hidrológicos. Por ejemplo, durante las crecidas, la mayor fracción del agua superficial llega al río sin penetrar el suelo o con un tiempo de residencia muy corto. Durante los flujos bajos, el agua en los

ríos proviene de la descarga de aguas subterráneas. Factores como éstos ocasionan variaciones en la concentración de los diferentes minerales en el agua superficial. La **Ilustración 7.2** muestra este patrón de variabilidad en la conductividad al graficar valores promedio mensuales para la estación de aforo en el Río Grande de Loíza (50055000). La conductividad aumenta en un 25% durante los meses de flujos bajos, donde el aporte del agua subterránea en el flujo base del río es mayor.

La concentración total de los sólidos disueltos (TDS) en el agua se puede determinar al evaporar una muestra de agua filtrada y pesar los residuos. También se puede determinar la concentración total de los minerales disueltos al medir la conductividad eléctrica del agua. El agua pura es un conductor pobre de electricidad, al

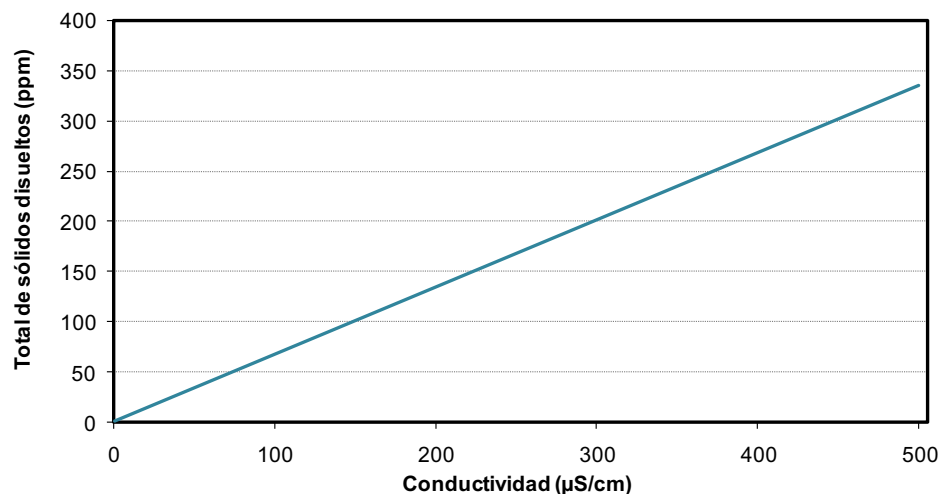


Ilustración 7.3: Relación aproximada entre conductividad y sólidos disueltos.

incrementar la concentración de minerales produce un aumento en su conductividad. La relación aproximada entre conductividad y la concentración total de sólidos disueltos se presenta en la **Ilustración 7.3**.

Algunos minerales son mejores conductores que otros. Por tal motivo, el método de conductividad no presenta resultados exactos. Se puede obtener una mejor precisión mediante la calibración del equipo para cada cuerpo de agua.

En las aguas superficiales de los ríos de Puerto Rico, el total de los minerales disueltos típicamente se encuentra en el rango de 100 a 250 mg/l, muy por debajo del límite de 500 mg/l recomendado como la concentración máxima para el agua potable. El agua para riego puede tener concentraciones de sólidos de hasta aproximadamente 1,000 o 1,500 mg/l. La enea (*Typha*), planta común de humedal de agua dulce, no soporta concentraciones mayores de aproximadamente 5,000 mg/l. La salinidad del mar es de aproximadamente 34,000 mg/l y los mangles de mayor tolerancia a la salinidad (negro y blanco), mueren cuando las concentraciones en la zona de sus raíces supera aproximadamente 70,000 mg/l, o sea, el doble de la salinidad del mar.

Las actividades antropogénicas han aumentado significativamente la concentración de ciertos materiales peligrosos. Estos materiales incluyen

metales pesados, como el mercurio y el plomo, sustancias tóxicas que se acumulan en el cuerpo humano.

Las plantas de filtración de la AAA solo remueven el material particulado y no eliminan ningún mineral disuelto. Por tal motivo, es necesario establecer controles estrictos sobre la descarga hacia el medio ambiente de sustancias solubles, dañinas a la salud ya que el proceso de filtración no lo remueve.

La mayor parte del peso seco de los productores primarios consiste del carbón, derivado del dióxido de carbono en la atmósfera, cuya concentración puede ser relativamente baja en relación a las necesidades biológicas. Los nutrientes son los minerales que se requieren en menor cantidad, pero pueden ser disponibles en cantidades limitadas en el ambiente. Los nutrientes mas importantes son el nitrógeno y el fósforo. Debido a que la disponibilidad de estos elementos normalmente limita la tasa de crecimiento de las plantas, un aumento en su concentración resulta en un aumento correspondiente en la actividad fotosintética. Como consecuencia adversa, esto promueve el crecimiento rápido de algas, que a su vez provoca variaciones grandes en la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Por este motivo, las concentraciones de oxígeno disuelto en la noche pueden bajar hasta cero, lo que provoca la muerte de peces y otros organismos.

El aumento en la cantidad de nutrientes en los cuerpos de agua ha sido provocado por los siguientes factores:

- La agricultura industrializada con su dependencia de fertilizantes que eventualmente son arrastrados hacia los ríos por la esorrentía.
- La población de animales domésticos, tales como el ganado.
- La carga de nutrientes provenientes de desperdicios líquidos de plantas de tratamiento y pozos sépticos.

Las algas que cubren las piedras son una señal visual de una alta concentración de nutrientes en el agua (**Ilustración 7.4**). La mayor parte de



Ilustración 7.4: Las algas cubren las piedras.

los nutrientes provenientes de descargas municipales pueden ser removidos de las aguas servidas por un proceso de tratamiento terciario.

El oxígeno en el agua es proporcionado por el aire y también es producido por las plantas acuáticas. Las burbujas que se encuentran en las masas de algas sumergidas son de oxígeno (**Ilustración 7.5**). Los niveles de oxígeno en el agua pueden variar desde cero hasta un estado de supersaturación (**Ilustración 7.6**).

El oxígeno no es un contaminante, sino que es el gas de mayor importancia en el agua, necesario para la supervivencia de peces, crustáceos, microbios aerobios, etc. Su concentración saturada es limitada a solamente 8 mg/l en las aguas de Puerto Rico. La concentración de oxígeno disuelto en el agua es afectada por los contaminantes que se descargan en los cuerpos de agua que aumentan la actividad biológica. Esto propicia un incremento en el consumo de oxígeno y una reducción en su concentración durante la noche que resulta en la muerte de peces y de otros organismos.

La concentración de saturación de oxígeno en el agua varía con la temperatura, según aumenta la temperatura, la concentración de saturación se reduce. El nivel de saturación del oxígeno también depende de la concentración de minerales y la presión atmosférica (elevación). La concen-



Ilustración 7.5: Burbujas de aire en algas.

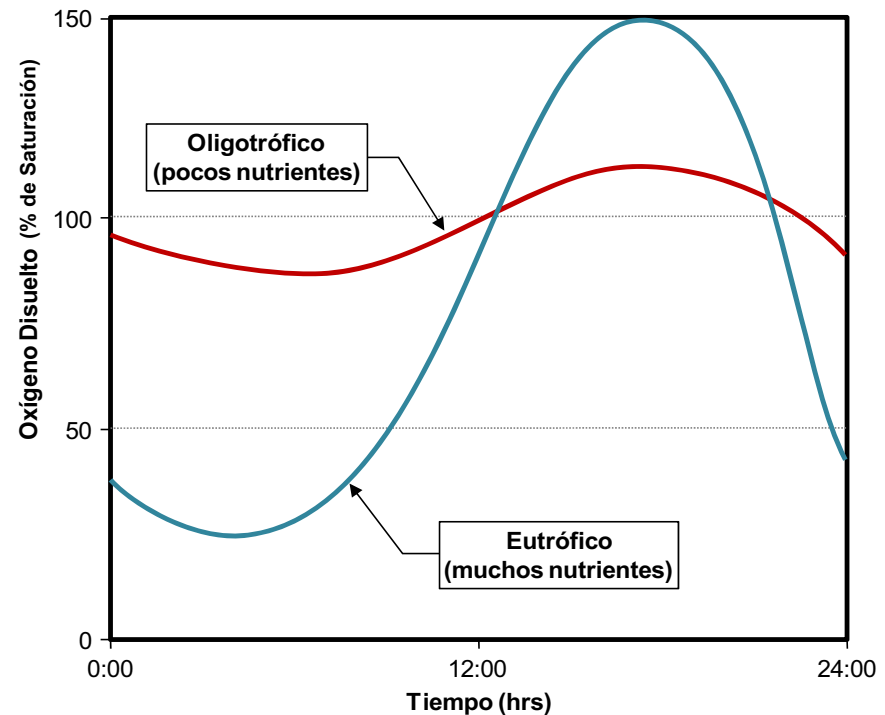
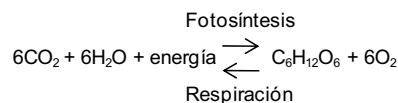


Ilustración 7.6: Variación diaria de la concentración de oxígeno en un cuerpo de agua, de acuerdo a su concentración de nutrientes y producción primaria.

tración de oxígeno en saturación disminuye con la elevación y también disminuye con la salinidad. La **Ilustración 7.7** señala la relación entre oxígeno disuelto y temperatura para el agua dulce y el agua de mar.

El oxígeno puede entrar a un cuerpo de agua por tres procesos:

1. El oxígeno en la atmósfera puede ser transferido a través de la superficie del agua, un proceso acelerado por el viento y la turbulencia de las olas. Los ríos de Puerto Rico típicamente no experimentan problemas con respecto a su nivel de saturación de oxígeno donde las aguas son de poca profundidad y hay turbulencia. Sin embargo, el fondo de los ríos puede estar anaeróbico en zonas profundas cercanas a la costa con estratificación del flujo (los estuarios).
2. Las plantas acuáticas pueden generar oxígeno por el proceso de fotosíntesis, según la ecuación fotosintética:



La ecuación fotosintética demuestra que, mediante el proceso de fotosíntesis, las plantas utilizan la energía solar para extraer dióxido de carbono del aire y convertirlo en masa celular (representado

por el azúcar $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Un producto de esta reacción es la evolución de oxígeno a gas. Las burbujas en las algas sumergidas representan cantidades de oxígeno que exceden la capacidad del agua en absorberlo (**Ilustración 7.5**).

3. El proceso de respiración es lo opuesto a la fotosíntesis. Mediante este proceso, los heterótrofos (todos los animales) pueden obtener su energía utilizando la energía previamente atrapada por el proceso de fotosíntesis. Las plantas también contienen en sus tejidos procesos de respiración.

Debido a la influencia del proceso fotosintético y la correspondiente evolución de oxígeno, la concentración de oxígeno disuelto tiende a aumentar durante el transcurso del día y frecuentemente produce concentraciones de oxígeno en exceso a la condición de saturación. Durante la noche, el consumo de oxígeno por el proceso de respiración de los organismos, incluyendo las algas y microbios, puede reducir las concentraciones hasta niveles que resultan en la muerte de peces y otros organismos. Los niveles mínimos de oxígeno disuelto ocurren durante las últimas horas de la noche (**Ilustración 7.6**). Los datos de oxígeno disuelto recogidos durante las horas del día no indican las concentraciones mínimas que pueden ocurrir de noche (**Ilustración 7.8**).

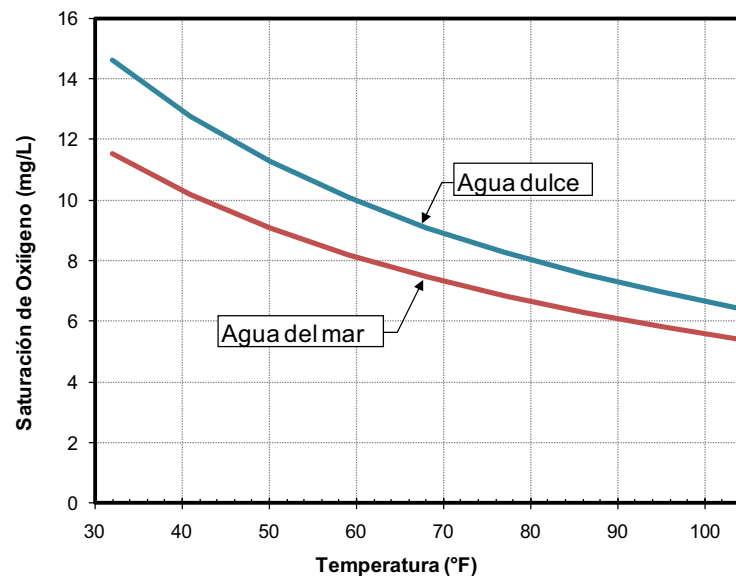


Ilustración 7.7: Relación entre oxígeno disuelto y temperatura para agua dulce y agua de mar.

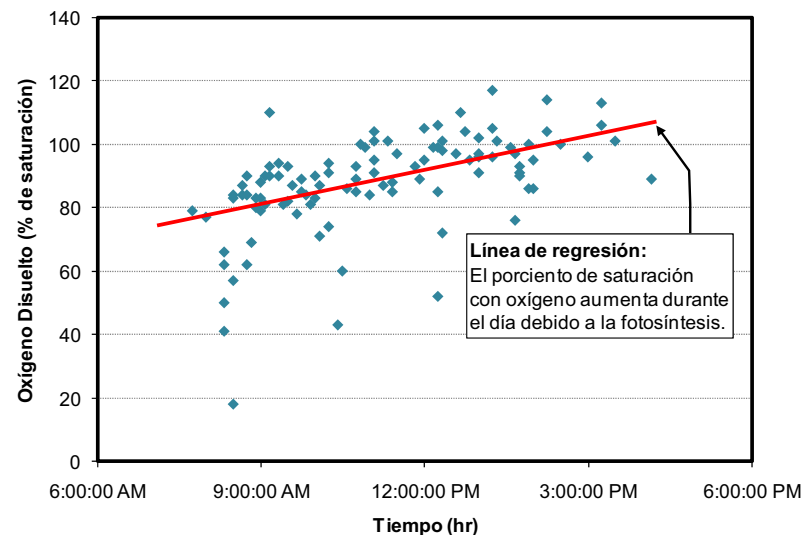


Ilustración 7.8: Variabilidad en las concentraciones de oxígeno disuelto durante el día causada por el proceso de fotosíntesis., estación de aforo en el Río Grande de Loíza (50055000).

Turbulencia y estratificación

El movimiento de las aguas en los ríos crea una turbulencia que mantiene el agua mezclada, por lo que la concentración de oxígeno es esencialmente la misma en todas las áreas que cuentan con una velocidad de flujo significativa. Sin embargo, a falta de turbulencia, la condición natural de los cuerpos de agua es de estratificarse en dos capas de acuerdo a las diferencias en densidad. Estas variacio-

nes en densidad dentro del cuerpo de agua están ocasionadas por uno o más de tres factores: temperatura, concentración de sólidos disueltos y concentración de sólidos en suspensión.

La estratificación es importante para controlar la distribución de oxígeno, ya que representa una barrera hidráulica dentro de la columna de agua que corta la circulación vertical. Las aguas profundas quedan atrapadas por de-

bajo de la barrera de densidad y así pierden contacto con la atmósfera que es la principal fuente de suministro de oxígeno.

El flujo de agua que contiene oxígeno puede transportarlo a zonas donde la estratificación no permite que éste llegue por otro medio. La **Ilustración 7.9** presenta un perfil vertical del Embalse La Plata, señalando el flujo de agua de una crecida que se dirige hacia el fondo del embalse como con-

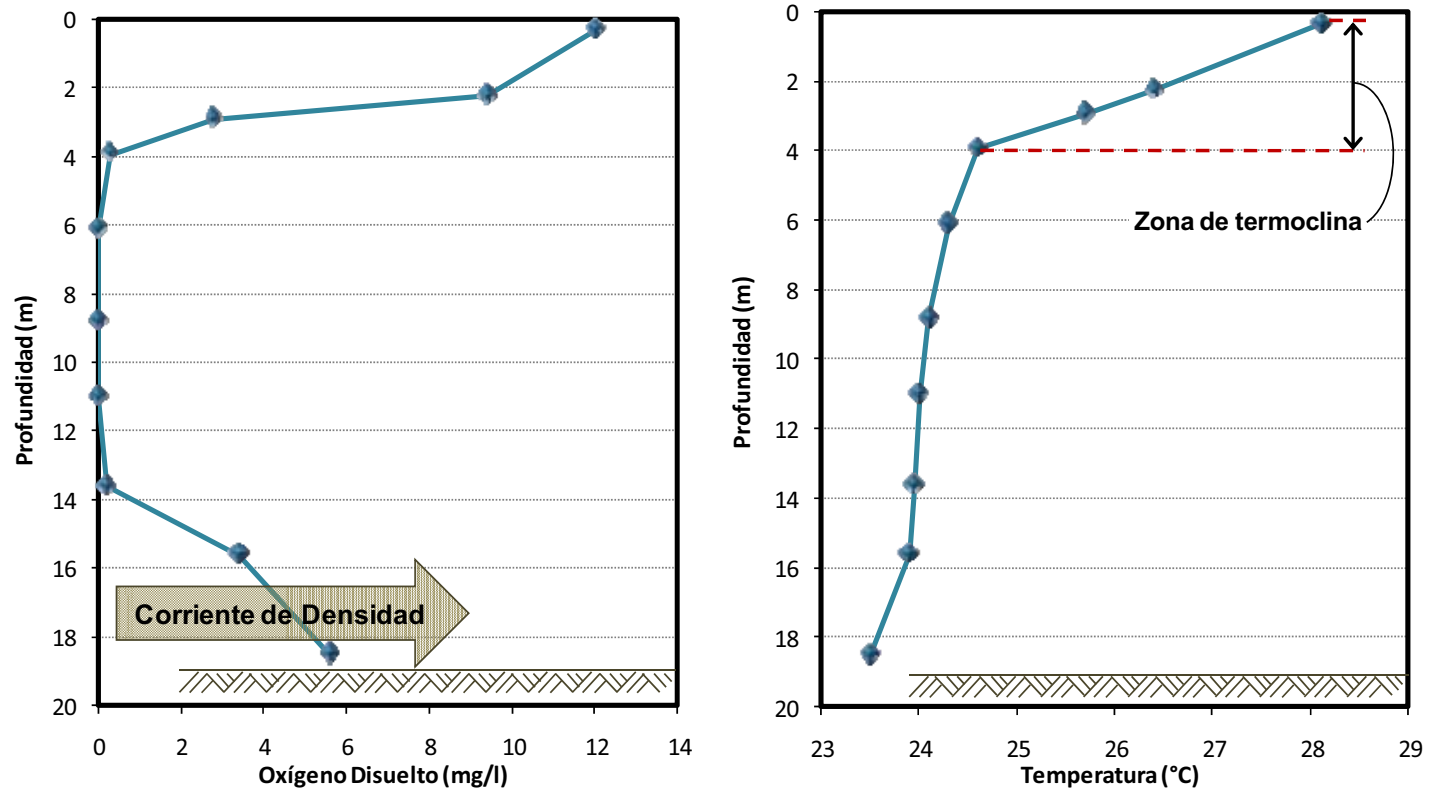


Ilustración 7.9: Perfil vertical de oxígeno disuelto y temperatura del Embalse La Plata durante un evento de lluvia.

secuencia de su mayor densidad, que es el resultado de su concentración de sedimentos y de su menor temperatura. Ambos factores aumentan la densidad del flujo en comparación con las aguas claras y calientes en la superficie del lago.

Las diferencias en temperatura son el agente comúnmente responsable de ocasionar estratificación, particularmente en los lagos y el mar. Las aguas superficiales son calentadas por el sol y la turbulencia superficial ocasiona que este calor solar se distribuya hasta una profundidad de unos 100 metros en el mar. En contraste, las aguas profundas son oscuras y frías. La zona de cambio rápido en la temperatura que separa la zona cálida superficial de la zona profunda y fría se llama la termoclina (thermocline) y se muestra en la **Ilustración 7.10**.

En los embalses de Puerto Rico, donde la turbulencia es poca en la superficie y la penetración solar es limitada debido a su turbidez (incluyendo la turbidez resultante de poblaciones elevadas de algas), la termoclina ocurre de 2 a 5 metros de la superficie.

La estratificación ocasionada por diferencias en la concentración de sedimentos en suspensión es común en los embalses. Cuando el agua turbia de crecidas entra al embalse, se sumerge por debajo de la superficie y fluye a lo largo de éste hasta llegar a la represa. El efecto de una corriente de esta clase en el embalse La Plata se presenta en la **Ilustración 7.8**, se-

ñalando una corriente de agua turbia y oxigenada que entró al embalse luego de una lluvia fuerte. El oxígeno suministrado por la corriente de agua turbia en poco tiempo es consumido por los microbios hasta regresar a la condición normal que es un estado anaeróbico.

Existen embalses donde esta corriente de agua turbia puede fluir a lo largo del embalse por el fondo y salir aguas abajo por orificios o turbinas inferiores. Un ejemplo de esto es el embalse Dos Bocas, donde el agua turbia no queda atrapada, sino que pasa por las turbinas cuyas tomas están colocadas cerca del fondo del embalse.

En los estuarios la estratificación ocurre debido a diferencias en salinidad. Según se presenta en la **Ilustración 7.11**, en los estuarios de desembocadura de los ríos de Puerto Rico, el agua dulce fluye por encima de la cuña de agua salada que avanza río

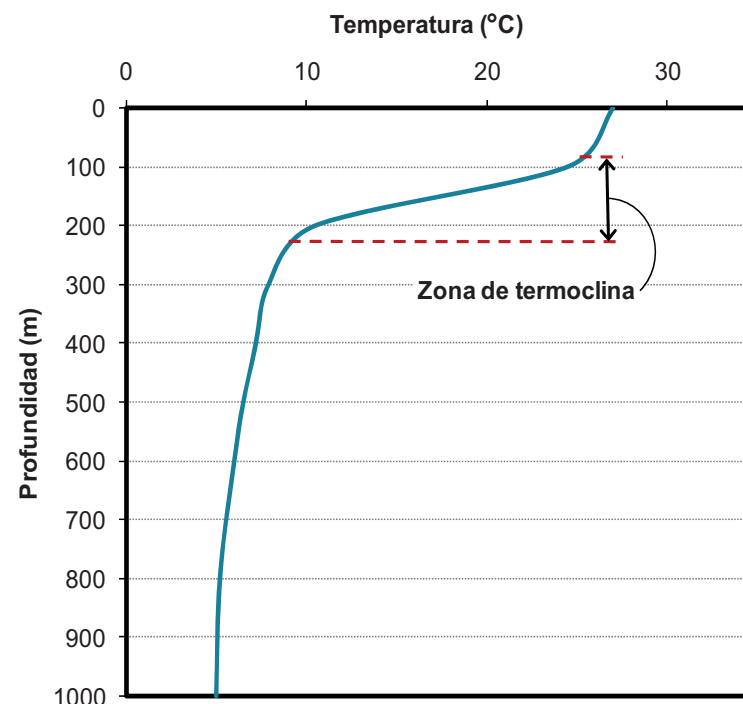


Ilustración 7.10: Perfil vertical de temperatura en el océano.

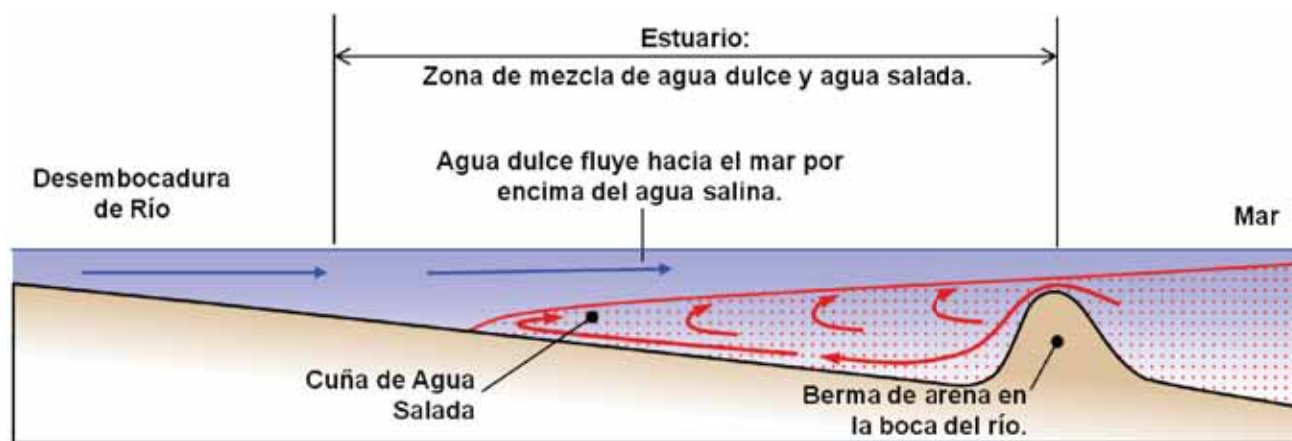


Ilustración 7.11: Estratificación del agua en estuarios.

arriba. Un litro de agua del mar pesa unos 2.5% más que un litro de agua dulce, una diferencia en densidad que crea una interface abrupta entre el agua dulce y salina. Las crecidas empujan el agua salina fuera del estuario, pero al terminar la crecida el agua salina avanza río arriba rápidamente. La alta concentración de materia orgánica que caracteriza los ríos de Puerto Rico favorece que, al eliminarse la circulación de agua al cerrarse la boca del río, el agua salina atrapada por debajo del agua dulce se vuelva anaeróbica.

Materia orgánica

Los cauces de los ríos naturales contienen un volumen sustancial de materia orgánica que incluye hojas y troncos de árboles. Sin embargo, esta materia orgánica natural se compone en su gran mayoría por celulosa, un material muy resistente al proceso de descomposición. Por lo tanto, un río o una quebrada puede tener mucha materia orgánica natural y estar completamente saludable. De hecho, la materia orgánica, tal como los troncos, representa un componente importante del hábitat físico, pues provee escondites para varios organismos.

Contrario a la materia orgánica natural, muchas actividades humanas provocan la descarga de materia orgánica en una forma mucho más fácil de utilizar como fuente de alimentación. Esto acelera dramáticamente la actividad biológica en el agua. Por ejem-

plo, la descarga de aguas servidas, no tratadas, representa una fuente de alimentación para organismos acuáticos, particularmente para la población microbial. Una población microbial creciente consume el oxígeno en el agua, lo que resulta en la muerte de los organismos mas sensitivos a una reducción en oxígeno. Esto último provoca un cambio en el ecosistema.

El proceso de tratamiento secundario en las plantas de aguas servidas es diseñado para remover la materia orgánica fácilmente disponible para microbios como fuente de alimentación. Los procesos convencionales de tratamiento de aguas mantienen en su sistema una población microbial de alta concentración. Esta población utiliza materia orgánica como fuente de alimentación y consume gran parte de ella previo a la descarga de las aguas tratadas hacia el ambiente.

La cantidad de alimento fácilmente disponible para el uso de microbios se puede medir con una prueba de demanda bioquímica de oxígeno (BOD₅). En esta prueba se añaden organismos a una serie de muestras de agua, con diferentes diluciones, dentro de una serie de frascos herméticos que no permiten el ingreso de oxígeno adicional. Luego se mide la reducción en la concentración de oxígeno durante un periodo de 5 días a una temperatura controlada. La cantidad de materia orgánica fácilmente disponible para la población microbial se mide en términos de la cantidad de

oxígeno utilizada durante los 5 días. El valor de BOD₅ de aguas usadas es aproximadamente 200 mg/l, mientras el efluente de una planta de tratamiento secundario puede estar en el rango de 15 a 30 mg/l. Este valor se puede reducir aún más al incluir filtración como la etapa final del proceso para remover la fracción de materia orgánica que está compuesta de material particulado.

Contaminación microbial

Los estudios de calidad de agua se concentran casi exclusivamente en la identificación de los microbios que son patógenos a los seres humanos. Uno de los mayores adelantos de la salud humana fue entender que muchas de las enfermedades tienen su origen en microbios transmitidos por el agua potable debido a la falta de barreras entre ésta y la materia fecal. Esta relación no se confirmó hasta que ocurrió la epidemia de cólera de 1854 en Londres, donde las investigaciones del Dr. Snow señalaron que todos los casos de cólera en el distrito Soho de Londres estaban relacionados a personas que bebieron agua del pozo contaminado de la Calle Broad. Esto marcó el comienzo de la epidemiología y demostró que enfermedades como el cólera son transmitidas por el agua y no por los "malos olores" o los "aires de pantano", según la creencia tradicional.

Al presente, la AAA realiza diariamente más de mil pruebas de contamina-

ción microbial de las aguas suministradas al público, prestando atención especial a los coliformes fecales, un microbio que se encuentra en el sistema digestivo de todos los mamíferos. La ausencia de este microbio es indicador de que el agua no sufre de contaminación fecal. Debido a que casi todas las aguas de Puerto Rico sufren de concentraciones elevadas de coliformes fecales, las pruebas de la AAA tienen el propósito principal de asegurar que los sistemas de desinfección eliminen los microbios patógenos del agua potable. El agua potable no está libre de todos los organismos, es decir, no es agua estéril. El enfoque es eliminar aquellos organismos que son dañinos a la salud.

Químicos sintéticos

Los químicos sintéticos son aquellos creados por la sociedad. Algunos podrían aparecer naturalmente en concentraciones muy pequeñas y en condiciones especiales. Sin embargo, para todos los efectos prácticos, estos químicos no son parte de los sistemas naturales. Ejemplos son los petroquímicos y sus derivados, químicos industriales, solventes, detergentes y materiales de limpieza utilizados en el hogar (desechados por el drenaje o inodoro), productos carcinógenos creados por la reacción de cloro con materia orgánica natural (ej. THMs), plaguicidas, y medicamentos (antibióticos, reguladores hormonales y medicamentos “over-the-counter”). Estos químicos sintéticos se encuen-

tran esencialmente en todos los cuerpos de agua superficiales de Puerto Rico y también en muchas de las aguas subterráneas donde su presencia ha ocasionado el cierre de muchos pozos.

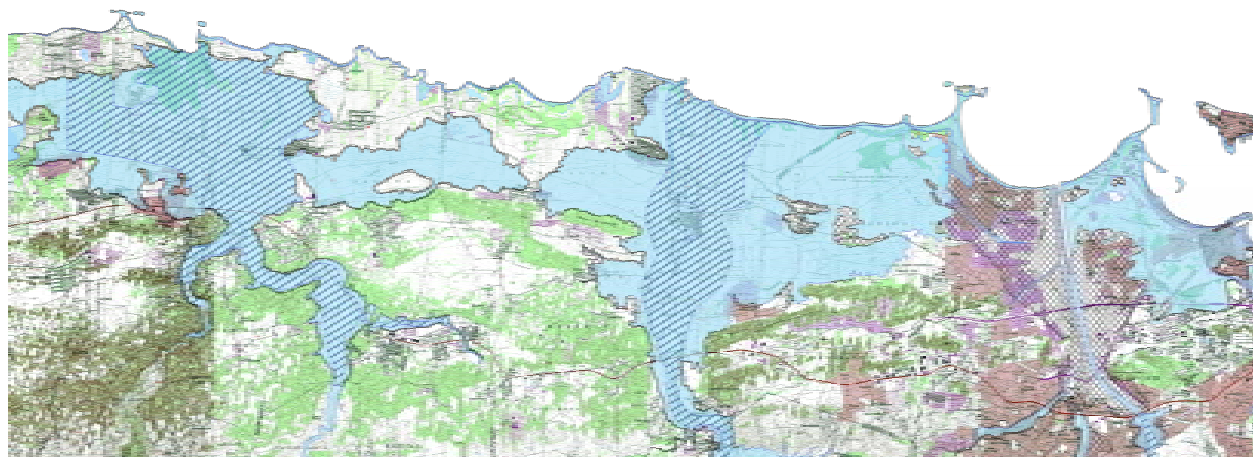
Algunos de estos químicos son volátiles, o sea, pueden dispersarse en el aire mediante la aireación del agua. Sin embargo, no hay métodos para remover fácilmente la mayoría de estos químicos. Por ser material disuelto, las plantas de filtración de agua potable no remueven estas sustancias (a menos que sean volátiles y la planta provea aireación), y las concentraciones que existen en las aguas superficiales y subterráneas son las mismas concentraciones que bebemos en el agua potable.

No hay información precisa referente al efecto que tiene sobre la salud la exposición a estos químicos, en bajas concentraciones, durante toda la vida. El consumo de líquidos embotellados no necesariamente elimina esta posible fuente de contaminación, debido a que los plásticos de las botellas también pueden contribuir con químicos sintéticos al líquido.

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 8

Aspectos legales y reglamentarios



Contenido

1. Definición de río y quebrada
2. Ley Núm. 49 de 3 de enero de 2003, según enmendada
3. Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación
4. Permisos del Cuerpo de Ingenieros
5. Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico

Introducción

En esta sección, se presentan aquellos estatutos y procesos complementarios relacionados al desarrollo de obras e intervenciones en los cauces de Puerto Rico.

La Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, según enmendada) establece que el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales será la agencia encargada de planificar y reglamentar el uso y aprovechamiento, conservación y desarrollo de las aguas en Puerto Rico y de implantar la política pública y las normas pertinentes a las aguas de la Isla. Esta Guía para el Manejo de Ríos representa uno de los esfuerzos del Departamento para proveer la información técnica necesaria para mejorar el manejo de los recursos fluviales.

Definición de río y quebrada

Los ríos y las quebradas se tratan de forma distinta bajo las leyes de Puerto Rico. Se consideran como ríos los cuerpos de agua así nombrados en los mapas topográficos preparados por el Servicio Geológico Federal (USGS por sus siglas en inglés) (**Ilustración 8.1**). No hay un criterio hidrológico para determinar si una quebrada tiene el tamaño suficiente para ser considerada como río. Las quebradas son cuerpos de agua más pequeños que los ríos, pero ambos pueden tener flujo intermitente. El tamaño de muchos ríos en Puerto Rico es tal que, si fueran cuerpos de agua en el Amazonas, serían denominados quebradas.

Los ríos son de dominio público y son custodiados por el DRNA. Para éstos se requiere un “deslinde de cauce” para determinar el límite de la propiedad pública y privada a lo largo del río. La Ley 49 de 3 de enero de 2003, según enmendada, requiere la delimitación de una faja de conservación con un ancho mínimo de cinco metros lineales en cada lado del río cuando se realice cualquier obra de urbanización o lotificación en terrenos colindantes con un río. Debido a que los ríos se mueven lateralmente por causa de la migración de sus meandros, la faja y los de deslinde se mueven a la par con éste.

Las quebradas, sus cauces y sus riberas se consideran de dominio privado. La Ley 49 citada aplica también a las quebradas, pero en este caso, la faja de terreno es cedida al municipio.

En los casos en que el río determina el límite de dos propiedades, al trasladarse gradualmente durante un periodo de años, un propietario podría ganar terreno y el otro perderlo. Sin embargo, un cambio abrupto en el curso del río, como podría ser uno ocasionado por un huracán, no conlleva un cambio en el límite de la propiedad.

Los reglamentos para el manejo de cuerpos de agua, como por ejemplo los reglamentos del Cuerpo de Ingenieros, no diferencian entre ríos y quebradas. Tanto en la reglamentación federal como en la estatal, es importante determinar el límite jurisdiccional en dirección aguas arriba ya que la quebrada jurisdiccional no se extiende aguas arriba hasta el nacimiento de ésta. Los procedimientos federales y estatales para este particular son diferentes, pero ambos utilizan como criterio la presencia de los trazos morfológicos de un cauce sobre el terreno, y no la presencia o ausencia del agua.

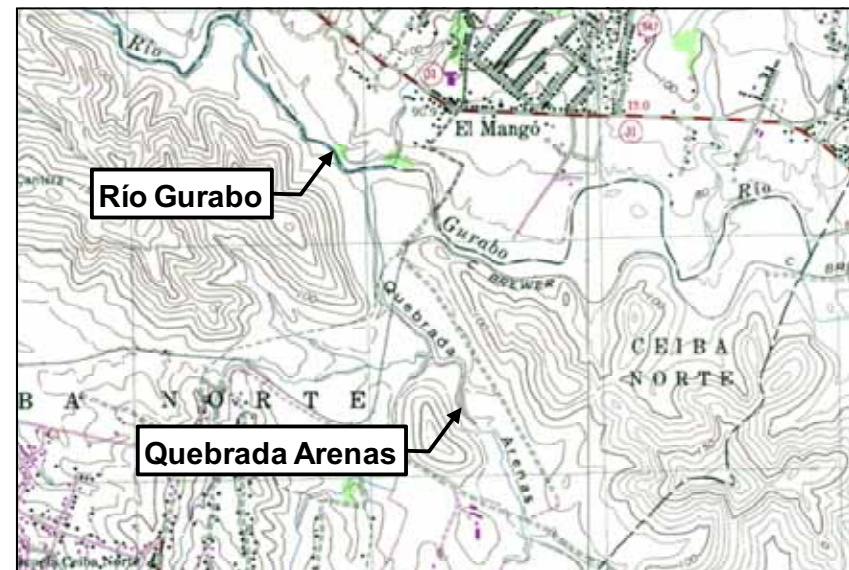


Ilustración 8.1. Mapa del USGS identificando río y quebrada de Puerto Rico.

Acciones de Protección bajo el Plan de Agua

La Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley Núm. 136 del 3 de junio de 1976) requiere al Estado Libre Asociado (ELA), a través del Secretario del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), la adopción del Plan Integral de Recursos de Agua (PIRA; aprobado el 8 de abril de 2008), el cual tiene como fin precisar los usos actuales de los cuerpos de agua del país y proyectar los futuros, tomando en cuenta las necesidades de los sistemas naturales, sociales y económicos del País que dependen directamente del recurso agua. Dentro del PIRA, existen una serie de proyectos dirigidos a actualizar la información concerniente al manejo adecuado de los cuerpos de agua de la Isla, para garantizar la protección de las especies que componen dicho ecosistema. Dos de los proyectos más importantes para este fin son el proyecto de Caudales Ecológicos y el de Ríos Patrimoniales.

Caudales ecológicos

El Concepto de Caudal Ecológico se define como *“el flujo de agua necesario dentro del cauce para mantener la integridad y diversidad de poblaciones de organismos, funciones ecológicas y*

otros bienes y servicios ecológicos de los sistemas fluviales”. El rol del DRNA es desarrollar una metodología para estimar el caudal ambiental mínimo en las corrientes de agua que permita a los ecosistemas asociados mantenerse saludables, comenzando por aquellas sujetas a proyectos tales como la construcción de embalses y la instalación de tomas de agua.

Ríos patrimoniales

El objetivo del proyecto de Ríos Patrimoniales es preservar las funciones ecológicas y las poblaciones de especies nativas en los ríos que aún no han sufrido daños severos por el desarrollo, minimizando los impactos futuros en ellos y preservando sus poblaciones de especies nativas. Para esto, el DRNA tiene la tarea de identificar los ríos o tramos de ríos cuya condición ecológica se mantiene en una condición semejante a la natural para sostener la complejidad de la flora y fauna nativa. A estos cuerpos de agua se les designará Patrimoniales y, mediante esta designación, se aplicarán normas más estrictas para cualquier intervención futura que pueda afectar el sistema fluvial y los ecosistemas acuáticos.

Ley Núm. 49 del 3 de enero de 2003

Ley Núm. 49 de 2003, según enmendada

La Ley Núm. 49 de 3 de enero de 2003, según enmendada, establece la política pública sobre la conservación de ríos y quebradas como ecosistemas que proveen múltiples beneficios. Además, establece la política pública para obras de control de inundaciones y sobre la dedicación a uso público de fajas verdes.

Control de inundaciones y canalización

Conforme a esta ley, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

podrá llevar a cabo obras de control de inundaciones y canalización de ríos siempre y cuando sea necesario para prevenir o disminuir inundaciones en áreas que tienen un historial de inundaciones con daños a la vida y la propiedad y cuya realización se haya determinado como la alternativa de acción más efectiva en términos económicos y ambientales. No se promoverán obras públicas de control de inundaciones para el rescate de terrenos públicos o privados. Esta ley prohíbe la construcción de canalizaciones por particulares.

Obras y construcciones colindantes a cuerpos de agua

La ley dispone que en cualquier obra de urbanización, permiso de construcción, o de uso o cualquier lotificación en terrenos colindantes, con o por el cual discurre cualquier cuerpo de agua, se dedicará a uso público una faja de terreno de un mínimo de 5 metros lineales a ambos lados del cauce. La faja se cederá a nombre del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales si se trata de un río y a nombre del Municipio si se trata de una quebrada. La faja se mantendrá expedita (libre de obras construidas por el ser humano) y sólo se

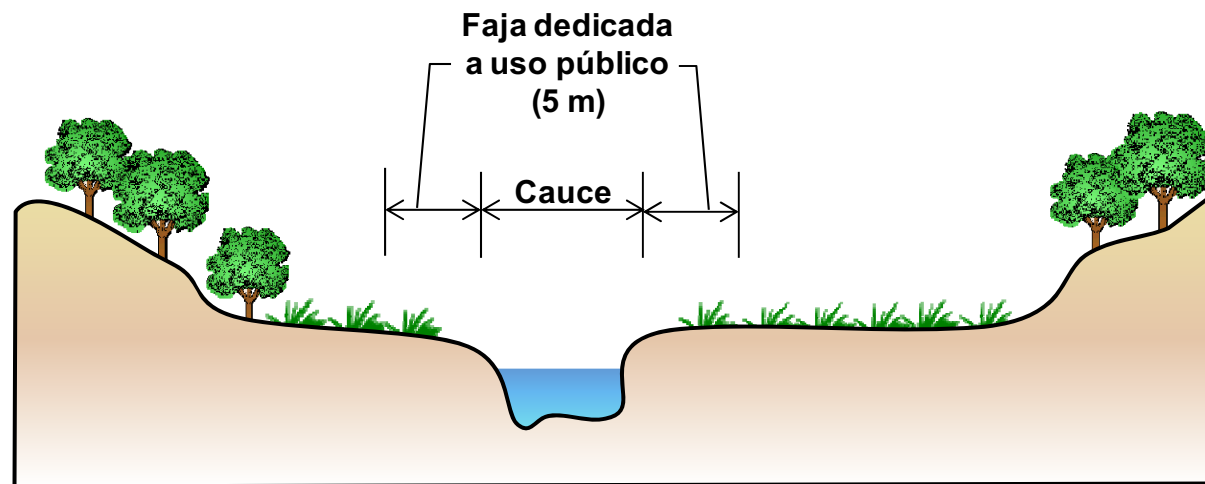


Ilustración 8.2. Faja dedicada a uso público.

utilizará para usos recreativos pasivos que no confluyan con las funciones de conservación y limpieza y estén relacionados con el disfrute del cuerpo de agua. La delimitación de esta faja se muestra de forma esquemática en la **Ilustración 8.2**.

Para identificar el límite del cauce se debe utilizar el cauce geomórfico (el cauce lleno) que corresponde ordinariamente un evento con intervalo de recurrencia de 1.5 a 2 años. En las zonas del río cuya ribera está siendo erosionada, el límite del cauce se debe establecer en el tope del talud. Al establecer la faja de conservación, se debe tomar en consideración como factor principal el patrón y velocidad de erosión, requiriendo una faja mayor en aquellos lugares donde la erosión de la ribera es activa. El objetivo es evitar construcciones en zonas de alto riesgo.

El Secretario ordenará la remoción de cualquier obra, construcción, mejora o relleno sin autorización en el cauce de un cuerpo de agua. Además, ordenará la restauración del cauce a su condición original o, si es más conveniente, una condición que recree el cauce original, provea para el libre fluir de las aguas y mitigue el impacto ambiental causado.

Conservación y limpieza de cauces de río

El Departamento podrá llevar a cabo obras de conservación y limpieza de ríos cuando se determine que existe una situación que afecte intereses o fines públicos, que afecte vida y propiedad o ecosistemas sensitivos y si se ha determinado que es la alternativa de acción más efectiva desde el punto económico y ambiental.

- Esta ley define el término limpieza como *“la remoción de materiales exógenos del cuerpo de agua que no son producto de procesos geológicos y que obstruyen el libre fluir de las aguas.”*
- El término conservación se define como *“obras en los cauces de los ríos dirigidas a restaurar las riberas que están erosionadas y reducir o eliminar el proceso de erosión.”*

Las obras de limpieza y conservación no podrán alterar la geometría ni el área seccional del cuerpo de agua o interferir con el ciclo de transporte natural de sedimentos hacia la costa. Al aplicar este concepto es importante reconocer que las barras son un componente natural del río, y no deben ser removidos por procesos de limpieza o conservación.

El DRNA no es responsable de la limpieza y conservación de cauces de cuerpos de agua en dominio privado, aunque está facultado para hacerlo de entender que sea meritorio.

Restauración de Cauces

El DRNA podrá ordenar la remoción de cualquier obra de construcción o mejora hecha sin autorización en el cauce de un cuerpo de agua. Podrá además, ordenar la restauración del cauce a su condición original o en su defecto a una condición que provea el libre fluir de las aguas sin obstrucción alguna, se recree el cauce original, se mitigue el impacto ocurrido en la flora y fauna y sea un ecosistema que provea múltiples beneficios.

Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación

Una estrategia fundamental adoptada por el gobierno, tanto federal como estatal, es evitar la construcción en áreas de alto riesgo, como las áreas inundables. Con este propósito, se estableció en Puerto Rico el Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación que acopia los conceptos de la reglamentación federal (Code of Federal Regulations 44CFR60.3) y los mapas de FEMA, para reglamentar el uso de los terrenos inundables en la Isla.

Al rellenar áreas inundables, el nivel de inundación aumenta. Con el objetivo de permitir el desarrollo de una parte de los terrenos inundables sin perjudicar a los demás propietarios dentro del valle inundable, se ha establecido el evento de los 100 años (1%

de probabilidad anual de ocurrencia) como la “Inundación Base” para la planificación. Además, se ha establecido incrementos máximos en los niveles de inundación que pueden ocurrir en cualquier punto del valle inundable. Se permite relleno en ambos lados del río hasta los límites que producen, pero no exceden, un incremento en el nivel de inundación, de 0.3 m en zonas no-desarrolladas y 0.15 m en zonas desarrolladas (**Ilustración 8.3**).

La zona de cauce mayor no es siempre una zona de velocidad alta de flujo. En las planicies costeras hay muchas áreas clasificadas “cauce mayor”, esto se debe a su efecto de almacenar un volumen de agua de la

inundación y no a su capacidad hidráulica para transportar flujo.

La Junta de Planificación ha adoptado los mapas preparados por la agencia federal FEMA, Programa Nacional de Seguros Contra Inundaciones (NFIP, por sus siglas en inglés). Estos mapas definen los límites de zonas inundables para gran parte de los ríos y quebradas de la Isla. Sin embargo, no todos los cuerpos de agua han sido estudiado por FEMA, y la falta de designación de “inundable” por FEMA no garantiza que no existe riesgo.

La **Ilustración 8.4** muestra una porción del mapa de zonas susceptibles a inundación de FEMA panel 7200001560H. El mapa define varias

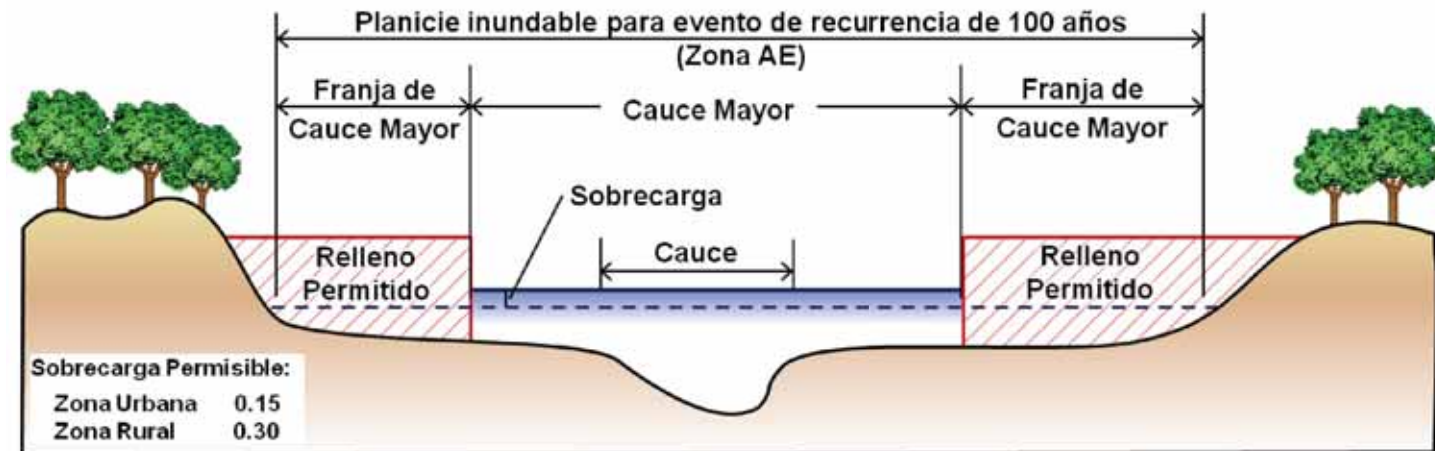


Ilustración 8.3. Definición de zonas inundables y límites del desarrollo permitido.

zonas. Las zonas utilizadas en los estudios de FEMA se definen a continuación:

Zona AE. Zona afectada por una inundación con una recurrencia de 100 años (inundación base). Hay una segunda clasificación dentro de esta zona, la zona delimitada con líneas blancas se refiere a la zona de cauce mayor donde no se permite la ubicación de relleno o estructuras a menos que estudios adicionales demuestren su factibilidad.

Zona X. Zona afectada por una inundación con una recurrencia de 500 años.

Zona A. Zona afectada por una inundación con una recurrencia de 100 años y determinada por métodos aproximados.

En zonas con estudios detallados, el mapa también ilustra los contornos del nivel de la inundación de 100 años y la localización de secciones transversales utilizadas en los modelos hidráulicos (**Ilustración 8.4**).

La Junta de Planificación establece varios requerimientos para el manejo de los terrenos dentro de zonas inundables dependiendo del tipo de zona donde se encuentren.

Las disposiciones generales de la Junta de Planificación en el cauce mayor son la prohibición de la ubicación de obstáculos tales como: estruc-

turas, relleno, mejoras sustanciales y otros desarrollos. Esta disposición tiene la excepción de que se podría construir en esta zona si se determina mediante un estudio hidrológico-hidráulico que la estructura no incrementará los niveles del cauce mayor durante una inundación base y que no existe otra alternativa para la ubicación de la obra propuesta. Esta excepción generalmente se utiliza en la construcción de las pilastras de puentes, debido a que en la mayoría de los casos sus pilastras caen dentro de los límites del cauce mayor. En estos casos se analiza la obstrucción total

del puente, pilastras y estribos en conjunto.

En la Zona AE, fuera del cauce mayor, se permite el relleno y desarrollo, siempre y cuando se cumplan con las disposiciones del reglamento. Toda estructura ubicada en esta zona deberá tener un nivel de piso de por lo menos 0.3 metros por encima del nivel de inundación base (inundación de 100 años).

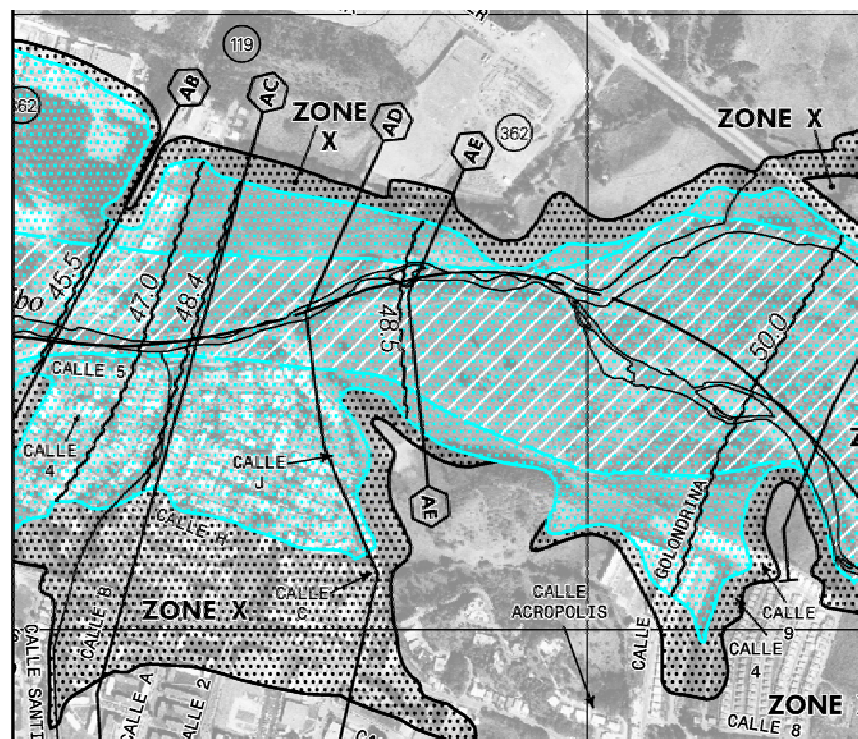


Ilustración 8.4. Mapa de zonas susceptibles a inundación de FEMA.

Permisos del Cuerpo de Ingenieros

Toda actividad que incluya el depósito de material de relleno o el dragado de sedimentos de las aguas de los Estados Unidos requiere un permiso del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) bajo la Sección 404 de la Ley de Agua Limpia y Sección 10 de la Ley de Ríos y Puertos.

En términos generales, las “aguas de los Estados Unidos” incluyen océanos, mares, ríos, quebradas (perennes, intermitentes o efímeras), estuarios y humedales asociados a éstos. El criterio principal para determinar jurisdicción es si las aguas son, han sido o tienen el potencial de ser navegables o si hay un nexo significativo entre el cuerpo de agua bajo evaluación y aguas navegables. La **Ilustración 8.5** muestra un flujograma sencillo para determinar cuándo se requiere un permiso del Cuerpo de Ingenieros.

Existen dos tipos de permisos que administra el USACE, (1) Permiso “Nationwide” (NWP, por sus siglas en inglés) y (2) Permiso Individual. Los NWPs son permisos generales aplicables a ciertas actividades que se llevan a cabo con frecuencia que se pueden acoger si cumplen con los parámetros establecidos. Existen cincuenta (50) diferentes tipos de NWPs, así enumerados, cada uno para actividades específicas y con sus propios parámetros y condiciones de

cumplimiento. Los NWPs más aplicables en Puerto Rico relacionados a actividades que se llevan a cabo frecuentemente en ríos son los siguientes:

- NWP 3 – obras de mantenimiento
- NWP 5 – instalación de equipos de medición científica
- NWP 6 – actividades de mensura
- NWP 7 – estructuras de “intakes” y “outfalls”
- NWP 12 – instalación de tuberías y líneas de utilidades
- NWP 13 – estabilización de bancos del río
- NWP 14 – proyectos de transporte lineal (puentes)
- NWP 18 – descargas menores de sedimentos
- NWP 19 – dragados menores de sedimentos cuando el impacto es muy limitado
- NWP 29 – desarrollos residenciales
- NWP 31 – mantenimiento de obras de control de inundaciones

- NWP 33 – cruces de ríos temporeros (por ejemplo, durante actividades de construcción)
- NWP 39 – desarrollos comerciales e institucionales cuando el impacto es muy limitado

Los permisos “nationwide” son sencillos y no requieren de notificación pública.

Los Permisos Individuales serán requeridos para aquellas actividades que no cumplan con los parámetros establecidos para los NWP. El proceso de evaluación de estos permisos es más complejo y requiere de un período de notificación y un aviso público.

Ya sea para acogerse a un NWP o para solicitar un Permiso Individual, se debe someter una Solicitud de Permiso Conjunto (*Joint Permit Application*). Esta solicitud es evaluada por el USACE, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre (USFWS), la Oficina Estatal de Conservación Histórica (SHPO por sus siglas en inglés), la Junta de Calidad Ambiental (JCA), el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) y la Junta de Planificación de Puerto Rico (JP). En aquellos casos que se pueda afectar la navegación, la Guardia Costanera también evaluará la solicitud de permiso.

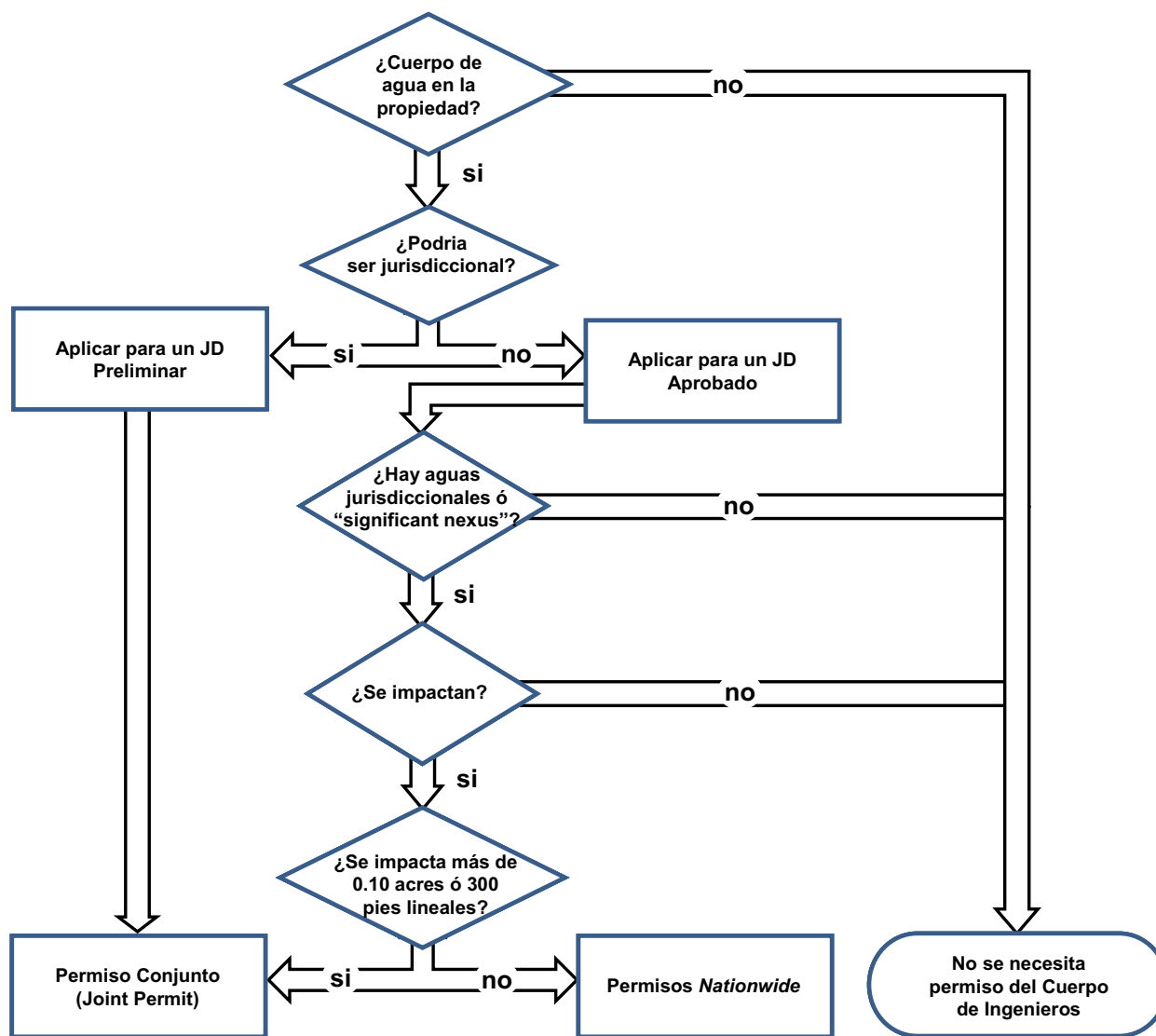
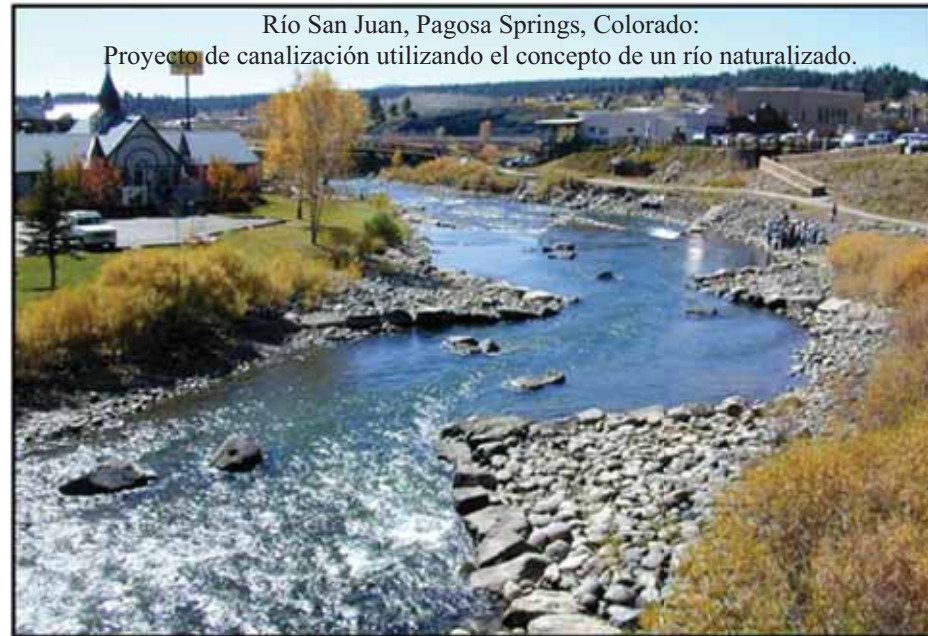


Ilustración 8.5: Flujograma para determinar si se requiere de un permiso del Cuerpo de Ingenieros.

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 9

Alternativas de manejo



Contenido

- | | |
|--|--|
| 1. Limpieza de ríos | 7. Atarjeas |
| 2. Extracción de grava y arena | 8. Represas |
| 3. Protección de riberas | 9. Tomas |
| 4. Enfoque de manejo de las inundaciones | 10. Protección de la zona de cauce mayor |
| 5. Canalizaciones | |
| 6. Puentes | |

Introducción

Esta sección discute las estructuras, intervenciones y actividades comunes que afectan los ríos de Puerto Rico. Además, describe algunos problemas hidráulicos, geomórficos y ambientales, y sugiere alternativas más sustentables.

Limpieza de ríos

Los procesos comúnmente utilizados para la "limpieza" de ríos provocan su desestabilización geomórfica, afecta adversamente a los ecosistemas acuáticos y a largo plazo puede aumentar el riesgo de inundación.

La ley Número 49 del año 2003, según enmendada, establece que las actividades de "limpieza de río" deben limitarse a la remoción de material exógeno del cauce, sin modificar la configuración del cauce. Sin embargo, en Puerto Rico la obra de limpieza frecuentemente consiste en excavar las barras del lecho del río, llenar charcas de sedimentos, enderezar meandros y ampliar el cauce, creando así una mini-canalización.

También ha sido práctica común depositar los materiales extraídos sobre la planicie inundable, utilizando una topadora ("bulldozer") para sacar los sedimentos y empujarlos fuera del cauce, modificando la planicie inundable además del cauce (**Ilustración 9.1**). Mediante este proceso, se crea un tramo de río con un ancho excesivo que provoca un incremento en la deposición de sedimentos. Esto oca-

siona que se regrese año tras año a sacar los sedimentos y que se continúe con la deposición de éstos sobre la planicie inundable, reduciendo su capacidad hidráulica.

A pesar de que esta clase de limpieza de río se lleva a cabo con el objetivo de reducir el riesgo de inundaciones, su efecto a largo plazo puede ser contrario a su propósito por la pérdida de capacidad hidráulica en la planicie inundable causada por la deposición de sedimentos extraídos del río.

Un ejemplo de este problema ocurre en Yauco. Parte del área urbana del pueblo es afectada por inundaciones producidas por la crecida de Río Yauco. El cauce de este río se ha limpiado en varias ocasiones a través de los años y los sedimentos extraídos se han depositado en la planicie izquierda (este) del río. Otra clase de

obra informal que se ha hecho en Puerto Rico es el enderezamiento de meandros. Como consecuencia adversa, esto aumenta la pendiente del río, ya que el tramo enderezado es más corto, provocando una mayor velocidad del flujo, lo que a su vez lleva a un aumento en la capacidad de transporte de sedimentos lo que ocasiona el atrincheramiento del río (vea Balance Lane, Capítulo 3).

En los ríos y quebradas, es natural que hayan troncos de árboles caídos dentro del cauce, que componen parte del hábitat biológico. Este material natural no debe ser removido a menos que exista peligro de que obstaculice algún puente ó atarjea.

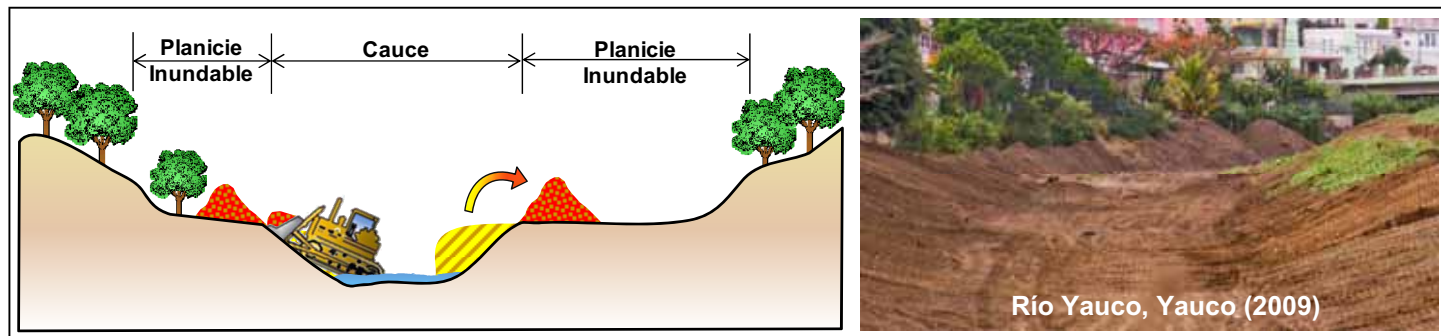


Ilustración 9.1: Proceso típico de limpieza de ríos en Puerto Rico.

Extracción de grava y arena

Existe una necesidad de arena y grava para actividades de construcción. El tamaño del agregado para el hormigón es de 0.3 mm o mayor (ASTM C33-03 Fine Aggregate), un tamaño que corresponde al tamaño de arena mediana o mayor.

La fuente más conveniente y económica para obtener estos materiales han sido las dunas de arena (ya destruidas casi en su totalidad en Puerto Rico), las playas y bocas de los ríos en las playas (otra actividad ahora no permitida por la ley) y el cauce de los ríos (una actividad aún permitida). Todas estas actividades tienen en común que están aprovechando un recurso que forma parte del ciclo geomórfico activo. En otras palabras, son depósitos de sedimentos que están en la zona de transporte activo y no de depósitos fósiles lejos de las acciones de transporte.

Los sedimentos en la zona de transporte activo inciden directamente en las condiciones del ambiente e impactan nuestras vidas e infraestructura. Por ejemplo, sacar arena de las playas tiene un impacto directo e inmediato en el aumento de la erosión costanera. Esto es un problema muy severo en muchas áreas de Puerto Rico, particularmente en la costa norte. La extracción de materiales del cauce de los ríos tiene un impacto similar dentro

y fuera de la zona de extracción; reduce el nivel del cauce, ocasiona o acelera el atrincheramiento del lecho y la erosión y colapso de las riberas, y reduce la arena disponible para nutrir las playas.

Hay otras fuentes de agregados fuera de los materiales en las zonas de transporte activo. Estas incluyen la extracción en fosas, la manufactura del agregado al triturar roca y la extracción de yacimientos submarinos en zonas que están fuera del ciclo de transporte activo. Estas otras fuentes tienen la característica de no ocasionar un cambio en el patrón del ciclo geomórfico activo y, por lo tanto, no resultan en problemas de erosión y en alteraciones a la morfología y ecología.

El problema del atrincheramiento

Casi todos los ríos de Puerto Rico han sufrido atrincheramiento por la extracción de grava y arena de sus cauces. Extraer materiales del lecho es una causa directa de atrincheramiento, siempre y cuando el río no rellene rápidamente la fosa excavada en el cauce. La experiencia ha sido que el fondo de los ríos sigue bajando, éstos presentan evidencia de su degradación progresiva y su falta de recuperación ante las actividades de extracción.

El problema que ocasiona el atrincheramiento es que la gran mayoría de los sedimentos transportados por los ríos en Puerto Rico son finos. En contraste, el volumen de transporte de sedimentos de los tamaños de interés económico es muy pequeño y no son remplazados aún durante décadas.

Extraer el material grueso del cauce del río ocasiona que el río ajuste su condición morfológica, incluyendo las siguientes reacciones geomórficas y ecológicas.

- Atrincheramiento en la zona de extracción, una consecuencia directa de remover material del río.
- Atrincheramiento en la dirección aguas abajo, debido a la reducción en el influjo de sedimentos gruesos.
- Puede ocasionar atrincheramiento aguas arriba según el río ajusta su perfil.
- Se reduce el volumen de arena que llega a la costa y se agrava el problema de erosión costanera.
- Al bajar el fondo del río principal, se puede iniciar el proceso de

Las extracciones de material de los ríos son otra actividad que provoca su desestabilización, creando problemas de atrincheramiento, turbidez, y eliminación de hábitats.

atrincheramiento en los tributarios que desembocan hacia el río.

- El atrincheramiento pone en riesgo los apoyos de los puentes y puede exponer tuberías que cruzan por debajo del fondo del río (**Ilustración 9.2**).
- El proceso de atrincheramiento aumenta la altura de las riberas, reduce su estabilidad y acelera el proceso de su erosión y colapso. El colapso de las riberas puede dañar estructuras públicas y privadas y también añade una carga de sedimentos finos al río y a la zona costanera.

- Se modifica la morfología del río y las zonas de flujo de rápidos se pueden convertir en zonas profundas, representando una pérdida de hábitat para las especies nativas.
- Durante el proceso de extracción se genera turbidez que fluye aguas abajo, donde puede afectar la ecología del río y las plantas de filtración de agua potable.

En resumen, las consecuencias adversas de la extracción de material de los cauces son múltiples y de larga duración.

Análisis del impacto ambiental

Las declaraciones de impacto ambiental, a pesar de que son preparadas por los consultores del proponente, se emiten como si fueran documentos originados por el DRNA. Hay muchos impactos potenciales asociados con una extracción, pero uno de los más importantes es el atrincheramiento. Al analizar el impacto ambiental de una extracción, se debe asegurar que la actividad no va a crear o agravar problemas de atrincheramiento.

Una revisión de varios documentos ambientales preparados para proyectos de extracción evidencian que este tema no se toca. En algunos casos,



Ilustración 9.2: Tubería de 48 pulgadas expuesta por atrincheramiento del Río Toa Vaca.

se calcula el volumen del material disponible simplemente al indicar que existe un cauce de cierto ancho y largo. Si el tramo objeto a la extracción se encuentra aguas abajo de un embalse, no tiene ninguna fuente para reemplazar este sedimento, excepto por el colapso de las riberas, pero esto no se menciona. En otro caso, el documento ambiental trata de demostrar que existe material en volúmenes adecuados al calcular el volumen de sedimento que entra a la zona de extracción. Sin embargo, se calcula el abasto de sedimento en base a un

material más fino que el que se propone extraer.

Otra estrategia es utilizar un modelo matemático de transporte de sedimento para demostrar cómo el tramo aguas arriba reemplazará los sedimentos objeto de la extracción. Sin embargo, no indican que el modelo matemático presume un abasto infinito de sedimentos en su última sección aguas arriba (esto es una característica de los modelos de transporte). Mientras que esta premisa puede ser aceptable en ciertas condiciones, en la situación actual de Puerto Rico no

es realista, ya que el volumen de sedimento disponible aguas arriba es limitado.

Como resultado, se están otorgando permisos de extracción en tramos de río con problemas serios de atrincheramiento, incluyendo puentes con problemas de exposición de pilastras y colapso de estribos (**Ilustración 9.3**), tubería expuesta a socavación y zonas con casas literalmente cayéndose en el agua (**Ilustración 9.4**), según colapsan las riberas altas al lado del río atrincherado. Es decir, el beneficio económico de la extracción está afec-



Ilustración 9.3: Colapso de estribo de puente por atrincheramiento de Río Inabón.

tando terceros que están sufriendo los costos del atrincheramiento.

Alternativas para extracción de material del cauce

La extracción de material del cauce, dentro de ciertas condiciones, puede que no ocasione atrincheramiento adicional al existente. Una extracción justamente en la zona de la entrada de un río hacia un embalse no debe ocasionar atrincheramiento adicional, ya que el proceso de atrincheramiento

aguas abajo es controlado por el embalse. Otro sitio donde el efecto será menor es dentro de una canalización larga ya que las canalizaciones suelen funcionar como trampas de sedimentos. En el caso de las canalizaciones, sería importante analizar si el transporte ocurre o puede ocurrir, para eventualmente estabilizar el balance de sedimentos nuevamente en el tramo aguas abajo. En realidad, para minimizar los impactos de la canalización en la morfología del río, los sedimentos gruesos atrapados en el canal

deben ser transportados y depositados en el límite aguas debajo de la canalización.

En algunas áreas del mundo, se están tomando las medidas para recoger los sedimentos gruesos atrapados aguas arriba de estructuras como embalses y transportarlos aguas abajo. Esto ayuda a evitar problemas de atrincheramiento y un cambio en el tamaño de los sedimentos del lecho que puede cambiar las condiciones ecológicas.



Ilustración 9.4: Residencias afectadas por erosión de ribera.

Protección de riberas

Las riberas de los ríos están sujetas al impacto de la energía hidráulica, particularmente en el exterior de los meandros. La energía hidráulica aumenta durante las crecidas. Por esta razón, las riberas pueden estar relativamente estables por periodos largos de tiempo pero erosionar considerablemente durante un evento grande.

Dos métodos muy comúnmente utilizados para la protección de riberas son los muros de contención de hormigón y muros de gaviones. Estos tienen una rugosidad hidráulica relativamente baja y propician la aceleración del flujo. Esto también incrementa la capacidad de transporte de sedimentos y por consiguiente, el potencial de socavación también aumenta.

Esas estructuras están sujetas a mayor riesgo de fallo por socavación y ocasionan que el punto de ataque de la rivera se mueva en la dirección aguas abajo.

Es importante recordar que la falla de riberas generalmente tiene dos componentes, la socavación del pie del talud y la falla subsiguiente del talud superior debido a una falla geotécnica, según se presentó en la **Ilustración 3.14**. El objetivo principal de controlar la erosión de una ribera es evitar la socavación inicial al pie del talud para así evitar el subsiguiente colapso del talud.

Gaviones

Los gaviones son un método muy común, pero poco efectivo, para proteger riberas sujetas a la erosión. Consisten en cajas hechas de mallas de metal llenas de piedras (**Ilustración 9.5**). La malla de metal amarra las piedras y ayuda a resistir el desplazamiento de éstas. Como la rocas usadas son pequeñas su estabilidad depende de la fuerza del metal.

A pesar de la popularidad de su uso en Puerto Rico, los gaviones son una tecnología que siempre falla en el ambiente fluvial y no se considera sustentable.



Ilustración 9.5: Gaviones recién instalados.

Los gaviones utilizados para la protección de riberas representan una falla inminente. Esto implica que no es un método sostenible de estabilizar riberas.

Existen cuatro causas para la falla de gaviones y se clasifican en dos categorías: problemas con la tecnología y problemas de diseño. Estas causas se discuten a continuación.

1. Corrosión de la malla. La corrosión de la malla es la falla más común en los gaviones. Se ha observado esta falla en gaviones utilizados en los ríos de Puerto Rico a sólo cinco años de su instalación. El problema es aún más grave cuando se utilizan en ambientes de agua salada. El uso de revestimiento de plástico sobre los gaviones puede prolongar su vida útil, pero el deterioro inevitable del plástico permite el acceso de humedad que provoca la corrosión de la malla. Esta falla es inherente en la tecnología. Vea la **Ilustración 9.6**.
2. Abrasión de la malla. El choque de piedras grandes contra la ma-

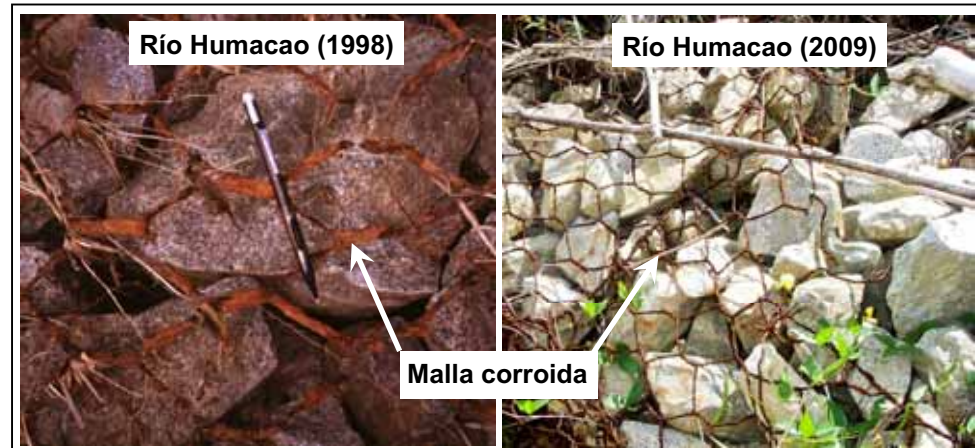


Ilustración 9.6: Oxidación de la malla de los gaviones, Río Humacao.



Ilustración 9.7: Abrasión de la malla, Río Mameyes.



Ilustración 9.8: Falla de gaviones nuevos en "caja" por socavación hidráulica.



Ilustración 9.9: Falla de gaviones nuevos en "colchón" por socavación hidráulica.

lla puede debilitarla o partirla (**Ilustración 9.7**). Este problema se puede evitar si el uso de gaviones se limita a ríos que no transporten piedras de mayor tamaño que los mismos gaviones. Esta falla es inherente a la tecnología.

3. Socavación. La socavación la base de las estructuras construidas en gaviones provoca su falla. Esto puede afectar tanto a gaviones en caja (**Ilustración 9.8**) como a gaviones en

"colchón" (**Ilustración 9.9**). Esta falla ocurre principalmente por deficiencias en el diseño.

4. **Falla hidráulica.** Las fuerzas hidráulicas durante crecidas pueden destruir una obra de gaviones y hasta llevar las "cajas" o "colchones" aguas abajo. La primera etapa de este tipo de falla, particularmente evidente en "colchones", es la deformación de las cajas individuales por el movimiento de las piedras por debajo de la malla (**Ilustración 9.10**). La siguiente etapa es la ruptura de la caja (**Ilustración 9.11**) o el colapso de toda la masa de gaviones. Luego de una falla masiva de esta clase, se pueden observar cajas de malla, aún con rocas adentro, arrastradas por las fuerzas hidráulicas por cientos de pies aguas abajo de su punto original (**Ilustración 9.12**). Esta falla ocurre principalmente como consecuencia de problemas en el diseño y de utilizar gaviones en sitios inapropiados.

Aún cuando se resuelvan las deficiencias de diseño que contribuyen a la falla de gaviones, las cajas de alambre no representan una tecnología sustentable. Esto se debe a la vida inherentemente limitada de su material de construcción, dada su exposición a un ambiente fluvial y al impacto por la humedad del río o del suelo. Luego de su instalación, eventualmente se degradan y, debido a su costo,

Río Artibonite, Haití (2008)



Ilustración 9.10: Deformación de las cajas de gaviones (primera etapa de falla por fuerza hidráulica).

Río Mameyes (2004)



Ilustración 9.11: Ruptura de las cajas de gaviones (segunda etapa de falla por fuerza hidráulica).

Río Turabo (2004)

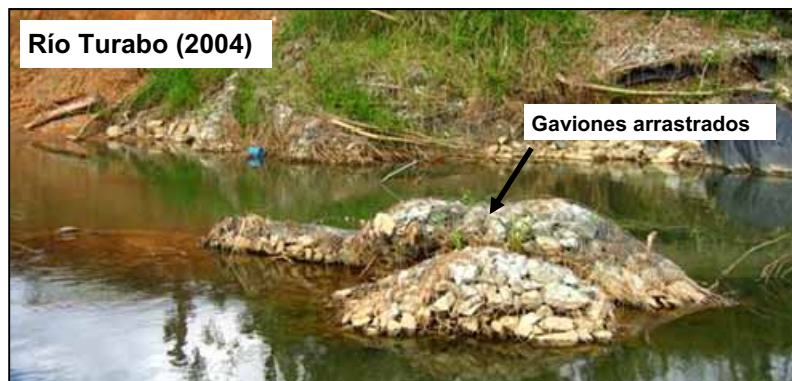


Ilustración 9.12: Gaviones arrastrados por fuerza hidráulica.

no se reparan o reemplazan hasta que ocurre una falla.

Estructuras de protección

Para corregir un problema de erosión de ribera es necesario entender la causa dentro del entorno del sistema fluvial. Es necesario aplicar técnicas adecuadas para fijar el curso del río utilizando materiales y diseños sosten-

tables. Los gaviones, por ejemplo, no representan un material sustentable. Alternativas que son sustentables incluyen el uso de vegetación (en áreas con menor velocidad) y rocas. En lugares altamente urbanizados donde no hay otra opción, se puede considerar hormigón. Sin embargo, el uso de hormigón también ha experimentado muchos problemas y hay canalizaciones en hormigón que se han deterio-

No es recomendable utilizar gaviones en ninguna obra de protección asociada con el ambiente fluvial o en contacto con suelo húmedo.

rado a través de los años hasta el punto de ser inservibles.

El uso de piedras para crear “*riprap*” a lo largo del río es una técnica tradicional. Tiene la ventaja de que, en ausencia de socavación y se diseña apropiadamente, puede ser estable durante siglos. Sin embargo, también tiene varias desventajas: (1) conlleva un alto costo, (2) es ambientalmente dañino si se elimina el crecimiento de vegetación en las riberas, (3) tiende a acelerar el flujo y por consiguiente, puede aumentar los problemas de socavación, los cuales se observan con frecuencia en Puerto Rico donde los ríos están simultáneamente afectados por el problema de atrinchera-

miento y (4) no es estéticamente atractivo. Este factor es muy importante ya que, si se compromete el aspecto estético de los ríos, la gente tiende a utilizarlos como depósitos de desperdicios. Por lo tanto, el uso de “*riprap*” convencional no es la mejor estrategia para solucionar problemas de inestabilidad de riberas. De ser necesario utilizar “*riprap*”, se debe incorporar vegetación en la estructura. La vegetación puede reducir la velocidad del flujo y proveer hábitat ambiental.

Una técnica relativamente nueva y de mayor beneficio ambiental es el uso de “guías de roca” (*rock vanes*). Éstas consisten en estructuras cons-

truidas por roca angular cuya orientación dentro del cauce tiene el propósito de redirigir el flujo en el fondo del río para que no ataque el pie del talud. La orientación general se presenta en la **Ilustración 9.13**. La **Ilustración 9.14** muestra claramente el efecto en el patrón de flujo producido por las guías de roca en un río en Suiza. Una variación en este concepto incluye la colocación de rocas adicionales al final para crear la forma de una letra “J.” De esta manera se crea una charca para hábitat acuático.

El tope de la roca en la orilla típicamente se establece al nivel de cauce lleno (1.5 a 2 años de recurrencia) y la estructura tiene una pendiente hacia

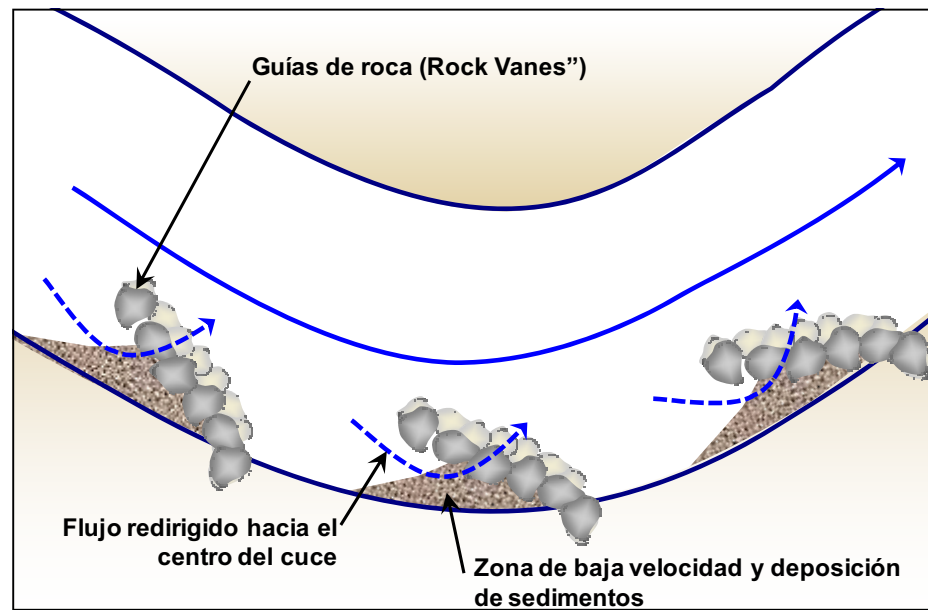


Ilustración 9.13: Configuración de guías de roca (“rock vanes”).

abajo, tal que la elevación del tope de la última roca es cercana al fondo del río. Es esencial proteger estas estructuras contra la socavación que ocurre en el lado aguas abajo y en su punta

mediante el uso de un yacimiento de piedras ubicado a una profundidad mayor que la profundidad de socavación. La cantidad de roca y su profundidad dependen del tamaño del curso

del agua. Además, el tamaño de la roca tiene que ser estable en la crecida de diseño. Es necesario colocar cada piedra individualmente para asegurar la estabilidad de la estructura.



Ilustración 9.14: Guías de roca instalados en Suiza.

Enfoque de manejo de las inundaciones

Las medidas de control de inundaciones deben enfocarse primeramente en remover a la gente de las zonas de alto riesgo para lograr una solución permanente.

Las inundaciones son un fenómeno natural. Sin embargo, los “problemas” de inundación se crean cuando la sociedad ocupa las zonas con susceptibilidad a inundarse. En Puerto Rico, gran parte de los terrenos llanos son inundables y la ocupación de éstos crea la base del conflicto entre la sociedad y la naturaleza. Este conflicto se puede resolver de dos formas:

- Medidas estructurales. Medidas utilizadas para controlar las inundaciones e incluyen canalizaciones, embalses, diques y la ubicación de relleno para subir el nivel del terreno.
- Medidas no estructurales. Medidas orientadas a preservar el espacio del río. Comúnmente utilizadas para evitar construcciones en las zonas de mayor riesgo.

Desde hace más de 100 años, la comunidad de la ingeniería se ha concentrado en resolver el “problema” de las inundaciones mediante la implantación de controles estructurales. Sin embargo, este enfoque se ha caracterizado por varias deficiencias importantes.

- Las obras de ingeniería, particularmente las canalizaciones, requieren un mantenimiento conti-

nuo (**Ilustración 9.15**). Frecuentemente el mantenimiento realizado es deficiente.

- Ciertas obras, como los diques, son de alto riesgo porque su falla puede resultar en consecuencias catastróficas (Ejemplo, fallo de diques de Nueva Orleans en 2005).
- Ciertas obras de ingeniería, como las canalizaciones y los embalses, tienen impactos ambientales grandes y permanentes. Además, ambos acumulan sedimentos y crean problemas en el cauce aguas abajo por haber reducido o eliminado el transporte de sedimentos gruesos.
- Las obras conllevan altos costos económicos y ambientales.
- Las obras no son estéticamente atractivas.
- Las obras están diseñadas para manejar el “evento de diseño,” pero, de ocurrir un evento mayor, la obra puede fallar, posiblemente con resultados catastróficos (**Ilustración 9.16**).

Al convertir los sistemas naturales a sistemas manejados y mantenidos por

la sociedad, ésta se expone a un costo de mantenimiento perpetuo y los ecosistema se someten a daños irreversibles.

Debido a las muchas consecuencias adversas asociadas al control de inundaciones por medios estructurales, el gobierno federal de los EE.UU ha adoptado como política publica el enfoque en las medidas no estructurales. Las medidas estructurales se deben utilizar solamente cuando las obras no estructurales no son adecuadas (33 U.S. Code - Title 33: Navigation and Navigable Waters, January 2003, Sección 701b-11: Flood Protection Projects). Puerto Rico se caracteriza por tener muchas áreas urbanas, ya construidas, que son susceptibles a inundaciones. Esas áreas generalmente son habitadas por personas de bajos recursos económicos, y en muchas de ellas no son viables las medidas estructurales y la única alternativa es la relocalización de las personas.



Ilustración 9.15: Obras de limpieza de canalización en Ponce.



Ilustración 9.16: Canalización de la Quebrada Blasina en Carolina al punto de desborde, 2002. El nivel elevado en el canal reduce la capacidad hidráulica de las tuberías pluviales provocando inundaciones aun sin haberse desbordado el canal.

Canalizaciones

La morfología de una canalización

La canalización de un río es una obra tradicional de la ingeniería hidráulica, fundamentada en el concepto de un río como canal. Se diseña con el objetivo de concentrar y acelerar el flujo del agua para minimizar la sección hidráulica y su costo de construcción. Comúnmente, se utilizan secciones hidráulicas trapezoidales o rectangulares. Sin embargo, el río no solamente transporta agua, sino que también sedimentos. Una parte de los sedimentos transportados se depositan en el canal, funcionando ésta como una trampa de sedimentos.

Cuando el agua transporta sedimentos, la deposición natural de éstos resulta en la formación de un cauce. La **Ilustración 9.17** señala la formación de cauces por deposición de sedimentos en una zona de delta, según el río avanza en el cuerpo de agua.

El balance entre la socavación y la deposición de sedimentos hace que, en los ríos naturales, los cauces activos tengan la capacidad de transportar el evento de aproximadamente 1.5 años de recurrencia antes de desbordar sus riberas. En contraste, las canalizaciones se construyen con una sección transversal mucho mayor que

la de un río natural y su sección hidráulica típicamente se calcula con un fondo plano sin considerar el proceso natural de acumulación de sedimentos.

Cuando el flujo de las crecidas frecuentes entra al tramo canalizado, su velocidad se reduce y el tramo canalizado empieza a atrapar sedimentos. La deposición de sedimentos dentro de la canalización eventualmente resulta en la creación de un cauce activo y de una planicie inundable. El río trata de regresar a su configuración natural dentro de los límites de la canalización (**Ilustración 3.18**). Esta

Las canalizaciones funcionan como trampas de sedimentos y provocan inestabilidad del río aguas abajo por la reducción en la carga de arrastre, lo que resulta en muchos casos en el atrincheramiento del río.



Ilustración 9.17: Formación de cauces naturales en el delta de Río Manatee, Bradenton, Florida.

evolución de la sección transversal de una canalización se muestra claramente en la canalización del Río Humacao (**Ilustración 9.18**).

Los sedimentos depositados en los laterales del cauce activo son de todos los tamaños, tanto finos como gruesos, y se cubren con vegetación. Estos depósitos pueden quedarse intactos, aún durante una crecida grande, según ilustrado por la foto de la canalización del Río Humacao luego del huracán Georges (**Ilustración 9.19**).

La acumulación de sedimentos dentro de las canalizaciones convencionales es inevitable. Aún ocurre en canalizaciones con trampa de sedimentos ("debris basin") aguas arriba, debido a que la mayor parte de la carga de sedimentos consiste en material más fino de lo que normalmente se atrapa en una trampa de sedimentos.

Debido a su tendencia a acumular sedimentos, a modificar su sección transversal y a perder su capacidad hidráulica a través del tiempo, los ríos canalizados no son estables. Al contrario, éstos representan un problema de mantenimiento continuo, porque para preservar su capacidad hidráulica es necesario remover la acumulación de sedimentos por un tiempo indefinido.

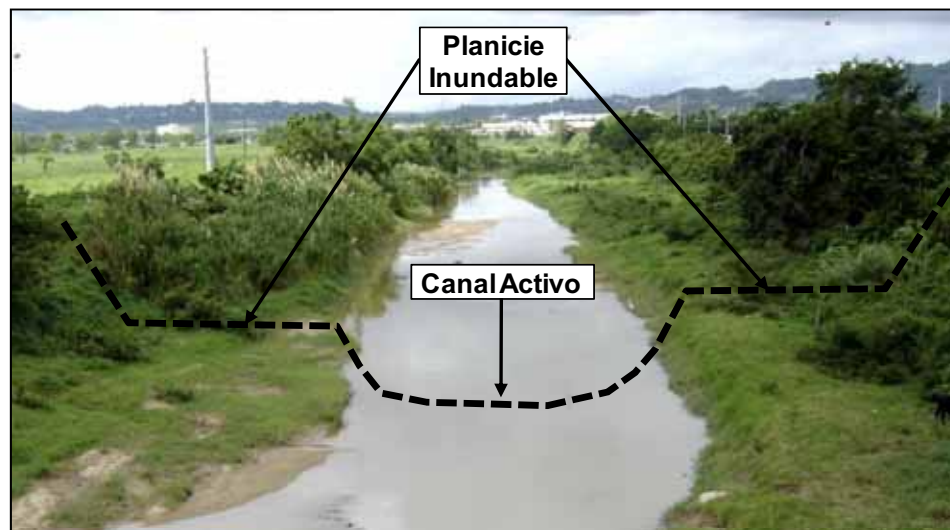


Ilustración 9.18: Evolución de canalización en el Río Humacao.



Ilustración 9.19: Canalización en el Río Humacao luego del Huracán Georges (1998). La crecida no removió los sedimentos previamente depositados y cubiertos de vegetación.

Las canalizaciones tradicionales se transforman en una configuración de cauce y planicie inundable por el depósito de sedimentos.

A pesar de que las canalizaciones se realizan para reducir el riesgo de inundaciones, la tendencia de acumular sedimentos y la falta de mantenimiento, puede crear una condición de riesgo diferente a la anticipada en el diseño.

Impactos aguas abajo

Las canalizaciones eliminan los meandros del río y el almacenaje de agua sobre la planicie inundable, lo que provoca un aumento en la descarga pico. Se puede reducir el riesgo de inundación en el área adyacente a la canalización, pero se aumentan las fuerzas hidráulicas y el riesgo de inundación aguas abajo.

Al atrapar sedimentos, las canalizaciones ocasionan una reducción en los sedimentos gruesos que conforman el lecho del río aguas abajo. La combinación de reducir los sedimentos

gruesos y aumentar la fuerza hidráulica acelera el proceso de atrincheraamiento y erosión de las riberas en el tramo aguas abajo de la canalización. Este efecto de remover los sedimentos gruesos del río se puede analizar conceptualmente utilizando el balance de Lane (Capítulo 3).

Los sedimentos gruesos que se remueven de la canalización durante el proceso de mantenimiento son necesarios aguas abajo para mantener la estabilidad del lecho, aunque esa no es la práctica común. La foto en la **Ilustración 9.20** muestra la acumulación de sedimentos gruesos en el pri-



Ilustración 9.20: Acumulación de sedimentos en la canalización del Río Turabo.

mer tramo de la canalización del Río Turabo.

Ecología

Las canalizaciones tienen impactos grandes y permanentes sobre la ecología de los ríos.

- Destruyen el hábitat de la ribera y remueven las raíces y sombra de la vegetación.
- Eliminan la secuencia de charcas y rápidos, dejando una zona de flujo continuamente llano.
- Sustituyen un río meándrico por un canal simplificado, recto o parcialmente recto, que elimina las zonas de meandros y remolinos que son aprovechadas por la vida acuática. También eliminan los refugios que utilizan las especies durante las crecidas.
- Representan barreras migratorias, particularmente aquellas construidas en forma de escalera.
- Requieren obras de mantenimiento que son un impacto catastrófico a la vida acuática, y conllevan un alto costo económico para el país.

Estrategias sustentables para el control de inundaciones

La comunidad de la ingeniería no le ha dado la importancia que requiere

el problema de la acumulación de sedimentos de las obras hidráulicas. Esto siempre se ha reconocido como un problema de pobre mantenimiento por parte del gobierno en vez de un problema de diseño. Sin embargo, los problemas de mantenimiento son tan universales, que ya se deben considerar como una deficiencia en el diseño de las obras, ya que existen diseños alternos que están más en armonía con los procesos naturales.

La mejor estrategia es evitar las canalizaciones y aplicar métodos de control de inundación en base a la zonificación apropiada. No se deben promover las canalizaciones para rescatar terrenos según se estipula en la Ley

Núm. 49 del 4 de enero de 2003, según enmendada. Sin embargo, en algunos sitios ya desarrollados, las canalizaciones son inevitables. En esos lugares:

- En vez de hacer una canalización convencional trapezoidal, lo apropiado es diseñar la canalización con la configuración de cauce y planicie inundable (**Ilustración 9.21**). Este tipo de canalización ocupa más espacio que las configuraciones convencionales, pero minimiza el mantenimiento y los impactos al ambiente.
- Los sedimentos gruesos removidos de las canalizaciones durante

el proceso de mantenimiento se deben depositar aguas abajo de la canalización para mantener el lecho del río.

- Se deben maximizar los beneficios ambientales y estéticos para poder desarrollar usos adicionales, como áreas recreativas para la comunidad.

Canalizar un río es empobrecer su ecosistema natural y, en la mayoría de los casos, el daño es irreparable.

Canalización Convencional



Canalización de Sección Combinada

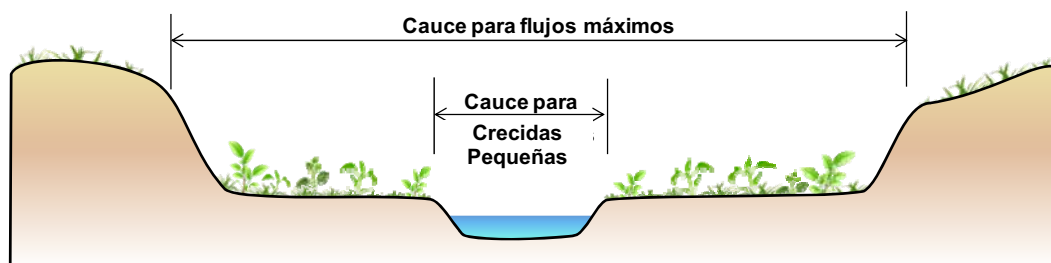


Ilustración 9.21: Comparación de canalización de sección combinada con una convencional.

Puentes

La construcción de puentes es costosa, por lo que siempre se trata de ubicarlos en tramos de río estrechos y rectos. Al cruzar una planicie inundable, frecuentemente se construye una parte del tramo sobre un terraplén, porque es más económico que extender el puente. El terraplén obstaculiza parte del curso del flujo sobre la planicie inundable propiciando que el puente funcione como un punto de control hidráulico (cuello de botella) durante las inundaciones.

El estándar de diseño hidráulico para los puentes consiste en no aumentar el nivel de la inundación base (100-años) más de lo permitido por el Reglamento de la Junta de Planificación Núm. 13 (0.30 m en áreas no desarrolladas y 0.15 m en áreas desarrolladas). El fondo de la viga inferior del puente se debe colocar a un nivel de por lo menos 0.6 m sobre el nivel de 100 años de recurrencia para permitir pasar materiales flotantes.

La modelación hidráulica de un puente evalúa la obstrucción ocasionada por el puente más la obstrucción de las pilastras. Las secciones transversales utilizadas en el análisis deben representar correctamente esas obstrucciones.

En el diseño hidráulico de puentes se utiliza comúnmente la premisa de que

la apertura del puente permanecerá limpia durante una crecida. Sin embargo, los ríos en Puerto Rico arrastran muchos escombros que frecuentemente quedan atrapados en la apertura de los puentes. La **Ilustración 9.22** muestra dos fotos de un puente sobre el Río Guayanilla, señalando la condición sin obstrucción y la condición de obstrucción experimentada durante la crecida del huracán Georges. Durante ese evento se perdió una parte significativa de la capacidad hidráulica debido a la obstrucción por escombros y sedimentos.

El puente ubica en un meandro del Río Guayanilla. Como se mencionó previamente en la sección de geomorfología (Capítulo 3), el interior de los meandros representa una zona de flujo lento y de acumulación de sedimentos. Este factor ocasionó que la parte del puente que ocupa el interior del meandro quedara obstaculizada con los sedimentos y los escombros transportados por la crecida. Para evitar esta clase de problemas es necesario entender la relación del puente propuesto en la morfología del río.

El primer paso en el diseño de un puente es asegurarse de que el cruce cumpla con los parámetros hidráulicos necesarios para asegurar su funcionamiento adecuado.

- El puente debe estar ubicado en un tramo recto del río, evitando en lo posible la construcción en curvas.
- Mediante el análisis de fotografías aéreas históricas, se debe corroborar que el lugar donde se propone la ubicación de un puente no se caracterice por trasladarse lateralmente. En el inventario de fotogrametría de la Autoridad de Carreteras hay fotos aéreas a partir del año 1938 para casi la totalidad de Puerto Rico, lo que permite un análisis del comportamiento de los ríos.
- En lo posible, el puente debe cruzar el río en un ángulo perpendicular al flujo.
- Las pilastras se deben ubicar fuera del cauce activo. También se debe tener presente que cuando el río ajusta su posición, la planicie inundable donde se ubica una pilastra pueda convertirse en cauce activo. Por esta razón, la profundidad de las pilastras cercanas al cauce activo debe diseñarse considerando esta eventualidad.

Otro problema que afecta los puentes es la socavación de sus pilastras y estribos, lo que puede reducir su esta-

bilidad y resultar en una falla estructural. En un análisis de socavación de puentes se toman en consideración tres factores: (1) el atrincheramiento del río a largo plazo, (2) la socavación que resulta del aumento en velocidad local a consecuencia de obstaculizar el flujo sobre la planicie inundable por el terraplén y (3) la socavación por las corrientes locales que ocurren alrededor de las pilastras y estribos.

El puente puede ser afectado por el proceso de atrincheramiento. De reducir el nivel del lecho del río, se pueden socavar y exponer las pilastras que apoyan la estructura, resultando eventualmente en la falla del mismo. El potencial de que este problema afecte la integridad estructural de un puente depende de su sistema de apoyo. Para puentes construidos sobre roca o con mucha arcilla en su

yacimiento, como ocurre comúnmente en el interior de la Isla, hay un reducido potencial de que este problema resulte en el fallo de la estructura. Sin embargo, en el caso de los puentes construidos sobre materiales aluviales, el problema es real. El Capítulo 3 describe varios indicadores de atrincheramiento.

No todos los puentes han sido construidos de acuerdo a los estándares actuales, y hay lugares donde no es posible remplazar el puente actual de acuerdo a los estándares vigentes debido a las limitaciones en los niveles de los caminos de acceso, particularmente en áreas urbanas donde no se pueden cambiar los niveles o la localización de las calles. Otra situación ocurre en las planicies inundables donde el puente se está sobre el nivel de la inundación, pero la carrete-

ra de acceso no se puede elevar porque representaría un dique que obstaculizaría el flujo de las aguas de inundación.

Los puentes no deben requerir la reconfiguración del cauce del río para aumentar su capacidad. Esto se debe a que el río reajustará el tamaño de su cauce al depositar sedimentos, volviendo así a su configuración original.

El diseño de un puente no debe depender de medidas de prevención de socavación, ya que esos métodos tienen un largo historial de fallos.



Ilustración 9.22: Puente sobre Río Guayanilla.

Atarjeas

Las atarjeas son utilizadas para cruces de cuerpos de agua de menor tamaño y consisten de uno o más conductos para transportar el agua por debajo del terraplén de un camino o por debajo de las calles de un área urbana (**Ilustración 9.23**). La política actual es de preservar la configuración natural del cauce de los ríos y quebradas en vez de construir atarjeas. Hay varias razones muy lógicas para adoptar esta estrategia.

Las atarjeas son más susceptibles a obstaculización que los puentes porque son más pequeñas. A pesar de que generalmente éstas son conside-

radas como estructuras menores, su potencial para ocasionar inundaciones es grande debido a su gran cantidad en áreas urbanizadas y a la facilidad con que se obstaculizan con escombros (**Ilustración 9.24**). De obstaculizarse parcialmente una atarjea, el agua vierte por encima de la carretera. Hay que asegurar que la topografía obligue al flujo desbordado a regresar al cauce, sin desviarse en otra dirección. Por ejemplo, en 2008 la Urb. Jardines de Yabucoa fue inundada por el agua desbordada y desviada de una atarjea en la carretera estatal PR-901 lejos de la urbanización. En vez de cruzar perpendicularmente, el

agua desbordada fluyó a lo largo de la carretera hasta llegar la urbanización.

La capacidad hidráulica de la mayoría de las atarjeas en Puerto Rico está limitada por el tamaño de su boca. Se puede aumentar la capacidad de una atarjea corta en un 15% con simplemente mejorar el diseño de la entrada.

Las atarjeas comúnmente se diseñan para manejar el caudal de 100 años. Esto hace que fluyan parcialmente llenas la mayor parte del tiempo, por lo que tienden a acumular sedimentos, situación similar a las canalizaciones.

Las atarjeas son estructuras con un alto potencial para obstaculizarse, por lo que esto se debe considerar en su diseño.



Ilustración 9.23: Puente vado en Humacao. La notable socavación de la cara aguas abajo demuestra que esta es la zona de mayor riesgo de falla estructural.

Las atarjeas comparten con las canalizaciones el problema de sedimentación debido a que su sección hidráulica es muy grande en comparación con el cauce activo del río. A diferencia de un puente, que (en teoría) no modifica el tamaño del cauce, las atarjeas dirigen la totalidad del flujo a través de una estructura hidráulica,

mientras que la planicie inundable queda obstaculizada por el terraplén de la carretera. Es muy común encontrar atarjeas de múltiples aperturas con varias de ellas obstaculizadas con sedimentos.

Los puentes vados consisten de una serie de atarjeas para manejar los

flujos normales y crecidas pequeñas, pero en eventos grandes la estructura completa se sumerge. El fallo típico de estas estructuras es ocasionado por la socavación de la cara aguas abajo.



Ilustración 9.24: Atarjeas obstaculizadas.

Represas

Los embalses son obras necesarias y deben diseñarse con un enfoque sustentable el cual no le cree problemas a las generaciones futuras.

Los embalses “fuera del cauce” cuentan con una vida útil mucho más larga que los embalses convencionales, por lo que representan una fuente de abasto de agua sustentable.

Las represas representan el mayor impacto que la sociedad puede ejercer sobre un río y al mismo tiempo son necesarias. Su uso principal en Puerto Rico es para el abasto de agua municipal. Otros usos incluyen el riego, generación de energía y control de inundaciones.

Las represas atrapan casi la totalidad de los sedimentos llevados por los ríos. Esto resulta en la acumulación de un volumen masivo de sedimentos y en la pérdida de su capacidad para almacenar agua. Hay muy pocas alternativas para la remoción y disposición de grandes volúmenes de sedimentos. Por esta razón no se considera que los embalses representen fuentes renovables de agua, a menos que el problema de la sedimentación esté resuelto a largo plazo.

Para presentar una idea de la magnitud del problema, ya en 1997-98 el Embalse Carraízo había perdido la mitad de su capacidad debido a la sedimentación. Se removieron unos 6 Mm³ de sedimentos del embalse mediante un proyecto de dragado que costó unos \$60 millones (\$10/m³). Los sedimentos fueron depositados en tres áreas de contención aguas arriba del embalse. Para mantener la capacidad del Embalse Carraízo se requerirá repetir el proceso de draga-

do cada 20 años (**Ilustración 9.25**), lo que implica un costo exorbitante.

Además del alto costo del dragado, tampoco hay espacio para depositar los sedimentos sobre el terreno, ya que los terrenos llanos y no inundables están desarrollados. Disponer en el mar unos 15 km aguas abajo de la represa es una alternativa de muy alto costo económico y con muchas interrogantes ambientales. Este problema

no se limita al Embalse Carraízo; la fuente principal de agua para el Super Acueducto, el Embalse Dos Bocas, también ha perdido la mitad de su capacidad por la sedimentación y otras embalses en Puerto Rico tienen el mismo problema.

Embalses fuera del cauce

Durante la última década se inició la construcción de dos embalses “fuera

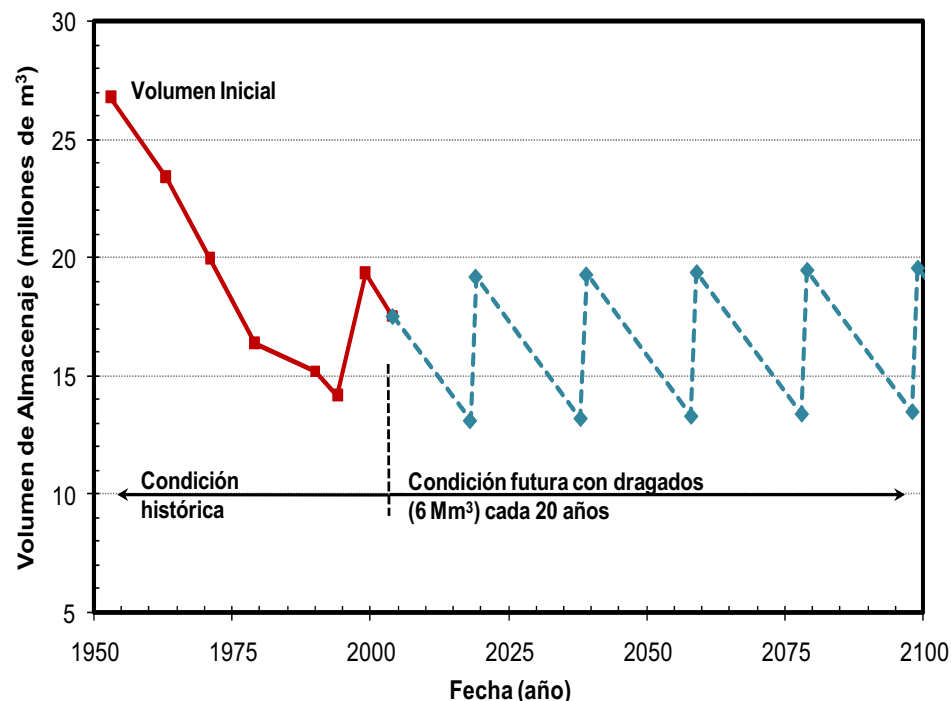


Ilustración 9.25: Proyección de capacidad del Embalse Carraízo, histórica y proyectada, y dragados requeridos para mantener su capacidad.

del cauce” en Puerto Rico, diseñados para reducir la entrada de sedimentos. Las crecidas grandes transportan la mayoría de los sedimentos, pero dado el régimen hidrológico de Puerto Rico y el tamaño de los embalses en la Isla, no es necesaria recolectar el agua de estas crecidas para llenar los embalses. El embalse “fuera del cauce” permite desviar hacia el embalse las aguas con bajas concentraciones de sedimentos mediante una tubería de aducción y previene que toda el agua de la crecida con sus altas concentraciones de sedimentos entren al embalse. La **Ilustración 9.26** compara esquemáticamente los embalses convencionales y los embalses “fuera del cauce”.

La **Tabla 9.1** muestra la tasa de acumulación de sedimentos para algunos embalses en Puerto Rico, es notable la diferencia entre embalses dentro y fuera del cauce. Los embalses fuera del cauce reciben aproximadamente 10 veces menos sedimentos que los embalses convencionales, lo que implica una vida media de sobre 1,000 años. Esto se traduce en dragados en intervalos de siglos en vez de décadas. Los embalses fuera del cauce tampoco representan una barrera a la migración de la especies acuáticas y mantienen el transporte del sedimento grueso a lo largo del río. Por estas razones se considera que los embalses “fuera del cauce” son una fuente sustentable de abasto de agua.

Tabla 9.1: Tasa de Acumulación de Sedimentos en Embalses de Puerto Rico.

Embalse	Rendimiento Seguro (mgd)	Acumulación Anual de Sedimento (m ³ /año)	Carga Anual de Sedimento por 1 mgd de Rendimiento (m ³ /año/mgd)	Años en Perder 50% de su Capacidad
Río Blanco ¹	18	2,770	154	1,000
Beatriz ²	13	12,000	923	300
Guajataca	40	87,042	2,176	280
La Plata	50	197,917	3,958	100
Carraízo	63	307,561	4,882	45
Valenciano	15	79,217	5,281	120
Dos Bocas-Caonillas	100	598,900	5,989	60 ³ 110 ⁴

¹ Embalse fuera del cauce existente

² Embalse fuera del cauce en planificación

³ Embalse Dos Bocas

⁴ Embalse Caonillas

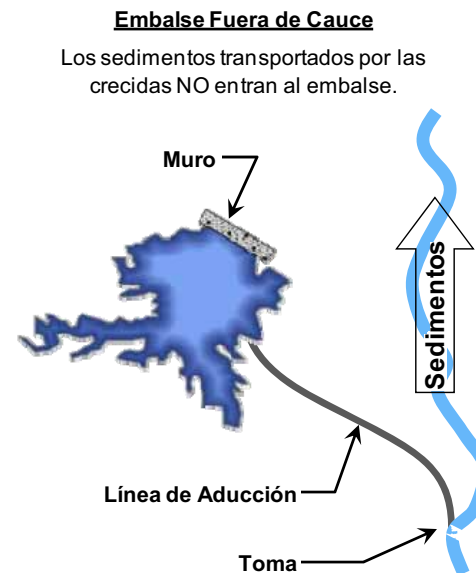
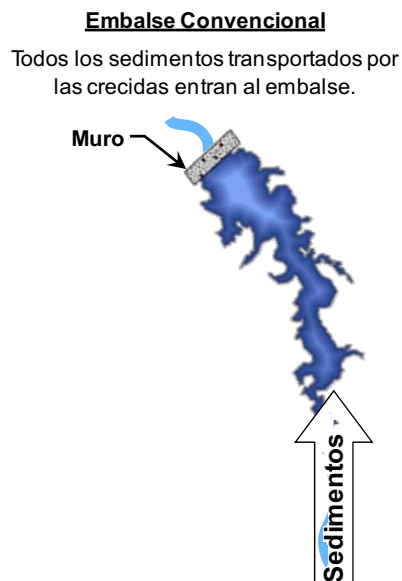


Ilustración 9.26: Comparación de embalses dentro y fuera del cauce.

Tomas

Las tomas deben diseñarse para que cumplan su propósito de una forma efectiva sin afectar los procesos morfológicos y ecológicos de los ríos.

Las tomas de agua son obras que comúnmente consisten en presas pequeñas que cruzan los cauces para recoger agua y dirigirla hacia una tubería de aducción, por gravedad o por bombeo. Los problemas operacionales generalmente asociados con las tomas incluyen: (1) acumulación de sedimentos y escombros transportados por las crecidas, dejando la estructura fuera de funcionamiento hasta que se pueda limpiar el cauce con máquinas, (2) socavación y daño a las estructuras ocasionado por las creci-

das. Desde el punto de vista ambiental los problemas incluyen: (1) las estructuras pueden actuar como una barrera a la migración de las especies acuáticas, (2) no cuentan con los mecanismos necesarios para garantizar un flujo mínimo ambiental aguas abajo y (3) requieren trabajos de mantenimiento con maquinaria pesada dentro del cauce.

Un concepto utilizado recientemente se basa en la ubicación de la toma en la curva de un meandro u otro punto

donde la fuerza del río esté dirigida directamente hacia una ribera con un control estructural. Durante crecidas, este flujo ocasiona la socavación del lecho del río. Esto mantiene el área frente a la toma libre de sedimentos y minimiza la acumulación de materiales arrastrados por el río. Este concepto se presenta en la **Ilustración 9.27** y ha sido aplicado en el Río Fajardo y Río Grande de Loíza (San Lorenzo), la **Ilustración 9.28** muestra una foto de la toma en Río Fajardo.

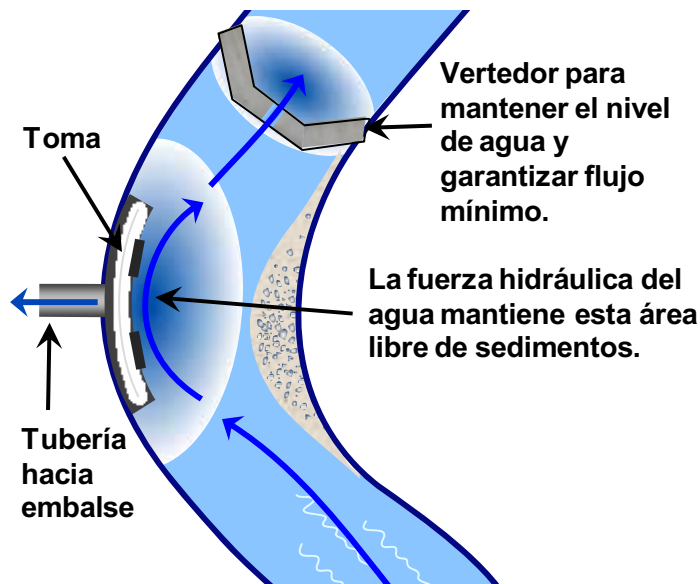


Ilustración 9.27: Configuración de toma en Río Fajardo y Río Grande de Loíza (San Lorenzo).



Ilustración 9.28: Foto de la toma en Río Fajardo, 2009.

Protección de la zona de cauce mayor

Hay una percepción errónea de que un río consiste sólo del cauce, cuando en realidad consiste del cauce más su planicie inundable; ambos son esenciales en el funcionamiento hidráulico de un río. El término “cauce mayor” refiere a la combinación del cauce más aquella porción de la planicie inundable cuya combinación provea la mayor parte de la capacidad hidráulica. Los límites del cauce mayor se definen mediante modelación hidráulica en base a producir un incremento limitado en el nivel de inundación base (**Ilustración 8.3**). La zonificación de áreas inundables se ha enfocado en mantener la combinación de cauce y planicie inundable libre de obstrucciones con el fin de prevenir estructuras en esta zona.

FEMA y la Junta de Planificación han publicado mapas de zonas inundables en los que se delimita el cauce mayor de los ríos principales de Puerto Rico. El Reglamento #13 de la Junta de Planificación prohíbe la ubicación de relleno en el cauce mayor, excepto que se demuestre con un estudio H/H que no se reducirá la capacidad hidráulica. Sólo se permiten obras cuya construcción sea necesaria, por ejemplo estaciones de bombeo, o que no tengan ningún impacto adverso sobre las inundaciones, por ejemplo facilidades agrícolas y ciertas facilidades recreativas.

En Puerto Rico existe un problema significativo relacionado al relleno ilegal en los cauces mayores de los ríos. En algunos casos los dueños ubican relleno sin permiso clandestinamente para habilitar su terreno. Luego de varios años preparan un estudio topográfico demostrando que el terreno es superior al nivel de inundación y solicitan un cambio de zonificación de área inundable para facilitar su desarrollo. Otro problema que ocurre comúnmente es el impacto acumulativo de muchos rellenos pequeños, particularmente en áreas rurales y comunidades de bajos ingresos.

Históricamente muchas de las comunidades de bajos recursos se han desarrollado en zonas inundables, incluyendo áreas donde ni existe la posibilidad de eliminar las inundaciones por métodos estructurales. Con el paso del tiempo se hacen mejoras sustanciales a las residencias y la comunidad sigue expandiéndose, algo que está expresamente prohibido por las reglamentaciones de la Junta de Planificación y de FEMA, lo que aumenta los daños por inundación.

Hay que reconocer que la reglamentación sobre áreas inundables fue creada para proveer un nivel de protección adecuado a la sociedad. La otorgación de servicios gubernamentales, incluyendo energía eléctrica y agua

potable, a las construcciones nuevas y mejoras en estas comunidades sólo empeoran el problema.

Toda la gente, sin importar su nivel social, merece vivir en una zona donde no halla un riesgo de inundabilidad. El gobierno tiene que aplicar la reglamentación de zonas inundables por igual a todas las comunidades, porque de lo contrario siempre se va a tener el problema en el que algunas comunidades (comúnmente de bajos recursos) se vean afectadas por problemas de inundaciones.

Página Intencionalmente en Blanco

Capítulo 10

Problemas de manejo



Contenido

1. Río Inabón
2. Río Sabana
3. Río Mameyes

Introducción

Esta sección presenta en detalle varios ejemplos de intervenciones en ríos de Puerto Rico y sus consecuencias. Las intervenciones han sido realizadas por múltiples partes, tanto entidades públicas como privadas. Cada una de estas intervenciones va dirigida a resolver un problema particular enfocándose en elementos específicos del río, pero las soluciones no funcionan según vislumbrado o crean problemas adicionales. Esto refleja la falta de entendimiento y de enfoque sobre el manejo del río como el sistema integrado que es.

Río Inabón

El Río Inabón está localizado en la colindancia entre los municipios de Ponce y Juana Díaz. Hace más de diez años se reemplazó un puente vado que cruzaba el Río Inabón unos 75 metros aguas abajo de la PR-52 (**Ilustración 10.1**). La **Ilustración 10.2** muestra la condición inicial en el Río Inabón. El puente vado funcionó como un punto de control de nivel del río, pero fue reemplazado por un

puente convencional. Al remover el puente vado el río comenzó un proceso acelerado de atrincheramiento aguas arriba (“head cutting”). El atrincheramiento afectó las pilastras del puente de la PR-52, por lo que la Autoridad de Carreteras instaló gaviones en todo el lecho del río a un costo de \$2 millones (**Ilustración 10.3**). En poco tiempo el río se llevó los gaviones y el problema de atrincheramiento

se agravó. Las **Ilustraciones 10.4, 10.5 y 10.6** muestran el salto de agua producido por la pared de gaviones aún sin fallar, las pilastras expuestas del puente de la PR-52 y el remanente de los gaviones encima.

Como nueva alternativa, la Autoridad de Carreteras relleno el lecho del río con piedras. Las piedras utilizadas no contaban con el tamaño adecuado, por lo que en la próxima crecida fue-



Ilustración 10.1: Localización del tramo de estudio del Río Inabón.

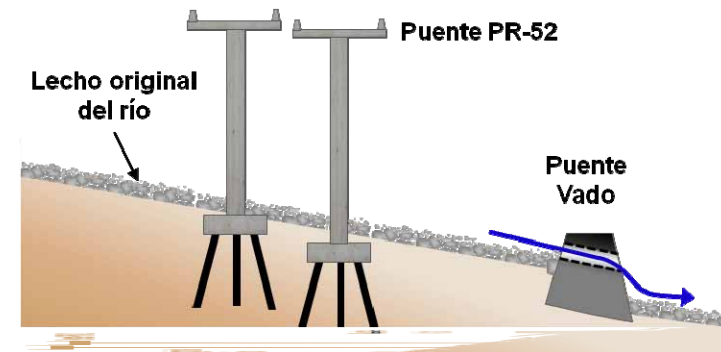


Ilustración 10.2: Condición inicial del Río Inabón.

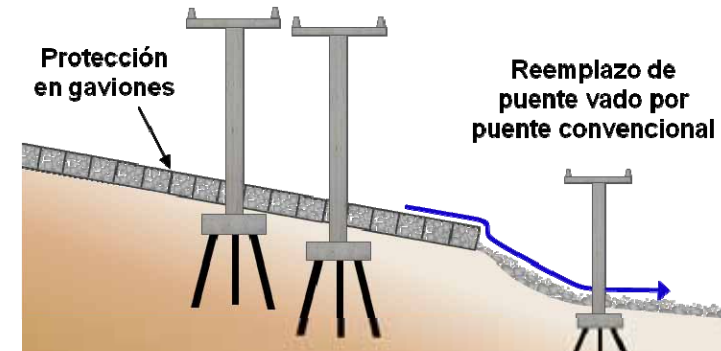


Ilustración 10.3: Instalación de gaviones para protección de pilastras del puente de la PR-52.

ron arrastradas más de 1 km aguas abajo (**Ilustración 10.7**). Este atrincheramiento acelerado también ha ocasionado el colapso de uno de los estribos del nuevo puente (**Ilustración 10.8**).

Luego, se otorgó un permiso de extracción de corteza terrestre aguas debajo de esta zona, que agravó aún más el atrincheramiento.

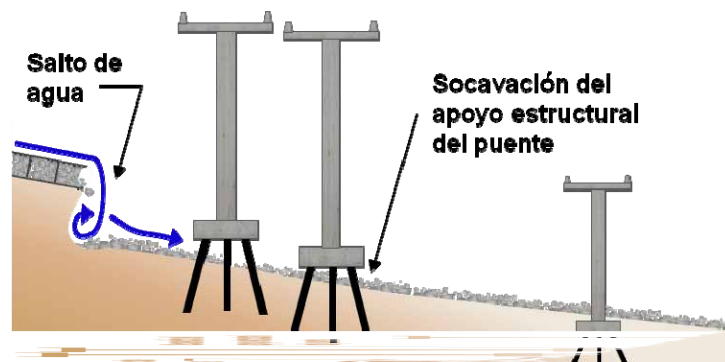


Ilustración 10.4: Salto de agua y falla de gaviones.



Ilustración 10.5: Salto de agua producido por la falla de gaviones.

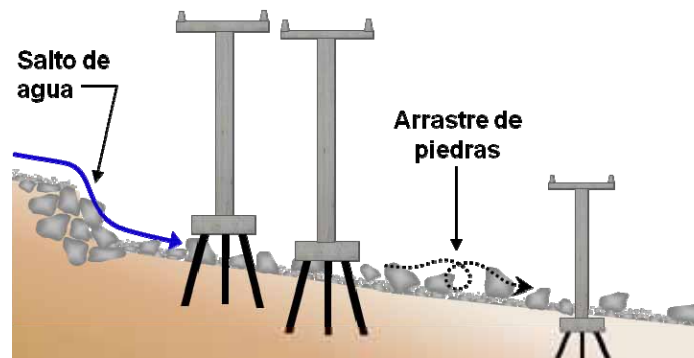


Ilustración 10.7: Piedras utilizadas para control de atrincheramiento fueron arrastradas por el río.



Ilustración 10.6: Falla de gaviones y pilastras expuestas del puente de la PR-52 en Río Inabón.



Ilustración 10.8: Colapso de estribo por atrincheramiento del lecho (2008).

Río Sabana

El tramo estudiado del Río Sabana está localizado en el municipio de Luquillo al sur de la PR-3 (**Ilustración 10.9**). La migración lateral en esta zona se debe en gran medida a que el río está sobre depósitos aluviales. La **Ilustración 10.9** también muestra la alineación histórica del Río Sabana. La alineación original que se presenta es para el año 1931, la que le sigue en secuencia es para 1981. En esta se puede apreciar como se rellenó y realineó el río para la construcción de la Urbanización Alamar. Las últimas dos alineaciones presentadas, 2002 y 2007, muestran como el río ha ido migrando lateralmente a su posición original. En adición, el problema se ha agravado por la colocación de un relleno en el lado opuesto del río que ha provocado la reducción en el área de flujo. Como resultado el río está atacando la urbanización y ha provocado la destrucción parcial de varias viviendas según se muestra en la **Ilustración 10.10**.

Esto es un problema actual que aún no ha sido resuelto y la solución propuesta es un muro en gaviones a un costo de \$2 millones, lo que no es una solución sustentable.

Este ejemplo muestra que el método de determinar el cauce mayor del río en base a la hidráulica, para determinar los límites del relleno permisible,

no ofrece ninguna garantía con respecto a los riesgos geomórficos que

pueden estar asociados con el movimiento de los meandros.



Ilustración 10.9: Localización del tramo de estudio en Río Sabana y su alineación histórica.



Ilustración 10.10: Vivienda de la Urbanización Alamar afectada por la migración del meandro.

Río Mameyes



Ilustración 10.11: Localización del talud erosionado.



Ilustración 10.12: Erosión de talud en Río Mameyes luego del Huracán Georges, septiembre 1998.

La serie de fotos presentada en esta sección ilustra el proceso de deterioro de la instalación de gaviones en la carretera PR-191, km 2.0 al sur de su intersección con la PR-3. En la **Ilustración 10.11** se puede apreciar el meandro del río y la zona de socavación aguas abajo de los gaviones.

Las inundaciones del huracán Georges ocasionaron la socavación de la ribera y el colapso de un tramo de la carretera PR-191 en Río Grande. La fuerza hidráulica produjo una socavación de aproximadamente 8 a 10 pies de profundidad (**Ilustración 10.12**).

La solución fue restablecer el talud de la carretera utilizando gaviones. La **Ilustración 10.13** muestra los trabajos finalizados en el año 2000. El diseño consistió de un colchón de gaviones que se extendía sobre el fondo del río. En teoría, se esperaba que el colchón deflexionara con la socavación y que continuara protegiendo el talud.

La protección de gaviones se deterioró en tan sólo 4 años (**Ilustración 10.14 y 10.15**). No sólo se deterioraron los gaviones, sino que también el meandro se ha movido aguas abajo y de esta manera ha socavado el área no protegida. Esta erosión fue causada por la aceleración del flujo producida por la poca resistencia que ejerce la superficie del muro y la tendencia

natural para el meandro migrar en la dirección aguas abajo.

La condición en el año 2008 (**Ilustración 10.16**) señala que el pie del muro de gaviones ha sido socavado unos 8 pies de profundidad (ver la mano extendida de la persona que está parada sobre el fondo del río). Toda la protección de gaviones por debajo del nivel del agua ya ha sido removida por el río. Durante el próximo evento, el talud está expuesto a un fallo catastrófico debido a la socavación y el colapso de la ribera.

Esta secuencia de la construcción y deterioro de gaviones es un patrón típico que indica claramente que los gaviones no representan una manera sustentable para atender los problemas de erosión en las riberas de los ríos. También ilustra el problema de instalar un parcho de protección, sin dar atención a la tendencia natural del meandro en trasladarse en dirección aguas abajo.

Para este lugar, una mejor opción hubiese sido la construcción de guías de roca para reorientar el flujo con dos propósitos, proteger la ribera y controlar el flujo para minimizar la tendencia del meandro de trasladarse aguas abajo y erosionar la ribera no protegida.



Ilustración 10.13: Gaviones instalados para protección de talud en Río Mameyes, junio 2000.



Ilustración 10.15: Falla de gaviones por fuerza hidráulica (2004).



Ilustración 10.14: Límite aguas debajo de la instalación de los gaviones, señalando la erosión adicional (2004).



Ilustración 10.16: Mismo lugar de la ilustración 10.13, ocho años después (2008).

Página Intencionalmente en Blanco

Referencias

Giusti, E.V., and Bennet, G.D. 1976. 'Water Resources of the North Coast Limestone Area Puerto Rico'. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations. San Juan, Puerto Rico.

Interagency Committee on Water Data (IACWD), 1982. Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin No. 17B, Hydrology Subcommittee, Washington, D.C.

Maidment, D.R. 1993. "Handbook of Hydrology". McGraw-Hill, Inc. New York.

Morris, G.L. and Fan, J. 1998. "Reservoir Sedimentation Handbook". McGraw-Hill, New York.

Morris, G.L. 2009. "Minimum Instream Flow Methodology at Ungaged Stream Sites in Puerto Rico". Water Plan Office, Department of Natural and Environmental Resources of Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.

NOAA. 2006. "Precipitation-Frequency Atlas of the United States." National Oceanic and Atmospheric Administration Atlas 14, Washington DC.

Puerto Rico Planning Board, 1975. "Normas de Diseño para Sistemas de Alcantarillado Pluvial". San Juan PR.

Renken, R.A. 2000. "Geology and Hydrogeology of the Caribbean Islands Aquifer System of the Commonwealth of Puerto and U.S. Virgin Islands". U.S. Geological Survey Professional Paper 1419. San Juan, Puerto Rico.

Rosgen, D.L. 1994. "A classification of Natural Rivers". Catena, Vol 22: 169-199. Elsevier Science, B.V. Amsterdam.

Rosgen, D.L. 1996. "Applied River Morphology, Second Edition". Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado.

Rubey, W.R. 1931. "Settling Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles." American J. Science.

US Department of Commerce. 1961. "Technical Paper #42". Washington DC.