

PROBLEMÁTICA DE LA SEDIMENTACIÓN DEL EMBALSE DE VALDESIA, REPÚBLICA DOMINICANA

Oscar Jiménez Ramírez (*) y Hector Daniel Farias (**)

(*) Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica, e-mail: ojimenezr@ice.go.cr

(**) Instituto de Recursos Hídricos, Univ. Nacional Santiago del Estero (IRHi-FCEyT-UNSE), e-mail: hfarias@bigfoot.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis de los procesos de sedimentación en un embalse situado en una cuenca afectada por un régimen hidrológico tropical, en la que la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, fundamentalmente huracanes, produce efectos de gran magnitud en lo que respecta a la producción de sedimentos y en consecuencia su incidencia en la sedimentación en embalses resulta significativa. El embalse de Valdesia, situado en la cuenca del Río Nizao en la República Dominicana, ilustra esta situación de manera dramática. El análisis de la problemática se ve fuertemente influenciado por la falta de información detallada relativa a la producción de sedimentos, ya que con los datos de batimetrías es posible calibrar modelos de producción de sedimentos, y también resulta aconsejable recurrir a la aplicación de técnicas sencillas para la predicción del comportamiento de embalses en esas circunstancias.

ABSTRACT

This paper presents the analysis of the sedimentation processes in a watershed affected by a tropical hydrologic regime, in which the occurrence of extreme events, mainly hurricanes, produces very significant sediment yields. The Valdesia reservoir, located in the Nizao watershed, Dominican Republic, shows this situation in a dramatic way. The analysis of the problem is strongly influenced by the lack of detailed sediment yield information. In fact, the bathymetric surveys are used for calibrating sediment yield models. Also, it is desirable to apply simple techniques (e.g., based on sediment budgets) for the prediction of reservoir behavior under these conditions.

INTRODUCCIÓN

La presa de Valdesia permite el almacenamiento y desvío de las aguas del río Nizao para su aprovechamiento por medio de: una central hidroeléctrica (54 MW); un acueducto que surte aproximadamente un 40% de las necesidades del acueducto metropolitano de Santo Domingo (6.25 m³/s); y un sistema de riego a partir del desfogue de las aguas turbinadas en el contraembalse de Las Barías.

Una batimetría realizada luego de la ocurrencia de huracanes David y Federico en 1979 mostró que se habían depositado unos 33 Mm³ desde la puesta en marcha del proyecto en el año 1976, lo que representa cerca de un 18% del volumen original de poco más de 185 Mm³. Entre otros daños, estos eventos colmataron las dos descargas de fondo de 1.3 m de diámetro cada una.

En los años siguientes la Corporación Dominicana de Energía (CDE), propietaria de la obra, se abocó a buscar una solución al problema, para lo cual en el año 1984 se firmó un contrato con la empresa italiana Geolidro para el suministro de una draga especialmente diseñada para la situación de Valdesia, que funciona mediante un sistema de sifonamiento que se basa en aprovechar la columna de agua presente en el embalse para producir la descarga de los sedimentos. Está draga finalmente comenzó a operar en 1988, y funcionó de forma sostenida

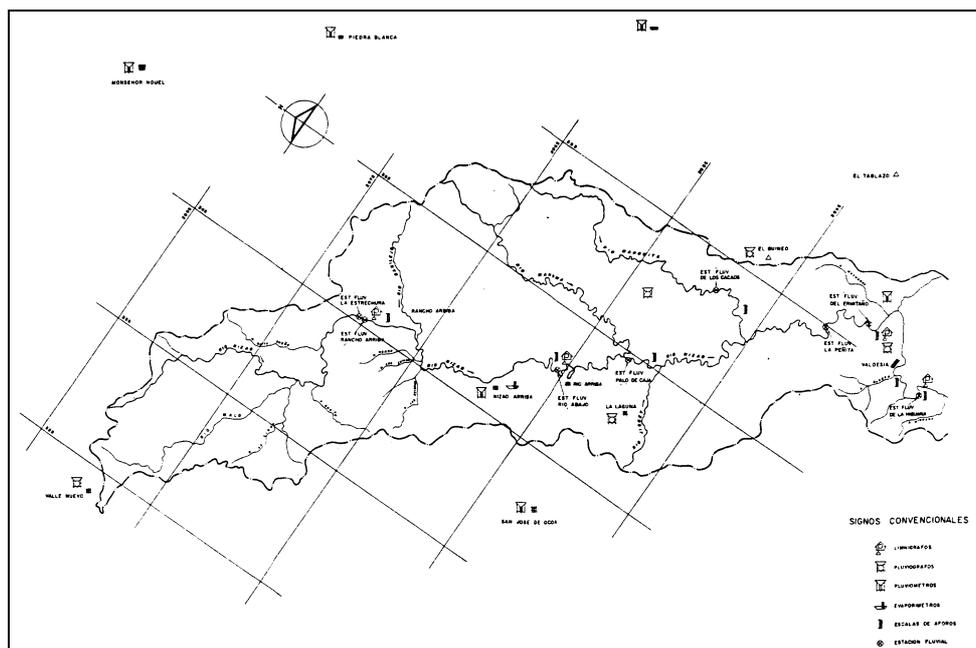
por unos cuatro años, logrando limpiar de sedimentos una zona de unos 200 a 300 m desde la cortina. Desde entonces, el alto nivel del embalse así como algunos daños menores y falta de algunos repuestos ha impedido que esta máquina continúe su trabajo.

En el año 1992 iniciaron operación las centrales de Jigüey y Aguacate, ubicadas aguas arriba de Valdesia. Particularmente la primera, cuenta con un embalse a la fecha de su inauguración, de 167 Mm^3 , aportados por una cuenca tributaria que representa el 60% de la cuenca hasta Valdesia (Fig. 1). Presumiblemente, como se discute en este estudio, estas nuevas obras han reducido el ingreso de sedimentos al embalse de Valdesia a un 30% del valor original.

Los sedimentos, cuyo volumen actual es del orden de los 50 Mm^3 , ocupan un alto porcentaje de la capacidad muerta del embalse de Valdesia y una proporción importante de la capacidad útil. Una de las tomas del acueducto, se encuentra a tan sólo 9 m de ser alcanzada por el nivel de sedimentos.

Por lo tanto, en este momento, la condición del sistema es delicada, pues de mantenerse la tendencia, sobre todo en caso de un nuevo huracán o evento hidro-meteorológico extremo, es posible que el embalse se colmate en una fracción significativa de su capacidad útil de sedimentos o por lo menos obstruya las tomas del acueducto y de la central hidroeléctrica.

El caso de Valdesia es de interés para los estudiosos del tema de la sedimentación de embalses, pues evidencia el gravísimo problema de la sedimentación en países expuestos a eventos hidrológicos extremos, tal como los huracanes en la República Dominicana.



ASPECTOS HIDROLÓGICOS Y SEDIMENTOLÓGICOS

Información existente

La estimación de la producción de sedimentos de una cuenca o conjunto de micro-cuencas puede realizarse a partir de la aplicación de técnicas empíricas que se basan en una serie de parámetros que dependen las características fisiográficas de las cuencas y de los aspectos climáticos e hidro-meteorológicos de la región en donde se emplazan. Asimismo, las tasas de materiales sólidos que ingresan a los ríos y que pueden ser transportados por los mismos pueden evaluarse a partir de varios años de estadísticas de caudales líquidos y medición de sedimentos en suspensión y arrastre de fondo en estaciones hidrométricas y sedimentométricas. A partir de esta información sería posible establecer relaciones funcionales entre caudales líquidos y sólidos que permitirían generar estimaciones de los volúmenes totales por unidad de tiempo de los sedimentos transportados. Esta información, en conjunto con las características de los embalses y la granulometría de los sedimentos, finalmente permitiría estimar la cantidad de sedimentos que se depositarán en los vasos de almacenamiento durante intervalos de tiempo establecidos, generalmente asociados a la vida útil de las obras hidráulicas.

Desafortunadamente, y esta es una situación típica en los países en vías de desarrollo, no existen mediciones sistemáticas de los parámetros antes mencionados por parte de los organismos públicos y/o privados encargados de recolectar información básica de los sistemas hidráulicos. En ese caso se hace necesario recurrir a técnicas empíricas estimativas para la valoración cuantitativa de la producción de sedimentos en cuencas, transporte de material sólido a través de los cauces y deposición en cuerpos de agua.

Por otra parte, existen algunas experiencias muy particulares sobre estudios de erosión en parcelas, tales como las realizadas por Nagle (2000). Sin embargo, estos resultados no se pueden extrapolar al nivel de cuenca, en la cual, movimientos en masa resultantes de inestabilidad de laderas, de construcción de caminos, y otras tipologías de erosión parecerían tener mucha más importancia en la producción total de sedimentos (Nagle, 2000).

Prácticamente la única información de mediciones sedimentológicas con que se cuenta es la correspondiente a una serie de relevamientos batimétricos realizados en el embalse de Valdesia, en los años 1979, 1981, 1991 y en el año 2000. Sobre esta última batimetría sólo se cuenta con información parcial.

Estas valiosas mediciones han permitido determinar que existe una alta tasa de sedimentación en la cuenca del Nizao y en general en muchas otras de las cuencas del país en las que existen embalses. Ello es consecuencia de las pronunciadas pendientes de las cuencas y sus interfluvios, el terreno geológicamente inestable, y las elevadas precipitaciones (tanto en monto como en intensidad) que ocurren durante eventos extremos (léase tormentas tropicales y huracanes). Inclusive, investigadores como Nagle (2000) cuestionan los limitados efectos que ante esta situación pueden tener los esfuerzos de controlar las fuentes agrícolas de la sedimentación, siendo que las fuentes principales son de origen natural o están asociadas a la construcción de caminos.

Las primeras mediciones de sedimentos en República Dominicana fueron realizadas a raíz del paso de los Huracanes David y Federico en 1979. Para ello, la Dirección de Desarrollo

Hidroeléctrico de la CDE de entonces, contrató al asesor norteamericano José Lara, bajo cuya guía se adquirieron los equipos de ecosonda y se estableció la metodología para llevar a cabo las mediciones.

Así, las primeras mediciones de batimetría del embalse de Valdesia fueron realizadas en diciembre de 1979, seguido por mediciones en los embalses de Tavera, Rincón, Sabaneta y Sabana Yegua.

En cuanto a Valdesia, fueron realizados levantamientos posteriores en 1982, 1991 y en el año 2000. Sobre esta última, el levantamiento sólo se realizó en una parte del embalse, y los datos no están disponibles por no haber sido procesados.

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos hasta el momento en las diferentes presas del país. Según esta tabla, el embalse más afectado es el de Valdesia, con una disminución de su volumen total del 26% (hasta 1991), seguido de Tavera con un 21% y Rincón con un 17%. Estos embalses tienen respectivamente 26, 9 y 24 años de operación, y se puede apreciar la magnitud del problema, toda vez que en casi todos los casos ha empezado a manifestarse la amenaza de obstrucciones en tomas de riego, generación y de agua potable (Fig. 2). Un caso especialmente dramático no consignado en la Tabla 1 es el de la presa del Río Blanco, cuyo embalse está sedimentado en un 75% (INDRHI-CDE-MdG, 2001).

Tabla 1.- Capacidad Actual de Embalses, Rep. Dominicana (fuente: INDRHI)

EMBALSE	AÑO INICIO OPERACIÓN	CAPACIDAD INICIAL Mm ³			CAPACIDA ACTUAL Mm ³			FECHA ULTIMA BATIME.	VOL. SED. ACUMUL. Mm ³	PORCENTAJE DE DISMINUCION		
		Util	Muerto	Total	Util	Muerta	Total			Util	Muerto	Total
TAVERA	1973	165	8	173	137	0	137	Feb-93	36	17%	100%	21%
VALDESIA	1976	130	56	186	116	22	137.5	Dic-91	49	11%	60%	26%
RINCON	1978	58	16	75	49	11	60	Dic-93	14	15%	34%	19%
SABANA Y.	1979	447	33	480	404	18	422	Dic-92	58	10%	45%	12%
SABANETA	1980	66	11	77	59	5	63	May-99	13	11%	58%	18%
HATILLO	1980	416	25	441	353	22	375	Abr-94	66	15%	10%	15%
BAO	1980	129	115	244	87	64	151	Mar-93	93	33%	44%	38%
JIGUEY	1992	131	36	167				nunca				
AGUACATE	1992	1.5	2.8	4.3			Muy Reducida	nunca			Tal vez 50%	

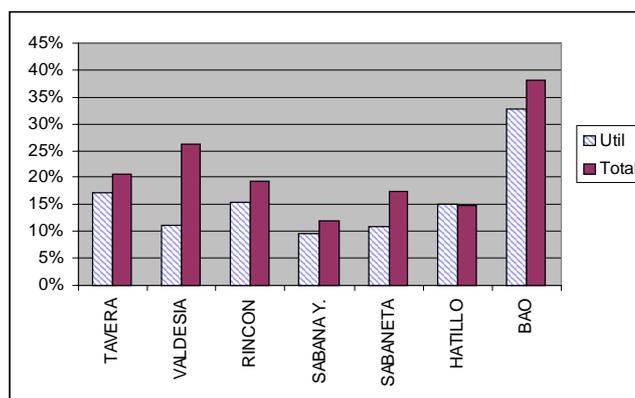


Figura 2.- Porcentaje de Pérdida de Capacidad de Embalse

En todos los casos, las tasas de pérdida del volumen están entre un 1 y un 2% anual, e indican un alto grado de erosión en las cuencas asociado a una utilización inadecuada de la tierra y de los recursos naturales. Esto concuerda con las condiciones adversas relativas a la sedimentación: pendientes altas, escasa cobertura vegetal y precipitaciones intensas en eventos

extremos. A partir de las mediciones batimétricas, se han realizado estimaciones de las producciones específicas de sedimentos en los embalses más importantes de la República Dominicana (Tabla 2).

Tabla2.- Producciones Específicas con base en Sedimentos Acumulados en Embalses (fuente: INDRHI y propia)

EMBALSE	AÑO INICIO OPERACIÓN	AREA CUENCA (km ²)	VOLUMEN ACUMULADO mill m ³	FECHA ULTIMA BATIME.	AÑOS HASTA BATIME.	DESCARGA UNITARIA (m ³ /km ² /año)
TAVERA	1973	785	36	Feb-93	20	2287
VALDESIA	1976	887	49	Dic-91	16	3417
RINCON	1978	178	14	Dic-93	16	5056
SABANA Y.	1979	1676	58	Dic-92	13	2644
SABANETA	1980	464	13	May-99	19	1520
HATILLO	1980	1190	66	Abr-94	14	3944
BAO	1980	887	93	Mar-93	13	8091
JIGUEY	1992	537	ND	--		
AGUACATE	1992	747	ND	--		

Nota: Resultados para Bao no son confiables pues existen dudas sobre volumen inicial.

Sin contar el caso de Bao, sobre el cual existen dudas, estos resultados muestran tasas de producción específica de entre 1500 y 5000 m³/km²/año. Estos valores son muy altos, y las evidencias apuntan a que son el resultado de eventos extraordinarios de precipitación, más que de las tormentas normales (Abt Assoc. Inc., 2002).

Es interesante comparar los resultados anteriores con los valores que se supusieron al nivel de proyecto, según se reporta en INITEC (1985) y se muestra en la Tabla 3. Se observa como las producciones específicas han resultado entre 2 y 10 veces mayores que esas estimaciones.

Tabla 3.- Degradación específica en cuencas de la República Dominicana
Estimaciones de la degradación específica en cuencas de la República Dominicana

Cuenca	Estudio	E _{sv} [m ³ /km ² /año]	Metodología Empleada
Yaque del Norte en Tavera	SOGREAH	734	Fórmula de Fournier
Yaque del Norte en Tavera	Lahmeyer	725	Mediciones en Santiago (Ing. Luna)
Yaque del Norte en Tavera	De La Cruz y Duverge	148	Modelo estadístico a partir de varias muestras
Yaque del Norte en Tavera	Mendar	534	Extrapolación de datos de Puerto Rico
Yaque del Norte en Tavera	DeLong	128	Serie corta de muestras
Nizao	Mendar	169	???
San Juan	ItalConsult	984	Comparacion de erosión en cuencas europeas y de Puerto Rico
Yaque del Sur en Sabana Yegua	ItalConsult	561	Fórmula de Fournier

Con respecto a la cuenca del Nizao, resulta interesante observar los módulos de producción de sedimentos por sub-cuenca obtenidos mediante la aplicación del modelo SWAT (Abt Assoc. Inc., 2002), que se presenta en Tabla 4 y la Fig. 3. Puede apreciarse que las sub-cuencas más productoras por unidad de área corresponden a Arroyo Jigüey y Alto Nizao, y en menor medida, Río Mahoma y Arroyo Cazuela. En términos absolutos, las sub-cuencas que más contribuyen son la del Alto Nizao 1 (25%), el Mahoma (15%) y el Mahomita (14%). Estos resultados están indicando a priori las cuencas que habría que tener en cuenta para la implementación de medidas de control de la degradación.

Tabla 4.- Módulos de Producción de Sedimentos por Sub-cuenca

Número	Sub-Cuenca	Area (km ²)			%	Produc. ton/km ²
		Jigüey	Aguacate	Valdesia	Area	
1	Río Malo	80.5	80.5	80.5	9.3%	959
2	Alto Nizao	130.7	130.7	130.7	15.1%	4,099
3	Río Banilejo	58.1	58.1	58.1	6.7%	2,301
4	Alto Nizao	93.9	93.9	93.9	10.8%	2,409
5	Arroyo Cazuela	29	29	29	3.3%	3,438
6	Arroyo La Cienega	14.7	14.7	14.7	1.7%	2,020
7	Cuenca Jigüey	40.5	40.5	40.5	4.7%	924
8	Río Mahoma	93.7	93.7	93.7	10.8%	3,223
9	Arroyo Jigüey		40	40	4.6%	4,898
10	Cuenca Aguacate		65.1	65.1	7.5%	1,642
11	Río Mahomita		105.3	105.3	12.1%	2,703
12	Cuenca Valdesia			116.7	13.4%	935
	Total	541.1	751.5	868.2	100.0%	2,463

Fuente: Abt Assoc. Inc., 2002

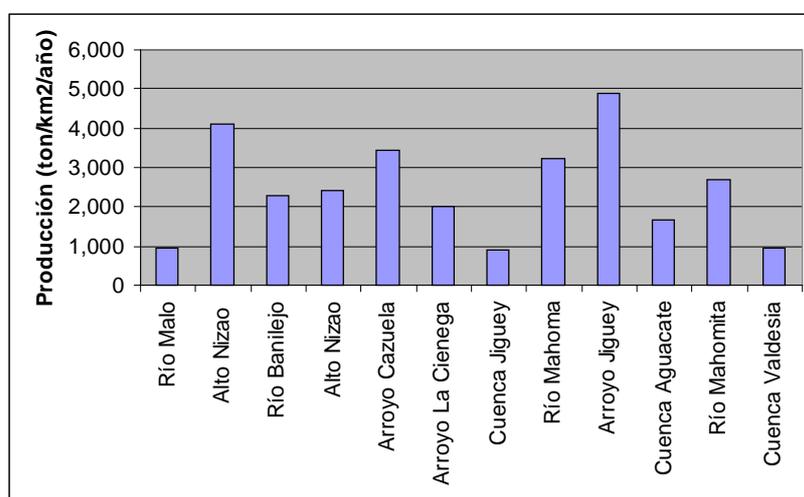


Figura 3.- Producción específica por sub-cuencas (fuente: Abt Assoc. Inc., 2002)

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

En la cuenca del Río Nizao existen tres regulaciones de importancia que son los embalses de Jigüey, Aguacate y Valdesia. La finalidad principal de los dos primeros es la producción de energía hidroeléctrica, mientras que el último también se utiliza para provisión de agua potable a núcleos urbanos y abastecimiento a sistemas de riego. Adicionalmente, aguas abajo del embalse de Valdesia se localiza el contraembalse Las Barias, que actúa como un embalse compensador de las descargas de Valdesia.

Los embalses de Jigüey y Aguacate fueron construidos en el año 1992 y tienen áreas de aporte de 541 km² y 751 km², respectivamente. La presa del embalse de Jigüey se sitúa aguas abajo de la confluencia de los ríos Nizao y Mahoma, mientras que el sitio de cierre en el que se emplaza la presa de Aguacate se ubica aguas abajo de la confluencia de los ríos Nizao y Mahomita.

Aguas abajo del embalse de Aguacate se ubica el embalse de Valdesia con un área tributaria de 868 km². Este embalse fue construido en el año 1975, mientras que en el año 1976 se terminó

la construcción del embalse compensador Las Barías ubicado a escasos kilómetros aguas abajo de Valdesia.

Teniendo en cuenta los antecedentes documentales (e.g., Espinal 1991), tres levantamientos batimétricos del embalse Valdesia - realizados en los años 1979, 1981 y 1991- han revelado el gran problema de producción de sedimentos que tiene esta cuenca. La dinámica de la deposición de estos volúmenes de sedimentos en el vaso del embalse, se ilustra a través de los resultados de estos levantamientos batimétricos, los cuales se resumen en la Tabla 5 (Abt, 2001).

Tabla 5.- Acumulación de sedimentos en el embalse de Valdesia
(de Espinal 1981,1991, citado por Abt 2001)

Año	Volumen acumulado [Mm³]
1975	0.00
1979	29.40
1981	32.90
1991	48.52

Si se considera el último valor del volumen de material sólido depositado, se puede observar que un área de drenaje de 868 km² ha generado un volumen de sedimentos de 48.52 Mm³ durante dieciséis años de operación del embalse de Valdesia (entre los años 1976 y 1991), lo cual implica una tasa específica unitaria de producción de sedimentos del orden de los 3500 m³/Km²/año. Podría decirse en primera instancia que este es un valor típico de cuencas altamente antropizadas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que durante ese lapso (1976-1991) la cuenca del río Nizao sufrió los efectos del Huracán David (Agosto 1979) y la Tormenta Tropical Federico (Septiembre 1979). El relevamiento batimétrico de 1979 (ejecutado durante el mes de diciembre) se realizó inmediatamente a posteriori de la ocurrencia de estos eventos tropicales de severa intensidad desde el punto de vista hidrológico.

En términos generales, los procesos de erosión hídrica continua en cauces e interfluvios y los fenómenos de remoción en masa en laderas se magnifican de manera significativa durante la ocurrencia de eventos de precipitación intensos, que generan grandes volúmenes de escorrentía superficial. A través de observaciones realizadas mediante levantamientos batimétricos de vasos de embalses, se ha observado que la pendiente dominante de los volúmenes sedimentados que se producen antes y después de la ocurrencia de un evento extremo (por ejemplo, tormentas monzónicas; Garde y Ranga Raju 1985) es aproximadamente similar.

En un estudio previo (Abt Assoc. Inc., 2001) se adoptó este tipo de comportamiento para la cuenca del río Nizao, encontrándose que la dinámica de la acumulación de sedimentos en el embalse de Valdesia debería haber sido similar a la que se ilustra en la Figura 4, la cual fue elaborada utilizando como base la información contenida en la tabla anterior (relevamientos batimétricos), y un volumen de almacenamiento de agua inicial de 186 Mm³ en el embalse Valdesia (a una cota máxima de 150 msnm).

Aceptando esta posible dinámica del azolvamiento del embalse Valdesia, se concluye que durante 15 años de operación (de los dieciséis transcurridos) se produjo un volumen de sedimentos del orden del 49 % del total acumulado, lo cual representa una tasa de 1.594 Mm³/año; mientras que en el año 1979 se produjo un volumen de 24.6 Mm³ (51 % del total y

del orden de quince veces el promedio anual) debido a las tormentas generadas por el paso de los huracanes David y Federico. El efecto de este azolvamiento se refleja en una reducción de más del 25 % de la capacidad de almacenamiento de este embalse.

El análisis descrito en párrafos anteriores refleja la gran complejidad de la producción de sedimentos en la cuenca del río Nizao, la cual se encuentra asociada a la gran varianza climática que es amplificada por el paso de eventos extremos como tormentas tropicales y huracanes.

Generalidades sobre Producción de Sedimentos

Los volúmenes de sedimentos producidos por una cuenca hídrica, y por ende el nivel de degradación o grado de erosión exhibido por la misma, pueden ser evaluados, en forma indirecta, a través de relevamientos topográficos y batimétricos de los vasos de embalses, mediante la utilización de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos de agua o bien mediante la aplicación de técnicas de estimación. Estos relevamientos y mediciones son sumamente importantes en el proceso de validación de distintas metodologías que comúnmente se emplean para estimar la producción de sedimentos en cuencas sin registros. En efecto, no todas las cuencas que componen una región poseen mediciones sistemáticas de caudales sólidos, ni tampoco poseen embalses construidos o, si éstos existen, es probable que no se cuente con una cantidad adecuada de relevamientos batimétricos. Esta situación es típica en países en vías de desarrollo y es el común denominador en la región de Latinoamérica y el Caribe.

Los sedimentos producidos por erosión superficial están asociados principalmente al fenómeno de destrucción del suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia y el posterior transporte por escurrimiento superficial. Se trata de un proceso que presenta una cierta continuidad temporal asociada a eventos hidrológicos ordinarios característicos de la cuenca. Por su parte, los sedimentos producidos por remoción en masa (deslizamientos de laderas, colapso de márgenes, flujos de barro, flujos de detritos, etc.) se vinculan con eventos hidrológicos extremos y no presentan la continuidad temporal de los primeros.

Cabe señalar que, tanto las mediciones sistemáticas de caudales sólidos, como así también los relevamientos batimétricos de los embalses, ambos contemplan en forma agregada los dos tipos de producción de sedimentos mencionados anteriormente.

Procesos de Transporte de Material Sólido

En el caso de cuencas sin aforos de caudales sólidos, como la cuenca del Río Nizao, es necesario recurrir a técnicas indirectas o aproximadas para estimar las potenciales producciones de sedimentos anuales. Las metodologías de estimación indirecta pueden clasificarse en los tipos:

- (1) Empleo de mediciones en cuencas vecinas y aplicación de un criterio regional de transposición de información sedimentológica.
- (2) Estimación de la capacidad total de transporte de sedimentos en una sección idealizada a la salida de la cuenca, mediante la aplicación de fórmulas basadas en las propiedades hidráulicas, geométricas y sedimentológicas del cauce.

- (3) Cálculo estimativo de la producción anual de materiales sólidos de la cuenca, a partir de información hidrológica, geomorfológica, fisiográfica y de uso del suelo en la misma. A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de estos criterios.

Criterio 1. Transposición Regional. En este caso habitualmente se dispone de mediciones de transporte sólido en suspensión (Q_{ss}) practicadas en una sección de un río vecino o bien un sistema fluvial típico de la región. Habitualmente, los valores de transporte medio anual de sedimento suspendido Q_{ss} se expresan en miles de toneladas por año, y expresa la suma de la carga de lavado (material fino proveniente de la cuenca) y material de lecho suspendido.

Con la finalidad de poder establecer una relación funcional de tipo regional, se procura estudiar una posible correlación entre esta magnitud y alguna variable hidrológica relevante. Teniendo en cuenta la información disponible y la compatibilidad en cuando a los períodos de tiempo en que se efectuaron los registros, en la mayoría de los casos se adopta el volumen de escorrentía media anual (ó derrame) V_Q como variable hidrológica característica.

Aparte de las relaciones que pudieran obtenerse para cantidades promediadas anualmente, en el caso particular de cuencas tropicales interesa la obtención de relaciones funcionales entre los valores instantáneos de las variables, en virtud de que para estos sistemas la mayor parte de los sedimentos transportados se produce en eventos de tormentas intensas, a su vez potencializados durante eventos extraordinarios como tormentas tropicales o huracanes. A modo de ejemplo para este patrón de comportamiento, puede citarse el caso de la cuenca del Río Loíza en Puerto Rico, que es una cuenca instrumentada por el USGS y en donde se ha medido en forma continua la carga de sedimentos en suspensión en dos estaciones de aforo emplazadas aguas arriba del Embalse homónimo (Morris y Fan, 1997). El análisis de las series de mediciones del USGS antes de la confluencia de los ríos Gurabo y Loíza, que totaliza un área de drenaje equivalente al 72% del área total de la cuenca en el sitio de embalse, indica que el 65% del sedimento ingresante para el total de la serie de 7 años (1984-1990) fue generado por la contribución de sólo 10 días, mientras que el 17% del total de sedimentos en suspensión transportados ocurrió durante un único evento diario.

Estas altas concentraciones de sedimentos en breves períodos de tiempo es típica de las cuencas tropicales como la del Río Nizao.

Criterio 2. Fórmulas de Transporte en Cauce. En este caso se procede a definir una sección transversal hidráulica típica para caracterizar el punto de interés, es decir, una sección que pueda considerarse representativa del tramo de ingreso al embalse del o los tributarios principales.

Con base a las características de los sedimentos dominantes en el tramo de interés se determinan sus parámetros representativos a partir de la curva granulométrica correspondiente. Para la estimación de las características friccionales del cauce, se considera la tipología del lecho y márgenes del o los tributarios y se aplica alguna técnica hidráulica para establecer la función de descarga o curva h-Q.

Una vez calculadas las características hidráulicas del cauce, se procede a estimar la capacidad de transporte total de material del lecho aplicando un conjunto de formulaciones que se

consideren adecuadas para las condiciones imperantes en el cauce fluvial. La mayor parte de las ecuaciones para cuantificar el transporte total de material de lecho en una corriente fluvial obedecen al formato funcional generalizado siguiente:

$$q_s = \Phi_{qs}(V, R, S, d; g, \rho, \rho_s, \nu, \dots)$$

donde q_s es el transporte volumétrico total de sedimentos por unidad de ancho del cauce, V es la velocidad media del flujo, R el radio hidráulico, d el tamaño medio del sedimento, g la aceleración de la gravedad, ρ la densidad del agua, ρ_s la densidad del sedimento, ν la viscosidad cinemática del agua (Garde y R. Raju, 1985; Julien, 1995; Yang, 1996).

Las fórmulas de transporte total de sedimentos también se pueden expresar en un formato adimensional estandarizado, en el cual las principales variables que gobiernan los procesos físicos involucrados en el movimiento de las partículas sólidas se agrupan en parámetros adimensionales, de los cuales los principales son los siguientes:

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{R \cdot S}{(\rho_s / \rho - 1) \cdot d} = \frac{R \cdot S}{\Delta \cdot d} \quad (\text{tensión de Shields})$$

$$C_* = \frac{V}{U_*} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot R \cdot S}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}} \quad (\text{coeficiente adimensional de Chezy})$$

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{g} \cdot \Delta \cdot d^3} \quad (\text{transporte adimensional de Einstein})$$

En función de las características hidráulicas, sedimentológicas y morfológicas del cauce se pueden escoger las ecuaciones adecuadas para su aplicación, y luego combinar sus predicciones con la curva de descarga, se puede establecer una relación estimativa del tipo $Q_s=f(Q)$.

Criterio 3. Fórmulas de Producción de Sedimentos a nivel de Cuenca. Existen varias formulaciones para estimar la producción de sedimentos por parte de una cuenca hidrológica. Entre ellas, una de las más conocidas es la denominada “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo” ó USLE (por su denominación en inglés) la cual, como indica su nombre, es una formulación que sirve para obtener una cuantificación de la cantidad de suelo superficial que puede ser removido de la cuenca por acción combinada de precipitación y escorrentía. Esta relación ha sido muy difundida por parte del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Julien, 1995) y, a pesar de su denominación de ‘universal’ la misma ha sido probada inicialmente para pequeñas cuencas agrícolas y su aplicación a cuencas naturales de escala importante induce cierto nivel de incertidumbre.

En la misma, la tasa de erosión potencial por unidad de superficie (E_s) se expresa como el producto de seis factores:

$$E_s = F_R F_K F_L F_S F_C F_P$$

donde:

F_R : factor de precipitación pluvial;
 F_K : factor de estabilidad del suelo;
 F_L : factor de longitud del flujo superficial;
 F_S : factor de pendiente de la cuenca;
 F_C : factor de manejo de cultivos;
 F_P : factor de prácticas de conservación.

Existen variantes de esta formulación (e.g., MUSLE, RUSLE; Julien, 1995) de las cuales la que resultaría interesante de comprobar para el caso del Río Nizao es la propuesta por Williams (Abt, 2001) para el análisis de la producción de sedimentos durante eventos hidrológicos de envergadura.

Otra formulación difundida en Europa, fundamentalmente por su efectividad cuando se la ha aplicado a ambientes de cuencas montañosas, es la de Gavrilovic. Esta metodología estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define (Spalletti y Brea, 1998).

Finalmente, existen algunas metodologías que se han originado como una necesidad de estimar la producción de sedimentos de la cuenca para evaluar la posible sedimentación en embalses. Justamente, con esta finalidad se desarrolló la metodología propuesta por Miraki (Garde & R. Raju, 1985), la cual ha sido calibrada con datos observados en 32 embalses cuya colmatación progresiva fue monitoreada conjuntamente con las características físicas e hidrológicas de las cuencas que aportaban su escorrentía a los cuerpos de agua.

De esta manera, puede presentarse una relación funcional general para estimar el volumen total absoluto (V_{sa}) de sólidos producidos por una cuenca en un año en la forma:

$$V_{sa} = \Psi_{V_{sa}} (A_c, P_a, V_Q, S_c, D_d, F_c)$$

En ella:

A_c : área de la cuenca;

P_a : precipitación media anual;

V_Q : derrame medio anual;

S_c : pendiente media de la cuenca;

D_d : densidad de drenaje de la cuenca;

F_c : factor de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca, que adquiere los valores: 0.20 para bosques protegidos y reservas forestales, 0.40 para bosques nativos, 0.60 para áreas agrícolas, 0.80 para pastizales y 1.00 para suelos denudados. F_c se determina ponderando cada una de las sub-áreas de la cuenca en relación al área total.

Aplicando un análisis de regresión múltiple, Miraki propuso la siguiente ecuación:

$$V_{sa} = 1.182 \times 10^{-6} \cdot A_c^{1.026} P_a^{1.289} V_Q^{0.287} S_c^{0.075} D_d^{0.398} F_c^{2.422}$$

En esta ecuación, para obtener V_{sa} en $Mm^3/año$, se deben ingresar A_c en Km^2 , P_a en cm , V_Q en Mm^3 , S_c adimensional, D_d en Km^{-1} y F_c adimensional. En cuando al comportamiento predictivo de la ecuación anterior, se ha reportado que en más del 85% de los casos probados,

las predicciones estuvieron dentro del rango del $\pm 30\%$ de los valores observados, por lo que se estima que su aplicación resulta razonablemente confiable cuando se puede disponer de todos los datos básicos para su aplicación.

En función de los datos usados para su calibración, puede suponerse que esta metodología contempla, además de la parte de la carga de lavado retenida en los embalses, la fracción correspondiente al material de lecho transportado por los cauces a través de la red de drenaje de la cuenca y luego depositados en el lago.

Cuantificación de la Producción de Sedimentos en la cuenca del Nizao

Teniendo en cuenta los aspectos y generalidades antes mencionadas, se investigó la posible estructura matemática de la relación: $Q_{ss} = f(V_Q)$. Graficando estas variables (escala log) podría inferirse que la relación funcional entre Q_{ss} y V_Q tiende a ajustarse a una ecuación de tipo potencial, es decir: $Q_{ss} = a_1 V_Q^{a_2}$, donde a_1 y a_2 son constantes a ser determinadas por regresión.

Con respecto a la disponibilidad de datos a escala regional, y dadas las características climáticas imperantes en el área del Caribe, particularmente las Islas La Hispaniola y Puerto Rico, sólo se dispone de mediciones realizadas durante eventos tropicales importantes en la cuenca del río Loíza en Puerto Rico (Morris y Fan, 1997).

Para la mencionada cuenca, que posee un embalse con serios problemas de colmatación por deposición de sedimentos, se realizaron mediciones en estaciones fluviométricas emplazadas sobre los dos tributarios principales y operadas por el U. S. Geological Survey durante el paso del Huracán Hugo. Los datos reportados por Morris y Fan (1987) indican que para el río Gurabo, para un caudal líquido en el pico del hidrograma de $1612 \text{ m}^3/\text{s}$, se midió una concentración de sólidos en suspensión de 5500 ppm , mientras que para el río Loíza, que soportó un pico de $792 \text{ m}^3/\text{s}$ la concentración máxima observada resultó de 4500 ppm . Teniendo en cuenta el segundo criterio de los antes mencionados, referido a la estimación de la relación $Q_s=f(Q)$ en base al uso de fórmulas para la predicción del transporte sólido en ríos, se encuentra que un gran número de formulaciones para sedimentos de tamaño medio (e.g., Meter-Peter y Muller, Engelund y Hansen, Ackers y White, Brownlie, etc.; Yang, 1996) conduce a relaciones entre caudal sólido y caudal líquido de tipo potencial, es decir:

$$Q_s = a_1 Q^{a_2}$$

Donde a_1 y a_2 son constantes a ser determinadas. Para las formulaciones investigadas se ha encontrado que a_2 depende fundamentalmente de la fórmula escogida y de las características hidráulicas del cauce (especialmente su pendiente) y varía aproximadamente entre 2 y 3, con un valor promedio cercano a 2.5, mientras que la variabilidad de a_1 es mucho más amplia y está fundamentalmente gobernada por las características de la cuenca de drenaje. Adoptando $a_2=2.5$, un cálculo expeditivo conduce a la siguiente ecuación para el caso del río Loíza:

$$C_{ss} = 0.066 Q^{1.5}$$

donde C_{ss} es la concentración del material sólido en suspensión en ppm y Q el caudal líquido en m^3/s .

Ahora bien, desde el punto de vista práctico, conviene disponer de elementos adicionales a fin de poder estimar el caudal sólido total (Q_s), el cual se compone de la carga en suspensión más la carga arrastrada a nivel del lecho fluvial, o carga de fondo Q_{sb} . Es decir, el transporte sólido total se expresa como: $Q_s = Q_{ss} + Q_{sb}$.

Existen en la literatura varios estudios tendientes a proporcionar algunos métodos aproximados de estimación de la carga total a partir de la carga en suspensión. La mayoría de ellos se basa en la introducción de coeficientes empíricos que correlacionan la carga de fondo como una fracción de la carga suspendida, o bien la razón entre la carga en suspensión sobre la carga total, es decir, el factor: $k_{Qs} = Q_{ss}/Q_s$. Garde y Ranga Raju (1985) presentan una tabla (p. 262) en la que enumeran una serie de valores observados (a través de mediciones) para el factor k_{Qs} , en la cual el mismo varía aproximadamente entre 0.5 y 0.9, en función de las características de arrastre de material grueso por parte de la corriente en cuestión. En este caso, teniendo en cuenta que la carga de lecho está fundamentalmente constituida por arena gruesa, se estima conveniente adoptar para el factor de transporte el valor: $k_{Qs} = 0.75$. De esta manera, la ecuación para el transporte sólido total podría escribirse como:

$$C_s = 0.088 Q^{1.5}$$

El paso siguiente consiste en estudiar la manera de poder transponer estos resultados para estimar el transporte de sedimentos en la cuenca del Río Nizao. Aceptando la hipótesis que las cuencas en cuestión se emplazan en la misma región hidrológica, con características climáticas, litológicas y de uso del suelo razonablemente homogéneas, resulta aceptable suponer que también se mantienen aproximadamente constantes entre ambas los principales factores que controlan los mecanismos de erosión y producción de sedimentos. En una serie de estudios sobre procesos de sedimentación en embalses en la región de la India y Pakistan, Khosla (Garde y Ranga Raju, 1985; p. 264) encontró que el volumen anual de sedimentos (V_s) producidos por una cuenca (el cual pudo medirse a través de relevamientos batimétricos de embalses colmatados) varía con el área de la cuenca elevada a una potencia del orden de 0.72. Es decir: $V_s = c_A A^{0.72}$, donde c_A es una constante que engloba todos los factores restantes que afectan a V_s (que en este caso se supone que no varían de una cuenca a otra). Por lo tanto, si se asume que c_A es el mismo para ambas cuencas, se podría obtener una estimación regional de la producción de sedimentos del Río Nizao a partir del dato homólogo del Río Loíza de la siguiente manera:

$$V_{S [Nizao]} = (A_{[Nizao]}/A_{[Loiza]})^{0.72} \cdot V_{S [Loiza]}$$

donde A indica el área de la cuenca. Efectuando las operaciones correspondientes, y teniendo en cuenta que el área de la cuenca del Río Loiza en la sección de aforo vale: $A_{Loiza} = 534 \text{ Km}^2$ y la del Río Nizao en el punto de interés $A_{Nizao} = 887 \text{ Km}^2$, se obtiene finalmente:

$$C_s = 0.1268 Q^{1.5}$$

Esta relación podría usarse como una primera aproximación gruesa para estimar la tasa media de transporte de sedimentos en el río Nizao durante eventos extraordinarios, mediante una integración del hidrograma de la crecida.

Por su parte, en la cuenca del Río Nizao existe una serie de estudios antecedentes tendientes a la estimación de la producción de sedimentos mediante varias técnicas alternativas. Entre ellos, deben destacarse las investigaciones llevadas a cabo por Nagle (1997), quien empleando técnicas basadas en el análisis de lluvias radioactivas de Cesio-137, logró estimar la pérdida de suelo en diferentes sub-áreas de la cuenca afectadas por distintas prácticas agrícolas y de uso del suelo. Los resultados obtenidos por este investigador indican que la pérdida de suelo, en el período que va de 1963 a 1997, varía en la cuenca desde un mínimo de 6.7 ton/Ha/año hasta un máximo de 59.0 ton/Ha/año, con una media de 27.5 ton/Ha/año. Es decir, transformando unidades la pérdida de suelo promedio según el criterio de Nagle resulta:

$$E_s = 2750 \text{ ton/km}^2/\text{año}$$

El valor de pérdida de suelo reportado por Nagle (1997) resulta razonable y consistente con las mediciones batimétricas realizadas por el INDRHI y reportadas por Espinal (1991), las cuales indican que para el período de operación del embalse comprendido entre 1979 y 1991, la tasa volumétrica promedio de acumulación de material sólido en el embalse fue de 2050 m³/km²/año, la que equivale a una tasa gravimétrica aproximada de 1708 ton/km²/año.

Este último valor es comparable con los 2750 reportados Nagle, ya que de la pérdida de suelo total sólo una fracción indicada por el 'factor de entrega' (sediment delivery ratio) llega a los cursos fluviales y de allí es transportada corriente abajo hacia el embalse. En este caso, para la cuenca del río Nizao a la altura del ingreso al embalse de Valdesia el factor de entrega resultaría aproximadamente: $(1708/2750) = 0.62$.

Los valores previos se encuentran en el rango típico de las tasas de pérdidas de suelo en cuencas tropicales, según reportan Morris y Fan (1997), quienes indican que para la isla de Puerto Rico E_s varía típicamente entre 1000 y 2000 ton/km²/año.

En un estudio reciente (Abt, 2001) se procedió a la aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), cuyo módulo de cálculo de erosión en la cuenca se basa en la aplicación del modelo USLE. En este caso, empleando los datos proporcionados por las batimetrías existentes se logró calibrar el modelo, encontrándose que E_s exhibe una variación a escala temporal (entre distintos años hidrológicos) que va de 189 a 8957 miles de ton/año para la cuenca del Nizao hasta Valdesia, con una media de 2.031×10^6 ton/año. Teniendo en cuenta que el área de la cuenca hasta el embalse es de 887 Km² (Espinal, 1991; aunque Abt considera que ese valor es de 868 Km²), se encuentra que según el criterio de Abt, la pérdida de suelo media resulta:

$$E_s = 2290 \text{ ton/km}^2/\text{año}$$

Nuevamente, este valor resulta comparable con la tasa de acumulación en el embalse de 1708 ton/km²/año reportada por el INDRHI (Espinal, 1991).

Un aspecto que resulta interesante investigar es el usar parte de la información existente para evaluar la posibilidad de estimar una función de calibración entre un indicador de la escorrentía superficial y la pérdida de suelo de la cuenca.

Para ello se analizaron los datos correspondientes a las series cronológicas de caudales medios anuales (Q_{ma}) del río Nizao en Valdesia y la serie homóloga de valores de pérdida de suelos (E_s) estimados con la aplicación del modelo SWAT (Abt, 2001).

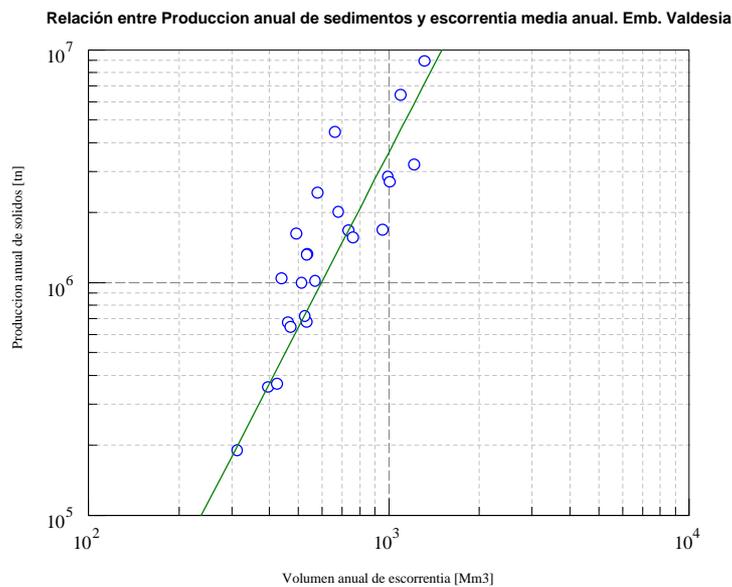


Figura 4.- Relación entre pérdida de suelo y escorrentía media anual para la cuenca del río Nizao en Valdesia

Los datos de E_s (expresado en ton/año) versus V_Q (en $Mm^3/año$) se muestran en la Fig. 4, en donde también se indica la función de mejor ajuste, la cual se obtuvo mediante una calibración del modelo:

$$E_s = a V_Q^b$$

encontrándose para los parámetros de la misma los valores: $a = 0.1150$, $b = 2.50$ con un coeficiente de correlación $r = 0.832$.

Debe destacarse que la forma de esta ecuación (fundamentalmente el exponente del caudal o indicador de escorrentía superficial) resulta consistente con los resultados inferidos a partir de ecuaciones de transporte sólido y también con relaciones encontradas en otras cuencas con problemas de sedimentación, por ejemplo, para la cuenca del río Reventazón a la altura del embalse de Cachí en Costa Rica (Jansson y Rodríguez, 1992). La ecuación de calibración encontrada para este embalse se expresa como: $Q_s = 0.2 Q^{2.0}$, donde la carga sólida se expresa en ton/día.

Procesos Erosivos durante eventos extraordinarios

Desde la construcción del embalse de Valdesia la cuenca del Río Nizao se ha visto afectada por la acción de eventos hidrológicos de magnitud extraordinaria en dos ocasiones: el paso del Huracán David al cual inmediatamente se sobrevino la tormenta tropical Federico en 1979 y más recientemente sufrió el paso del huracán Georges en 1998.

Teniendo en cuenta las características de estos eventos, los procesos de erosión, remoción en masa, transporte fluvial y deposición de sedimentos se ven fuertemente alterados durante estos

episodios caracterizados por precipitaciones extremas y tasas de escorrentía superficial muy por encima de los valores medios registrados en condiciones hidrológicas normales.

Lamentablemente, no se dispone de registros de datos confiables para analizar en detalle la influencia de estos eventos sobre la dinámica de producción de sedimentos, sino sólo de estimaciones en relación a la magnitud de las crecidas registradas en algunos puntos de la cuenca.

Dentro de este contexto, los antecedentes documentales indican que ha sido mucho más significativo el efecto sobre la sedimentación de la secuencia David-Federico que el producido por el Huracán Georges. Un indicio de tal afirmación puede obtenerse a partir del análisis de la información batimétrica obtenida para el embalse de Valdesia desde su puesta en operación en 1975, acompañada por los relevamientos realizados en 1979 (inmediatamente después del evento David-Federico), 1981 y 1991.

En condiciones hidrológicas “normales” es posible caracterizar globalmente la evolución temporal de la acumulación de sedimentos en un reservorio mediante una expresión matemática del tipo:

$$V_s = V_{E_0} \{ 1 - \exp[-k_E (t-t_0)] \}$$

donde V_s es el volumen acumulado hasta un instante de tiempo “ t ” desde el comienzo de operación del embalse, V_{E_0} indica la capacidad inicial de almacenamiento útil en el instante t_0 , mientras que k_E es un coeficiente empírico que depende de las características morfológicas del vaso y de otros aspectos hidráulicos y sedimentológicos.

El análisis de la dinámica evolutiva del proceso de acumulación se llevó a cabo considerando la curva $V_s=f(t)$ elaborada en base a los datos de la batimetrías y adoptando algunas hipótesis de comportamiento del sistema. La hipótesis fundamental asumida consiste en suponer que antes y después del evento extraordinario el proceso de acumulación durante años hidrológicos “normales” (es decir, sin el efecto de anomalías inducidas por huracanes) tiende a una función del tipo de la descripta anteriormente. Las curvas experimentales se presentan en la Fig. 5, en la que el punto correspondiente al año 1978 (anterior a la ocurrencia de David-Federico) se obtuvo con la hipótesis mencionada, resultando un valor de $V_s = 5.75 \text{ Mm}^3$.

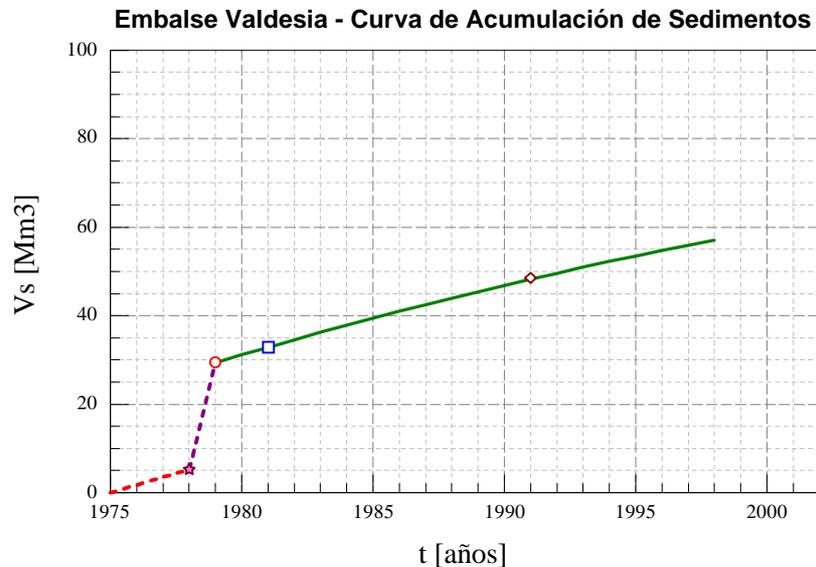


Figura 5.- Evolución de la acumulación de sedimentos en el embalse Valdesia. Hipótesis de comportamiento del sistema.

En cuanto a las tasas temporales de acumulación, dV_s/dt , las mismas se han estimado por intervalos en función de los datos.

Para el período 1979-1981: $dV_s/dt = 1.75 \text{ Mm}^3/\text{año}$

Para el período 1981-1991: $dV_s/dt = 1.56 \text{ Mm}^3/\text{año}$

Estos valores indican la tendencia lógica observada en la mayor parte de los embalses emplazados en áreas hidrológicas sin anomalías significativas, en el sentido que el ritmo de acumulación vá progresivamente disminuyendo a medida que el vaso se va colmatando y disminuye su eficiencia de retención de materiales sólidos.

Asimismo, estos valores pueden compararse con la estimación realizada por Espinal (1991), que para el período 1979-1991 estimó una tasa:

$$dV_s/dt = 1.82 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

aunque sin tener en cuenta los aspectos antes mencionados.

Por su parte, si se realiza un ajuste a la ecuación general del segmento de la curva de acumulación en el que se dispone de datos obtenidos por batimetrías (período 1980-1997), se encuentra la relación funcional:

$$V_s = 110.73 [1 - e^{-0.165 (t - 1965)}]$$

la cual justamente indica la anomalía que se registra antes de 1980, en el sentido de que para que la curva interprete los datos de las batimetrías, el valor de t_0 obtenido es de 1965 (en lugar de 1975, lo cual indicaría que el segmento superior de la curva exhibe un comportamiento comparable al que hubiera tenido el embalse si el mismo “hubiera empezado a operar 10 años antes en condiciones hidrológicas normales”). Por su parte, para el factor V_{E_0} también se encuentra un valor diferente del teórico (110.73 en lugar de 183.0), lo cual también es consecuencia de la anomalía introducida por el evento David-Federico.

Teniendo en cuenta los aspectos antes discutidos, este criterio (similar al adoptado por Abt, 2001) asigna al año hidrológico 1979 un valor de volumen de sedimentos acumulados del orden de 24.15 Mm³.

Debe tenerse en cuenta que de ninguna manera puede considerarse a este último valor como definitivo, ya que para su estimación se han considerado hipótesis que no se pueden comprobar (ante la carencia de datos en el año anterior a la ocurrencia de los huracanes) y además existen marcadas incertidumbres sobre los datos básicos, en especial en lo que se refiere a la capacidad inicial del embalse, la cual aparentemente se ha estimado a partir de una topografía aproximada en base a estudios previos que no poseían precisiones y exactitudes deseables. Este aspecto será discutido en mayor detalles en secciones siguientes de este estudio.

En relación a los aspectos cuantitativos del Huracán David, sólo se dispone de estimaciones aproximadas. Con base en estudios hidrológicos de entonces (e.g., IICA 1986, citado por Abt 2001) se estima que las lluvias ocasionadas durante tal evento generaron en la cuenca del Río Nizao una hidrograma con un caudal máximo del orden de 7000 m³/s y un volumen de la crecida cercano a los 250 Mm³. En un estudio reciente (Abt 2001), se aplicó la ecuación universal de pérdida de suelos en su versión modificada para eventos hidrológicos (MUSLE o también ecuación de Williams) :

$$E_{SM} = 11.8 (V_q \cdot Q_{max})^{0.56} F_K F_C F_P F_L F_S$$

y se usó para los factores restantes los valores calibrados para las variables medias anuales de la cuenca del Nizao, encontrándose una pérdida de suelo durante ese evento del orden de 25 millones de toneladas que equivale aproximadamente a unos 20.83 Mm³. Considerando la tormenta tropical Federico, que se presentó inmediatamente a posteriori del Huracán David, con un pico del orden de algo menos de un tercio de aquel, probablemente se tendría un valor global de pérdida de suelos durante esos dos eventos del orden de los 28 Mm³. Si se considera el factor de entrega previamente estimado para la cuenca de 0.62 se tendría una producción global de sedimentos para esa sucesión de eventos del orden de 18 Mm³, a lo cual habría que sumarle la tasa media anual correspondiente a 1979 para obtener una estimación del aporte de materiales sólidos durante ese año. Si se considera un valor medio cercano a 1.8 Mm³ para este último valor, se tendría para 1979 un aporte de casi 20 Mm³, valor aproximado a los 24 Mm³ estimados previamente con el modelo global de acumulación.

Con respecto al efecto del Huracán Georges sobre la cuenca del Río Nizao, fue posible obtener un hidrograma estimado por parte del INDRHI de los caudales ingresados al embalse de Valdesia. El mismo se presenta en la Fig. 6.

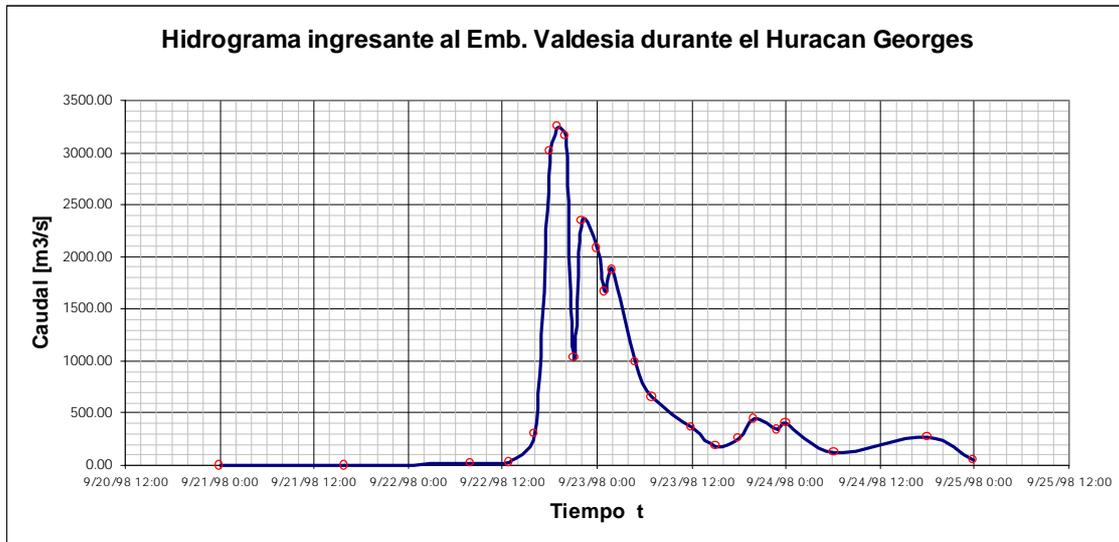


Figura 6.- Hidrograma en Valdesia durante el Huracán Georges

En base a este dato se calcularon los parámetros característicos del mismo, siendo los mismos:

- Caudal Pico: $Q_{\max} = 3244.45 \text{ m}^3/\text{s}$
- Volumen de la crecida: $V_q = 142 \text{ Mm}^3$

Lamentablemente, no se pudo disponer de un relevamiento batimétrico realizado con posterioridad a la ocurrencia de este huracán, ya que el mismo no pudo ser completado en toda la extensión del embalse por parte del personal del INDRHI, ya la carencia de este dato no permite realizar un análisis del tipo efectuado para el caso de la secuencia de huracán y tormenta tropical David-Federico.

Si se realiza un cálculo en base a hipótesis del tipo de las antes discutidas, es decir, aplicando la ecuación de Williams (MUSLE) considerando que los parámetros generales para una escala media anual se conservan en el caso de eventos, se encuentra un valor de pérdida de suelos sensiblemente inferior al encontrado para David-Federico, del orden de los 5.5 millones de toneladas, o 6.6 Mm^3 , que si se somete a la aplicación del factor de entrega resulta en una producción de sedimentos del orden de los 4.0 Mm^3 para este evento.

Aparentemente, los efectos de destrucción de vertientes, derrumbes y deslizamientos de laderas en la cuenca durante este huracán no fueron tan severos como en el caso de David-Federico, tal como reporta Nagle (1999), quien indica que la cuenca del río Nizao no sufrió importantes procesos de remoción en masa. Nagle afirma que “esta situación contrasta bastante con lo ocurrido en la cordillera central, cerca del pico Duarte, donde las fotografías aéreas y la exploración de campo indican derrumbes por doquier, que han lavado hasta un 30% del área superficial de algunas de las laderas más afectadas. Aparentemente, esto es lo que pasó también en partes de la cuenca del río Nizao durante los huracanes David y Federico en 1979. Sin duda, no ocurrieron esta clase de derrumbes durante el Huracán Georges por las áreas centrales y bajas del Nizao ...”.

SEDIMENTACIÓN EN LOS EMBALSES

Una vez examinado en el capítulo anterior la producción de sedimentos en la cuenca, se plantea un modelo que permite extrapolar hacia los años futuro el comportamiento del embalse, bajo la hipótesis de que el aporte de sedimentos de la cuenca mantendrá un comportamiento similar al de los años pasados. Con ello se podrá tener una idea de lo que se puede esperar en años futuros si no se realiza ninguna intervención, ya sea en términos de la producción de sedimentos en la cuenca (manejo de la cuenca) o en términos de la extracción de sedimentos del embalse de Valdesia.

La sedimentación en embalses se puede analizar por medio de métodos empíricos o por modelación matemática. Los métodos empíricos son relativamente simples y dan una idea general de las tasas de sedimentación. Dos de los más conocidos son el Método de Area-Incremento, y el método de Reducción de Areas, ambos desarrollados por Borland y Miller del U.S. Bureau of Reclamation. Por su parte la modelación matemática se basa en la solución de las ecuaciones que representan el movimiento y continuidad del agua y los sedimentos, junto con las que representan la capacidad de transporte de sedimentos. Estos modelos pueden ser unidimensionales, tal como el HEC-6 del Hydrologic Engineering Center, U.S. Corps of Engineers, o más complejos, con representación bi o tri-dimensional del problema. El uso de estos últimos requiere muchos datos relativos a la gradación de los sedimentos transportados y depositados, a la cantidad y tamaño de los sedimentos que ingresan al embalse, los caudales líquidos, así como una representación muy detallada de la geometría del embalse.

Para el caso de Valdesia, debido a la escasez de datos se decidió utilizar métodos empíricos. Se emplean dos procedimientos, uno desarrollado por los autores en el marco del presente estudio basado en una ecuación de eficiencia de atrape de sedimentos del tipo Brune, y otro basado en el método de reducción de áreas, aplicando un modelo computacional desarrollado por el HR Wallingford Group del Reino Unido.

En el estudio se desarrolló un modelo propio adaptado a la calidad y cantidad de datos disponible. El mismo se basa en la utilización de una expresión para la eficiencia de atrape de los sedimentos que ingresan al embalse, del tipo Brune (Siyam et. al 1999). Según esta expresión la eficiencia de atrape del embalse se puede aproximar de la siguiente forma:

$$\eta = e^{-\beta \frac{I}{V}}$$

en donde:

η = eficiencia de atrape de sedimentos

I = escorrentía promedio anual (m³)

V =volumen total de embalse (m³)

β =parámetro de ajuste=0.0079

Por ejemplo, la Fig. 7 muestra la eficiencia de atrape para un rango amplio de valores de V/I (volumen del embalse entre volumen de escorrentía anual). En este gráfico se muestran las eficiencias de los embalses de Aguacate y Valdesia estimadas según esta relación para el año 2002. Se observa como en el primer caso la eficiencia es menor al 30% y en el segundo caso es cercana al 100%. En otras palabras, un 70% de los sedimentos que ingresan a Aguacate continúan hacia aguas abajo, mientras que solo un 3% lo hace en Valdesia.

A partir de la expresión anterior y utilizando la estadística anual de caudales que ingresan a las presas Jigüey, Aguacate y Valdesia, y las estimaciones de producción de sedimentos para las mismas cuencas (según Abt Assoc. Inc. 2002), se elaboró una hoja de cálculo con MS Excel™ que hace una estimación, año a año, de la cantidad de los sedimentos que son atrapados en los diferentes embalses.

La estadística cubre los años 1975 a 1998. Las predicciones futuras se realizaron suponiendo que se repetirá el mismo patrón para los años a partir de 1998. Desde el punto de vista de sedimentos, esto parece una solución conservadora, toda vez que en el período 75-98 se incluye la ocurrencia de los huracanes David, Federico, Georges y otros eventos tropicales menores.

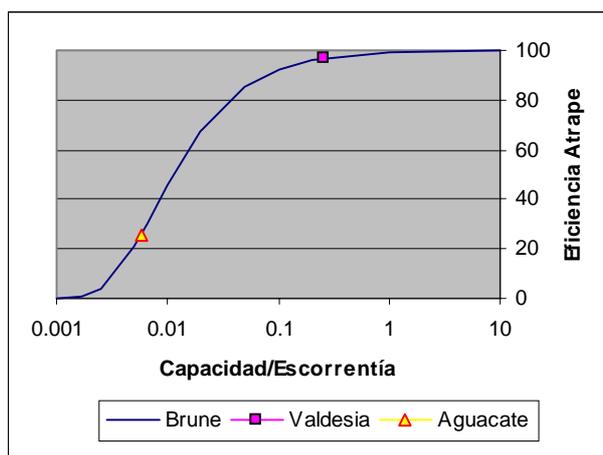


Figura 7 Estimación de eficiencia de atrape de sedimentos (ajuste a la curva empírica de Brune)

El procedimiento consiste en un cálculo año a año, a partir del año 1975, considerando el funcionamiento de Valdesia hasta el año 1992 cuando entran a operar Jigüey y Aguacate. A partir de entonces se debe considerar la cantidad de sedimentos que se van capturando en estas dos presas.

Programa RESSASS

Se trata de un programa de cómputo desarrollado por H.R. Wallinford (1996), que en realidad es la combinación de tres programas:

- Un método para el cálculo de volúmenes utilizando el levantamiento de secciones, el cual maximiza la exactitud de este tipo de estimaciones (Análisis de Volumen)
- Un método simple para la estimación de la variación futura de la sedimentación en el embalse (Predicción de Volumen)
- Un modelo numérico uni-dimensional para la estimación de la sedimentación en el embalse (Modelo Numérico)

El Análisis de Volumen utiliza información topográfica de secciones a lo largo del embalse y de áreas entre curvas de nivel obtenidas antes del llenado del embalse. Un segundo grupo de datos son las nuevas secciones levantadas posteriormente. Se utiliza el llamado “Stage Width Modification Method”, el cual maximiza la exactitud de la estimación del volumen inicial y el volumen al momento del segundo levantamiento.

El módulo de Predicción de Volumen se basa en una mejora del método empírico de Borland (1958). En este método se utilizan factores empíricos para estimar la capacidad futura sobre la base de cambios de volumen observador en el embalse. Para la estimación de la eficiencia de atrape se utilizan las curvas de Brune, y los cambios en la densidad de los sedimentos depositados se calculan por el método de Lane y Koelzer (1953).

Como se mencionó, en el presente trabajo no se pudo aplicar el Modelo Numérico, dados los requerimientos de información no disponible para el caso de Valdesia.

Para la estimación del volumen original del embalse se contaba con dos fuentes.

Una es el plano original de curvas de nivel levantado en octubre de 1956 por la empresa consultora Mendoza y Armenteros (Espinal 1991), y tiene curvas de nivel cada 5 metros a escala 1:5000. Este plano fue digitalizado y se muestra en la Lámina 1 al final del informe. Una copia reducida se muestra en la Fig. 8.

La segunda fuente con que se contaba es una serie de secciones transversales (33 secciones) que se presentan en el reporte de la batimetría levantada en 1991 (Espinal). Esta referencia contiene las secciones originales, así como los resultados de la batimetría del año 1991. Como es lógico en este tipo de levantamientos con eco-sonda, se presentan bastantes discrepancias entre las secciones originales, presumiblemente obtenidas del plano original, y los resultados del sondeo. En la Fig. 9 se muestra la localización de las secciones, 29 a lo largo del cauce principal del río y las restantes en tributarios que forman parte del embalse.

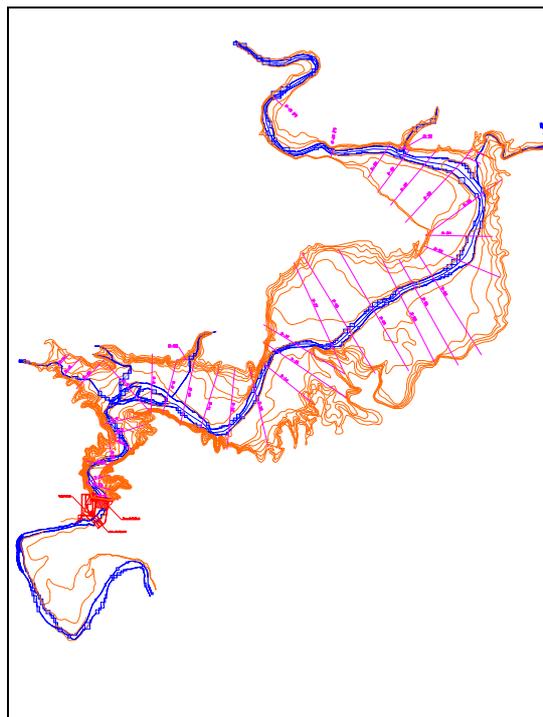


Figura 9 Planta del Embalse y Localización de Secciones
(según plano de Mendoza & Armenteros, 1956 y planos de las obras)

Resultados

Modelo Propio. Como se mencionó, la aplicación de la serie de caudales sólidos y líquidos se utilizó para estimar los sedimentos acumulados a través del tiempo para los tres embalses del sistema Jigüey, Aguacate y Valdesia. En este trabajo se examinan sólo los resultados obtenidos para el embalse Valdesia. La Fig. 10 muestra la estimación de la variación del volumen total del embalse de Valdesia. Al igual que en el caso anterior, hasta el año 1998 se utiliza la serie histórica, y del año 1999 en adelante se supone que se repite la secuencia presentada en el período de registro 75-98. La simulación se inicia en el año 1975, y hasta 1992 se supone que todos los sedimentos llegan al vaso. Posteriormente, se toman en cuenta los sedimentos atrapados en los dos embalses de aguas arriba.

El volumen total inicial de 186 Mm³ se ha reducido a un 75% en el año 2002, a un 67% en el año 2015 y a un 65% en el año 2025. Al igual que en los casos anteriores, esta estimación supone que del presente al 2027 se presentarán dos eventos similares a los del año 79 (David).

También en la Fig. 10 se muestran los resultados de las tres batimetrías realizadas hasta el momento (1979, 1981 y 1991), las cuales comparan bastante bien con los resultados del modelo.

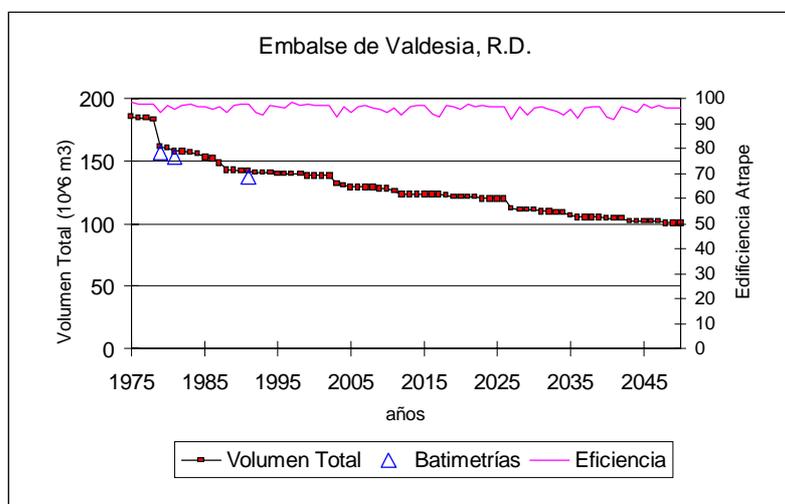


Figura 10.- Evolución de la sedimentación en el Embalse de Valdesia

Tabla 6.- Comparación entre batimetrías y modelo

Año	Volumen Total		Diferencia	Vol. Sedimentos	
	Batimetría	Modelo		Batimetría	Modelo
	mill m3	mill m3		mill m3	mill m3
1976	186.0	185.5	0%	0.0	0.0
1979	156.4	161.6	3%	29.4	23.9
1981	153.1	160.2	5%	33.0	25.3
1991	137.5	141.2	3%	48.5	44.3

Un resultado muy interesante es que la tasa de aporte de sedimentos al embalse se redujo a un 30% de la original con la entrada en operación del embalse de Jigüey. Esto se ilustra en la Fig. 11. Según estos resultados, la tasa de acumulación se redujo de 2.4 Mm³ anuales a 0.65 Mm³.

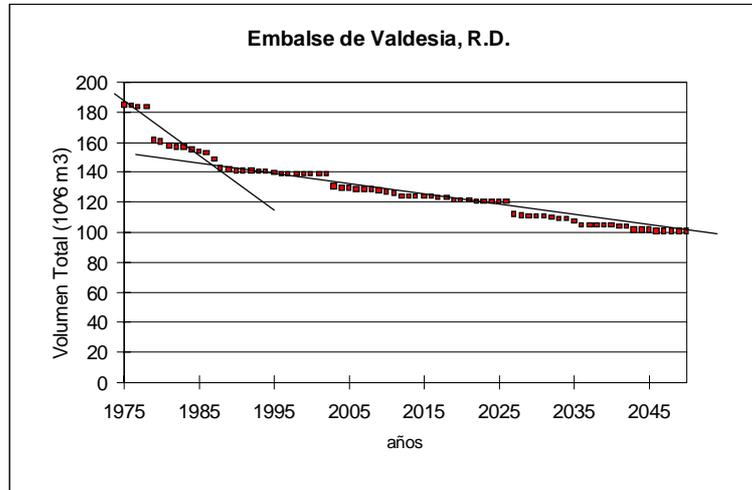


Figura 11.- Reducción en la tasa de sedimentación a partir del año 1992

Modelo RESSASS. El modelo aplicado anteriormente permite predecir con adecuada certeza el volumen total remanente con el paso del tiempo, desde luego bajo la suposición de que la producción de sedimentos en la cuenca seguirá el mismo patrón pasado. Sin embargo, no es capaz de predecir como se distribuirán los sedimentos en el embalse, ni tampoco cuales serán los niveles de la sedimentación en los alrededores de la presa, información muy importante desde el punto de vista operación.

El modelo RESSASS si permite predecir la distribución de la sedimentación en el embalse. Para ello, se parte de los volúmenes originales del embalse y de los volúmenes resultado de la batimetría del año 91. Con esto el RESSASS realiza una proyección de los patrones de sedimentación suponiendo que se mantendrá una tasa de producción de sedimentos en la cuenca similar a la del período 75-91.

Para considerar que en el año 1992 entraron en operación los embalses de Jigüey y Aguacate reduciendo de forma dramática el ingreso de sedimentos en Valdesia, se disminuyó dicho ingreso en un 30%, de acuerdo a los resultados del “modelo propio”. En Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos por el modelo RESSASS.

Tabla 7.- Resultados de Modelo RESSASS

Año	Vol. Total mill m ³	Vol. Sed. mill m ³	% de sedimentos	Vol Util mill m ³	Nivel Sed. msnm
1976	185.8	0	0	130	95.0
1991	145.7	40.1	21.6	119.5	105.0
2002	138.3	47.5	25.6	117.1	116.0
2015	126	59.8	32.2	112.4	118.0
2025	118.7	67.1	36.1	109.4	119.5

Los valores del año 76 y 91 no son predicciones sino la cubicación que hace RESSASS de los datos originales y batimétricos. El volumen original que obtiene RESSASS de 185.8 Mm³ es casi idéntico al valor reportado en los estudios batimétricos (186 millones). Sin embargo, RESSASS calcula un volumen de sedimentos depositados en el año 1991 de 40.1 Mm³, contra 48.5 Mm³ según los resultados de Espinal (1991). Se debe recordar que para este cálculo

RESSASS utiliza las secciones transversales levantadas en la batimetría de 1991, por lo que es difícil explicar esta diferencia pues en el informe de Espinal no se dan mayores datos sobre el procedimiento de cubicación.

En la Fig. 12 se comparan los resultados de las batimetrías con las estimaciones del “modelo propio” y del programa RESSASS. En todo caso, los proyecciones resultan muy similares. La figura muestra también la variación del volumen útil del embalse, que muestran que hacia el año 2025 el volumen muerto se habrá reducido a cero (volumen útil=volumen total).

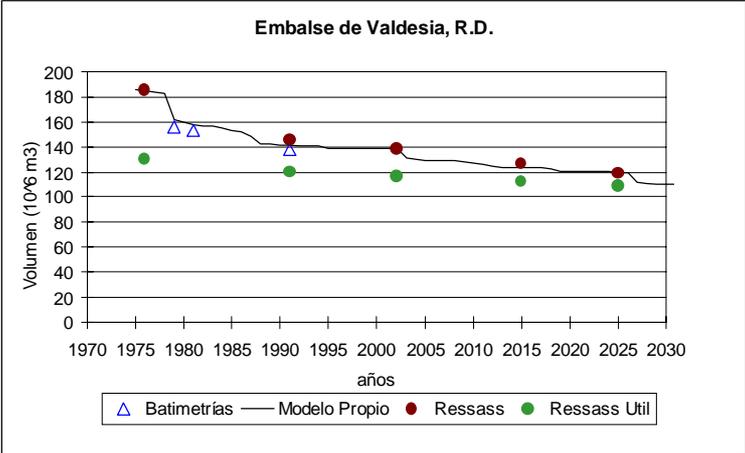
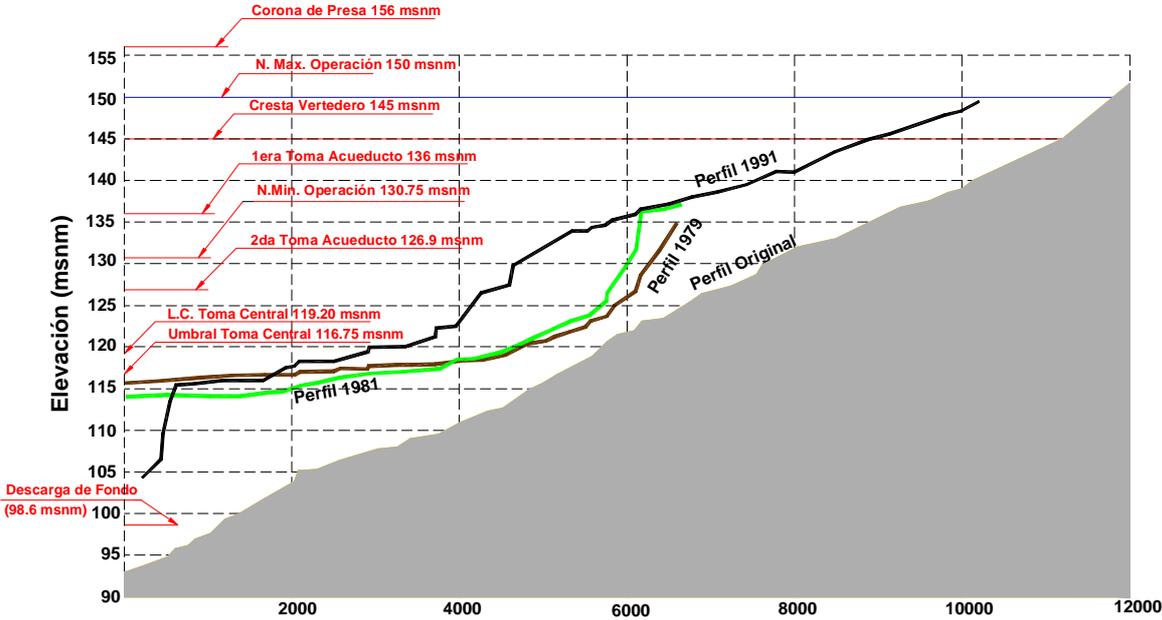


Figura 12.- Comparación entre batimetrías y los modelos de cálculo de la sedimentación en el embalse de Valdesia

En cuanto al nivel de los sedimentos en las cercanías de la presa, el método utilizado permite conocer de forma aproximada los niveles que alcanzarán los sedimentos en las cercanías de la cortina. Según esto, hacia el año 2025, el nivel de los sedimentos será la cota 120 msnm. La Figura 12 muestra los perfiles a lo largo del cauce resultado de las batimetrías efectuadas hasta el momento.



Control de la Sedimentación

En términos generales, para enfrentar el problema de la acumulación de sedimentos en los embalses existen dos procedimientos principales (Basson & Rooseboom, 1997; Vischer & Hager, 1998): la retención de los sedimentos en la cuenca, y la remoción de los sedimentos en el propio embalse. A su vez cada uno de estos procedimientos se puede aplicar mediante diferentes métodos, como se explica a continuación:

Retención de sedimentos en la cuenca: Esto es tal vez uno de los medios más efectivos de controlar la sedimentación, especialmente desde un punto de vista de sostenibilidad, aunque claramente uno de los más difíciles de implementar en cuencas grandes. En cuencas como la del Nizao, los procesos de erosión pueden reducirse ya sea con medidas de conservación de suelos, o bien con obras directamente en la red de drenaje. La aplicación de medidas de conservación de suelos está íntimamente relacionada con el problema general de la gestión de cuencas y ordenamiento territorial. Dentro de esta categoría se incluye la construcción de diques de acumulación, tema evaluado en un informe previo (EPTISA, 1978). Esta solución que ha sido descartada para el presente caso, por su alto costo y poca efectividad, como se comenta más adelante.

Desvío (“by-pass”) de los sedimentos: Esta técnica incluye el “by-pass” de los sedimentos mediante un canal o un túnel alrededor del embalse. Este procedimiento ha funcionado en condiciones muy especiales, puesto que en general la topografía alrededor de los embalses rara vez se presta para lograr un by-pass de forma económica. Por este motivo se descarta para el presente caso.

Tránsito o “Ruteo” de sedimentos en el embalse: Los sedimentos son acarreados a través del embalse en suspensión coloidal o turbulenta, por lo que este tipo de transporte puede mejorarse mediante la operación de compuertas, o bien mediante la formación de “corrientes de densidad”. En este caso se examinó la posibilidad del ruteo mediante el la descarga de corrientes de densidad.

Remoción de los sedimentos acumulados mediante vaciado: Este método consiste en provocar la socavación de los sedimentos depositados en el embalse mediante el vaciado o “flushing”. Un análisis de esta opción mostró que se requeriría rehabilitar el túnel de desvío para que funcione como descarga de fondo, obra que tendría un costo de unos US\$8 a 10 millones. Además se hizo una estimación de que, en total, todo el proceso de vaciado y limpieza tomaría al menos 12 días. Dado que resulta muy oneroso y complicado el vaciado completo cada año, especialmente por el tema del acueducto, se podría realizar esta operación cada tres años, dependiendo de la severidad de los períodos húmedos recién pasados. Como se puede ver, este procedimiento resulta poco efectivo dado que requiere una inversión importante, la interrupción del suministro de agua potable por 12 días cada tres años, y apenas contribuiría con una disminución de la acumulación en un 25%. A pesar de lo anterior, a más largo plazo esta solución puede complementar otras medidas y ser parte de una solución integral. Será factible en la medida en que sea posible prescindir del suministro de agua potable por un período como el indicado. Asimismo, dado que las descargas de fondo existentes están

inutilizadas, el contar con una descarga de fondo presenta otras ventajas operativas y de seguridad para la obra que habría que valorar.

Remoción de los sedimentos acumulados mediante dragado: El análisis sobre las diversas opciones que existen para controlar los sedimentos en el embalse indican que para el caso de Valdesia y a corto plazo, la opción viable para la remoción de un porcentaje significativo de los sedimentos es la del dragado.

El análisis de las diversas opciones que existen para controlar los sedimentos en el embalse indicó que la única opción viable a corto plazo para la remoción de un porcentaje significativo de los sedimentos que finalmente llegan al embalse es la del dragado. Para ello se propuso la ejecución de un proyecto que consistiría de los siguientes elementos: (a) Reparación y puesta en marcha de draga; (b) Limpieza de los sedimentos en las inmediaciones de la cortina con el objeto de liberar el ingreso a las descargas de fondo (primeros 100 m). (c) Desatascamiento y limpieza de las descargas de fondo, utilizando diversos procedimientos tales como el uso de busos, inyección con agua a presión, u otros. Para la remoción de los sedimentos del embalse, la idea sería la limpieza de los primeros 500 m, y posteriormente llegar hasta el primer kilómetro desde la cortina. La cantidad a remover sería del orden de los 2 Mm³. El plazo de ejecución sería de entre tres y cuatro años, según la productividad que se logre.

A más largo plazo habrá que evaluar la conveniencia de la construcción de una nueva descarga de fondo utilizando el túnel de desvío, de tal forma que se puedan realizar vaciados de limpieza cada varios años.

CONCLUSIONES

El embalse de Valdesia ilustra una situación muy poco estudiada en la literatura técnica, cual es el efecto en la producción de sedimentos y en la sedimentación de embalses de eventos hidrológicos extremos tipo huracanes. En este trabajo se ha presentado la metodología empleado para la caracterización de los procesos de producción de sedimentos en una cuenca y la cuantificación de los procesos de deposición de material sólido en un embalse situado en la misma. El conjunto de técnicas aplicadas proporciona elementos para la toma de decisiones relativas al menjo y control de reservorios en regiones tropicales expuestas a la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos como huracanes y tormentas tropicales que generan grandes volúmenes de sólidos en un único episodio. Se ha demostrado también como, ante la falta de información detallada relativa a la producción de sedimentos, con los datos de batimetrías es posible calibrar modelos de producción de sedimentos, así como la aplicación de técnicas sencillas para la predicción del comportamiento de embalses en esas circunstancias.

Se estima que esta metodología se podría generalizar para el estudio de cuencas y embalses de características similares a las aquí abordadas.

Reconocimiento. Los autores desean expresar su agradecimiento a los Dres. Sergio Mora y Manuel Basterrechea, por su invaluable aporte al presente trabajo, y a los técnicos de la Corporación Dominicana de Electricidad (CDE) y el Instituto Dominicano de Recursos Hidráulicos (INDRHI) por el apoyo logístico brindado durante las campañas y la documentación facilitada para su examen.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abt Associates Inc., (2002), Montaje y Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT en la Cuenca del Río Nizao, PROMATREC, INDRHI.

Arnold J.G., Williams J.R., Srinivasan R. and K.W. King (2001). *SWAT. Soil and Water Assessment Tool*. USDA Agricultural Research Service. Soil and Water Research Laboratory. Temple, Texas. USA.

Basson, G., y Rooseboom, A. (1997). "Dealing with Reservoir Sedimentation", ICOLD report, January.

Dotel, E. (2001). *Problema de sedimentación de los embalses de la cuenca del río Nizao*. Corporación Dominicana de Electricidad, agosto

EPTISA (1978). *Proyecto de restauración hidrológico-forestal de la cuenca alimentadora del embalse de Valdesia, río Nizao, República Dominicana*. INDRHI, Rep. Dominicana.

Espinal, Miguel y TOFOCA c.a. (1991). *Batimetría del Embalse Valdesia*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República Dominicana (INDRHI). Santo Domingo, República Dominicana.

Espinal M. (1981). *Informe Final sobre los Levantamientos Batimétricos del Embalse de Valdesia*, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), Santo Domingo, República Dominicana, Diciembre.

Garde, R. J. & Ranga-Raju, K. (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. Halsted Press, J. Wiley & Sons, NY, USA.

Graf, W.H. (1984). "Storage losses in reservoir". *Water Power & Dam Construction*, April.

HR Wallinford Ltd. (1996). "Measuring and Prediction Reservoir Volume Changes due to Sedimentation: RESSASS Versión 1.1". *User Manual*. Wallingford, Oxfordshire, U.K.

Jansson, M. B. & Rodríguez, A. (Eds.) (1992). *Sedimentological Studies in the Cachí Reservoir, Costa Rica*. UNGI Report No. 81, Dept. Physical Geography, Uppsala University, Sweden.

Julien, P.Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, NY, USA.

Lai, J.S. (1994). *Hydraulic Flushing for Reservoir Desiltation*. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of California at Berkeley.

Morris, G. L. & Fan, J. (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook. Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill Book Co., NY, USA.

Nagle, G.N. (1997). *The use of cesium-137 in the study of hillslope erosion in a tropical watershed*. Dissertation presented to the Faculty of the graduate school of Cornell University, January

Neitsch S.L., Arnold J.G. and J.R. Williams (1999). *SWAT. Soil and Water Assessment Tool. USER'S MANUAL VERSION 992*. USDA Agricultural Research Service. Soil and Water Research Laboratory. Temple, Texas. USA.

Neitsch S.L., Arnold J.G. and J.R. Williams (2001). *SWAT. Soil and Water Assessment Tool. Model Calibration*. USDA Agricultural Research Service. Soil and Water Research Laboratory. Temple, Texas. USA.

Siyam, A.M., Yeoh, J.S., & Loveless, J.H. (1999). "Sustainable Reservoir Sedimentation Control", *Proc. IAHR Congress*, Vienna.

Spalletti, P. & Brea J.D. (1998). "Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña". *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Oaxaca, México.

White, R. (2001). *Evacuation of Sediments from Reservoirs*, HR Wallinford, Thomas Telford, London.

Yang, C.T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice*. Mc Graw-Hill Book Co., NY, USA.