



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DISEÑO DE EMBALSE TENIENDO EN CONSIDERACIÓN LOS IMPACTOS AMBIENTALES

Jhon Córdova-Carmen

Piura, diciembre de 2015

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

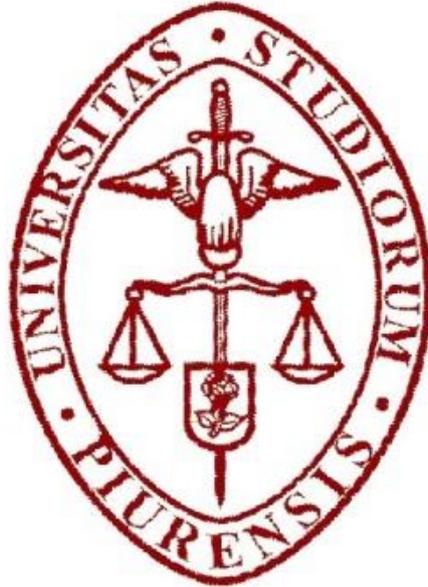
Córdova, J. (2015). *Diseño de embalse teniendo en consideración los impactos ambientales*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**“DISEÑO DE EMBALSE TENIENDO EN CONSIDERACIÓN LOS IMPACTOS
AMBIENTALES”**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Jhon Junior Córdova Carmen

Asesor: Dr. Jorge Reyes Salazar

Piura, Diciembre 2015

*A Dios,
a mis padres,
especialmente a ti madre,
por la entrega, dedicación e infinita fe.
Por lo que estaré eternamente
agradecido.*

PROLOGO

La creciente demanda de agua y energía, ha impulsado considerablemente la construcción de embalses. Las represas de gran alcance, han permitido embalsar una cantidad de agua cada vez mayor, pero al mismo tiempo, pueden causar cambios ambientales irreversibles en áreas geográficas muy extensas.

Son precisamente los impactos ambientales, el principal motivo que me llevó a seleccionar este tema de tesis, puesto que actualmente existen embalses de gran envergadura generando impactos ambientales negativos que afectan a la pesca, flora, fauna, tierras silvestres, agricultura, poblaciones humanas cercanas al área, etc.

Para evitar y mitigar los impactos ambientales negativos, se presenta en este trabajo: una lista de medidas de protección de un embalse, un plan de manejo ambiental, un plan de seguimiento y monitoreo, plan de contingencia y también se propone una nueva metodología de diseño de embalse.

Para concluir quisiera hacer mi agradecimiento especial al Dr. Jorge Reyes Salazar, por su calidad de asesor en mi tesis; al Ing. Francisco Arteaga, por brindarme su experiencia en el tema medio-ambiental; a mi buen amigo Juan A. Enríquez Beck, por el apoyo brindado a lo largo de este trabajo, a mi familia y amigos por su ayuda incondicional.

RESUMEN

Generalmente los diseños de embalses no le brindan la consideración debida a los impactos ambientales que pueden generar, ya que se basan solamente en la capacidad de almacenamiento, descarga y distribución del agua.

Es por esta razón que se plantea como propósito del presente trabajo: identificar los eventuales impactos ambientales que se generan durante la construcción, operación y mantenimiento de un embalse; y proponer una nueva metodología de diseño de embalses que aporte alternativas de solución para la mitigación de los impactos ambientales negativos. Se plantean además, algunas innovaciones en relación a las técnicas y herramientas empleadas habitualmente en el diseño de los embalses.

Se presenta la curva: “Área de inundación vs Altura de presa”, la cual permite escoger la altura de presa adecuada para que no inunde una zona geográficamente extensa; otra alternativa que disminuye el área de inundación, es la generación de una “Cadena de embalses”, la cual es un conjunto de pequeños embalses que reemplazan la capacidad de un embalse de gran envergadura; finalmente, se presenta la aplicación de nuevas metodologías batimétricas, cuyos resultados permiten obtener con mayor certeza la evolución de los procesos de colmatación por sedimentos en los embalses de grandes presas.

INDICE

PROLOGO	I
RESUMEN	III
INDICE	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
MARCO TEÓRICO	3
1.1. DEFINICIÓN	3
1.2. GENERACIÓN DE EMBALSES	3
1.2.1. <i>Embalses naturales</i>	3
1.2.2. <i>Embalses artificiales</i>	5
1.3. ZONAS DE UN EMBALSE	6
1.3.1. <i>Zona ribericina o cola del embalse</i>	6
1.3.2. <i>Zona de transición o zona media del embalse</i>	6
1.3.3. <i>Zona lacustre o zona de presa</i>	6
1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS EMBALSES	7
1.4.1. <i>Embalses según su ubicación en el río</i>	7
1.4.2. <i>Embalses según su función</i>	7
1.4.3. <i>Embalses según el tamaño y profundidad</i>	8
1.5. ESTRUCTURAS QUE CONFORMAN LOS EMBALSES	8
1.5.1. <i>Presas</i>	9
1.5.2. <i>Aliviadero o vertedor</i>	19
1.5.3. <i>Obras de toma</i>	20
1.6. USO DE LOS EMBALSES	21
1.7. VENTAJAS DE LOS EMBALSES	22
1.8. DESVENTAJAS DE LOS EMBALSES	22
1.9. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMBALSES	23
1.9.1. <i>Niveles característicos de los caudales de un embalse</i>	24
1.9.2. <i>Volúmenes característicos de un embalse</i>	24
1.9.3. <i>Caudales característicos de un embalse</i>	26
1.10. CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO DEL EMBALSE	26
1.11. ASPECTOS DE LOS DISEÑOS HIDRÁULICOS DE UNA PRESA	27
1.11.1. <i>Demanda</i>	27
1.11.2. <i>Volumen útil de almacenamiento</i>	27
1.11.3. <i>Volumen de sedimentos</i>	27
1.11.4. <i>Estructuras de captación</i>	28
1.11.5. <i>Vertimiento de excesos</i>	28
1.11.6. <i>Altura de la presa</i>	28
CAPÍTULO 2	29
EFECTO AMBIENTAL DE LOS EMBALSES	29
2.1. CARACTERÍSTICAS LIMNOLÓGICAS DE LOS EMBALSES	30
2.1.1. <i>Estratificación térmica de un ecosistema acuático</i>	31

2.1.2.	<i>Diferencias entre lagos y embalses</i>	32
2.2.	PRINCIPALES PROBLEMÁTICAS EN LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS EMBALSES	34
2.2.1.	<i>Efectos ambientales por la regulación del caudal</i>	34
2.2.2.	<i>Eutrofización</i>	35
2.2.3.	<i>Efectos ambientales por colmatación de un embalse</i>	35
2.2.4.	<i>Introducción de especies exóticas y especies invasoras</i>	36
2.2.5.	<i>Modificación del régimen térmico fluvial</i>	36
2.2.6.	<i>Efectos del cambio climático</i>	37
2.2.7.	<i>Efecto invernadero</i>	37
2.3.	EFFECTOS AMBIENTALES EN LAS DIFERENTES FASES DEL PROYECTO	39
2.3.1.	<i>Fase de construcción del embalse</i>	39
2.3.2.	<i>Fase de operación del embalse</i>	40
2.3.3.	<i>Fase de mantenimiento</i>	41
CAPÍTULO 3		43
MEDIDAS DE MITIGACIÓN		43
3.1.	MEDIDAS DE PROTECCIÓN DE UN EMBALSE	43
3.2.	APORTACIÓN DE LA LIMNOLOGÍA A LA GESTIÓN DE EMBALSES	43
3.2.1.	<i>Gestión hidráulica del embalse</i>	44
3.2.2.	<i>Gestión de una cadena de embalses</i>	44
3.3.	PLAN DE MANEJO AMBIENTAL	45
3.3.1.	<i>Medio abiótico</i>	45
3.3.2.	<i>Medio biótico</i>	46
3.3.3.	<i>Medio socioeconómico</i>	47
3.4.	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO	48
3.4.1.	<i>Medio abiótico</i>	48
3.4.2.	<i>Medio biótico</i>	48
3.4.3.	<i>Medio socioeconómico</i>	48
3.5.	PLAN DE CONTINGENCIA	49
3.5.1.	<i>Análisis de riesgos</i>	49
3.5.2.	<i>Plan de contingencia</i>	50
3.6.	PLAN DE RESTAURACIÓN FINAL	50
3.7.	CUADRO RESUMEN	51
CAPÍTULO 4		55
DISEÑO DE UN EMBALSE		55
4.1.	OPERACIÓN DE EMBALSES	55
4.2.	ALTURA DE LA PRESA	56
4.2.1.	<i>Determinación del volumen muerto del embalse (V_M)</i>	58
4.2.2.	<i>Determinación del nivel mínimo para turbinas (N_T)</i>	61
4.2.3.	<i>Determinación del volumen útil (V_U)</i>	61
4.2.4.	<i>Pérdidas de agua en el embalse</i>	64
4.2.5.	<i>Cálculo del volumen de crecidas (V_C)</i>	65
4.2.6.	<i>Cálculo del borde libre (B_L)</i>	66
4.3.	ALIVIADERO	69
4.2.1.	<i>Determinación de la avenida extraordinaria</i>	72
4.3.2.	<i>Laminado de avenida extraordinaria - cálculo simplificado</i>	82

4.3.3.	<i>Caudal específico del vertedero</i>	82
4.3.4.	<i>Determinación del ancho del vertedero</i>	84
4.4.	OBRAS DE TOMA	84
4.4.1.	<i>Posición de las obras de toma en relación con los niveles del agua en el vaso</i>	84
4.5.	ORIFICIOS DE PURGA	85
4.5.1.	<i>Criterios de diseño</i>	85
4.5.2.	<i>Predimensionamiento</i>	86
4.5.3.	<i>Análisis de la purga</i>	86
4.5.4.	<i>Dimensionamiento de una presa.</i>	86
4.6.	ALTURA DEFINITIVA Y NORMAS DE OPERACIÓN	88
4.7.	MODELOS	88
CAPÍTULO 5		93
NUEVA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE EMBALSE		93
5.1.	ASPECTOS HIDRÁULICOS - HIDROLÓGICOS	93
5.1.1.	<i>Curva “Área de inundación vs Altura de presa”.</i>	94
5.1.2.	<i>Cadena de embalses</i>	96
5.2.	ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS	99
5.2.1.	<i>Aplicación de Nuevas Metodologías Batimétricas</i>	99
CONCLUSIONES		109
RECOMENDACIONES		111
BIBLIOGRAFÍA		113
ANEXO A		117
MATRIZ PARA IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN PRESAS		117
ANEXO B		121
DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA		121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Embalse por derrumbe de laderas	4
Figura 2: Embalse por acumulación de hielo	4
Figura 3: Presa construida por castores	5
Figura 4: Presa Hoover	5
Figura 5: Zonas de un embalse.....	7
Figura 6. Elementos constitutivos de un embalse.	8
Figura 7: Presa de gravedad.	10
Figura 8: Presa de arco.....	11
Figura 9: Presas de arco-gravedad.	11
Figura 10: Presa de bóveda.	12
Figura 11: Presa aligerada o de contrafuertes	13
Figura 12: Partes de una presa de tierra	14
Figura 13: Tipos de presas de tierra.....	15
Figura 14: Principales variantes de presas de enrocado.....	16
Figura 15: Curva característica de los embalses.....	23
Figura 16: Representación de los niveles característicos de un embalse.	25
Figura 17: Estratificación de embalses.	31
Figura 18: Profundidad máxima de (a) lagos y (b) embalses.	32
Figura 19: Comparación de áreas y perímetros entre lagos y embalses.....	34
Figura 20. Franjas imaginarias para el cálculo de la altura de una presa de embalse.	57
Figura 21. Eficiencia de atrape de sedimentos de un embalse	59
Figura 22. Diagrama de Rippl para calcular la capacidad necesaria de un embalse en un río.	63
Figura 23. Distribución del agua en un embalse.....	65
Figura 24. Fetch en un embalse.	68
Figura 25. Descripción del vertedero.....	71
Figura 26. Secuencia de cálculo del ancho del vertedor	71
Figura 27. Coeficiente de corrección según el Período de Retorno.....	73
Figura 28. Coeficiente de corrección según la duración.	74
Figura 29. Coeficiente de corrección según la superficie de la cuenca.....	75
Figura 30. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Precipitación de 3 horas de Duración y 10 años de Período de Retorno.	75
Figura 31. Cuencas hidrográficas del Perú.....	76
Figura 32. Isoyetas medias anuales (mm) en el Perú.	77
Figura 33. Determinación del caudal de máximo vertido.	82
Figura 34. a. y b. Determinación del caudal específico (q) en el canal vertedero.	83
Figura 35. Presa únicamente con descargas de fondo.....	87
Figura 36. Presa con aliviadero móvil.....	87
Figura 37. Presa con aliviadero móvil y descargas de fondo.	88
Figura 38. Variación del nivel de un embalse.	89
Figura 39. Malla computacional del embalse Chaglla	90
Figura 40. Curvas de nivel del cauce del embalse	91
Figura 41. Vista tridimensional aguas arriba de la presa	92
Figura 42. Curva Área de inundación vs Altura de presa, del Reservorio San Lorenzo.	96
Figura 43. Vista de perfil de un Embalse de gran tamaño.....	97
Figura 44. Vista de perfil de una Cadena de embalses.....	98

Figura 45. Vista de perfil de un embalse pequeño.....	98
Figura 46. Modelo Digital de Profundidades (MDP) generado para el embalse El Tunal.....	105
Figura 47. Comparación entre los métodos de (a) espirales o rulos y (b) transectas.	106
Figura 48. Superposición de la curva de 275 msnm (en color magenta) tomada del levantamiento original del vaso del embalse de Río Hondo con la curva de 274,05 tomada de la imagen satelital LANDSAT 5 TM 230 079 - 25-MAY-2007.	107
Figura 49. Planta de la presa Tablachaca.	123
Figura 50. Presa mostrando los 4 aliviós y las 4 compuertas.	124
Figura 51. Sección de la presa mostrando el alivio A3.	124
Figura 52. Sección de la presa Tablachaca mostrando el alivio A4.....	125
Figura 53. Presa Puente Cincel. Diseño 1. Vista frontal.	127
Figura 54. Presa Puente Cincel. Diseño 1.	128
Figura 55. Presa Puente Cincel. Diseño 2.	128
Figura 56. Vista de las descargas de fondo operando	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia de atrape de embalses	59
Tabla 2. Valores de pbi y β	60
Tabla 3. Valores de infiltración mensual.....	64
Tabla 4. Embalses del mundo por superficie. Elaboración propia.....	67
Tabla 5. Coeficiente k del método del NRCS.....	72
Tabla 6. Coeficientes de escorrentía.	78
Tabla 7. Número de Curva del Método del NRCS.	80
Tabla 8. Grupo Hidrológico (según el NRCS) de los suelos del Uruguay.	81
Tabla 9. Velocidades máximas en suelos empastados.	83
Tabla 10. Datos hidráulicos del Reservorio de San Lorenzo.....	94
Tabla 11. Condiciones iniciales de los embalses estudiados.	101
Tabla 12. Comparación de los métodos de interpolación TIN y GRID.	104
Tabla 13. Diferencia entre métodos para el embalse de El Tunal, para las transectas 2 y 3.	105
Tabla 14. Cálculo del coeficiente de descarga promedio en el Embalse Tablachaca.	126
Tabla 15. Cálculo del coeficiente de descarga promedio en la Presa Puente Cincel.	130

INTRODUCCIÓN

El hombre ha construido embalses desde la antigüedad, pero no ha sido hasta muy recientemente que este tipo de construcciones ha tenido un auge considerable. La creciente demanda de agua y energía, ha impulsado considerablemente la construcción de este tipo de obras hidráulicas. En el mundo actual, las represas destinadas a producir energía hidroeléctrica son las que resaltan más por ser las de mayor tamaño. Estas represas de gran alcance, han permitido almacenar una cantidad de agua cada vez mayor, pero al mismo tiempo, pueden causar cambios ambientales irreversibles en áreas geográficas muy extensas.

Durante la última década, las críticas sobre este tipo de proyectos han aumentado y esto no es ajeno en nuestro país. Los críticos más severos sostienen que los costos sociales, ambientales y económicos de estas represas pesan más que sus beneficios y que, por lo tanto, no se justifica la construcción de las grandes represas.

Marc Dourojeanni, en su libro: “*Amazonía probable y deseable*”, comenta que en el 2011 se registraron en el sector público 52 proyectos de generación de energía hidroeléctrica en la cuenca amazónica, de los cuales 26 se encuentran propiamente en la selva. Se trata del acuerdo energético Perú-Brasil, en el cual se pretende aprovechar el potencial eléctrico de los ríos de la Amazonia Peruana construyendo centrales hidroeléctricas en nuestro país y de esta forma proveer de energía a Brasil para satisfacer su demanda de energía futura. Las hidroeléctricas planteadas en el acuerdo, son las llamadas hidroeléctricas de embalse, estas suponen la construcción de represas que crean lagos artificiales (**embalses**) para regular la fuerza de la caída del agua y así generar energía. Dichos embalses ubicados en la Amazonía Peruana, producirían grandes impactos ambientales debido a la inundación de grandes áreas de bosque.

Es por esto, que la presidenta de la Central Asháninka del Río Ene (CARE)¹, y activista medio-ambiental: Ruth Buendía², realizó una campaña para que no se ejecute el proyecto hidroeléctrico de Pakitzapango, el cual implicaba la construcción de uno de los grandes embalses mencionados en el libro “*Amazonía probable y deseable*”. El proyecto pretendía ser ejecutado sin previa consulta a los pobladores, y además inundaría alrededor de 95 mil hectáreas de bosque amazónico en la región Junín, donde justamente habita la comunidad a la que pertenece.

¹ Organización que se encarga de defender los derechos de los **Asháninkas**, la etnia indígena más numerosa del Perú.

² Recibió el premio Goldman en abril de 2014, en mérito de haber logrado la paralización del proyecto hidroeléctrico de Pakitzapango.

Por lo anterior, se concluye que los diseños de embalses no le brindan la consideración debida a los impactos ambientales que pueden generar, enfocándose básicamente en la capacidad de almacenamiento, descarga y distribución del agua. Es por esta razón que se plantea como propósito del presente trabajo, identificar los eventuales impactos ambientales que se pueden generar durante la construcción, operación y mantenimiento de un embalse, para, de esta forma, proponer alternativas de solución en el diseño de embalses, que si bien en algunos casos no eliminarán por completo los impactos ambientales negativos que se originan en la zona, tratarán en la medida posible de mitigar su efecto.

El **primer capítulo** de este estudio presenta un marco teórico sobre los embalses, el mismo que contiene información general (conceptos, definiciones e hipótesis), la cual puede ser tomada por el lector como una introducción para mayor entendimiento de la problemática que se mostrará más adelante.

El **segundo capítulo** consiste en identificar los impactos ambientales que generan los embalses en su etapa de construcción, operación y mantenimiento, tratando de abarcar tanto los efectos directos como los indirectos, así como también incluir los diferentes aspectos sociales, económicos, políticos, ecológicos, etc.

En el **tercer capítulo** se presenta una serie de acciones que permiten la mitigación de los impactos ambientales negativos (indicados en el capítulo anterior). Es por esto que se elaboró una lista de medidas de protección de un embalse, un plan de manejo ambiental, un plan de seguimiento y monitoreo, plan de contingencia y un plan de restauración ambiental.

En el **cuarto capítulo** se realizará el diseño hidrológico e hidráulico de un embalse, teniendo en cuenta aspectos generales y que además, presente condiciones similares a las que se tienen en Perú.

En el **quinto capítulo** se planteará una nueva metodología de diseño de embalse, teniendo como base aspectos hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos y que a su vez contemple los impactos ambientales apreciados anteriormente.

Al final de la tesis se harán las conclusiones y recomendaciones del tema abordado, para la posterior investigación de personas que estén interesadas en el tema.

Capítulo 1.

Marco teórico

1.1. Definición

Se denomina embalse³ a la acumulación de agua debido a una obstrucción en el lecho de un río que cierra parcial o totalmente su cauce. El volumen de agua queda retenido en un vaso topográfico, debido a una serie de eventos ocasionados por la naturaleza o por la intervención del hombre, gracias a la realización de obras hidráulicas (Guevara, 2000). Por lo general, un embalse se forma artificialmente cerrando la boca de un valle mediante una presa o dique, dando lugar a un lago artificial, construido con el fin de producir energía hidroeléctrica o almacenar agua durante la estación lluviosa⁴ y distribuirla durante la estación seca (Bustamante, 1996), para el riego de terrenos o abastecimiento de agua para la población.

1.2. Generación de embalses

La obstrucción del cauce puede ocurrir por causas naturales como por ejemplo: el derrumbe de una ladera en un tramo estrecho del río o arroyo, la acumulación de placas de hielo o las construcciones hechas por los castores; y por lo general, por obras construidas por el hombre, como son las presas (Ainzúa, 2007).

1.2.1. Embalses naturales

1.2.1.1. Derrumbe de laderas

En este caso se trata de embalses totalmente incontrolados, que generalmente tienen una vida corta, días, semanas o hasta meses. Al llenarse el embalse con los aportes del río o arroyo, se provocan filtraciones a través de la masa de tierra no compactada, y vertidos por el punto más bajo de la corona, que llevan a la ruptura más o menos rápida y abrupta de la presa, pudiendo causar grandes daños a las poblaciones y áreas cultivadas situadas aguas abajo.

Un fenómeno de este tipo se produjo en el paraje conocido como La Josefina en el río Paute, en Ecuador (Ver Figura 1).

³ En España se emplea ocasionalmente el término pantano con este significado.

⁴ Para la mayoría de los países del mundo, las lluvias, salvo contadas áreas, están concentradas durante un período de cinco o seis meses, conocido como invierno, siendo muy escasa o nulas durante el resto del año.



Figura 1. Embalse por derrumbe de laderas. En marzo de 1993, cerca de 30 millones de m^3 de material pétreo se deslizaron en el sitio "La Josefina", taponando así los caudales de los ríos Jadán y Cuenca, Ecuador.

Fuente: <http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/2013/05/LA-JOSEFINA.jpg>

1.2.1.2. Acumulación de hielo

La acumulación de hielo en los grandes ríos situados en zonas frías se produce generalmente en puntos en los cuales el cauce presenta algún estrechamiento, ya sea natural, como la presencia de rocas, o artificial, como los pilares de un puente.

Situaciones de este tipo pueden darse, por ejemplo, en el río Yeso, en la cordillera de los Andes a una altitud de 2500 msnm (Ver Figura 2).

Para prevenir los daños que esto puede causar, los servicios de prevención utilizan barcos especiales denominados rompehielos.



Figura 2: Embalse por acumulación de hielo. Embalse del Yeso está ubicado a unos 100 km de Santiago, Chile y a 3000 metros de altura

Fuente: http://www.huellaschilenas.cl/fot/Embalse_El_Yeso.jpg

1.2.1.3. Presa construida por castores

Las presas construidas por castores se dan en pequeños arroyos, generalmente en áreas poco habitadas y, por lo tanto, los eventuales daños causados por su ruptura son generalmente limitados (Ver Figura 3).



Figura 3: Presa construida por castores. En la provincia Alberta, en Canadá.

Fuente: http://static.blog.it/ecologiablog/ecologiablog_walle_1307.jpg

1.2.2. Embalses artificiales

Los embalses artificiales son aquellos generados al construir una presa en el cauce de un río (Ver Figura 4) y pueden tener la finalidad de:

- Regular el caudal de un río o arroyo, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos para el riego, para el abastecimiento de agua potable, para la generación de energía eléctrica, para permitir la navegación o para diluir contaminantes.
- Contener los caudales extremos de las avenidas o crecidas (laminación de avenidas).
- Crear una diferencia de nivel para generar energía eléctrica, mediante una central hidroeléctrica.

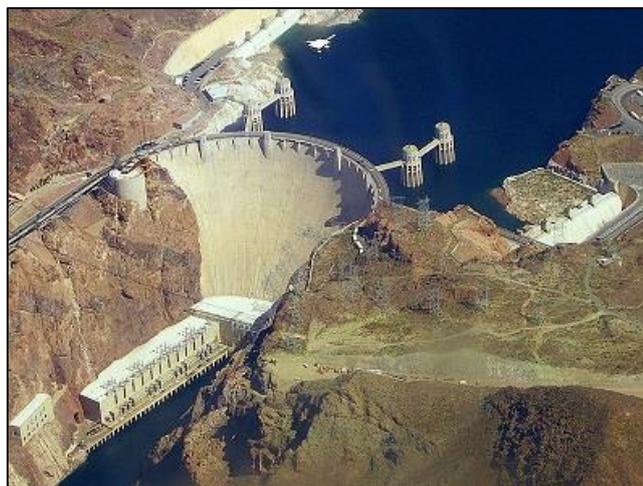


Figura 4: Presa Hoover. Ubicada en el curso del río Colorado (EE. UU.).

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Presa_Hoover#/media/File:Hoover_dam_from_air.jpg

1.3. Zonas de un embalse

Según Roldán Pérez & Ramirez Restrepo (2008), un embalse tiene una zonificación horizontal y se divide en 3 zonas, las mismas que presentan características independientes.

1.3.1. Zona riberina o cola del embalse

Esta zona contiene restos vegetales entremezclados con capas de sedimentos elásticos, es decir, a partir del depósito o roca formada por los fragmentos preexistentes. En ella, la velocidad del flujo disminuye rápidamente, sedimentándose partículas de arena y limo gruesas, al igual que una porción del material orgánico particulado. Aunque la respiración puede ser alta, la zona riberina es por lo general poco profunda y bien mezclada, en consecuencia aeróbica. La velocidad y la turbulencia del río disminuidas en esta zona, no mantienen por mucho tiempo las algas en suspensión, y la alta turbidez minimiza la penetración lumínica, por lo que la fotosíntesis debe ser baja. Estas algas son generalmente diatomeas⁵ de pared gruesa provenientes del perifiton⁶ del río, que resisten la alta abrasión durante el transporte por él, pero que se hunden rápidamente en un régimen de baja energía. (Ver Figura 5).

1.3.2. Zona de transición o zona media del embalse

En esta área se sedimentan arcillas y limos de tamaño grueso y medio, y materia orgánica particulada. Es una zona donde impera la anoxia (falta o disminución de oxígeno), por el procesamiento biológico de materia orgánica particulada fina que puede agotar rápidamente el oxígeno hipolimnético⁷ (referente a la parte del lago situado en el hipolimnion, constituido por agua estancada y con una temperatura esencialmente uniforme). Estas condiciones: aceleran la desnitrificación⁸ y la resolubilización⁹ del fósforo, el manganeso y el hierro absorbidos al material particulado sedimentado, y la liberación del H₂S a la columna de agua. Una de las principales características de esta zona es su dinámica (Thornton *et al.*, 1990) (Ver Figura 5).

1.3.3. Zona lacustre o zona de presa

Es la más profunda del embalse, con características similares a la de un lago. En ella predomina el plancton, disminuye la sedimentación del material inorgánico, la penetración de luz es suficiente para promover la producción primaria. Existe en esta zona limitación potencial de nutrientes y la producción de materia orgánica excede el procesamiento de la misma dentro de la zona de mezcla. (Ver Figura 5).

⁵ Son una clase de algas unicelulares que constituyen uno de los más comunes tipos de fitoplancton. Se calcula que son responsables de la producción de alrededor del 40% de todo el oxígeno de la Tierra.

⁶ Es el complejo conjunto de organismos de bacterias, hongos, algas y protozoos embebidos en una matriz polisacárida.

⁷ Ver la sección 2.1.1. Estratificación térmica de un ecosistema acuático.

⁸ La desnitrificación es un proceso en el cual el amonio se oxida a nitrito luego a nitrato, el cual en condiciones anóxicas se convierte en N₂ (nitrógeno gas, que se pierde a la atmósfera).

⁹ Consiste en disolver uno de los componentes de una mezcla sólida.

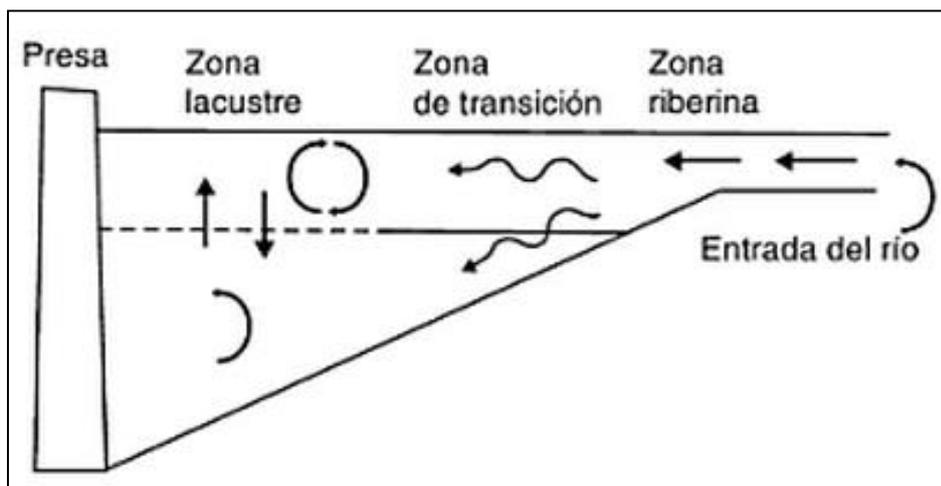


Figura 5: Zonas de un embalse

Fuente: Fundamentos de la limnología tropical

1.4. Clasificación de los embalses

1.4.1. Embalses según su ubicación en el río

En general hay dos tipos de embalses. Los ubicados fuera del cauce fluvial, a los que se denomina *laterales* (en inglés, off-stream reservoirs) y los llamados *frontales* (on-stream reservoirs) que están ubicados sobre el lecho fluvial, como Poechos sobre el río Chira, Gallito Ciego sobre el río Jequetepeque, o Tablachaca sobre el Mantaro. (Rocha Felices, Mayo 2011).

Hay dos clases de embalses frontales. Unos, que requieren un volumen adicional para almacenar los sedimentos y conservar así el volumen útil durante un cierto número de años, asociado a la llamada vida útil del embalse (Poechos y Gallito Ciego). Otros que, por existir condiciones favorables para ello, tienen los dispositivos para la eliminación de los sólidos depositados (Tablachaca) por medio de una purga hidráulica (limpieza, eliminación de sólidos) que se efectúa, por lo general, una vez al año, siempre que las condiciones hidrológicas lo permitan. Comúnmente, los embalses laterales tienen un volumen de regulación menor que el de los embalses frontales (Rocha Felices, Mayo 2011).

1.4.2. Embalses según su función

Según Guevara (2000) los embalses, dependiendo la función que realicen, serán: de acumulación, distribución y pondajes.

1.4.2.1. Embalses de acumulación

Retienen excesos de agua en períodos de alto escurrimiento para ser usados en épocas de sequía.

1.4.2.2. Embalses de distribución

No producen grandes almacenamientos, pero facilitan el funcionamiento de sistemas de suministro de agua, plantas de tratamiento o estaciones de bombeo.

1.4.2.3. Pondajes

Pequeños almacenamientos para suplir consumos locales o demandas pico.

1.4.3. Embalses según el tamaño y profundidad

La clasificación de los embalses de acuerdo al tamaño se hace más por razones de tipo estadístico que por interés desde el punto de vista técnico.

- Embalses gigantes : $V > 100,000 \text{ Mm}^3$
- Embalses muy grandes : $100,000 \text{ Mm}^3 > V > 10,000 \text{ Mm}^3$
- Embalses grandes : $10,000 \text{ Mm}^3 > V > 1,000 \text{ Mm}^3$
- Embalses medianos : $1,000 \text{ Mm}^3 > V > 1 \text{ Mm}^3$
- Embalses pequeños o pondajes: $V < 1 \text{ Mm}^3$

*V: Volumen del embalse.

*Mm³: Millones de metros cúbicos.

1.5. Estructuras que conforman los embalses

Todo embalse consta de las siguientes estructuras hidráulicas básicas (Ver Figura 6):

- La presa.
- El vertedero o aliviadero.
- Las obras de toma.

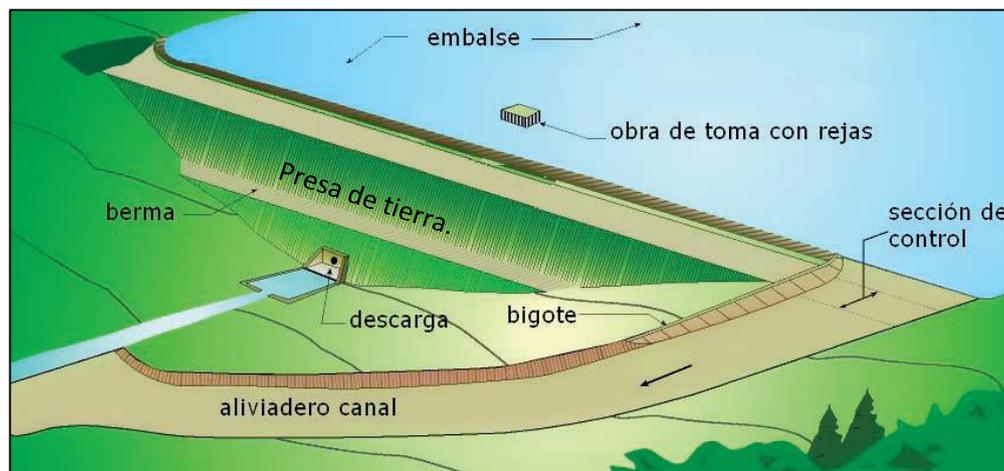


Figura 6. Elementos constitutivos de un embalse. Diseño y Construcción de pequeñas presas, 2011.

1.5.1. Presas

La presa, dique o represa es una pared que se coloca en un sitio determinado del cauce de una corriente natural con el objeto de almacenar parte del caudal que transporta la corriente (Giraldo Betancourt, 2014). La pared debe ser diseñada para que soporte las fuerzas que se generan por la presión del agua, y para que impida filtraciones a lo largo de su estructura y en las superficies de contacto entre la estructura y el terreno natural adyacente. Además, la presa debe contar con obras complementarias que permitan el paso del agua que no se embalsa y con estructuras de toma para captar y entregar el agua embalsada a los usuarios del sistema (Arango Tobón).

1.5.1.1. Elementos principales de una presa

Los elementos que conforman a una presa, según el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2012), son:

Los paramentos, caras o taludes: Son las dos superficies más o menos verticales principales que limitan el cuerpo de la presa, el interior o de aguas arriba, que está en contacto con el agua, y el exterior o de aguas abajo.

La corona o cresta: Es la superficie que delimita la presa superiormente. Corresponde a la parte superior de la presa y a veces la misma es proyectada con camino transitable y otras no.

Los estribos o empotramientos: Son los laterales del muro que están en contacto con la cerrada¹⁰ contra la que se apoya.

La cimentación: Es la parte de la estructura de la presa, a través de la cual se transmiten las cargas al terreno, tanto las producidas por la presión hidrostática como las del peso propio de la estructura.

Las compuertas: Son los dispositivos mecánicos destinados a regular el caudal de agua a través de la presa.

El desagüe de fondo: Permite mantener el denominado caudal ecológico aguas abajo de la presa y vaciar la presa en caso de ser necesario.

1.5.1.2. Tipos de presas

1) Según sus materiales

A. Presas de hormigón – concreto

Son las más utilizadas en los países desarrollados ya que con éste material se pueden elaborar construcciones más estables y duraderas; además que su cálculo es del todo fiable frente a las producidas con otros materiales.

¹⁰ Es el punto concreto del terreno donde se construye la presa.

Normalmente, todas las presas de tipo gravedad, arco y contrafuerte están hechas de este material.

Dependiendo del diseño que se efectúe con la forma del concreto, se pueden encontrar los siguientes tipos (Gamarra, 2014):

a. Presa de gravedad

Es aquella en la que su propio peso es el encargado de resistir el empuje del agua. El empuje del embalse es transmitido hacia el suelo, por lo que éste debe ser muy estable para soportar el peso de la presa y del embalse. Tienen mayor durabilidad y requieren menor mantenimiento. Su base es ancha y se va estrechando a medida que se asciende hacia la parte superior, en muchos casos el lado que da al embalse es casi vertical. Existe una diferencia notable en el grosor del muro a medida que aumenta la altura de la presa porque la presión en el fondo del embalse es mayor que en la superficie, de esta forma, el muro tendrá que soportar más presión en el fondo del embalse que en la superficie (Ver Figura 7).

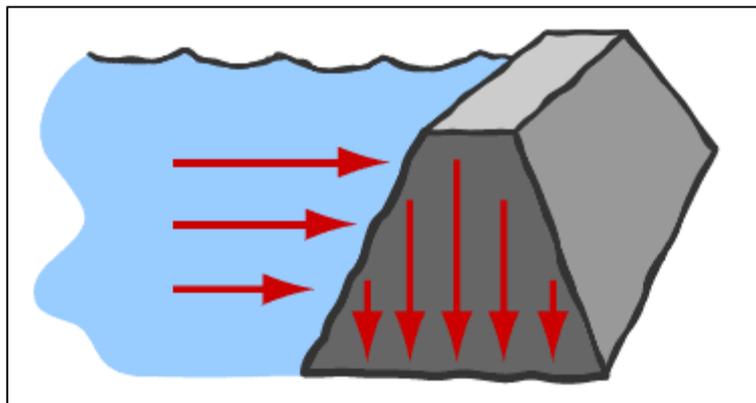


Figura 7: Presa de gravedad.

Fuente. <http://www-tc.pbs.org/wgbh/buildingbig/images/dam/gravityforces.gif>

b. Presa de arco

Es aquella en la que su propia forma curva con convexidad, es la encargada de resistir el empuje del agua. Debido a que la presión se transfiere en forma muy concentrada hacia las laderas de la cerrada, se requiere que ésta sea de roca muy dura y resistente. Adquiere la mayor parte de su estabilidad al transmitir la presión hidráulica y cargas adicionales, por acción del arco. Son las represas más innovadoras en cuanto al diseño y las que menor cantidad de concreto se necesita para su construcción. Se construyen con concreto armado y pretensado. Utiliza los fundamentos teóricos de la bóveda, ya que su curvatura presenta una convexidad dirigida hacia el embalse, así la carga se distribuye por toda la presa hacia los extremos (Ver Figura 8).

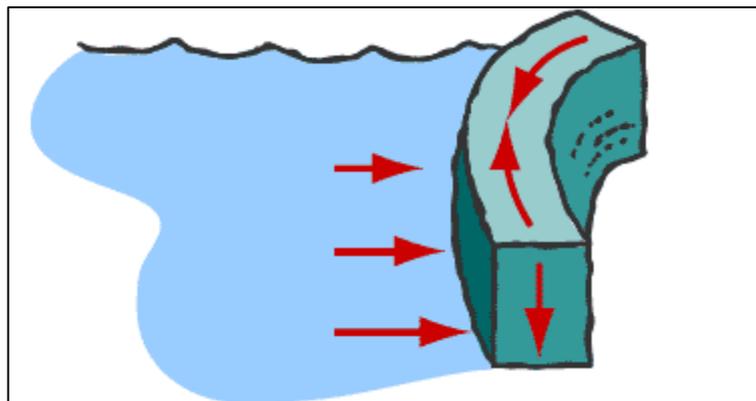


Figura 8: Presa de arco

Fuente:

<http://www-tc.pbs.org/wgbh/buildingbig/images/dam/archforces.gif>

c. Presa de arco-gravedad

Combina características de las presas de arco y de gravedad, se considera una solución de compromiso entre los dos tipos.

Tiene forma curva para dirigir la mayor parte del esfuerzo contra las paredes de un cañón o un valle, que sirven de apoyo al arco de la presa, además, el muro de contención tiene más espesor en la base y el peso de la presa permite soportar parte del empuje del agua.

Este tipo de presa precisa menor volumen de relleno que una presa de gravedad (Ver Figura 9).



Figura 9: Presas de arco-gravedad. Presa de Aldeadávila.

Fuente:

<http://servicios2.magrama.es/imagenes/DGA/Fotografias/Presas/00053f2.jpg>

d. Presa de bóveda o de doble arco

Cuando la presa tiene curvatura en el plano vertical y en el plano horizontal, también se denomina de bóveda (Ver Figura 10).

Para lograr sus complejas formas se construyen con concreto y requieren gran habilidad y experiencia de sus constructores, que deben recurrir a sistemas constructivos poco comunes.

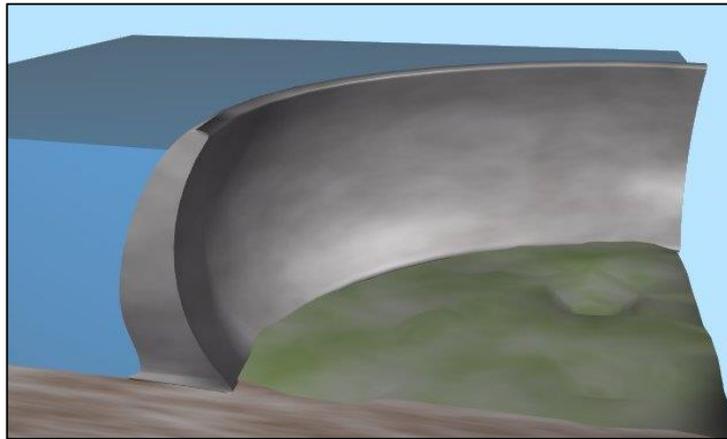


Figura 10: Presa de bóveda.

Fuente:

https://es.wikipedia.org/wiki/Represa#/media/File:Img_barrage_voute.jpg

e. Presas aligeradas

En las presas aligeradas, para resistir el empuje del agua, se reemplaza la utilización de hormigón en grandes masas por un cuerpo resistente más liviano integrado por elementos estructurales tales como columnas, losas y vigas.

La presión del agua, distribuida a lo largo de una superficie, se transforma en fuerzas concentradas y se "conduce" a los apoyos de la presa mediante elementos planos y lineales.

Las presas del tipo aligeradas más conocidas son las de contrafuertes verticales (Ver Figura 11).

Los contrafuertes son especies de costillas estructurales perpendiculares al eje de la presa, que se unen hacia aguas arriba con losas de hormigón que "sostienen" el agua, reciben su empuje y lo "transmite" a los contrafuertes, los que a su vez trasladan los esfuerzos a las fundaciones o cimientos de la presa.

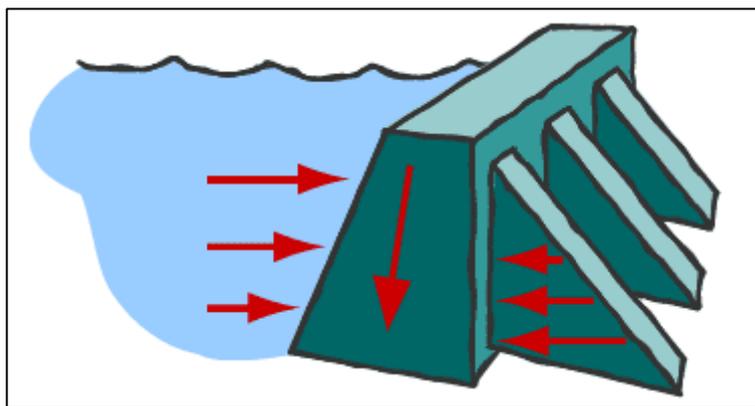


Figura 11: Presa aligerada o de contrafuertes

Fuente: <http://www-tc.pbs.org/wgbh/buildingbig/images/dam/buttrssforces.gif>gravedad.

B. Presas de tierra

Las presas de tierra son el tipo más común, debido básicamente a que en su construcción se utilizan los materiales en estado natural con un proceso mínimo. La mayor parte del volumen de relleno o la totalidad está constituida de suelos finos, materiales que pueden tener como máximo gravas. La ventaja de estas presas es que se adaptan fácilmente a la cimentación del terreno natural; además, los requisitos de cimentación para este tipo de presas son menos rigurosos que en otros.

Los materiales utilizados en los rellenos deben satisfacer las condiciones siguientes:

- Tener una fuerte resistencia al corte o cizallamiento.
- Contar con suficiente impermeabilidad.
- No contener materiales solubles como sales y calizas.
- No tener materiales orgánicos
- El material al secarse no debe presentar fisuras que faciliten las filtraciones.

El talud húmedo de la presa puede variar de 2,25:1 a 4:1, mientras que el talud seco (aguas abajo) varía de 2:1 a 3:1, dependiendo de las condiciones del terreno de cimentación y de los materiales disponibles en cantera. El talud mojado a su vez suele protegerse con enrocado para mermar la erosión que pueda ocasionar el oleaje (Ver Figura 12).

La estabilidad de una presa de tierra, se efectúa mediante el método del Círculo de Falla, que se basa en representar el posible deslizamiento de una masa de suelo simulando una superficie cilíndrica en una sección del talud de la presa.

Las presas de tierra suelen tener un núcleo impermeable ubicado en el centro de la sección, como una pared interna. Este núcleo tiene como objeto evitar filtraciones, pues estas pueden generar pérdida de agua y falla por sifonamiento de la propia presa.

Las presas de tierra requieren aliviaderos separados de la presa porque el principal problema de una presa de tierra consiste en que puede sufrir daños graves, e incluso ser destruida por la erosión producida en el caso de un vertido por su coronación. Por ello se debe de prever suficiente capacidad para el aliviadero.

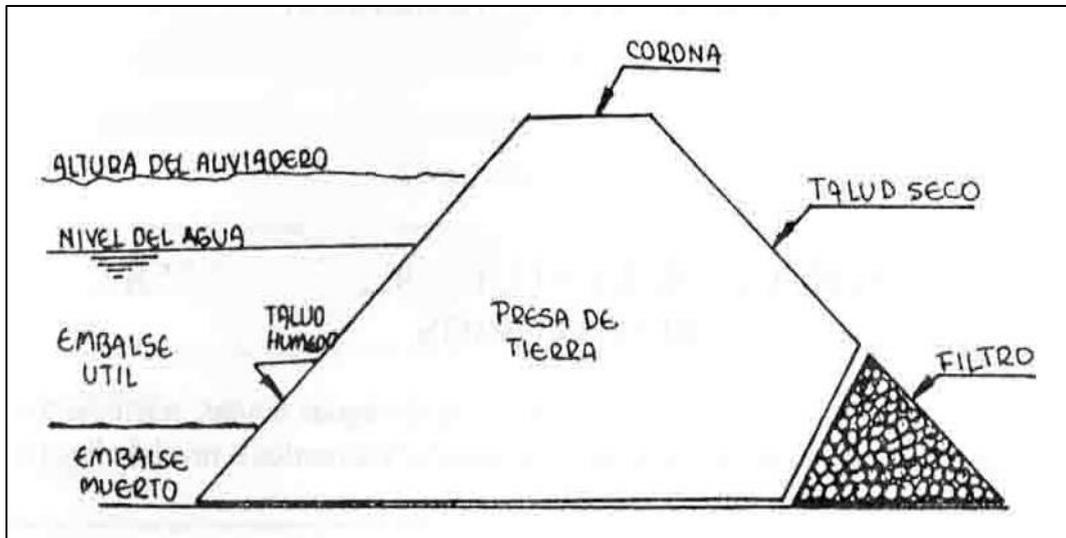


Figura 12: Partes de una presa de tierra

Fuente: Manual técnico para el manejo integral de cuencas hidrográficas, 1997

Las presas de tierra compactada pueden ser de tres tipos: homogéneas, heterogéneas y de pantalla (Ver Figura 13).

- a. **Presas de tipo homogéneo:** Se compone de material de una sola clase, excluyendo la protección de los taludes. El material que forma la presa debe ser suficientemente impermeable para proporcionar una estanqueidad adecuada. Aunque es inevitable que se dé la filtración a lo largo del tiempo. Esta sección completamente homogénea puede variar por una sección modificada donde se emplea pequeñas cantidades de materiales permeables que controlan la acción de la filtración, evacuando el agua del interior de la presa por unos filtros.
- b. **Presas de tipo heterogéneo o de zonas:** Es la sección más común de las presas de tierra compactada. Tiene un núcleo central impermeable, cubierto por zonas de materiales más permeables. Se considera heterogénea si la anchura horizontal de la zona impermeable, en cualquier punto, es igual o mayor que la altura de terraplén sobre ese punto de la presa.
- c. **Presas de pantalla:** El terraplén se construye con material permeable, estableciéndose una pantalla fina de material impermeable que constituye una pared que impide el paso del agua. La pantalla puede ser de tierra, concreto o material bituminoso.

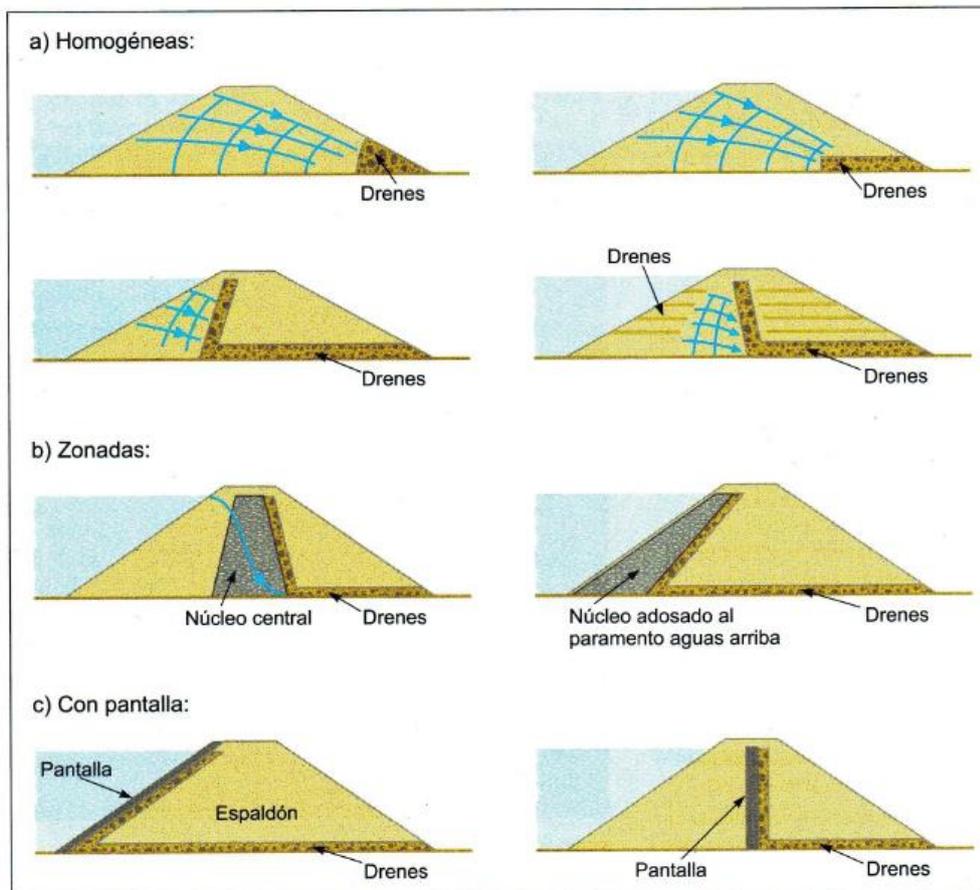


Figura 13: Tipos de presas de tierra.

Fuente: <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ingenieria-civil/contenido/TEMA%205%20-%20PRESAS.pdf>

C. Presas de escollera

Las presas de escollera o de enrocamiento se han definido como una presa cuya mayor parte de la estructura está compuesta de piedras volcadas o en capas.

Se denominan así, cuando el cuerpo de la misma, está constituido en más de un 50% de materiales procedentes de rocas y gravas, o por materiales que como máximo contienen un 10% de materiales finos. Los materiales mencionados son acumulados, distribuidos y compactados en el cuerpo de la presa.

Las presas de escollera se construyen con rocas de todos los tamaños, que aseguran la estabilidad, y una pantalla impermeable para darle estanqueidad.

La ubicación y disposición de dicha pantalla distingue a las presas de enrocamiento en tres clases: de pantalla exterior, de núcleo vertical o de núcleo inclinado (Ver Figura 14).

La pantalla puede ser una capa de tierra impermeable como núcleo, o puede ubicarse en el paramento de aguas arriba (de pantalla exterior) como una losa de concreto, una lámina de concreto asfáltico o planchas metálicas. Sin embargo las presas de pantalla exterior con losas de concreto no se recomiendan en grandes alturas de presa.

Las presas de escollera, igual que las de tierra, pueden dañarse debido al desbordamiento por coronación, por lo que debe construirse un aliviadero para prevenir su vertido.

El tipo de presa de escollera es adecuado en lugares remotos donde no se cuenta con la posibilidad de obtener una buena roca, no se disponga de un suelo apropiado o se tengan largos tiempos de lluvias que vuelvan los periodos estacionales de construcción muy cortos.

También es recomendable donde la construcción de una presa de concreto sea excesivamente costosa, o donde se disponga de una gran cantidad de piedras procedentes de excavaciones propias del proyecto como un aliviadero o túnel.

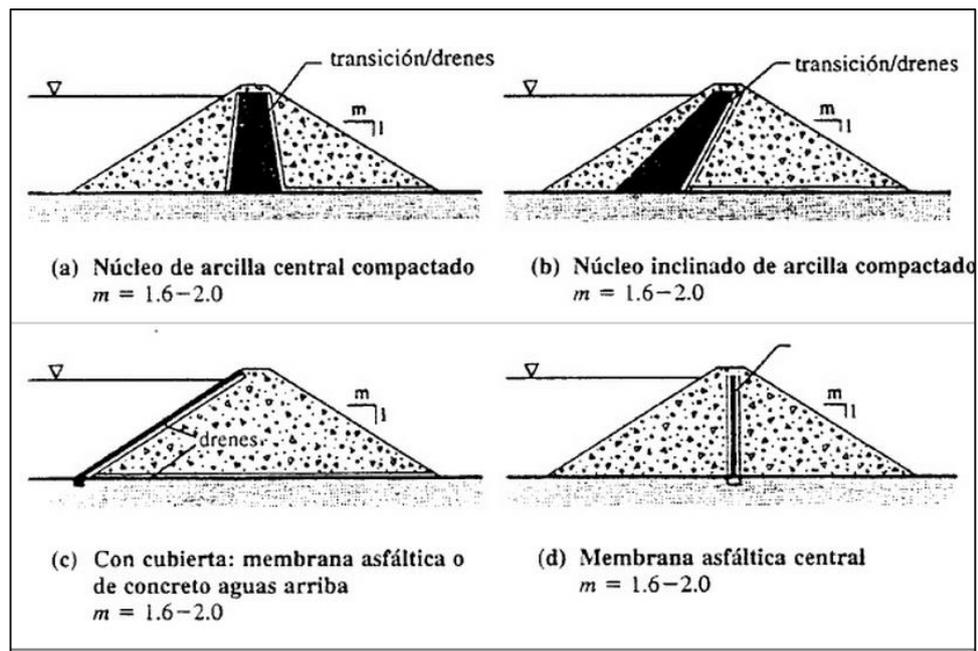


Figura 14: Principales variantes de presas de enrocado.

Fuente: <http://es.slideshare.net/ardromeda/presa-42111791>

2) Según sus características hidráulicas

Las presas pueden clasificarse como presas vertedero y no vertedero (Bureau Of Reclamation, 1970).

A. Presas vertedero

Se denominan presas vertedero a las que pueden verter por la coronación. Deben construirse con materiales que el agua no erosione cuando vierte. Los materiales empleados son: hormigón, mampostería, acero y madera, salvo en el caso de estructuras de muy poca altura.

B. Presas no vertedero

Son aquellas que han sido proyectadas para que no se viertan por su coronación. Este tipo de presas permite el empleo en su construcción de tierra y escollera.

*A menudo se combinan estos tipos para dar lugar a una estructura compuesta formada, por ejemplo, por una parte de presa gravedad con aliviadero, completada con diques de tierra.

3) Según su aplicación

Según Gamarra (2014) los embalses se clasifican en:

A. Presas de almacenamiento

El objetivo principal de estas, es retener el agua para su uso regulado en irrigación, generación eléctrica, abastecimiento a poblaciones, recreación o navegación, formando grandes vasos o lagunas artificiales. El mayor porcentaje de presas del mundo, las de mayor capacidad de embalse y mayor altura de cortina corresponden a este objetivo.

B. Presas filtrantes

Son aquellas que tienen la función de retener sólidos, desde material fino, hasta rocas de gran tamaño, transportadas por torrentes en áreas montañosas, permitiendo sin embargo el paso del agua.

C. Presas de control de avenidas – reguladoras

Son aquellas cuya finalidad es la de laminar el caudal de las avenidas torrenciales, con el fin de que no se cause daño a los terrenos situados aguas abajo de la presa en casos de fuerte tormenta.

D. Presas de derivación

El objetivo principal de estas, es elevar la cota del agua para hacer factible su derivación, controlando la sedimentación del cauce de forma que no se

obstruyan las bocatomas de derivación. Este tipo de presas son, en general, de poca altura ya que el almacenamiento del agua es un objetivo secundario.

E. Presa de relaves

Son estructuras de retención de sólidos sueltos y líquidos de desecho, producto de la explotación minera, los cuales son almacenados en vasos para su decantación. Por lo común son de menores dimensiones que las presas que retienen agua, pero en algunos casos corresponden a estructuras que contienen enormes volúmenes de estos materiales. Al igual que las presas hidráulicas tienen cortina (normalmente del mismo tipo de material), vertedero, y poseen un sistema para extraer los líquidos.

4) Según su grado de riesgo

El grado de seguridad exigible a las presas no debe ser uniforme, sino adecuado a su importancia, al servicio que presta y, sobre todo, al riesgo potencial que resultaría de su eventual fallo (Cánovas Del Castillo, 1998).

El Reglamento Español (art. 3.2), de acuerdo con la Directriz de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, distingue tres categorías a este respecto:

- **Categoría A.** Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o a servicios especiales, así como producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- **Categoría B.** Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
- **Categoría C.** Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales de moderada importancia o sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las A o B.

La primera categoría incluye las presas cuyos riesgos derivados de la rotura son inaceptables, como serían los siguientes:

- Destrucción de edificios o de equipamiento de un barrio o conjunto comercial o industrial importante que, aparte de la misma destrucción dejaría a mucha gente sin empleo o con precisión de traslado.
- Destrucción o interrupción duradera del abastecimiento de agua a una comunidad importante, sin alternativa sustitutoria viable,
- Destrucción o graves daños en un conjunto histórico-artístico de alto interés sin posibilidad de protección o traslado previo.
- Efectos graves irreparables en el ambiente
- Pérdida de vidas probable por el número de los afectados o por falta de garantía de aviso previo para la evacuación.

En el otro extremo, la categoría C comprende las presas de poca importancia y riesgo, exclusiva o preferentemente ceñido a la propia presa, esto es, al propietario de ella, por lo que la decisión de aceptar un cierto grado de riesgos es más fácil. En general, se trata de presas de menor altura, aisladas o lejanas.

1.5.2. Aliviadero o vertedor

El aliviadero o estructura de alivio o vertedor, descarga los excesos que llegan al embalse, los cuales no se desean almacenar. Su característica más importante es la de evacuar con facilidad las máximas crecientes que llegan al vaso de almacenamiento. Su insuficiencia provoca el desborde del agua por encima de la cresta de la presa y el posible colapso de esta estructura sobre todo si se trata de una presa de tierra o enrocado (Fattorelli & Fernandez, 2011).

Según la Bureau Of Reclamation, 1970: La función de los vertederos en las presas de almacenamiento y en las reguladoras es dejar escapar el agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para almacenamiento, y en las presas derivadoras dejar pasar los excedentes que no se envían al sistema de derivación. Ordinariamente los volúmenes en exceso se toman de la parte superior del embalse creado por la presa y se conducen por un conducto artificial de nuevo al río o algún canal de drenaje natural.

La importancia que tiene un vertedor seguro no se puede exagerar. Muchas de las fallas de las presas se han debido a vertedores mal proyectados o de capacidad insuficiente. La amplitud de la capacidad es de extraordinaria importancia en las presas de tierra y en las de enrocamiento, que tienen el riesgo de ser destruidas si son rebasadas, mientras que, las presas de concreto pueden soportar un rebasamiento moderado. Generalmente, el aumento en costo no es directamente proporcional al aumento de capacidad. Con frecuencia el costo de un vertedor de amplia capacidad es sólo un poco mayor que el de uno que evidentemente es muy pequeño.

Además de tener suficiente capacidad, el vertedor debe ser hidráulica y estructuralmente adecuado y debe estar localizado de manera que las descargas del vertedor no erosionen, ni socaven el talón de aguas abajo de la presa. Las superficies que forman el canal de descarga del vertedor deben ser resistentes a las velocidades erosivas creadas por la caída desde la superficie del vaso a la del agua de descarga y, generalmente, es necesario algún medio para la disipación de la energía al pie de la caída.

La frecuencia del uso del vertedor la determinan las características de escurrimiento de la cuenca y la naturaleza del aprovechamiento. Ordinariamente, las avenidas que se almacenan en el vaso, se derivan por las tomas o se descargan a través de los desagües, y no es necesario que funcione el vertedor o aliviadero.

Las avenidas extraordinarias (por ejemplo, durante las épocas de deshielo, o de grandes escorrentías), agotan los recursos normales de desembalse y entonces se requieren los servicios del aliviadero. Cuando se ha previsto una gran capacidad de embalse o cuando se dispone de dispositivos de desagüe y derivación de gran aforo, no es frecuente el uso del aliviadero. En cambio, en las presas de derivación, con un volumen de embalse o almacenamiento limitado y derivaciones relativamente

pequeñas comparadas con el gasto normal del río, el vertedor o aliviadero se utiliza casi constantemente.

Las partes componentes de un vertedero son las siguientes (Bustamante, 1996):

Estructura de control: La estructura de control regula y controla las descargas del depósito. Estas estructuras pueden consistir en una cresta, vertedero, orificio, pozo o tubo, sifón, etcétera. Se consideran preferentemente las estructuras cresta libre o de escurrimiento libre. Con perfil de cimacio. Estas estructuras se aproximan al tipo ideal de vertedero; en el cual, el agua debe pasar guiada suavemente sobre la cresta con el mínimo de turbulencia. La lámina de agua se adhiere al paramento del perfil y es guiada sobre la superficie de talud del canal de descarga.

Canal de descarga: El canal de descarga conduce las aguas descargadas por la estructura de control hacia el cauce natural, aguas abajo de la presa. La estructura de conducción puede ser un canal excavado en una de las laderas, en los extremos de la presa; un canal excavado a través de la presa; un canal apoyado sobre el paramento de aguas debajo de la presa, etcétera. El perfil longitudinal del canal puede tener poca pendiente o pendiente fuerte. La sección del canal puede ser rectangular o trapecial y se construye de hormigón armado, para soportar las sollicitaciones producidas sobre la estructura.

Estructura terminal: La energía hidráulica producida por el agua, al caer desde el nivel de aguas máximas de crecida del depósito hasta el lecho del cauce natural, se convierte en energía cinética que se manifiesta en altas velocidades; las cuales, si se trata de disminuirlas, producen grandes presiones sobre las estructuras. Por este motivo, debe diseñarse una estructura terminal que permita descargar el agua en el cauce natural, sin erosiones o socavaciones peligrosas en el talón de la presa, y que no produzca daños en las estructuras vecinas. Existen muchos tipos de estructuras terminales que se pueden adoptar, tales como estanques, dados amortiguadores, deflectores, trampolines, etcétera.

1.5.3. Obras de toma

Las obras de toma son un conjunto de estructuras formadas por una entrada o toma, un túnel o conducto a través de un estribo o de la presa y una estructura de salida. Este conjunto permite tomar las aguas del embalse y pasarlas al canal principal. Debe tener suficiente capacidad para descargar las aguas, abastecer las demandas dispuestas para la operación del embalse, de acuerdo a los requerimientos para niveles mínimos del mismo (Fattorelli & Fernandez, 2011).

Los componentes de la obra de toma son los siguientes (Bustamante, 1996):

La estructura de toma: Consiste en una cámara de entrada, con rejilla removible en la boca de acceso de las aguas, y con unión flexible en el cabezal de la tubería en la salida de las aguas. Esta cámara se construye de hormigón armado y sus dimensiones son mínimas, pero debe tener capacidad para que pueda trabajar un hombre en su interior. Además, debe tener una ranura que permita instalar eventualmente una hoja de compuerta en la entrada de la tubería. La estructura de toma se ubica en el fondo del embalse, en la cota o nivel mínimo útil del embalse.

La tubería de conducción: Consiste en un conducto cerrado a presión, que se coloca enterrado a través de la presa. La ubicación de este conducto más conveniente, a lo largo de la presa, es en sus extremos, donde la presión de la presa sobre el terreno natural es mínima, o menor que en el centro donde la presa tiene mayor altura. Para disminuir las filtraciones a lo largo de la superficie de contacto del conducto y del terraplén, se debe utilizar **dentellones de collar**¹¹.

Los dispositivos de control que se instalan en las presas pequeñas son generalmente válvulas de regulación y de cierre. Las compuertas pueden ser de acero protegido o de fierro fundido. Las válvulas de mariposa y válvulas de compuertas son adecuadas cuando el punto de control está ubicado en el extremo de aguas abajo de la tubería a presión y si la tubería está diseñada para operar con descarga libre. La válvula de regulación permite descargar gastos especificados de agua desde el embalse. Si la válvula de regulación está ubicada a la salida de la tubería a presión, es conveniente colocar antes de ella una válvula de cierre o abertura total, que se usa solamente en el caso de falla de la válvula de regulación. Las válvulas se instalan en una cámara de válvulas a la salida de la tubería de conducción y antes de la estructura terminal.

La estructura terminal y disipadora: Consiste en una cámara de salida, en la cual descarga la tubería de conducción. El chorro de agua se disipa en un pozo vertical amortiguador de la cámara, en la cual se forma un colchón de agua. La salida de la cámara consiste en una sección de canal rectangular, con aletas, que empalma con el canal derivado del embalse. Si es necesario se coloca un pedraplén de tres metros de longitud, a la salida de la cámara, para evitar la socavación del fondo del canal.

1.6. Uso de los embalses

Básicamente un embalse creado por una presa que interrumpe el cauce natural de un río, pone a disposición del operador del embalse: un volumen de almacenamiento potencial que puede ser utilizado para múltiples fines, algunos de ellos complementarios y otros conflictivos entre sí; así como también pone a disposición del operador del embalse, un potencial energético derivado de la elevación del nivel del agua.

Se pueden distinguir los usos que para su maximización requieren que el embalse esté lo más lleno posible, garantizando un caudal regularizado mayor (Ainzúa, 2007). Estos usos son:

La generación de energía eléctrica: Protección y suministro de energía para usos domésticos e industriales.

El Riego: Usos domésticos e industriales, obteniéndose como beneficio: Incremento de la producción agropecuaria.

Abastecimiento de agua potable o industrial: Aumento de bienestar de la población. Mejoramiento de la piscicultura para usos industriales. Mejoramiento de la ecología vegetal y animal.

¹¹ Estructuras anulares que rodean totalmente el conducto, se construyen de hormigón armado y se colocan sobre un relleno asfáltico, pre-moldeado en las juntas entre tubos, para evitar esfuerzos secundarios sobre la tubería.

Control de sedimentos: Pequeños embalses para control de sedimentos a otros embalses o a corrientes de agua. Control de erosión.

Navegación: Facilidades de transporte por vía fluvial, permitiendo la navegación entre poblaciones.

1.6.1. Embalse de usos múltiples

Muchos embalses modernos son diseñados para usos múltiples. En estos casos el operador del embalse debe establecer políticas de operación, que deben tener en cuenta:

- Prioridad de cada uno de los usos, asociado a la disponibilidad de otras alternativas técnica y económicamente factibles en el área. En general, el abastecimiento de agua potable tiene la prioridad más elevada.
- Limitaciones de caudal, máximo y mínimo, aguas abajo de la presa que soporta el embalse.

1.7. Ventajas de los embalses

- Mejoramiento en el suministro de agua a núcleos urbanos en épocas de sequía.
- Desarrollo de la industria pesquera.
- Incremento de las posibilidades de recreación.
- Mantenimiento de reservas de agua para diferentes usos.
- Incremento de vías navegables y disminución de distancias para navegación.
- Control de crecientes de los ríos y daños causados por inundaciones.
- Mejoramiento de condiciones ambientales y paisajísticas.

1.8. Desventajas de los embalses

- Pérdidas en la actividad agroindustrial por inundación de zonas con alto índice de desarrollo.
- Alteración de los hábitats y los paisajes fluviales.
- Alteración de las zonas bajas que perturba el ciclo natural de peces y otros organismos acuáticos (alteración de corredores ecológicos naturales)
- Desplazamiento de comunidades enteras.
- Inestabilidad en los taludes que se encuentran cerca al valle, generando deslizamientos de material en algunos casos.
- Posible incremento de la actividad sísmica, especialmente durante el llenado de embalses muy grandes.

1.9. Características de los embalses

Lo más importante de un embalse es su capacidad de almacenamiento, que se representa por medio de las curvas características que son dos: (Guevara, 2000) (Ver Figura 15).

Curva área-elevación o cota-superficie: Se construye a partir de información topográfica planimetrando el área comprendida entre cada curva de nivel del vaso topográfico. Esta curva indica la superficie inundada correspondiente a cada elevación.

Curva capacidad-elevación o cota-volumen: Se obtiene mediante la integración de la curva área-elevación. Indica el volumen almacenado correspondiente a cada elevación.

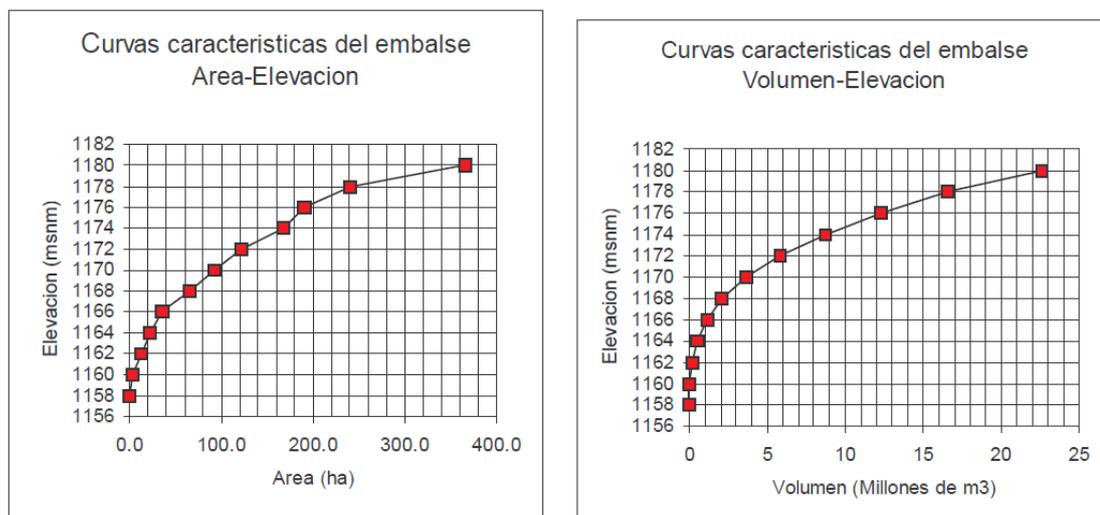


Figura 15: Curva característica de los embalses.

Fuente. Estructuras hidráulicas. Embalses.

Para determinar estas curvas se requiere de información topográfica consistente en un plano topográfico de la cuenca hidrográfica. Escalas usuales son 1:50.000, 1:25.000, 1:20.000, 1:10.000, 1:5.000, y 1:1.000, con curvas de nivel entre 20 m y 1 m, dependiendo de la magnitud del proyecto y del nivel de precisión requerido.

El incremento de volumen entre dos curvas de nivel consecutivas se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{\Delta h}{3} (A_i + A_s + \sqrt{A_i * A_s})$$

ΔV = Incremento de volumen entre curvas de nivel consecutivas.

Δh = Diferencia de nivel entre curvas de nivel consecutivas.

A_i = Área correspondiente a un nivel inferior.

A_s = Área correspondiente a un nivel superior.

1.9.1. Niveles característicos de los caudales de un embalse

El nivel del agua en un embalse es siempre mayor que el nivel original del río. Desde el punto de vista de la operación de los embalses, se definen una serie de niveles. Los principales son (en orden creciente): (Ver Fig. 16).

- **Nivel de embalse muerto (NEM):** es el nivel mínimo de agua en el embalse. Delimita superiormente el volumen muerto del embalse.
- **Nivel mínimo de operación del embalse (NMOE):** Delimita superiormente el volumen generado por la altura mínima del agua necesaria para el correcto funcionamiento de toma de agua la que se sitúa por encima de NME.
- **Nivel normal del embalse (NNE):** Delimita superiormente al volumen útil del embalse, que es el que se aprovecha y gasta en función de diferentes propósitos: energía, irrigación, suministro de agua, etc. Para su ubicación se tienen en cuenta los siguientes aspectos: aportes de la cuenca, demanda de agua, pérdidas por infiltración y evaporación.
- **Nivel forzado de aguas (NFE):** Se presenta temporalmente durante la creciente de los ríos dando lugar al volumen forzado del embalse, el cual puede ser usado en algunos casos, pero por lo general es evacuado rápidamente por medio del vertedor de demasías o rebosadero o aliviadero.

En condiciones normales ocurre oscilación del nivel del agua entre el NNE y el NMOE.

Volumen total del embalse = volumen muerto + volumen de operación + volumen útil + volumen forzado.

1.9.2. Volúmenes característicos de un embalse

Los volúmenes característicos de los embalses están asociados a los niveles, de esta forma se tiene: (Ver Figura 16).

- **Volumen muerto:** Está ubicado por debajo del nivel muerto del embalse (NME) y es donde se acumularán los sedimentos durante la vida útil del embalse. Debe exceder en capacidad al volumen de sedimentos calculado durante la vida útil con el fin de que el embalse los pueda contener. Su determinación es muy compleja, sobre todo si el embalse es de propósito múltiple (caso en que debe tenerse en cuenta la carga de agua sobre las turbinas, condiciones de navegación aguas arriba, altura de comando sobre las tierras de riego, etc.).
- **Volumen útil:** Es el volumen de almacenamiento ubicado entre el nivel mínimo de operación del embalse (NMOE) y el nivel de aguas normales (NNE).
- **Volumen de laminación:** Es el volumen, como su nombre indica, que se utiliza para reducir el caudal vertido en las avenidas, para limitar los daños aguas abajo.

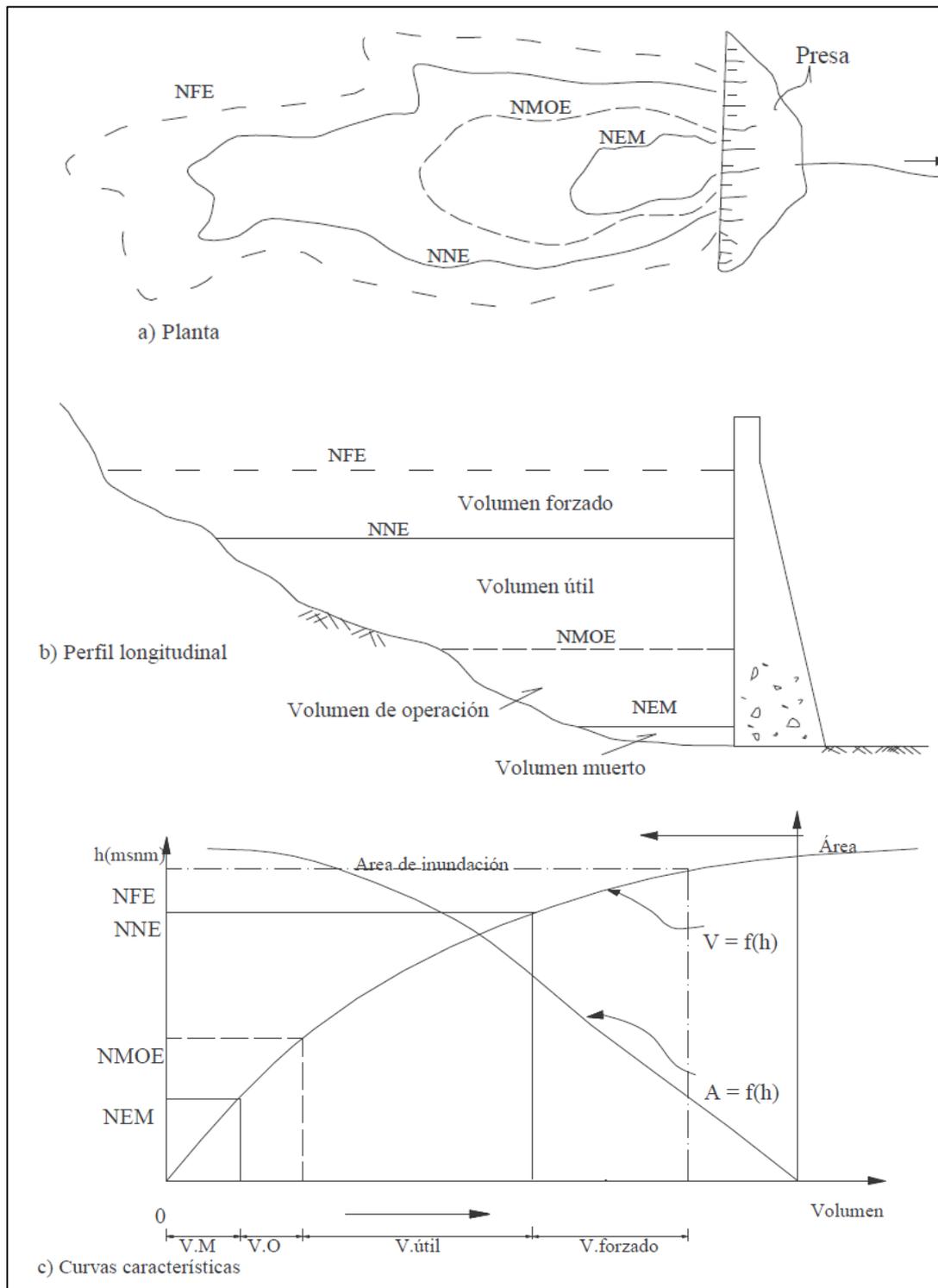


Figura 16: Representación de los niveles característicos de un embalse.

Fuente. Estructuras hidráulicas. Embalses.

1.9.3. Caudales característicos de un embalse

- **Caudal firme:** Es el caudal máximo que se puede retirar del embalse en un período crítico. Si el embalse ha sido dimensionado para compensar los caudales a lo largo de un año hidrológico, generalmente se considera como período crítico al año hidrológico en el cual se ha registrado el volumen aportado mínimo. Sin embargo, existen otras definiciones para el período crítico también aceptadas, como, por ejemplo, el volumen anual de aporte hídrico superado en el 75 % de los años, que es una condición menos crítica que la anterior.
- **Caudal regularizado:** Es el caudal que se puede retirar del embalse durante todo el año hidrológico, asociado a una probabilidad.

1.10. Consideraciones para la selección del sitio del embalse

Guevara (2000) considera que para escoger el sitio adecuado donde estará el embalse, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El vaso natural debe tener una adecuada capacidad, la que es definida por la topografía. La relación entre agua almacenada y volumen de presa, debe ser mayor a diez, para pequeños proyectos.
- La geología del lugar debe analizarse desde el punto de vista de la filtración del lecho del embalse estudiando fallas, contactos y fisuras. Las filtraciones ocasionan no solamente pérdidas de agua, sino también ascenso del nivel freático dando lugar a cambios en las condiciones de los suelos adyacentes. Las mejores condiciones para un embalse las dan suelos arcillosos o suelos formados por rocas sanas, y las peores los suelos limo-arenosos. Si las filtraciones son muy grandes, casi seguro que el vaso topográfico natural no es factible para el almacenamiento. Si resulta económico, se puede impermeabilizar el vaso, lo que sobre todo es factible en el caso de pondajes.
- La estabilidad de los taludes del embalse debe ser analizada, puesto que cuando el embalse está lleno no se presentan serios problemas, pero éstos surgen al ocurrir descensos en los niveles del agua y especialmente si son súbitos.
- Es necesario hacer el avalúo de los terrenos a inundar. El costo de compra de los terrenos no debe ser excesivo. El área del embalse no debe tener en lo posible vías importantes ni edificaciones de relocalización costosa.
- La calidad del agua embalsada es importante y debe ser satisfactoria para el uso proyectado. Los aportes de agua de la cuenca hidrográfica deben ser suficientes durante los períodos de lluvia para llenar el embalse y poder suplir la demanda durante épocas de sequía; en otro caso, hay que estudiar la posibilidad de trasvases.
- El impacto ambiental y social tanto aguas arriba como aguas abajo debe considerarse y evaluarse.

- La limpieza de la zona del embalse puede resultar costosa y debe considerarse a favor o en contra de un proyecto. Materias flotantes, árboles, y otros desechos pueden ser causa de problemas en el funcionamiento de las obras y en la explotación del embalse. La hoya hidrográfica debe presentar pocos síntomas de erosión.
- Se busca que en la vecindad haya materiales para la construcción de la presa y obras anexas.

1.11. Aspectos de los diseños hidráulicos de una presa

Los diseños hidráulicos en una presa de embalse consideran los siguientes aspectos (Arango Tobón):

1.11.1. Demanda

Es la necesidad de agua que tiene el sistema que se está considerando. Cuando el río o la quebrada que se seleccionó como fuente de suministro pueden entregar el caudal de demanda durante unos períodos pero falla en otros, entonces se hacen estudios hidrológicos adicionales de la fuente para determinar si la construcción de un embalse resuelve el problema. Como resultado de estos estudios se obtiene el volumen de almacenamiento requerido que es el volumen que se debe almacenar para suministrar la demanda todo el tiempo.

1.11.2. Volumen útil de almacenamiento

Es el volumen que el embalse está en capacidad de almacenar para suministrar a los usuarios del sistema. Se determina mediante la aplicación de modelos de simulación hidrológica, utilizando como variables las características físicas del embalse, los caudales naturales que entran al embalse, las lluvias directas sobre el área del embalse, las pérdidas por evapotranspiración, infiltración, y vertimientos, y el suministro de agua a los usuarios. Cuando el volumen útil es menor que el volumen requerido entonces el embalse no está en capacidad de suministrar la demanda durante todo el tiempo y se presentan fallas en el suministro con el consiguiente racionamiento. Hay algunas tolerancias para que el sistema permita operar con racionamientos.

1.11.3. Volumen de sedimentos

Un embalse es un gran sedimentador. Mediante estudios de hidráulica fluvial y de transporte de sedimentos se estiman los volúmenes y las características granulométricas de los sedimentos que llegan al embalse en un año típico. También, dado que los sedimentos más gruesos se quedan primero que los finos, y que un porcentaje de estos últimos se deposita contra la presa, es necesario evaluar la forma que toma la masa de los sólidos que se sedimentan para definir el volumen que ocuparán año tras año durante la vida útil del embalse. Los diseños deben asegurar que hay suficiente espacio de almacenamiento de sedimentos para que durante los años de operación proyectados los sedimentos no obstaculicen el funcionamiento de las estructuras de captación.

1.11.4. Estructuras de captación

Son obras de toma que están colocadas por encima del nivel de sedimentos y por debajo del nivel mínimo de operación del embalse. Pueden ser torres con o sin compuertas que se comunican con conductos cerrados que pasan a través de la presa y entregan el agua a los sistemas de distribución, o estructuras más sencillas controladas por compuertas o por válvulas.

1.11.5. Vertimiento de excesos

Los volúmenes de agua que llegan al embalse cuando el volumen de embalse útil está lleno son excesos que deben salir de la estructura en un tiempo corto. Para este efecto se diseñan las estructuras de vertimiento, las cuales deben tener capacidad para conducir los picos de las crecientes extraordinarias en forma segura hasta entregarlos aguas abajo de la presa. En presas de concreto es corriente construir el vertedero de excesos dentro del cuerpo de la presa, pero en presas de tierra y escollera, y en algunos casos particulares de estructuras de concreto resulta más conveniente diseñar y construir el vertedero de excesos como una estructura independiente.

1.11.6. Altura de la presa

Teniendo en cuenta solamente los aspectos hidráulicos, la altura de la presa se define con base en los niveles de operación. Este valor puede ser modificado por consideraciones geotécnicas, estructurales o de costos.

Capítulo 2.

Efecto ambiental de los embalses

La actividad del hombre ha transformado la superficie terrestre desde el principio de los tiempos. Estos cambios son parte del crecimiento de la civilización, pero también son trascendentales para quien se siente afectado por ellos, como es el ser humano y el medio ambiente. ¿Es conveniente entonces ejecutar un proyecto de gran alcance que genera tanto aspectos positivos como negativos? Estas son las dos caras de una misma moneda, puesto que una parte de la sociedad busca el progreso y desarrollo de una nación, mientras que la otra parte defiende los derechos humanos y la conservación del medio ambiente que lo rodea, el mismo que en algunos casos, es el hábitat ideal para satisfacer las necesidades esenciales de etnias o grupos indígenas que existen en algunos países.

En toda obra civil de gran envergadura, es de suma importancia realizar un estudio de impacto ambiental (EIA)¹², el cual debe abarcar todas las consecuencias que posiblemente ocasione el proyecto a ejecutar y que puedan afectar al medio ambiente o entorno que rodea la zona a intervenir, es por esto que a los proyectos de embalses les corresponde efectuar este tipo de estudios y más aún, porque pueden causar cambios ambientales irreversibles en áreas geográficas muy extensas. La aprobación de dicho estudio es y será un debate. En muchos casos, los efectos ambientales son bien justificados, mientras que en otros siempre se tendrá cabida a la polémica.

Aunque las empresas invierten dinero en la elaboración de un EIA, muchas veces ellas mismas lo ven como una mera formalidad para recibir un permiso o una concesión de, por ejemplo: la explotación de recursos naturales. A pesar de existir metodologías ambientales adecuadas para este tipo de proyectos (Anexo A), no se realiza un estudio serio por parte de la empresa y en demasiados casos la calidad del EIA es deficiente, generando situaciones de desconfianza por parte de la población hacia los proyectos a ejecutar. Además, se critica que el cálculo de los costos ambientales es muy deficiente. Todos los ecosistemas nos brindan diferentes servicios ambientales que, en muchos casos, no valoramos más allá del valor monetario. Un bosque, por ejemplo, no sólo nos abastece de madera, sino que además cumple funciones de regulador del agua subterránea o de protección en las montañas.

¹² En el Perú, se aplican los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) desde los años 90 con el objetivo de evitar el deterioro del medio ambiente. Actualmente son de carácter obligatorio para grandes proyectos, como son los embalses y represas.

Finalmente, la participación de la ciudadanía en los diferentes procesos del proyecto, se reduce a una simple entrega de información, y no de decisión, dejando de lado las opiniones de los pobladores; en ocasiones, incluso, se impide la participación de personas críticas al proyecto, lo cual obstaculiza un debate completo sobre la real utilidad de tales iniciativas (Estudio de impacto ambiental y Evaluación ambiental Estratégica).

Según la escritora india Arundhati Roy: “Las grandes presas empezaron bien, pero han acabado mal. Hubo un tiempo en que gustaban a todo el mundo (...) Pero ya no es así”. Esto es debido a los impactos ambientales que se originan por la construcción de las grandes presas y embalses. Actualmente, las ideologías en cuanto a la ejecución de proyectos de grandes embalses, se encuentran divididas, y es así que durante la última década las críticas han aumentado, los críticos más severos sostienen que los costos sociales, ambientales y económicos de estas represas pesan más que sus beneficios y que, por lo tanto, no se justifica la construcción de las represas grandes. Otros mencionan que, en algunos casos, los costos ambientales y sociales pueden ser reducidos a niveles aceptables, si es que se evalúa, cuidadosamente, los problemas potenciales y se realiza un buen plan de gestión ambiental y social.

Cuando se construye un embalse: se inundan en forma permanente amplias extensiones de tierras y las aguas del río cambian su régimen de flujo, es decir, de ser un ecosistema lótico se convierten en uno léntico. La fauna terrestre es desplazada a áreas aledañas al embalse, que no siempre son adecuadas para su supervivencia, y debe competir con las poblaciones ya existentes en ellas (aves, mamíferos grandes y medianos, reptiles grandes, algunos insectos voladores), o muere ahogada durante la inundación (mamíferos y reptiles pequeños, anfibios, la mayoría de los insectos, arañas, caracoles, lombrices, etc.). Las praderas y bosques cubiertos por las aguas mueren indefectiblemente y su lenta descomposición condiciona la calidad de las aguas embalsadas.

En este capítulo no se busca realizar un **Estudio de Impacto Ambiental**¹³ sobre los embalses, sino más bien, la idea es identificar la mayor cantidad de impactos negativos posibles que origina la construcción de un embalse (no sólo como fase constructiva del proyecto, sino referido a todo el proyecto en general) con el fin de proponer medidas de mitigación que disminuyan su efecto negativo y de esta manera obtener embalses que generen más ventajas que desventajas.

2.1. Características limnológicas de los embalses

Un embalse es un centro colector de eventos, un híbrido entre un río (sistema lótico) y un lago (sistema léntico). Tundisi (1986) considera los embalses como concentradores y digestores de contaminantes químicos provenientes de la vertiente, como también archivos de información de desarrollos económicos y cambios ecológicos ocurridos en el área de captación. Son entonces sistemas abiertos, integradores de la cuenca total; por lo tanto, la cuenca influenciará el cuerpo de agua y a la inversa.

Las características de las represas o embalses varían grandemente de acuerdo con el área geográfica, las condiciones climáticas y el uso y manejo de la tierra en su área de influencia. Mientras las zonas templadas la productividad y el comportamiento

¹³ Haciendo una referencia a Estudio de Impacto Ambiental como el documento técnico en el que se apoya todo el proceso de decisión de la Evaluación de Impacto Ambiental, describiendo a detalle los efectos negativos que generaría el proyecto a ejecutar.

fisicoquímico y biológico están marcados por los cambios de temperatura, debido a las estaciones, en los trópicos estos parecen estarlo asociados a las épocas de lluvia y sequía. En los trópicos y subtropicos el problema de las malezas acuáticas reviste características graves que atentan contra la existencia de los embalses. Este problema en las zonas templadas es prácticamente inexistente. Por lo tanto, dar normas generales para su uso y manejo es casi imposible, máxime en los trópicos donde existen pocos estudios acerca de su limnología y comportamiento ecológico general. Hay que recordar que los embalses son ecosistemas artificiales creados por el hombre y que muchas veces éstos pierden su vida útil antes de alcanzar una estabilidad ecológica (Roldán Pérez & Ramirez Restrepo, 2008).

Por lo regular, los embalses en sus primeras etapas de funcionamiento pasan por una serie de cambios físico-químicos, los cuales repercuten en el establecimiento de una flora y fauna estables, así como también en la óptima utilización de los mismos, ya sea para centrales hidroeléctricas o para consumo humano.

2.1.1. Estratificación térmica de un ecosistema acuático

En los embalses y lagos profundos y/o de grandes dimensiones, se produce la estratificación de sus aguas (disposición en capas o estratos, en una secuencia vertical uno sobre otro) durante las estaciones cálidas. Es así que podemos encontrar 3 zonas de características bien diferenciadas (Ver Figura 17). La situación, composición y localización de cada una de las zonas cambia con las estaciones del año.

- **El epilimnion:** Es la zona superficial del embalse, rica en oxígeno y de temperatura más elevada.
- **El metalimnion o termoclina:** Es la zona intermedia que separa la superficie del fondo. Se caracteriza por la caída exponencial y continua de temperatura hasta llegar al hipolimnion.
- **El hypolimnion:** Es la zona profunda de temperatura más fría, próxima a los 4°C. Sus aguas prácticamente están a la misma temperatura todo el año.

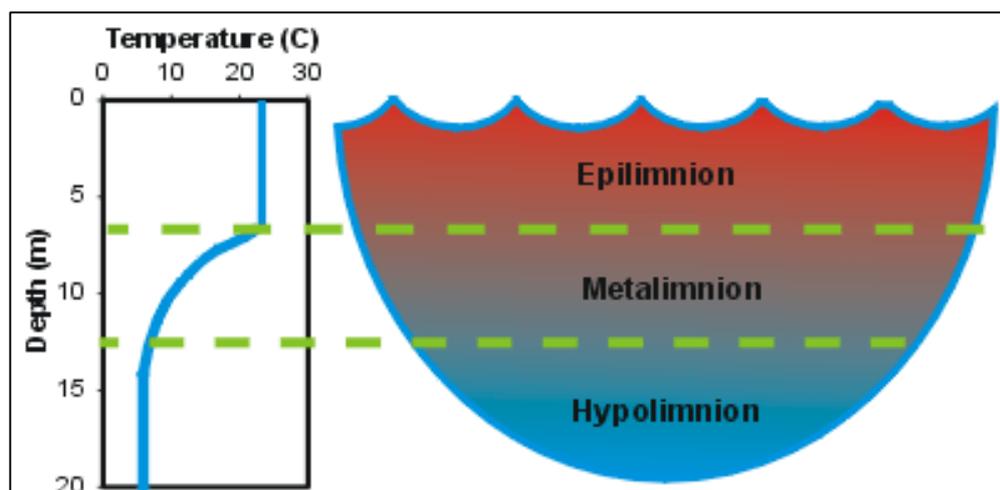


Figura 17: Estratificación de embalses.

Fuente. <http://www.upstatefreshwater.org/temperature.gif>

2.1.2. Diferencias entre lagos y embalses

Veamos a continuación algunas diferencias limnológicas entre lagos y embalses (Roldán Pérez & Ramírez Restrepo, 2008):

- Los embalses tienen entre 10 y 100 años, mientras que los lagos, algunos tienen millones de años de formados.
- El río embalsado regula y retarda su flujo, a la vez que se extiende en forma de una capa de agua que busca el equilibrio al contacto con el nuevo sistema imperante, es por esto que la tasa de renovación del agua es más lenta que la de un río pero más rápida que la de un lago.
- Mientras los lagos tienen forma regular, los embalses son generalmente dendríticos (con valores altos del índice de desarrollo de la línea costera).
- La profundidad máxima en los lagos está localizada cerca del centro, mientras que en los embalses se sitúa cerca de la presa. (Ver Figura 18).
- La organización vertical del lago y la horizontal del río quedan sustituidas por otra organización intermedia y característica, en la que es importante resaltar la asimetría entre la presa o dique y la cola del embalse.
- En los embalses se alteran los períodos de mezcla y estratificación propios de un lago a causa de los movimientos horizontales del agua y su tasa de renovación, que suelen ir acompañadas de cambios importantes en el nivel y en los perímetros húmedos.
- En los embalses, la biomasa es menor y posee una tasa de renovación más elevada.

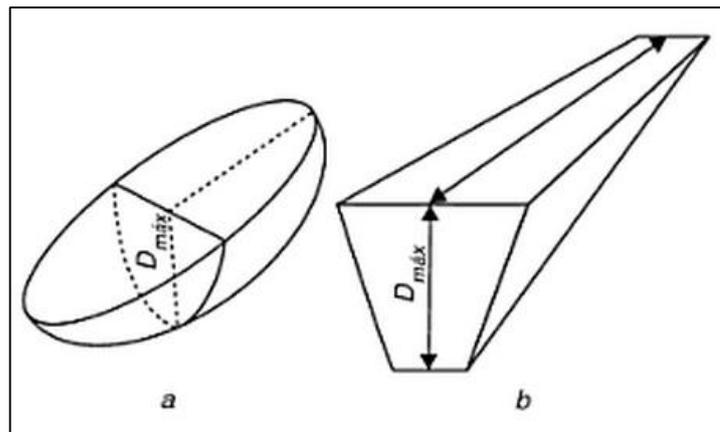


Figura 18: Profundidad máxima de (a) lagos y (b) embalses.

Fuente. Fundamentos de la Limnología Tropical.

- Si la finalidad del embalse es regular las salidas, entonces los cambios de nivel son grandes, para absorber la variabilidad de las entradas. Esta variabilidad afecta en grado diferente a los diversos estratos.

- Los embalses presentan mayor sedimentación que los lagos; por tanto, su agua es más turbia y de menor transparencia, la cual puede llegar a contrarrestar el efecto del suministro de nutrientes a través de las entradas.
- Los sedimentos del fondo son de carácter **autóctono**¹⁴ en los lagos y de tipo **alóctono**¹⁵ en los embalses. En general, el material autóctono se sedimenta en la zona limnética del embalse, mientras que el material alóctono se acumula cerca a la cola del mismo.
- Las comunidades del ecosistema acuático en los embalses son de composición más pobre que en los lagos y cambian con mayor rapidez.
- El viento, que sopla generalmente en los embalses en el sentido de su eje longitudinal, puede tener mayor influencia en la irregularidad de la estratificación térmica.
- Si se consideran cuencas de la misma área e igual precipitación, la relación entre el perímetro de la línea costera y el área de la cuenca es mayor en embalses, ya que estos tienen un índice de desarrollo del perímetro mucho mayor que en los lagos. Para embalses de igual tamaño localizados en igual precipitación tiene menor tiempo de residencia el que presente la mayor cuenca. (Ver Figura 19).
- Los embalses son ecosistemas forzados, con alto suministro de material nutritivo en superficie (fuentes alóctonas), desnitrificación en el hipolimnion anóxico (ausencia de oxígeno) y alta precipitación de fósforo y materia orgánica; por ello, muchos embalses son prácticamente **meromícticos**¹⁶ y no circulan por debajo de la toma de agua. Esta escasez de retorno es compensada con creces por la entrada de nuevos nutrientes.
- La profundidad de la salida es superficial en los lagos y generalmente profunda en los embalses. Consecuentemente, los lagos serán exportadores de calor, pero trampas de nutrientes, mientras que en los embalses serán exportadores de aguas frías, ricas en elementos nutritivos, pero pobres en oxígeno.

¹⁴ Los sedimentos se formaron en ese lugar (lago).

¹⁵ Los sedimentos se originaron en otro lugar y fueron arrastrados hasta llegar al embalse.

¹⁶ **Meromíctico** es una calificación que se aplica a los lagos que tienen la característica que las aguas de las capas profundas no se mezclan nunca con las capas superficiales.

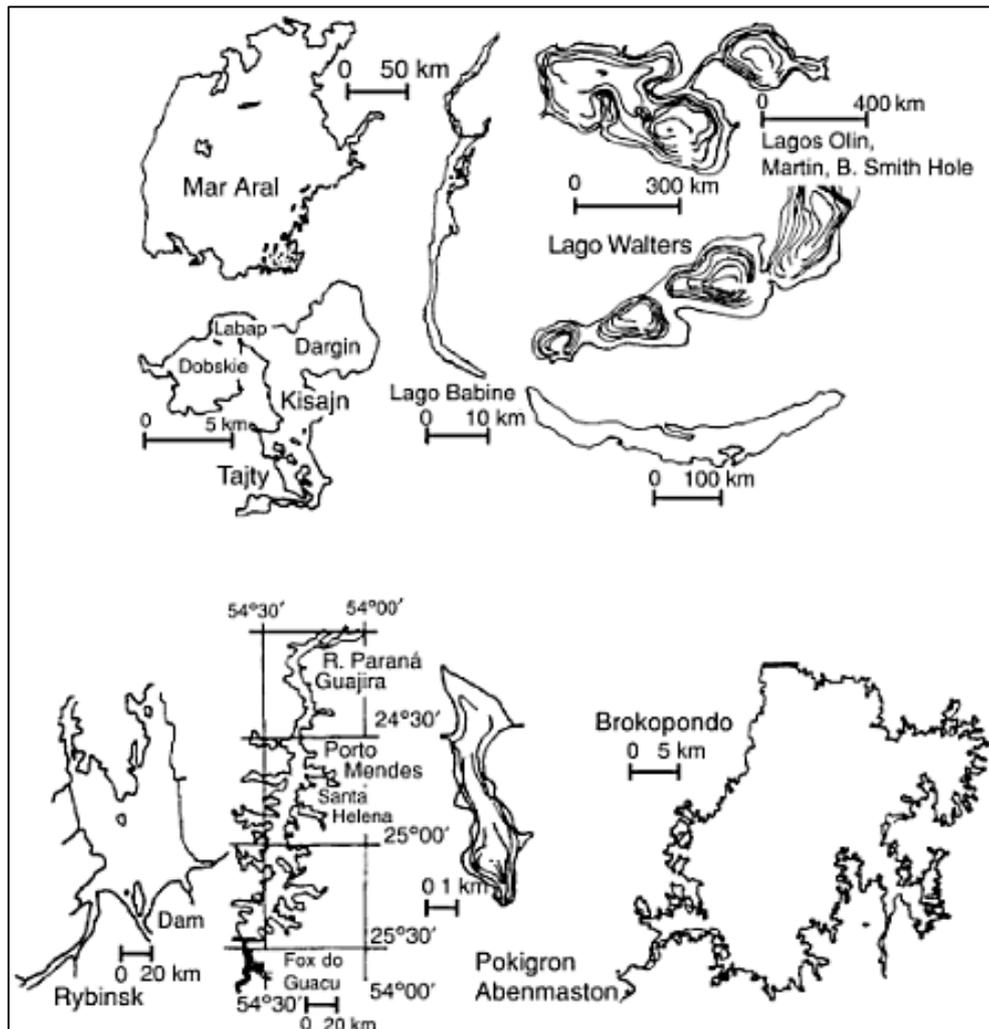


Figura 19: Comparación de áreas y perímetros entre lagos y embalses

Fuente. Fundamentos de la Limnología Tropical

2.2. Principales problemáticas en la gestión ambiental de los embalses

En esta sección se presentan los principales retos ambientales en la gestión de los embalses, como son: la alteración de los regímenes de caudales, la eutrofización, interrupción del transporte de sedimentos y la introducción de especies exóticas. Además, existe un interés creciente en la alteración de los regímenes térmicos, sobre todo en relación con los efectos del cambio climático. Finalmente, la planificación de la explotación de los recursos hídricos supone un reto a causa de la incertidumbre sobre los efectos del cambio climático global, la evolución futura de los consumos y los usos del suelo (Prats, Armengol, Dolz, & Morales-Baquero, 2014).

2.2.1. Efectos ambientales por la regulación del caudal

En general, los embalses causan una reducción de la magnitud de las avenidas abajo de la presa, cosa que puede originar un establecimiento más lento de la vegetación de ribera, una reducción del hábitat de la llanura de inundación disponible para los peces o la creación de un hábitat de aguas lentas más favorable para el crecimiento

de **macrófitos**¹⁷. Además, este descenso de caudales provoca un aumento de la deposición de materiales finos, que pueden colmatar las **zonas de freza**¹⁸ de algunas especies de salmónidos y afectar a los macro-invertebrados acuáticos propias de los lechos de gravas.

En función del objetivo principal del embalse, podrán existir otros importantes efectos. Así, los embalses destinados al riego pueden provocar una disminución del caudal medio anual a causa del consumo del agua por la agricultura y en parte a la evaporación de los embalses. Además, a menudo dan lugar a un patrón temporal de caudales inverso al natural, con altos caudales en verano y bajos caudales en invierno, modificando las cadenas tróficas y la productividad del ecosistema fluvial. Cuanto mayor sea la intensidad de la alteración mayor será el efecto sobre el número de especies, sobre la calidad del hábitat y del bosque de ribera.

Los embalses hidroeléctricos, a menudo causan importantes variaciones del caudal turbinado a escala diaria, e incluso semanal, en respuesta a los picos de demanda de consumo eléctrico, reduciendo el hábitat efectivo disponible y la productividad acuática. Esta alta variabilidad de los caudales hace aumentar el arrastre de los macro-invertebrados por la corriente.

2.2.2. Eutrofización

La eutrofia en los ecosistemas acuáticos es causada por un exceso de nutrientes y se refleja en una sobreproducción de fitoplancton. Durante los períodos de estratificación térmica, el exceso de biomasa producida en la zona fótica y aerobia sedimenta hacia el fondo donde es mineralizada por organismos utilizando el oxígeno del agua del hipolimnion anóxico. En casos de gran producción primaria en la superficie, se puede llegar a consumir todo el oxígeno disponible en las zonas profundas del lago o embalse produciendo episodios de anoxia. Las condiciones anóxicas intervienen en la dinámica del fósforo, del nitrógeno, y de metales pesados en la interfase agua-sedimentos, con potenciales consecuencias adversas y, además, pueden resultar corrosivas para el hierro y el cemento, y por lo tanto, para las estructuras hidráulicas. Otros problemas son la generación de malos olores y de sabores desagradables.

La eutrofización en embalses tiene principalmente dos causas: el aporte de nutrientes desde la cuenca vertiente y/o la materia orgánica presente en el vaso del embalse durante su primer llenado. En algunos casos, con tiempos de renovación largos y una importante entrada de nutrientes, como en el caso del embalse hipereutrófico de Foix, es posible que se presente una oxiclina durante todo el año además de la anoxia típica del periodo de estratificación.

2.2.3. Efectos ambientales por colmatación de un embalse

El transporte de sedimentos es una de las características ambientales que más interesan a los ingenieros hidráulicos porque al cabo de los años pueden llegar a reducir de forma importante la capacidad de los embalses y también porque la

¹⁷ Macrófitos: Constituyen formas macroscópicas de vegetación acuática. Comprenden las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos) adaptadas a la vida acuática y las angiospermas.

¹⁸ Lugar donde colocan sus huevos los peces.

retención de sedimentos en los embalses puede generar problemas de estabilidad de las estructuras hidráulicas situadas aguas abajo. Desde el punto de vista del ecólogo, la retención de sedimentos supone además una modificación del transporte de nutrientes y de materia orgánica.

Los embalses retienen una gran parte de los sedimentos transportados por el río. El depósito de sedimentos está relacionado con el tiempo de residencia del agua en el embalse, velocidad del agua, avenidas y utilización de la toma de fondo para la extracción de agua.

Las presas suponen, pues, una barrera para el transporte de sedimentos de fondo que sólo se reactiva en caso de avenidas o si se utiliza la toma de fondo de los embalses. La calidad de los sólidos en suspensión también se modifica por la presencia del embalse: disminuye la proporción de material grueso, que sedimenta, y aumenta la fracción orgánica, debida a la producción fitoplanctónica dentro del embalse.

La reducción de la granulometría del sedimento en suspensión y la modificación del régimen hídrico conlleva que se transporten sobre todo sedimentos finos, dando lugar a un acorazamiento del lecho del río y una modificación del hábitat fluvial. La reducción del transporte sólido da lugar a la regresión de los deltas, efecto todavía más importante en un contexto de elevación del nivel del mar. Se pueden producir además fenómenos de incisión del cauce y problemas de erosión localizada (pilas de puentes, etc.) aguas abajo de los embalses.

2.2.4. Introducción de especies exóticas y especies invasoras

La construcción de embalses ha proporcionado un hábitat nuevo, sin una estructura ecológica consolidada, que ha facilitado la colonización de los mismos por nuevas especies. Además, el hombre ha introducido, voluntaria o involuntariamente, especies que tienen consecuencias drásticas sobre la ecología de estos ecosistemas. La preferencia de los pescadores de agua dulce por especies depredadoras y/o de gran tamaño, ha llevado a la introducción de poblaciones con estas características. Otras consecuencias de las introducciones van desde la extinción de especies nativas, a la hibridación y la aparición de enfermedades. Es aconsejable, por lo tanto, controlar estas introducciones y controlar las poblaciones de las especies introducidas de interés para la pesca deportiva en los embalses donde estén presentes.

Involuntariamente, también el hombre puede introducir especies de animales inferiores, como los invertebrados, que causan daños considerables. La erradicación de estas especies invasoras es mucho más compleja. El mejillón cebrá se introdujo en los Estados Unidos en 1988 y desde entonces ha ocasionado pérdidas millonarias sin que haya sido posible eliminarlo. Por lo tanto, cuando se trata de la introducción de especies, la prevención es la mejor arma, con una regulación y vigilancia adecuadas de la pesca fluvial y de la navegación en embalses.

2.2.5. Modificación del régimen térmico fluvial

El impacto térmico de los embalses depende de numerosos factores como son su tamaño, su comportamiento térmico o la profundidad de la toma de captación. Los embalses con toma superficial hacen aumentar la temperatura aguas abajo. En el caso de los embalses con captación de agua profunda, el impacto térmico depende del período del año y está directamente ligado a los procesos de estratificación y mezcla.

En verano, estos embalses liberan agua fría del hipolimnion, mientras que en invierno la temperatura del agua liberada es menos fría de lo que debería ser a causa de la lenta pérdida de calor del agua embalsada.

Además, los embalses también pueden alterar el ciclo térmico diario y dar lugar a la aparición de patrones espaciales, con zonas alternas de alta y baja variabilidad diaria. En los puntos de gran amplitud de la temperatura diaria, se puede llegar a altas temperaturas en algún momento del día que pueden no ser adecuadas para los peces. La distancia necesaria para la recuperación del ciclo térmico diario depende de la velocidad del río, caudal, anchura y procesos de intercambio de calor con la atmósfera. En algunos casos, además, las variaciones bruscas de caudal pueden conllevar cambios térmicos bruscos que pueden afectar a las poblaciones de macroinvertebrados.

2.2.6. Efectos del cambio climático

La reducción de caudal, ya sea a causa de cambios climáticos, de un aumento de los consumos o de un cambio de los usos del suelo, tiene como consecuencia una disminución de la calidad del agua de los ríos y, por tanto, de los embalses, pero también puede suponer un riesgo para la provisión de agua potable.

Por lo que respecta al comportamiento térmico e hidrodinámico de embalses, se espera un aumento de la temperatura superficial, un calentamiento primaveral más temprano, una mayor duración de la estratificación y una mayor estabilidad de la termoclina en verano (IPCC, 2014). Estos cambios afectan al acoplamiento de las cadenas tróficas, de manera que la transferencia de elementos desde las formas mineralizadas hasta los niveles más altos de la cadena animal se verán alteradas.

Sin embargo estas previsiones presentan numerosas incertidumbres: desconocimiento de la evolución futura de las emisiones de gases de efecto invernadero, de los usos del suelo, consumos, etc.; e incertidumbres ligadas a los modelos climáticos, hidrológicos y de calidad de agua utilizados.

La constatación de que el efecto humano sobre la hidrología fluvial es del mismo orden de magnitud que el impacto estimado del cambio climático por un lado es tranquilizante. Quiere decir que existe la posibilidad real de tomar medidas de adaptación para contrarrestar la disminución de caudales. Por el otro, deja a los gestores la obligación de tomar las medidas adecuadas.

2.2.7. Efecto invernadero

Como consecuencia de la radiación solar incidente sobre la tierra, y de las actividades que el hombre desarrolla, se producen radiaciones caloríficas que se emiten al ambiente. Como consecuencia de esas radiaciones una cantidad de elementos compuestos son emitidos a la atmósfera en forma de gases. La tierra absorbe parte de la radiación o la fija en algunos de sus elementos. Otra parte de la radiación es normalmente reflejada hacia la atmósfera. El balance entre las emisiones producidas y las reflejadas determina la temperatura de la superficie de la tierra.

2.2.7.1. Gases de efecto invernadero (GEI)

Muchos compuestos producto de las emisiones, se mantienen en la atmósfera en forma de gases, que tiene la particularidad de obstruir el calor reflejado por la tierra, conformando lo que podría considerarse un pared gaseosa que envuelve la atmósfera, en la misma forma actúan las paredes de cristal de un invernadero.

Por tal motivo, al CO₂ y a todo un conjunto de compuestos como el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), diversos hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre (SF₆) (22 000 veces más dañino que el CO₂) que en forma de gases, muestran un comportamiento similar al CO₂, aunque con potenciales mucho mayores, se les acostumbra llamar “gases de efecto invernadero” (GEI) o con la expresión inglesa “Green-House gases” (GHG).

2.2.7.2. Efecto de los Embalses en el balance de la producción de GEI

Por lo general, el efecto de un embalse es interrumpir el cauce de un río con una estructura construida para tal fin (presa o represa) por lo que el río tiende a formar un lago, incrementando su nivel, e inundando los terrenos de las riberas adyacentes, de acuerdo con la topografía de la zona. La energía cinética del agua del río, se transforma en energía potencial y permite incrementar la producción de energía eléctrica. Es justo por la inundación de amplias zonas geográficas, que los embalses ocasionan algunos efectos perjudiciales con relación a la producción de los GEI, pues reducen la cantidad de absorción de CO₂ y a su vez generan la producción de metano (CH₄) (Alvarez & SA).

- **Reducción de la absorción de CO₂:**

La presencia de un embalse implica la inundación de las riberas del río en la zona aguas arriba de la presa, entre la cota original del río y la cota final del embalse. Si en las riberas existe cierta cantidad de vegetación, hay una cantidad de CO₂ del ambiente que es normalmente absorbido permanentemente por esta vegetación por efecto del proceso de fotosíntesis. La magnitud de esta absorción depende del tipo de vegetación existente de la misma en la zona, y del área de riberas donde se encuentra. Al llenarse la presa toda la vegetación existente en las riberas es inundada, dejando de producirse en ellas el proceso de fotosíntesis, dejando de absorberse el CO₂, lo que puede contabilizarse con un efecto negativo. Cobra especial relevancia en este aspecto, la cota absoluta del embalse (en metros sobre el nivel del mar), porque es elemento que condiciona fuertemente el tipo de vegetación que puede encontrarse así como su densidad superficial.

- **Producción de metano (CH₄):**

Como consecuencia de lo anterior, la vegetación inundada además de dejar de absorber CO₂, inicia un proceso de eutrofización que incrementa el contenido orgánico, que al descomponerse en condiciones anaeróbicas producirá metano (CH₄), que será emitido a la atmósfera. Adicionalmente todos los residuos orgánicos que traiga el río, a menos que sean filtrados y retirados, van a acumularse en el fondo del embalse (reduciendo su volumen útil), y continúan produciendo, por efecto de su descomposición, nuevas fuentes de metano que se emiten a la

atmósfera. El metano es un gas de efecto invernadero cuyo potencial de calentamiento atmosférico (PCA) es equivalente a 21 veces el PCA del CO₂, que normalmente se usa como referencia para este parámetro.

2.3. Efectos ambientales en las diferentes fases del proyecto

La creación de un embalse constituye probablemente la obra pública más singular, y con unas incidencias sobre el ambiente, en términos generales, mayor que ninguna otra. Tales incidencias pueden ser positivas, negativas o mixtas. Entre las primeras se hallan el abastecimiento humano y doméstico, la incorporación del agua al proceso energético, su empleo en ciclos industriales y el propio uso de los embalses con fines lúdicos. Entre las repercusiones negativas se hallan las inundaciones de extensas áreas, que pueden llegar a tener un importante valor medioambiental; pero sin lugar a dudas la repercusión negativa más importante es aquella que deriva de la rotura de la presa, que puede dar lugar a una catástrofe de carácter humano, ambiental y económico, de mucha mayor intensidad que las originadas por las restantes construcciones realizadas por el hombre, con la excepción de las centrales nucleares u obras que almacenan desechos radiactivos. Entre las repercusiones de tipo mixto se hallan aquellas que afectan a los regímenes hídricos de los ríos; esta actuación es claramente positiva cuando se traduce en la laminación de las crecidas, pero puede ser negativa cuando la variación de caudales aguas abajo los aleja de los idóneos para conservar los equilibrios biológicos y morfológicos del río (de Célix Caballero & del Campo Benito, 2006).

Los impactos originados por el embalsamiento deben ser analizados considerando la respuesta del ecosistema durante las fases de construcción del proyecto y de operación del embalse. Una lista de posibles impactos ambientales en las diferentes fases del proyecto es la siguiente (Guevara, 2000):

2.3.1. Fase de construcción del embalse

- ✓ Desecho de sedimentos provenientes de la construcción de las obras en la corriente natural.
- ✓ Descarga de pesticidas, desechos orgánicos o petroquímicos y otros elementos contaminantes.
- ✓ Contaminación del aire con partículas sólidas en suspensión.
- ✓ Aumento del ruido como consecuencia de la utilización de maquinaria y de las diversas operaciones necesarias para la construcción de las obras.
- ✓ Inestabilidad de taludes por explotación de canteras. En principio, la solución óptima para la explotación de canteras consiste en localizarlas en los terrenos correspondientes al vaso del embalse de forma que queden cubiertas por las aguas una vez que se haya puesto al servicio.
- ✓ Alteraciones en la morfología del cauce, en la red de drenaje y en el paisaje.
- ✓ Alteraciones en la flora y la fauna por las desviaciones del cauce.
- ✓ Alteraciones sobre las condiciones de vida humana al presentarse presión sobre el uso de los servicios públicos y en general sobre la población tradicionalmente establecida.
- ✓ Introducción de vectores de enfermedades.

2.3.2. Fase de operación del embalse

- En la zona inundada

- ✓ Pérdida de recursos edáficos al quedar inundado el vaso hidrográfico.
- ✓ Impacto en los usos del suelo por inundaciones del terreno, siendo a veces preciso cambiar las prácticas tradicionales.
- ✓ Aporte de residuos al embalse por actividades recreativas.
- ✓ Contaminación del aire por el tráfico inducido.
- ✓ Descomposición orgánica en el embalse.
- ✓ Eutrofización: Deficiencias en la cantidad de oxígeno disuelto.
- ✓ Cambio de ambiente de río a lago y posible reducción de la diversidad de especies.
- ✓ Sedimentación en el embalse, disminuyendo el volumen útil y ocasionando la posible obstrucción de tomas y descargas de agua.
- ✓ Cambio en el paisaje como consecuencia de la desaparición de algunos de sus elementos característicos, o de su modificación por la introducción de obras ajenas al medio.
- ✓ Inestabilidad de taludes causada por el oleaje y por la fluctuación de niveles del agua. El desembalse súbito constituye la situación de mayor peligro, no solo para la estabilidad de las laderas del embalse, sino también para la estabilidad de la presa especialmente si es de materiales sueltos.
- ✓ Alteraciones sobre el nivel freático.
- ✓ Alteraciones de la fauna y de la vegetación por modificaciones en su hábitat natural. Erosión de las laderas del embalse por la acción del oleaje.
- ✓ Evaporación de embalses e incremento en la humedad atmosférica.
- ✓ Efecto del remanso causando, por ejemplo, sedimentación en tributarios.
- ✓ Estratificación de temperaturas en el embalse, lo que a su vez es origen de una gama de cambios sobre la calidad del agua. Estos cambios son de difícil predicción y dependen de la geometría del vaso, del flujo de agua en el embalse, de la velocidad del viento, y de la radiación solar. Probablemente el efecto más grande de la estratificación térmica es la inhibición de transferencia entre el epilimnion rico en oxígeno y el hipolimnion donde el oxígeno se agota debido a la oxidación de residuos orgánicos.

- En la zona aguas abajo

- ✓ Erosión en el cauce por la retención de sedimentos aguas arriba.
- ✓ Descenso de la fertilidad de los suelos al quedar desprovistos de la aportación de limo.
- ✓ Impacto sobre la biota, debido a la variación en la calidad del agua.
- ✓ Parque de estacionamiento y mantenimiento de la maquinaria pesada. Esta área es crítica, pues en este lugar se pueden producir vertimientos de aceite lubricante que puede contaminar el suelo si no se toman las debidas precauciones. De ninguna manera, deben dejarse depósitos de aceites servidos en áreas que han de ser inundadas pues estas llegaran a contaminar el freático.
- ✓ Posible eliminación de nutrientes en el contenido de agua, con efecto sobre los agro-ecosistemas.
- ✓ Impacto sobre los peces, los cultivos, etc. debido al cambio de temperatura de las aguas.

- ✓ Descarga de agua con temperaturas inadecuadas para los usos aguas abajo.
- ✓ Impacto favorable sobre los usos del suelo al aumentar control de inundaciones y a las posibilidades de irrigación.
- ✓ Control de contaminaciones al regular el caudal en épocas de estiajes.
- ✓ Campamentos de obras y viviendas para los obreros. Generalmente las presas se construyen en lugares bastante apartados, de manera que el traslado diario de los obreros puede ser un problema que induce a la empresa constructora de la presa a construir una villa para alojarlos en las proximidades de la obra. Considerando que el número de obreros puede alcanzar varios cientos, el campamento provisional, con una vida útil de 5 a 6 años debe ser planificado adecuadamente, considerando todos los servicios básicos. El impacto ambiental del campamento debe ser estudiado en detalle, a fin de analizar las medidas de mitigación de dichos impactos.

* Un impacto de los embalses en ambas zonas es que pueden alterar la actividad tectónica. La probabilidad de que produzca actividad sísmica es difícil de predecir; sin embargo, se deberá considerar el pleno potencial destructivo de los terremotos, que pueden causar desprendimientos de tierra, daños a la infraestructura de la represa, y la posible falla de la misma.

2.3.3. Fase de mantenimiento

- ✓ Derrame de aceites y grasas que puedan contaminar la calidad del agua (Generalmente cuando se realiza limpieza y cambio de grasas en válvulas, desmontaje y limpieza de bombas, en la comprobación del libre movimiento de todos los mecanismos de operación de compuertas y todas las piezas móviles deben lubricarse con grasa, etc.).
- ✓ Exposición al ruido.
- ✓ Fatiga visual, ocasionando lesiones por caídas menores y/o mayores.
- ✓ Exposición a la humedad, estrés térmico.

Se debe utilizar la matriz de impactos de la comisión de grandes presas, como guía para identificar los impactos ambientales que se producen en los embalses. Lo que se ha desarrollado en este capítulo debe ser complementado con la tabla del Anexo A.

Capítulo 3.

Medidas De Mitigación

3.1. Medidas de protección de un embalse

Guevara (2000) considera que para proteger un embalse, se debe:

- ✓ Cultivar las laderas en fajas o terrazas para retrasar el escurrimiento y mermar la erosión de la cuenca con el fin de reducir el aporte de sedimentos al embalse.
- ✓ Construir pequeñas presas de retención en las laderas.
- ✓ Colocar cubierta vegetal sobre el terreno para amortiguar el impacto de la lluvia.
- ✓ Construir trampas de sedimentos en los afluentes al embalse.
- ✓ Estabilizar los suelos de los taludes.
- ✓ Desmontar y limpiar del vaso.
- ✓ Tratar las aguas que llegan al vaso.
- ✓ Airear naturalmente el embalse por oscilación de niveles del agua y eventualmente usar aireación artificial, por ejemplo, haciendo inyecciones de oxígeno.
- ✓ Controlar los niveles del agua para navegación y recreación.
- ✓ Remover los azolves.

3.2. Aportación de la limnología a la gestión de embalses

Según Prats, Armengol, Dolz, & Morales-Baquero (2014), tradicionalmente, la gestión de los embalses se ha centrado en la satisfacción de los usos consuntivos y no consuntivos, y no se ha prestado la atención necesaria a los procesos que influyen en su estado ecológico y químico y a la influencia sobre la calidad aguas abajo. Si bien los embalses son sistemas creados por el ser humano, para gestionarlos de forma adecuada hay que ir más allá del concepto de un volumen de agua retenido por una presa. Son sistemas naturalizados, colonizados por microorganismos, animales y plantas. Sus aguas están expuestas a procesos físicos, químicos y biológicos que afectan a su calidad y que son muy semejantes a los que ocurren en los lagos naturales, si bien no son exactamente iguales. Es por eso que la limnología, que se puede definir como la parte de la ecología que se ocupa del estudio de las masas de agua continentales, aporta unos conocimientos de gran interés para la gestión de los embalses.

3.2.1. Gestión hidráulica del embalse

A nivel de embalse se pueden implementar dos tipos de medidas correctoras: respecto al diseño del embalse o con respecto a las estrategias de gestión u operación del embalse. Las maniobras de gestión deben adaptarse a las especificidades de cada embalse y a su estado ecológico en todo momento. La extracción de agua de la superficie es especialmente de interés en embalses eutróficos, donde el agua del fondo es anóxica y acumula compuestos reducidos, ácido sulfhídrico y metales disueltos (Armengol, 2007). En estas condiciones hay una diferencia importante de calidad entre el agua en superficie, mejor, y el agua profunda, peor. En embalses con un buen estado trófico, oligotróficos o mesotróficos, la cantidad de nutrientes y materia orgánica aportados por los afluentes son suficientemente bajos para que puedan ser procesados por el plancton. Entonces, la captación de agua del fondo basta para mantener la calidad del agua de toda la columna (Armengol, 2007).

La estructura térmica del embalse y el calor almacenado en él dependen de la profundidad de la que se toma el agua (Han et al., 2000; Moreno-Ostos et al., 2008). Los sistemas de captación múltiple pueden ofrecer una solución para evitar las bajas temperaturas en primavera y verano, permitiendo la descarga de agua con una temperatura adecuada (Sherman et al., 2007). En caso de utilizarse el embalse para la refrigeración de centrales térmicas, se crea una estratificación con un fuerte gradiente térmico, mayores temperaturas en superficie (asociadas con un incremento de la pérdida de calor por evaporación) y una mayor duración del período de estratificación. En estos casos, una toma superficial, ayuda a evacuar calor de la superficie del embalse, reduciendo el impacto térmico dentro del embalse mismo. Sin embargo, el impacto en el río aguas abajo es mayor. Por el contrario, una toma profunda provoca una profundización del epilimnion con una reducción del impacto aguas abajo.

En ocasiones podría ser de interés disponer de medidas que permitan el traslado de sedimentos aguas debajo de la presa. Sin embargo, las soluciones pueden ser costosas y la calidad de los sedimentos de un embalse no siempre es suficientemente buena para aconsejar su movilización. Los sedimentos pueden estar contaminados por la acumulación de metales pesados u otras sustancias. Por lo tanto, es imprescindible realizar un análisis de la calidad del sedimento almacenado antes de tomar cualquier decisión al respecto. Es aconsejable también disponer de información sobre la distribución de sedimentos en el embalse (Palau, 2006).

El vaciado del embalse mediante los desagües de fondo es una opción para eliminar los sedimentos del mismo, haciendo que sean arrastrados por las altas velocidades creadas cerca del fondo. Sin embargo, según Palau (2006), la mejor opción para la movilización de sedimento es la gestión de los niveles de agua almacenada, el control periódico de las tomas, las descargas de agua profunda y la generación de avenidas controladas. Durante una avenida, el mantenimiento de niveles bajos y el uso de la toma de fondo ayuda a movilizar el sedimento y evacuarlo aguas abajo.

3.2.2. Gestión de una cadena de embalses

La mejora de la calidad del agua almacenada se incrementa en una cadena de embalses si estos se manejan adecuadamente de forma global. Hay que tener en

cuenta la calidad del agua en cada uno de los embalses de manera que al transvasar el agua de entre embalses se facilite la satisfacción de la demanda en cantidad y calidad. En años húmedos o medios, la gestión de una cadena de embalses se basa en general en la extracción de agua superficial de un embalse para llenar el siguiente, aprovechando así la capacidad de depuración de las aguas represadas y mejorando progresivamente la calidad del agua en cada uno de los embalses (ACA, 2003; Armengol, 2007). En cambio, en años de sequía, la estrategia es diferente. En el caso del sistema de embalses Sau-Susqueda (2 embalses), se aconseja acumular toda el agua en el embalse inferior aprovechando las diferencias de densidad del agua para situarla en los niveles más adecuados (Armengol, 2007). En la sequía de octubre de 2005, se trasvasó el agua de la superficie de Sau, más caliente y de mejor calidad, al embalse de Susqueda antes de que se mezclara con el agua del fondo, de peor calidad. Con esta acción, el agua trasvasada se introdujo en el metalimnion, mejorando su calidad y mejorando la capacidad de gestión de las compuertas.

Las cadenas de embalses también pueden reducir el efecto térmico (Prats et al., 2010). En el caso del tramo inferior del Ebro, el impacto térmico más importante es el producido por el embalse de Mequinenza, con variaciones de la temperatura de entrada respecto a la de salida de hasta 6 °C. En el embalse de Riba-roja, situado justo aguas abajo del embalse anterior, la entrada del caudal aportado por el río Segre ayuda a diluir el impacto térmico. Además, el enlentecimiento de la velocidad de circulación del agua a lo largo de los embalses de Flix y Riba-roja favorece, también el acercamiento a las condiciones de equilibrio térmico con la atmósfera.

3.3. Plan de manejo ambiental

Es el conjunto de programas, proyectos y actividades, necesarios para prevenir, mitigar, corregir y compensar los impactos generados por el proyecto durante las diferentes etapas. Para cada impacto identificado, debe formularse como mínimo un programa y/o proyecto como medida de manejo. Se sugiere como mínimo contemplar, en caso de que apliquen, para el manejo de los impactos identificados los siguientes programas para cada uno de los medios (Construcción de presas, represas y embalses con capacidad mayor a 200 millones de m³, 2011):

3.3.1. Medio abiótico

Tener en cuenta los siguientes programas:

- De conservación y restauración de la estabilidad geotécnica.
- De Manejo y disposición de materiales sobrantes.
- Manejo de taludes.
- De atención y protección de sitios críticos, sensibles o vulnerables durante la operación del proyecto, en la franja de protección del embalse.
- De restauración en las zonas de uso temporal (campamentos, accesos transitorios).
- De manejo del recurso hídrico.
- De manejo paisajístico.
- De manejo de áreas de préstamo lateral.
- De manejo de materiales de construcción.
- De manejo de residuos líquidos.

- De manejo de áreas de disposición final de residuos sólidos domésticos, industriales y peligrosos.
- De manejo de cruces de cuerpos de agua.
- De manejo de captaciones.
- De manejo de fuentes de emisiones y ruido.
- De manejo para el uso eficiente y ahorro del agua.

En caso de presentarse impactos que no se puedan prevenir, mitigar o corregir, se debe proponer programas encaminados subsanar los efectos causados.

En lo referente a impactos acumulativos y sinérgicos se deberá tener en cuenta las siguientes medidas de manejo, entre otras:

- Medidas por el deterioro de calidad del agua.
- Manejo por el aumento de la capacidad erosiva de las aguas turbinadas.
- Manejo por posibles alteraciones en variables microclimáticas, debido a acumulación de embalses en la región.

3.3.2. Medio biótico

Tener en cuenta los siguientes programas:

- Programa de manejo Flora. Considerando: Remoción de cobertura vegetal y descapote, manejo y conservación de la capa superior del suelo (capa vegetal) con fines de restauración de áreas afectadas, manejo y disposición del material removido.
- Programa de conservación, restauración y compensación de la cobertura vegetal considerando actividades tales como: revegetalización, empradización y manejo de las sucesiones naturales en el contexto local, de forma que se garantice la minimización del efecto de fragmentación de los ecosistemas.
- Debe contener actividades y obras para resarcir y retribuir a las comunidades, regiones o localidades por los impactos ambientales ocasionados con la realización del proyecto. Para su elaboración se debe partir de la oferta, la demanda y la afectación que se realice en cada recurso, lo cual se amplía en el módulo de:
- Uso, aprovechamiento o afectación de los RNR y cuantificación de la oferta y la demanda para los manejos ambientales.
- Programa de manejo del aprovechamiento forestal, con énfasis en la cobertura vegetal del área de inundación.
- Programa de manejo de fauna silvestre.
- Programa para el establecimiento del caudal ambiental. Se deberá establecer el caudal ambiental de tal forma que permita:
 - a. Asegurar la supervivencia de las comunidades hidrobiológicas que habitan en la cuenca aguas abajo del sitio de toma del agua para embalsamiento y los procesos migratorios que éstas pudieran presentar dentro de la misma.
 - b. Garantizar aguas abajo del sitio de embalsamiento los caudales requeridos para consumos domésticos, industriales, agropecuarios, turísticos, navegación, dilución, así como la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua entre otros.

- Programa de conservación. Con énfasis en:
 - a. Manejo de especies vegetales y faunísticas en peligro crítico en veda o aquellas que no se encuentren registradas dentro del inventario nacional o que se cataloguen como posibles especies no identificadas.
 - b. Desarrollo y fomento de ecosistemas y especies de flora y fauna afectables por el proyecto.
 - c. Protección y conservación de hábitats. Se deberán definir estrategias para conservación de especies de flora y fauna endémica, en veda, amenazadas o en peligro crítico y de especies que no se encuentren registradas dentro del inventario nacional o se cataloguen como posibles nuevas especies.

- Programa de compensación
 - a. Por aprovechamiento de la cobertura vegetal: Las áreas a compensar no serán asimiladas a aquellas que por diseño, o requerimientos técnicos tengan que ser empradizadas o revegetalizadas. Se presentará un listado de predios y propietarios donde se realizarán las actividades de compensación forestal, sus correspondientes áreas, especies, distancias, densidades, sistemas de siembra y plan de mantenimiento (mínimo a tres años); en caso de compra de predios, como compensación, se debe realizar un programa de preservación y conservación, el cual debe ser concertado entre la Corporación ambiental competente, el municipio y el propietario del proyecto; además de involucrar a propietarios de predios cuyo conocimiento del territorio o condiciones de vulnerabilidad requiriera la incorporación de la fuerza laboral al proyecto y la aplicación de medidas de restitución económica.
 - b. Por afectación paisajística: Un programa de manejo paisajístico de áreas de especial interés para las comunidades y las entidades territoriales.
 - c. Por fauna y flora: Establecer un programa de recuperación de hábitats para la preservación de especies endémicas, en peligro de extinción o vulnerables, entre otras y apoyo a proyectos de investigación de especies de fauna y flora vulnerables con fines de repoblamiento.

3.3.3. Medio socioeconómico

Se deberán tener en cuenta los siguientes programas:

- Programa de educación y capacitación al personal vinculado al proyecto.
- Programa de información y participación comunitaria.
- Programa de reasentamiento de la población afectada.
- Programa de apoyo a la capacidad de gestión institucional.
- Programa de coordinación interinstitucional y reestructuración de los Esquemas y Planes de Ordenamiento.
- Programa de intercambio de saberes, convivencia y educación ambiental a la comunidad aledaña al proyecto.
- Programa de contratación de mano de obra local.
- Programa de restitución económica para quienes derivan su sustento del área de influencia directa del proyecto.
- Programa de arqueología preventiva.
- Programa de restauración del patrimonio arquitectónico.
- Programa de integración y articulación de la población receptora ubicada en áreas de reasentamiento.

- Programa de Salubridad y Saneamiento Básico para la Comunidad del Área de Influencia del Proyecto.
- Programa de Reposición de la Infraestructura Física.
- Programa de compensación social: En caso de afectación a los componentes social, económico y cultural (infraestructura o actividades individuales o colectivas), la compensación debe orientarse a la reposición, garantizando iguales o mejores condiciones de vida de los pobladores asentados en el área de influencia directa.

3.4. Plan de seguimiento y monitoreo

Mediante el Plan de Monitoreo y Seguimiento se busca alcanzar los objetivos definidos en los programas planteados en el Plan de Manejo Ambiental, lo que permitirá, si se requiere, ajustarlos a las nuevas condiciones que se vayan presentando durante la construcción de las obras y la operación del proyecto. Para ello se diseñaron programas de monitoreo y seguimiento para cada uno de los medios abiótico, biótico y socioeconómico.

3.4.1. Medio abiótico

- Programa de monitoreo y seguimiento de Agua residual y corriente receptora.
- Programa de monitoreo y seguimiento de Aguas subterráneas.
- Programa de monitoreo y seguimiento de Emisiones atmosféricas, calidad de aire y ruido.
- Programa de monitoreo y seguimiento del Suelo.
- Programa de monitoreo y seguimiento de Sistemas de manejo, tratamiento y disposición de residuos sólidos.

3.4.2. Medio biótico

- Programa de monitoreo y seguimiento de Flora y fauna (endémica, en peligro crítico o vulnerable, entre otras).
- Programa de monitoreo y seguimiento de Áreas donde han sido dispuestas las especies reubicadas.
- Programa de monitoreo y seguimiento de Humedales.
- Programa de monitoreo y seguimiento de Recursos hidrobiológicos.
- Programas de revegetalización y/o reforestación.

3.4.3. Medio socioeconómico

- Monitoreo y seguimiento a los conflictos sociales.
- Monitoreo y seguimiento de los Impactos sociales directos e indirectos.
- Acciones y procesos generados por las obras.
- Monitoreo y seguimiento a la atención de inquietudes, solicitudes o reclamos de las comunidades.
- Monitoreo y seguimiento de La participación e información oportuna de las comunidades.
- El monitoreo arqueológico.
- Monitoreo y seguimiento del grado de satisfacción de la población a las medidas de manejo aplicadas para el control de impactos.

- Seguimiento del proceso de educación ambiental.

3.5. Plan de contingencia

El plan de contingencia debe contemplar: emergencias y contingencias durante la construcción y la operación del embalse.

En cualquier estudio ambiental dentro del plan de contingencia, se debe hacer un análisis de riesgos por probable afectación y con base en ello realizar un Plan Estratégico, un Plan Operativo y un Plan Informático.

Aquí se debe tener en cuenta que existen otros actores que son partícipes de las actividades de construcción los cuales deben aportar su experiencia y conocimiento en la prevención, atención y control de probables eventos no previstos durante la construcción.

3.5.1. Análisis de riesgos

Debe incluir la identificación de las amenazas o siniestros de posible ocurrencia, el tiempo de exposición del elemento amenazante, la definición de escenarios, la estimación de la probabilidad de ocurrencia de las emergencias y la definición de los factores de vulnerabilidad que permitan calificar la gravedad de los eventos generadores de emergencias en cada escenario. Esta valoración debe considerar los riesgos tanto endógenos como exógenos. Se debe presentar la metodología utilizada.

Durante la evaluación de la vulnerabilidad se deben considerar, al menos los siguientes factores:

- Víctimas: número y clase de víctimas, así como también el tipo y gravedad de las lesiones.
- Daño ambiental: los impactos sobre el agua, fauna, flora, aire, suelos y comunidad, como consecuencia de la emergencia.
- Pérdidas materiales: representadas en infraestructura, equipos, productos, costos de las operaciones del control de emergencia, multas, indemnizaciones y atención médica, entre otras.

Los temas de amenazas naturales que deberán integrarse como parte de este análisis, son los siguientes (si aplican según la zona de estudio):

- Potencial de sismicidad regional (basado en datos de estudios sísmicos a nivel nacional o regional).
- Potencial de sismicidad local (basado en el índice de densidad sísmica considerado del registro de sismicidad instrumental e histórico).
- Potencial de licuefacción del terreno (basado en datos de espesor de formaciones superficiales arenosas, lodo-arenosas o areno-lodosas obtenidas de información secundaria o primaria y presencia de acuíferos freáticos someros y fluctuaciones).
- Potencial de fractura en superficie por falla geológica activa o potencialmente activa. Amenaza volcánica, potencial afectación por Tsunamis en zonas marino – costeras y amenaza por inundación.

3.5.2. Plan de contingencia

Con base en la información obtenida del análisis de riesgos, se deberá estructurar el plan de contingencia, de tal manera que incluya el diseño de los planes estratégico, operativo e informativo correspondientes.

El plan estratégico contemplará: objetivo, alcance, cobertura geográfica, infraestructura y características físicas de la zona, análisis del riesgo, organización, asignación de responsabilidades y definición de los niveles de respuesta del Plan de contingencia. Además, en éste se harán las recomendaciones para las acciones preventivas que minimizarán los riesgos.

El plan operativo establecerá los procedimientos básicos de la atención o plan de respuesta a una emergencia. En él se definen los mecanismos de notificación, organización y funcionamiento para la eventual activación del plan de contingencia. En el plan informativo se establecerá lo relacionado con los sistemas de manejo de información, a fin de que los planes estratégico y operativo sean eficientes.

El plan de contingencia además deberá:

- Determinar las prioridades de protección
- Definir los sitios estratégicos para el control de contingencias, teniendo en cuenta las características de las áreas sensibles que puedan verse afectadas.
- Presentar el programa de entrenamiento y capacitación previsto para el personal responsable de la aplicación del plan.
- Reportar los equipos de apoyo para atender las contingencias
- Cartografiar las áreas de riesgo identificadas, las vías de evacuación y la localización de los equipos necesarios para dar respuesta a las contingencias.
- Las acciones de socialización con los trabajadores y las comunidades, actualizaciones del Plan, así como la realización de simulacros; indicando las temáticas a desarrollar, grupos poblacionales y cronograma de actividades

3.6. Plan de restauración final

Para las áreas e infraestructura intervenidas de manera directa por el proyecto, debe:

- Presentar una propuesta de uso final del suelo en armonía con el medio.
- Señalar las medidas de manejo y reconfiguración morfológica que garanticen la estabilidad y restablecimiento de la cobertura vegetal y la reconfiguración paisajística, según aplique y en concordancia con la propuesta del uso final del suelo.
- Indicar las medidas de manejo para los residuos líquidos y sólidos generados durante las actividades de operación y abandono como desmantelamiento, retiro de equipos, demoliciones, entre otras.
- Presentar una estrategia de información a las comunidades y autoridades del área de influencia acerca de la finalización del proyecto y de la gestión social.
- Presentar el plan de restauración de áreas afectadas por las obras y actividades del proyecto, identificando las medidas de rehabilitación y recuperación a ejecutarse, con el fin de contrarrestar los efectos negativos acumulativos sobre los ecosistemas.

3.7. Cuadro resumen

IMPACTOS NEGATIVOS POTENCIALES	MEDIDAS DE ATENUACIÓN
<p>1. Efectos ecológicamente negativos, de la construcción:</p> <ul style="list-style-type: none"> • contaminación del aire y del agua como resultado de la construcción y de la eliminación de los desperdicios; • erosión del suelo; • destrucción de la vegetación, problemas de saneamiento y salud en los campamentos de construcción. 	<p>Medidas para reducir los impactos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • control de la contaminación del aire y agua; • ubicación cuidadosa de los campamentos, edificios, excavaciones; canteras, depósitos de basura y desechos; • preocupaciones para reducir la erosión; reclamación de la tierra.
<p>2. Dislocación de la gente que vive en la zona inundada</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reubicar a la gente en un área adecuada, entregar compensación en especie por los recursos perdidos, proveer servicios adecuados de cuidado sanitario, infraestructura y oportunidades de empleo.
<p>3. Pérdida de terreno (agrícola, bosques, pastos, humedales) a causa de la inundación para formar el reservorio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicar la represa de tal modo que se reduzcan las pérdidas, disminuir su magnitud y el del reservorio, proteger las áreas de igual tamaño en la región para compensar las pérdidas.
<p>4. Pérdida de propiedades históricas, culturales o ascéticas a raíz de la inundación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar el sitio de la represa o reducir el tamaño del reservorio para evitar pérdidas, recuperar o proteger el patrimonio cultural.
<p>5. Pérdida de tierras silvestres y hábitat de la fauna</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Localizar la represa o disminuir la magnitud del reservorio para evitar o reducir la pérdida, establecer parques compensatorios o áreas reservadas, rescatar a los animales y reubicarlos.

IMPACTOS NEGATIVOS POTENCIALES	MEDIDAS DE ATENUACIÓN
6. Proliferación de las hierbas acuáticas en el reservorio y aguas abajo, impidiendo la descarga de la represa, los sistemas de riego, la navegación y la pesca, y mayores pérdidas de agua por transpiración.	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar la vegetación lignosa de la zona del reservorio antes de inundarla (eliminar los alimentos), disponer medidas para controlar la maleza, cosechar la vegetación para compost, forraje o biogas, regular la descarga del agua y manipular los niveles de la misma para desalentar el crecimiento de la maleza.
7. Degradación de la calidad del agua del reservorio	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar la vegetación lignosa de la zona del reservorio antes de a inundarla; • Controlar el uso de la tierra, las descargas de aguas servidas y la aplicación de agroquímicos en la cuenca hidrográficas; • Limitar el tiempo de retención del agua en el reservorio; • Instalar salidas a diferentes niveles para evitar la descarga del agua sin oxígeno.
8. Sedimentación del reservorio y pérdida de su capacidad de almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar el uso de la tierra en la cuenca hidrográfica (prevenir, especialmente), la tala de los bosques para agricultura); • Implementar actividades de reforestación y/o conservación de suelos en las cuencas hidrográficas (efecto limitado); • Eliminar, hidráulicamente, los sedimentos (lavado, corrientes de agua, liberación de corrientes de alta densidad)
9. Formación de depósitos de sedimento en la entrada del reservorio, creando un efecto de contracorriente, e inundando las áreas, aguas arriba.	<ul style="list-style-type: none"> • Lavado del sedimento, corrientes de agua

IMPACTOS NEGATIVOS POTENCIALES	MEDIDAS DE ATENUACIÓN
10. Lavado del lecho del río, aguas debajo de la represa.	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar una trampa eficiente, para liberar el sedimento (p.ej. lavado del sedimento, corrientes de agua) para aumentar el contenido de sal del agua liberada.
11. Reducción de la agricultura de los terrenos aluviales (recesión).	<ul style="list-style-type: none"> • Regular la liberación de agua de la represa para duplicar, parcialmente, el sistema natural de inundación.
12. Salinización de los terrenos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> • Regular el flujo para reducir el efecto
13. Intrusión del agua salada al estero y aguas arriba	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener un caudal mínimo, por lo menos, para impedir la intrusión
14. Interrupción de la pesca en el río, debido a los cambios en el flujo, el bloqueo de la migración de los peces, y el cambio en la calidad y limnología del agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener un flujo mínimo, por lo menos, para la pesca, instalar gradas para los peces y otros medios para que puedan pasar, proteger los sitios de desove, implementar acuicultura y desarrollar la pesca en el reservorio como compensación.
15. Se agarran las redes de pesca en la vegetación sumergida del reservorio	<ul style="list-style-type: none"> • Desbrozar, selectivamente, la vegetación antes de la inundación
16. Aumento de las enfermedades relacionadas con el agua	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar y operar la represa para reducir el hábitat del vector • Controlar el vector • Emplear profilaxis y tratar la enfermedad
17. Demandas opuestas en cuanto al uso del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Planificar el manejo de la represa dentro el contexto de los planes regionales de desarrollo; distribuir el agua equitativamente entre los grandes y pequeños agricultores y entre las diferentes regiones geográficas del valle.

IMPACTOS NEGATIVOS POTENCIALES	MEDIDAS DE ATENUACIÓN
18. Trastorno social y reducción del nivel de vida de la gente reasentada	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener el nivel de vida, asegurando que el acceso a los recursos sea, por lo menos, igual a lo que se perdió; proveer servicios sanitarios y sociales.
19. Degradación ambiental debido al aumento de presión sobre el terreno.	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar el sitio de reasentamiento para evitar que se supere la capacidad de carga de la tierra. • Aumentar la productividad o mejorar el manejo de la tierra (mejorándola para la agricultura, pastoreo o silvicultura) para que pueda soportar una población más grande.
20. Trastorno/destrucción de los grupos indígenas y tribus	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar el desplazamiento de personas no asimiladas, culturalmente; donde esto no sea posible, reubicarles en un área que les permita mantener su estilo de vida y costumbres.
21. Aumento de humedad y neblina, localmente, creando un hábitat favorable para los vectores insectos de las enfermedades.	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar los vectores
22. Migración incontrolada de la gente hacia el área, gracias a los caminos de acceso y líneas de transmisión.	<ul style="list-style-type: none"> • Limitar el acceso, implementar desarrollo rural y servicios de salud para tratar de reducir el impacto.
23. Problemas ambientales como resultado del desarrollo que facilita la represa (agricultura con riego, industrias, crecimiento municipal).	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar planificación integral en toda la cuenca para evitar el uso excesivo, abuso y uso incompatible de los recursos terrestres acuáticos.
24. Mal uso de las tierras de las áreas de captación sobre el reservorio, produciendo mayor sedimentación y cambios en la calidad del agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Incluir en la planificación del uso de la tierra, las áreas de la cuenca hidrográfica que se encuentren encima de la represa.

Capítulo 4.

Diseño de un embalse

Consiste en la determinación del tamaño del almacenamiento, incluyendo el volumen muerto, el útil, de crecidas, las pérdidas, y el borde libre; así como también del diseño de las obras necesarias para su óptimo mantenimiento (vertedero o aliviadero, obras de toma, y orificios de purga).

4.1. Operación de embalses

Es la simulación del comportamiento del embalse a través del tiempo. Las reglas de operación que se deducen están afectadas por los datos hidrológicos que son difíciles de predecir, por lo que la regulación que se establezca para el embalse debe ser ajustada o variada de acuerdo con las condiciones reales de funcionamiento que se presenten (Guevara, 2000).

Los estudios se pueden dividir en tres tipos:

- Determinar la descarga óptima del embalse teniendo en cuenta almacenamientos largos o estacionales (multianuales, anuales, mensuales).
- Hacer la operación del embalse para suplir las fluctuaciones de la demanda en horas picos (regulación horaria, diaria, semanal).
- Dar las reglas para la operación del embalse en épocas de sequía o de precipitaciones extremas.

La operación del embalse se hace para cualquiera de los siguientes casos:

- Determinar el volumen necesario a embalsar para suplir la demanda.
- Determinar el consumo máximo que se puede garantizar si se tiene como limitante el volumen del embalse.
- Optimización del embalse en proyectos multipropósito.

La operación de embalses está regulada por las siguientes ecuaciones básicas:

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

$$\Delta V = V_{\text{ingreso}} - V_{\text{salida}}$$

ΔV = Cambio en el almacenamiento durante un período dado (semana, mes).

V_{ingreso} = Aportes al embalse durante un período dado (semana, mes).

V_{salida} = Caudales de demanda, vertimiento, pérdidas durante un período dado. Las pérdidas en el embalse pueden ser por evaporación o por filtración.

$$\Delta V = V_f - V_i$$

V_f = Almacenamiento al final del período.

V_i = Almacenamiento al inicio del período.

La operación de embalses se hace para un ciclo. Un ciclo se considera formado por el número de años para los cuales existen datos hidrológicos. Para la mayoría de estudios se buscan datos de mínimo 20 años. Para el caso de muchos pequeños proyectos la información disponible es solo la que se puede recoger durante los estudios.

Para realizar la operación de embalses se asume que el caudal que ha ocurrido en el pasado se repite en el futuro.

Teóricamente se puede construir una presa en cualquier sección de un curso de agua pero no siempre resulta práctico hacerlo de modo que resulte segura, económica y de capacidad suficiente para suplir las necesidades de los usuarios. Se puede dar el caso de que la demanda de agua exceda la capacidad disponible del vaso. En estos casos, toca por ejemplo, aumentar la altura de la presa y a veces también se hace necesario la construcción de diques para aumentar la capacidad de almacenamiento.

4.2. Altura de la presa

La altura de la presa, puede estar implícitamente controlada por la topografía y las condiciones geológicas del sitio de cierre del río, las cuales a su vez definen el tipo de presa: presa de tierra, de gravedad, de arco, etc. (Davis et al, 1969; USBR, 1987).

Los datos básicos necesarios que se deben tener en cuenta, una vez seleccionado el sitio, para poder calcular la altura de una presa son (Fattorelli & Fernandez, 2011):

- Mapas topográficos del vaso que permitan determinar las relaciones de cota-volumen y cota-área. Para vasos grandes la escala adecuada puede ser 1:25.000 y 1:10.000 o menor para vasos medianos o pequeños. Igualmente las curvas de nivel deberán tener un espaciamiento tal que permita obtener mapas de los sectores del vaso para alturas sucesivas con buena precisión.
- Datos de caudales o volúmenes anuales y mensuales de series históricas o generadas.
- Datos de aporte de sedimentos en el río.
- Datos de demandas estimadas a nivel anual y mensual.
- Datos climáticos de lluvias (si son importantes), evaporación y vientos.
- Datos de crecientes.
- Curvas de superficie libre del río aguas abajo de la presa para diferentes descargas y áreas inundables correspondientes a las mismas.

En la Figura 20 se indican las franjas imaginarias en que se divide una presa, con el fin de ordenar su diseño hidrológico, para el cálculo de la altura de la presa.

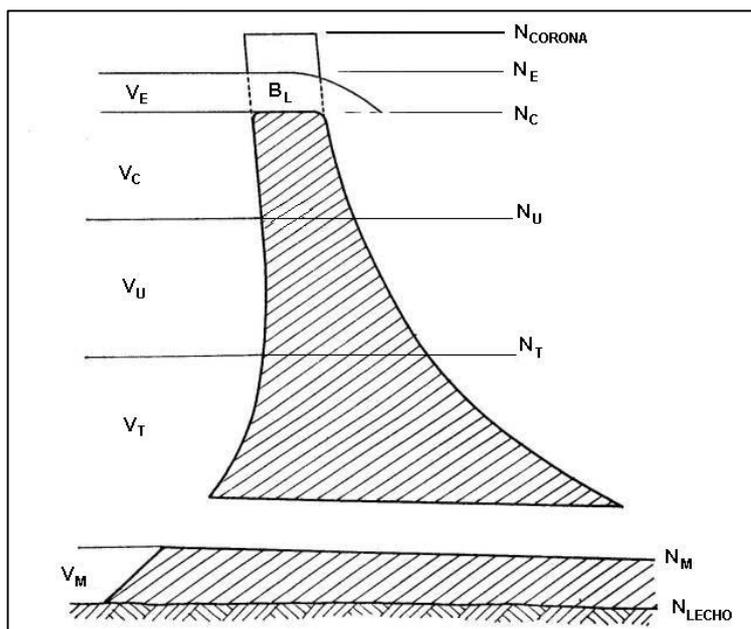


Figura 20. Franjas imaginarias para el cálculo de la altura de una presa de embalse. (Fattorelli & Fernandez, 2011)

Resumen de niveles para los correspondientes volúmenes de un embalse

NIVEL (m)	VOLUMEN (m ³)
Lecho del río (N _{LECHO})	Vol. Muerto (V _M)
Base de las tomas (N _M)	Vol. Turbinas (V _T)
Nivel mínimo admisible (N _T)	Vol. Útil (V _U)
Nivel mínimo normal (N _U)	Vol. Crecida (V _C)
Nivel máximo normal (N _C)	Vol. Extraordinario (V _E)
Nivel máx. extraordinario (N _E)	Vacío
Nivel de coronamiento (N _C)	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Determinación del volumen muerto del embalse (V_M)

Para el dimensionamiento de embalses, se requiere contar con estimativos suficientemente precisos del tipo, magnitud y variación a través del tiempo, del transporte de sólidos por las corrientes de agua que llegan al embalse. Esta información es útil para planear medidas de control de erosión en la cuenca del embalse y anticipar los efectos de modificaciones en el valle sobre la producción de sedimentos. Es frecuente que la información histórica sobre transporte de sedimentos sea muy deficiente en cuanto a su calidad, representatividad y duración. En muchos casos no hay datos y la información disponible es la que se obtiene durante el tiempo de estudio del proyecto.

La ausencia de información se traduce en la dificultad para decidir sobre la factibilidad de un proyecto, especialmente cuando depende de la apreciación correcta del acarreo de sedimentos al embalse.

Los factores principales que afectan el transporte de sedimentos a un embalse son:

- a. Características hidráulicas del cauce.
- b. Características de los materiales del cauce.
- c. Factores hidrometeorológicos que afectan el proceso erosivo.
- d. Factores topográficos, especialmente importantes en zonas de montaña que en combinación con lluvias copiosas generan crecientes rápidas con alto potencial de arrastre.
- e. Factores geológicos causantes de problemas principalmente en la zona andina de Colombia con frecuentes inestabilidades de los taludes y cañones de los ríos y quebradas. Estas inestabilidades generan la formación de depósitos de sedimentos poco consolidados que a su vez constituyen aporte de sedimentos a los cauces.
- f. Factores erosivos agravados por reforestación.
- g. Mal manejo de materiales sobrantes de obras de ingeniería civil.

El sedimento en suspensión es el que interesa porque el arrastre de fondo en su mayoría se deposita en la cola del embalse. El sedimento en suspensión se deposita en el embalse en una proporción diferente según sean las características del sedimento, las normas de operación y la relación entre la descarga del río y el volumen del embalse. Con respecto a las normas de operación, si un embalse retiene el agua por varios meses tendrá más sedimentación que otro que en pocos días descarga el agua que recibe. El porcentaje del sedimento que ingresa y es retenido en el embalse, se llama “eficiencia de atrape” (η_A), la cual es función de la relación entre el volumen del embalse (V_E) en m^3 y el volumen anual de la descarga del río (V_{DR}), en m^3 :

$$\eta_A = f\left(\frac{V_E}{V_{DR}}\right)$$

Así, se tendrá que un embalse pequeño en comparación con la magnitud de la descarga anual de un río dejará pasar gran parte del sedimento, mientras que un embalse cuyo volumen sea significativo con respecto a la descarga del río presentará una alta eficiencia de atrape. La relación volumen anual de descarga del río vs volumen del embalse ha sido tratado por Brune y Churchill, la cual se muestra en la Figura 21 y la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencia de atrape de embalses
Fuente. (USBR¹⁹, 1987).

V_E/V_{DR}	η_A	
	BRUNE	CHURCHILL
0.01	0.45	0.47
0.10	0.86	0.72
1.00	0.98	0.88
10.00	0.98	0.96

Es posible también calcular teóricamente la capacidad de transporte de material de lecho de un río aplicando principios de mecánica de fluidos, pero la dificultad está en la adquisición de la información necesaria. La determinación teórica del material suspendido es difícil, y se hace preciso recurrir a la toma directa de muestras de campo. El material suspendido usualmente es predominante y sobre todo es alto en épocas lluviosas. El material de lecho usualmente se considera como un 25% del suspendido.

Ante la necesidad de contar con registros de sedimentos suficientemente largos y bien distribuidos a lo largo de la cuenca del cauce en estudio, es fundamental considerar las estaciones automáticas de muestreo continuo y muestreadores de sedimentos para aguas altas.

En resumen, para el dimensionamiento del volumen muerto de un embalse, se requiere contar con información de caudales máximos y de aporte y calidad de los sedimentos que llegan al embalse.

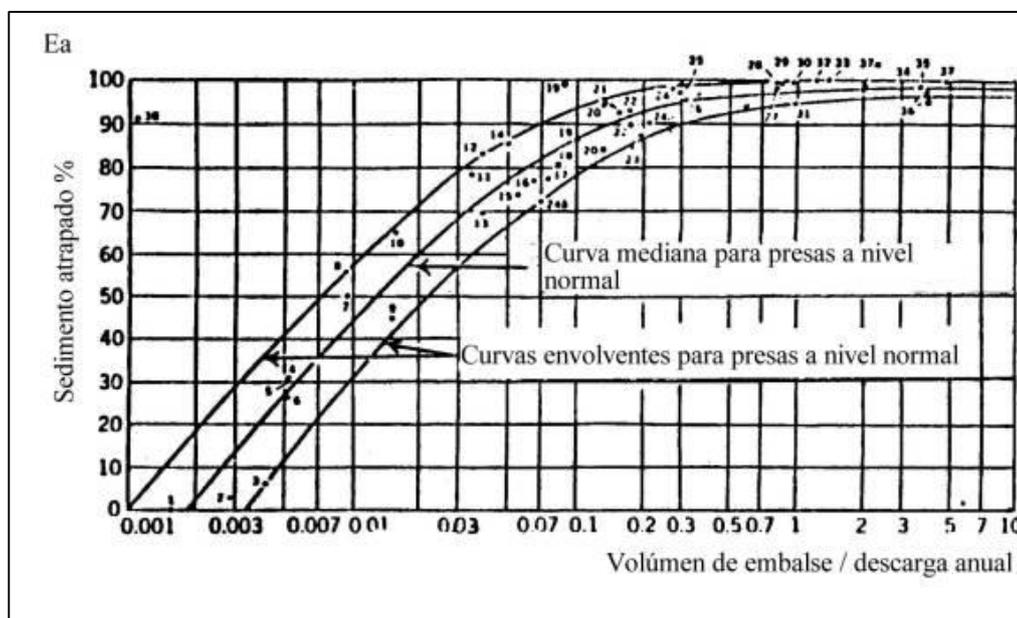


Figura 21. Eficiencia de atrape de sedimentos de un embalse (Brune, 1953).

¹⁹ USBR: United States Bureau of Reclamation

Las gravas finas, arenas, limos y arcillas constituyen el mayor porcentaje de sedimentos que contribuyen a la formación del embalse muerto. El mayor porcentaje de aporte de sedimentos se da cuando se presenta una creciente en el río por lo que los caudales máximos son los que se consideran para la determinación del volumen muerto. Dos formas para calcular el volumen muerto se van a considerar a continuación, teniendo en cuenta si se tienen o no información sobre caudal y sedimentos.

4.2.1.1. Cálculo del volumen de embalse de operación o volumen útil (V_U)

A. Teniendo en cuenta información de caudal y de sedimentos

$$V_M = \frac{CQT}{\rho_{bT}} * FC$$

V_M = Volumen muerto.

C = concentración de sedimentos en un intervalo de tiempo Δt [kg/m^3]

Q = caudal máximo mensual [m^3/s]

T = vida útil de la obra [años]

ρ_{bT} = densidad bulk del sedimento al cabo de la vida útil del embalse, peso volumétrico del sedimento [kg/m^3]

FC = factor de conversión de unidades 1 año = 31'536,000 segundos

$$\rho_{bT} = \rho_{bi} + \beta \log T$$

ρ_{bi} = densidad bulk inicial [kg/m^3]

β = coeficiente de consolidación

Lane & Koelzer (1953) dan los siguientes valores para el cálculo de los parámetros anteriores.

Tabla 2. Valores de ρ_{bi} y β .

Estado del embalse	Arena		Limo		Arcilla	
	ρ_{bi} (kg/m^3)	β	ρ_{bi} (kg/m^3)	β	ρ_{bi} (kg/m^3)	β
Siempre o casi siempre lleno	1500	0	1050	90	500	250
Embalse algo bajo	1500	0	1185	45	750	170
Embalse casi vacío	1500	0	1275	15	950	100
Embalse normalmente vacío	1500	0	1320	0	1250	0

El volumen muerto se puede calcular: mes a mes o año a año considerando la información hidrológica disponible.

El volumen muerto total en un año se obtiene sumando el volumen muerto obtenido para cada intervalo de tiempo Δt en un año y multiplicándolo por el número de años de vida del embalse.

B. Teniendo en cuenta el volumen útil del embalse

El volumen muerto se puede tomar preliminarmente entre un 8% y un 12 % del volumen útil (Guevara, 2000).

4.2.2. Determinación del nivel mínimo para turbinas (N_T)

Cuando la presa tiene turbinas existe una altura de carga mínima que asegura el buen funcionamiento de las mismas. Conocido ese valor, en base a las especificaciones de las turbinas a colocar, se calcula con las curvas de superficie libre (perfiles de flujos) del río de aguas abajo de la presa, el nivel que tendrá el mismo para la máxima descarga normal. Esta cota más la altura de carga mínima de las turbinas dará la cota del nivel mínimo a que puede llegar el embalse durante su operación. Este nivel determina en realidad un verdadero volumen muerto adicional que a veces es muy significativo con respecto al volumen total de embalse.

Lógicamente, el volumen correspondiente al nivel de turbinas (V_T), puede llegar a ser cero en embalses de montaña donde una caída natural en el río, aguas abajo de la presa, brinda la altura necesaria para el funcionamiento de las mismas.

4.2.3. Determinación del volumen útil (V_U)

Para determinar el volumen útil del embalse se consideran los siguientes criterios:

- Se busca tener el embalse lleno la mayor parte del año.
- La operación del embalse se inicia considerándolo lleno al inicio del ciclo.
- El embalse se considera lleno cuando el volumen de almacenamiento es cero y desocupado para un volumen igual al máximo valor absoluto.
- Rebose solo se presenta cuando el embalse está lleno y cuando el volumen que entra al embalse sea mayor que el volumen que sale del embalse.
- Al finalizar la operación del embalse se debe chequear que el almacenamiento al final de la operación sea igual al almacenamiento al inicio de la operación. Este implica que se siga con la operación del embalse hasta que logre el ajuste.
- El volumen útil requerido es el mayor valor absoluto de la operación del embalse.
- El período crítico es el número de períodos de tiempo desde que el embalse está lleno hasta que se desocupa.
- La operación del embalse se puede hacer para períodos semanales, mensuales, anuales, o multianuales, con la limitación de que los aportes medios del río al embalse en un período dado deben superar la demanda media en el mismo período.

4.2.3.1. Cálculo del volumen de embalse de operación o volumen útil (V_U)

Un análisis más detallado a nivel mensual, o diario o incluso horario según sean las necesidades en un estudio de operación del embalse, dará el ajuste final del cálculo del volumen útil. Para obtener la primera aproximación se usa la comparación de la curva de masa de volúmenes del río vs la curva de masa de los volúmenes de las demandas estimadas denominado diagrama de Rippl (Ver Figura 22).

Las curvas de masa permiten visualizar los períodos secos y los abundantes. Es importante destacar que no siempre resulta fácil seleccionar el período más crítico, porque frecuentemente una sucesión de períodos moderadamente secos resulta más grave que un sólo período muy seco, pero más corto.

La proyección de la línea de volúmenes de las demandas acumuladas a través de todo el período seco, indica en su máxima separación un valor que leído en la escala de las ordenadas da el volumen de operación necesario para satisfacer la demanda estimada a través de un período seco igual al histórico.

La línea de volúmenes de las demandas acumuladas debe siempre interceptar en algún punto a la línea de volúmenes acumulados de lo contrario la demanda estimada no puede ser satisfecha.

La pendiente de la curva de masa del río, en cualquier instante, es una medida del caudal medio en ese instante.

Con el diagrama de Rippl se pueden resolver dos problemas:

- a. **Determinar la capacidad de embalse necesaria en un río para diferentes niveles de consumo.** En este caso, se trazan líneas tangentes a la curva de masa siguiendo la pendiente de las diferentes líneas de demandas, desde el punto inicial del período seco hasta la intercepción con la misma, la máxima separación proporciona el valor de V_U .
- b. **Para una capacidad dada de embalse determinar la demanda que puede satisfacer.** En ciertos casos, la capacidad del embalse está fijada por razones topográficas, geológicas o constructivas. El procedimiento en este caso, consiste en trazar para los diferentes períodos de sequías líneas de demanda tales que, la máxima separación de la curva de masa, no supere el valor fijado de capacidad del embalse predeterminada.

De todas las líneas trazadas, aquella que tenga la menor pendiente será la que satisface la demanda primaria (caudal firme). Otros niveles de demanda superiores corresponderán a demandas secundarias que implican el riesgo de una determinada posibilidad de sequía. La elección de un determinado riesgo de sequía depende del uso del recurso y por lo tanto, de las consecuencias sociales y económicas que la restricción pueda ocasionar.

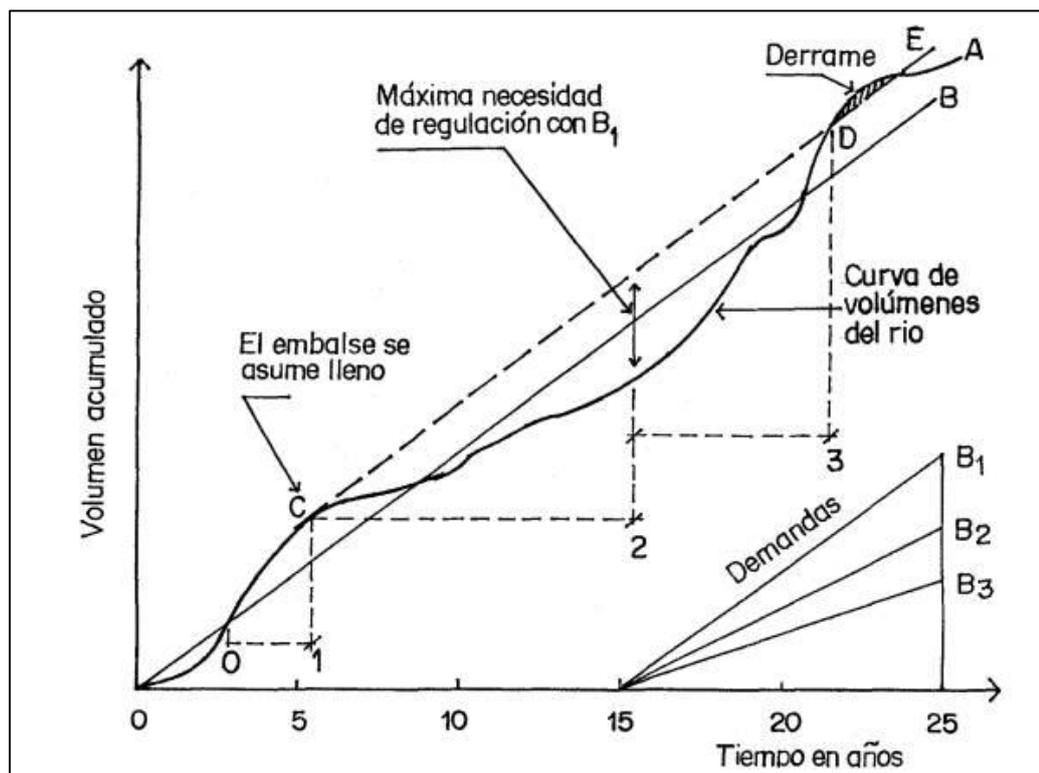


Figura 22. Diagrama de Rippl para calcular la capacidad necesaria de un embalse en un río. (Fattorelli & Fernandez, 2011)

En generación eléctrica o abastecimiento a ciudades o industrias, la demanda primaria tiene que tener una confiabilidad no menor del 90%. En el caso de riego, es variable con el tipo de cultivo pero en general se adoptan niveles de confiabilidad entre el 75% y el 85%.

Si la demanda es variable, la línea será una curva de masa de demandas y el procedimiento es el mismo, sólo que se debe tener cuidado en superponer las líneas en forma que coincidan cronológicamente, es decir, demanda de enero con caudal de enero, etc.

4.2.4. Pérdidas de agua en el embalse

4.2.4.1. Evaporación

Para estimar las pérdidas por evaporación hay necesidad de conocer los requisitos y el tamaño de la superficie libre del embalse. El volumen de agua evaporada del embalse se puede calcular mediante la fórmula:

$$V_{ev} = 10A * E_v * C$$

V_{ev} = volumen de agua evaporada [m³]

A = superficie media del embalse [ha]

$$A = (A1 + A2)/2$$

$A1$ = área correspondiente al embalse lleno

$A2$ = área correspondiente al embalse vacío

E_v = evaporación promedia [mm/mes]

C = número de meses correspondientes al período crítico contados desde que el embalse está lleno hasta que esté vacío

Tanto las pérdidas por evaporación como por infiltración se calculan para un período de tiempo igual al del déficit continuo de mayor duración.

4.2.4.2. Infiltración

Aunque existen fórmulas y métodos matemáticos para el cálculo de la infiltración a través de la presa, fondo y contorno del embalse, la información necesaria no siempre está disponible, por lo que para pequeños almacenamientos, se puede tomar como un porcentaje del volumen útil del embalse así:

$$V_{inf} = C * (\%V_U)$$

V_{inf} = volumen de infiltración [m³/mes]

$\%V_U$ = porcentaje del volumen útil (Ver Tabla 3).

C = número de meses correspondientes al período crítico contados desde que el embalse está lleno hasta que esté vacío.

Tabla 3. Valores de infiltración mensual.

SUELOS DEL EMBALSE	INFILTRACIÓN MENSUAL (%)
Impermeable	1
Regular impermeabilidad	1.5
Permeabilidad	2 a 5

La Figura 23 muestra un resumen de la distribución del agua en un embalse:

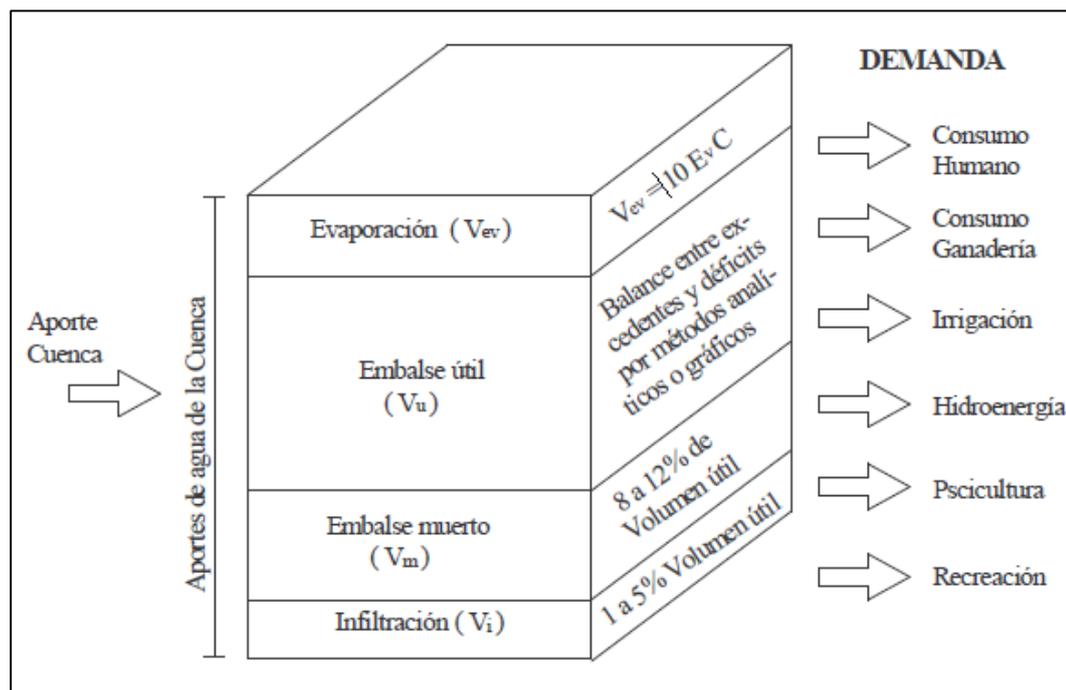


Figura 23. Distribución del agua en un embalse. (Guevara, 2000).

4.2.5. Cálculo del volumen de crecidas (V_C)

En todos los estudios de embalses se deben hacer análisis hidrológicos de las crecidas del río, ya que el adecuado control de estas contribuye no sólo con la seguridad hacia aguas abajo de la presa, sino a la estabilidad de la misma.

El volumen de crecidas, en los embalses de propósito múltiple, o el volumen total del embalse en aquellas que se construyen sólo para ese fin, tiene como objetivo amortiguar el pico del hidrograma de la creciente, embalsando agua en el momento que se producen los valores máximos de caudal, para luego descargar al río los mismos volúmenes en tiempos más largos (caudales menores).

En un embalse el volumen de crecidas es un espacio vacío reservado para almacenar temporariamente agua, mientras que el volumen de operación es sinónimo de agua embalsada para usos posteriores.

El dimensionamiento del volumen de crecidas implica el cálculo previo de la creciente de diseño. Sí se cuenta con el hidrograma de la creciente de proyecto, la metodología a seguir es la siguiente:

- Se realiza un diseño preliminar de los descargadores y del vertedero de crecidas.
- Se selecciona la descarga máxima posible.
- Se efectúa la curva de descarga de la presa para diferentes niveles del embalse.
- Finalmente, se simula el tránsito de la creciente del proyecto y se calcula el nivel máximo preliminar del embalse.

El volumen de embalse de crecidas puede tener un nivel N_C correspondiente a crecientes hasta un cierto valor de probabilidad de ocurrencia (100 años por ejemplo) y otro nivel N_E , para las situaciones de crecientes extraordinarias (1000 años o más)

que descargan un volumen por encima del vertedero (V_E). Para analizar esta última situación, bastaría repetir el cálculo del tránsito de la creciente partiendo de un valor inicial de embalse lleno al nivel de N_C .

4.2.6. Cálculo del borde libre (B_L)

Como se muestra en la Figura 20, la presa debe tener una altura superior al nivel máximo que puedan alcanzar las aguas.

Este nivel que no se ocupa con agua, se llama borde libre, evita que por efecto de olas o movimientos en la superficie libre del embalse el agua derrame por encima de la presa. Esta situación sería altamente indeseable principalmente en presas de tierra y material mixto.

En el cálculo del borde libre (B_L) intervienen: la acción del viento, la inclinación de la superficie del embalse, el choque de las olas en la presa, revanchas y el asentamiento de la presa.

4.2.6.1. Acción del viento

El oleaje en un embalse es causado por el viento y por los movimientos propios del agua. La altura de las olas varía con la magnitud de la velocidad del viento y su persistencia, es decir, el tiempo que el viento se mantiene en una misma dirección a una determinada velocidad.

La acción del viento se considera significativa en embalses muy grandes (mayores de 200 Km^2) y debe calcularse. Para embalses pequeños la acción del viento se puede considerar con un factor de seguridad adicional en el borde libre de la presa.

Los 2 embalses más importantes con los que cuenta Piura son: reservorio de Poechos y reservorio de San Lorenzo. Ambos embalses presentan una superficie menor a los 200 km^2 . En el caso de Poechos, se tiene una superficie del espejo de agua al 100% de su capacidad original de 62 Km^2 y representa a su vez la represa más grande del país, mientras que San Lorenzo cuenta con un área de embalse de $15,46 \text{ Km}^2$ (a la cota 290.00 m.s.n.m – Cota de corona 295.00 m.s.n.m).

Con lo mencionado anteriormente se indica que los embalses de Piura no son de gran tamaño (en comparación con los embalses que se indicarán más adelante), por lo que la acción del viento no tiene un papel importante en el cálculo del Borde libre, pero es recomendable hallarlo.

En estos casos, es más importante tener más atención con la inclinación de la superficie del embalse, así como también el asentamiento de la presa.

A continuación se presenta la Tabla 4 que muestra el área de los embalses más grandes del mundo, la cual está ordenada de forma descendente, en función de la superficie del embalse.

Tabla 4. Embalses del mundo por superficie. Elaboración propia.

Posición		Embalse	Nombre de la presa	Río	Año	Área (km ²)
Nº	País					
1	Kenia Tanzania Uganda	Lago Victoria	Owen Falls	Río Nilo	1954	68870
2	Ghana	Lago Volta	Presa Akosombo	Río Volta	1965	8482
3	Rusia	Embalse de Kuibyshev	Central Hidroeléctrica de Zhiguli	Río Volga	1955	6450
4	Canadá	Embalse de Smallwood	Churchill Falls	Río Churchill	1971	5698
5	Zambia Zimbabue	Lago Kariba	Presa de Kariba	Río Zembeze	1959	5580
11	Venezuela	Lago Guri	Presa de Guri	Río Caroní	1986	4250
12	Brasil	Embalse de Sobradinho	Sobradinho	Río Sao Francisco	1979	4214
45	Argentina	Represa de Yacyretá		Río Paraná	1998	1600
57	Uruguay	Lago Rincón del Bonete		Río Negro	1945	1140
133	Argentina	Embalse de Piedra del Águila	-	Río Limay	1993	305
153	Brasil	-	-	Río Grande		221

En la Tabla 4 se puede apreciar los grandes embalses del mundo, observándose que los embalses con más área superficial en Sudamérica están en Brasil, Argentina, Uruguay y Venezuela.

Frecuentemente, el efecto mayor para la formación de olas, se manifiesta si la duración del viento para una determinada dirección, supera los 60 minutos.

Las presas deben tener suficiente borde libre arriba del nivel máximo del embalse para que las ondas no puedan sobrepasar la cresta.

El oleaje causado por el viento se calcula por medio de fórmulas empíricas de las cuales dos ejemplos son:

Fórmula de Diakon:

$$h_0 = 0.0186V^{0.71}F^{0.24}P^{0.54}$$

- h_0 = altura de la ola [m]
 V = velocidad del viento [m/s]
 F = fetch [km]
 Fetch = longitud máxima del embalse sobre la que sopla el viento dominante
 P = altura de la presa [m]

Fórmula de Stevenson – Molitor:

$$h_0 = 0.0323\sqrt{VF} + 0.76 - 0.272\sqrt[4]{F}$$

- h_0 = altura de la ola [m]
 V = velocidad del viento [km/h]
 F = fetch [km] = altura de la ola [m] (Ver Figura 24).
 V = velocidad del viento [km/h]
 F = fetch [km]

Es recomendable calcular la altura de la ola para dos casos:

- Considerar la **fetch**²⁰ para la dirección del viento dominante.
- Considerar la fetch para la dirección del viento no dominante pues esta combinación puede resultar en mayor altura de la ola.

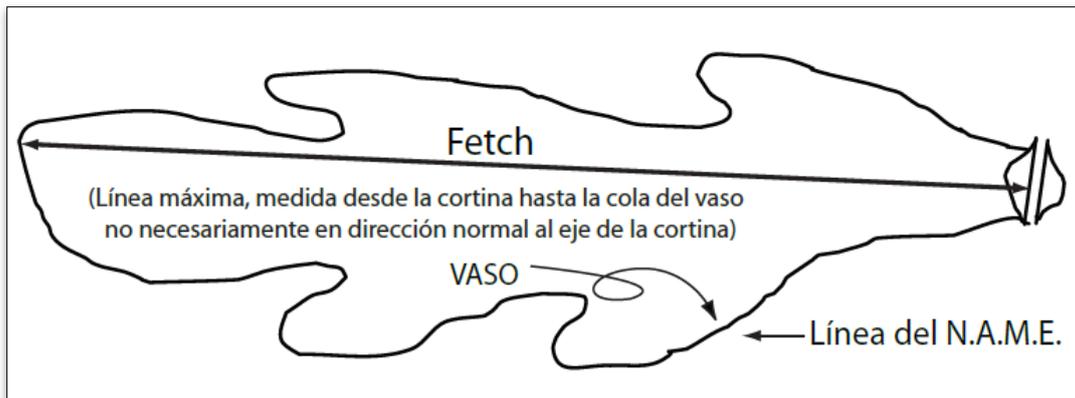


Figura 24. Fetch en un embalse.

4.2.6.2. Altura de trepada de la ola

La ola al chocar contra la cresta de la presa sufre una sobreelevación que debe tenerse en cuenta al determinar el borde libre de la presa. Este efecto se puede considerar incrementando la altura de la ola (Bustamante, 1996):

- Altura total de trepada de la ola sobre superficie vertical : $1.3 \cdot h_0$
 Altura total de trepada de la ola sobre superficie inclinada : $1.5 \cdot h_0$

²⁰ Se denomina fetch, a la mayor distancia rectilínea directa desde algún punto de la presa hasta el borde opuesto del embalse.

4.2.6.3. Sobre - elevación de la superficie libre del embalse (“Setup”)

Bajo la acción de vientos continuados en una misma dirección se produce un efecto de “marea” o ascenso de la superficie libre del agua sobre la costa del embalse, orientada de frente a la dirección del viento. Si ese efecto se produce sobre la presa, este ascenso se manifiesta con una elevación de la superficie del agua sobre la misma. Este efecto se considera mediante la siguiente expresión USBR (1987):

$$h_2 = \frac{V^2 \cdot F}{62000 \cdot h_m}$$

Donde:

h_2 = Altura de ascenso del agua [m]

V = Velocidad del viento [km/h]

F = Fetch [km]

$$h_m = \frac{\text{Volumen embalse}}{\text{Área}}$$

4.2.6.4. Asentamiento

En los diques de tierra también se debe considerar su asentamiento, el cual debe ser calculado por el proyectista de la presa.

4.2.6.5. Revancha

Corresponde a la diferencia entre la cota de coronamiento del muro y la altura máxima del agua, considerando los temporales de lluvias y viento asociados. Esta revancha debe ser superior a 0,9 m. Algunos autores consideran esta altura como la altura de seguridad para los eventuales asentamientos en el muro, y la consideran igual a 0,2 % de la altura máxima del muro, con un mínimo de 0,60 m.

4.3. Aliviadero

Se presenta a continuación el diseño hidrológico e hidráulico del vertedero-canal, (extraído del Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas), pues es el tipo de aliviadero que más comúnmente se adapta a los tajamares y pequeñas presas. Las limitaciones a la aplicación de este diseño son las siguientes:

a. Determinación de la crecida del proyecto.

Se propone una metodología para la determinación del hidrograma de la avenida extraordinaria con base en el Método Racional y el del NRCS²¹ (USDA-NRCS, 1997). La metodología se calibró especialmente para pequeñas cuencas dentro del territorio uruguayo, y se recomienda su aplicación solamente para áreas de aporte menores de 1000 km².

b. Laminado de la crecida del proyecto, determinación del caudal máximo de la obra de descarga y diseño del vertedero/aliviadero.

²¹ Natural Resources Conservation Service de los Estados Unidos (ex SCS).

La metodología que se propone es aplicable para tajamares y pequeñas presas en aquellos casos en que se decida la construcción del aliviadero como canal de pendiente y sección uniformes al menos en un tramo de longitud mayor a cinco veces su ancho, ubicado fuera del terraplén y excavado en el terreno natural. Esta solución es la adoptada en la gran mayoría de los tajamares y pequeñas presas del Uruguay y se basa en considerar que el agua escurre por el canal aliviadero con velocidades bajas y sin producir erosiones.

Además, este tipo de aliviadero es apto para aquellos casos en que por la capacidad de laminación del embalse se produce una significativa atenuación del caudal de la tormenta de diseño, aun cuando esta se inicie con el embalse lleno. Esta “capacidad de laminación” se puede cuantificar por la relación Q_{vmax}/Q_{max} entre el caudal de diseño del vertedero (Q_{vmax}) y el caudal máximo de la crecida extrema (Q_{max}). Los vertederos tipo canal indicados en este manual se adaptan para valores de $Q_{vmax}/Q_{max} < 0,5$. Para valores mayores se recomienda el estudio de otros diseños para el vertedero.

Adicionalmente habrá casos en que por presencia de suelos rocosos o por los excesivos volúmenes de excavación resultantes de un canal demasiado largo, convenga estudiar otros diseños para reducir los costos del aliviadero. Estos diseños podrán comprender vertederos construidos o revestidos en hormigón, o no revestidos pero excavados total o parcialmente en roca, etc., pero la metodología para su diseño claramente está fuera del alcance de esta sección.

El cálculo de las dimensiones del vertedero se realiza a partir del tránsito en el embalse de una avenida extraordinaria de período de retorno t_r : $Q(t_r, t)$.

Se proponen los siguientes períodos de retorno de las tormentas extraordinarias, de acuerdo al tipo de obra:

- Para tajamares y presas menores a 5 metros de altura, $t_r = 50$ años.
- Para pequeñas presas: $t_r = 100$ años.

La estructura de vertimiento es un canal vertedero de pendiente S , rugosidad de manning n y de ancho B . El ancho del vertedero (B) queda asociado al valor asumido del espesor de la lámina de crecida máxima (E), por encima de la cota de inicio del vertido (Figura 25). El esquema del cálculo es el indicado en la Figura 26:

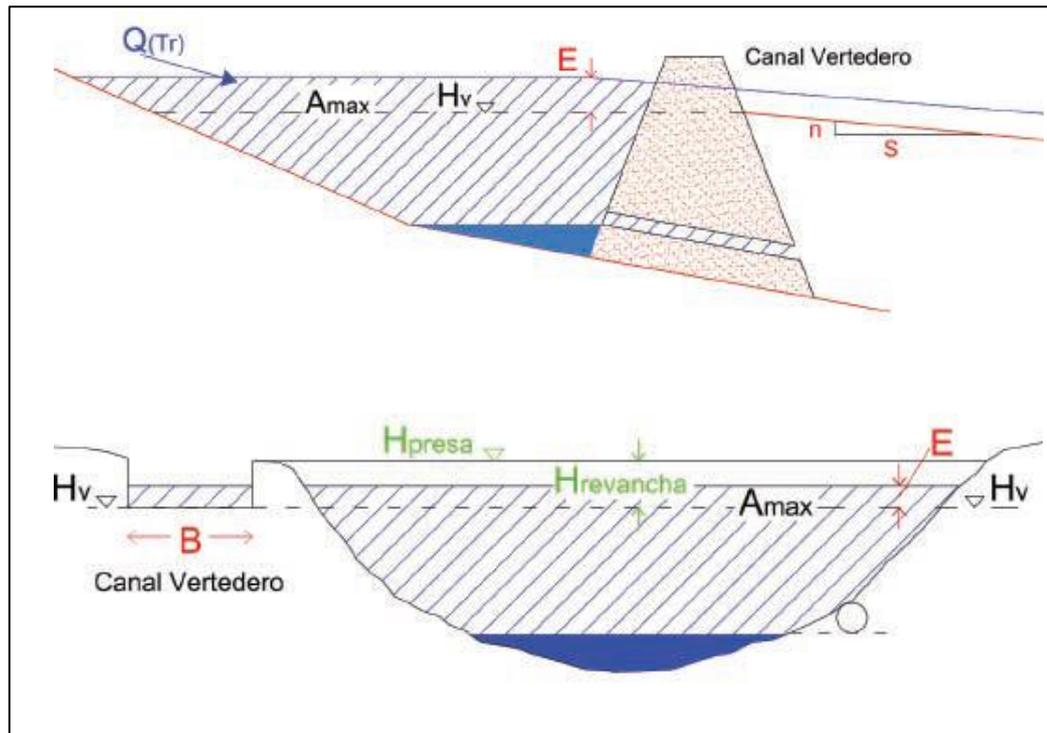


Figura 25. Descripción del vertedero (DINAGUA, 2011)

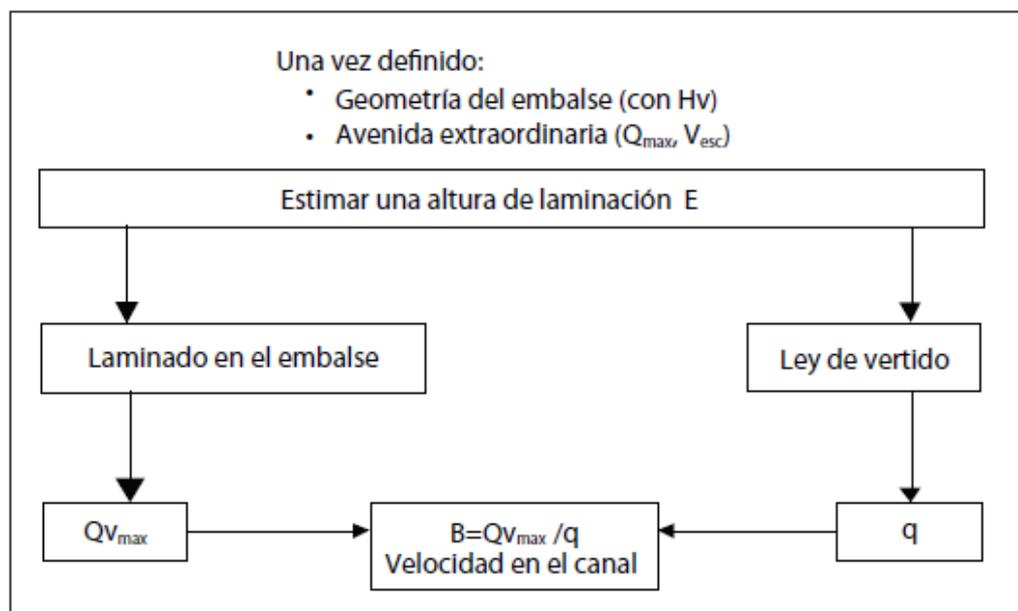


Figura 26. Secuencia de cálculo del ancho del vertedor (DINAGUA, 2011)

4.2.1. Determinación de la avenida extraordinaria

Se presenta el procedimiento de cálculo para estimar el caudal máximo y el volumen de escurrimiento de las avenidas extraordinarias correspondientes a eventos extremos anuales con intervalo de recurrencia promedio mayor a 2 años y a cuencas de aporte con área menor a 1000 km² y tiempo de concentración menor a 6 horas. Para una cuenca mayor, se la debe subdividir en subcuencas, y considerar el tránsito en la misma.

4.3.1.1. Tiempo de concentración

Delimitada la cuenca, se determina el cauce principal, como el cauce que une el punto de salida de la cuenca con el punto de la parte de aguas más alejado en el tiempo. Si la mayor parte del escurrimiento que se da en el cauce principal es concentrada, el tiempo de concentración se calcula por el método de Kirpich:

$$t_c = 0.4L^{0.77}S^{-0.385}$$

Donde:

t_c	- tiempo de concentración	(horas)
L	- longitud del cauce principal	(Km)
ΔH	- diferencia de cotas de altitud del cauce principal	(m)
S	- pendiente cauce principal = $\Delta H / l / 10$	(%)

Si la mayor parte del escurrimiento corresponde a un flujo no concentrado, el tiempo concentración se calcula por el método de velocidad del NRCS:

$$t_c = 0.91 \sum L_i k_i S_i^{-0.5}$$

Donde:

t_c	- tiempo de concentración	(horas)
L_i	- longitud del tramo i de la línea de corriente	(km)
k_i	- coeficiente de cobertura del suelo para el tramo i (Tabla 5)	(adim.)
S_i	- pendiente del tramo i = $0.1 * \Delta H_i (m) / l_i (Km)$	(%)

Tabla 5. Coeficiente k del método del NRCS. (DINAGUA, 2011)

COBERTURA DEL SUELO	k
Bosque con espeso mantillo sobre el suelo	3.95
Barbecho de hojarasca o cultivos de mínimo arado	2.02
Pasturas	1.41
Cultivos en línea recta	1.11
Suelo prácticamente desnudo y sin arar	1.00
Vías de agua empastadas	0.67
Área impermeable	0.50

De existir una componente de flujo concentrado, adicione al tiempo calculado por el método del NRCS, el tiempo de viaje de la gota de agua en el cauce, asumiendo una velocidad promedio de 0.45 m/s.

4.3.1.2. Precipitación máxima

Para la estimación de las precipitaciones que definen la avenida extraordinaria se utilizan las curvas IDF, desarrolladas con información anterior a 1980, según el procedimiento que se describe a continuación (Genta, Charbonnier, Rodríguez F.).

Coordenadas del punto de cierre de la cuenca:	p		
Período de retorno del evento extraordinario:	tr	-	(años)
Duración del intervalo de lluvia considerado:	d	-	(horas)
Área de la cuenca:	Ac	-	(Ha)

- A partir del punto de cierre de la cuenca, se calcula la precipitación de duración $d = 3$ horas y período de retorno $tr = 10$ años, interpolando en las isoyetas de la Figura 30.
- A partir del período de retorno (tr), se calcula el coeficiente de corrección [$CT_{(Tr)}$] según la siguiente ecuación (Ver Figura 27):

$$CT_{(Tr)} = 0.5786 - 0.4312 \log \left[\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right]$$

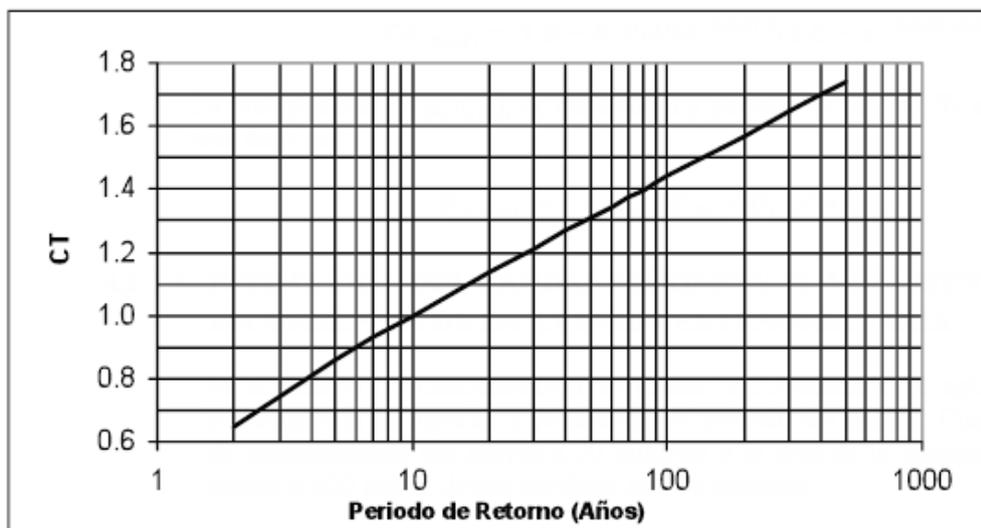


Figura 27. Coeficiente de corrección según el Período de Retorno. (DINAGUA, 2011)

- A partir de la duración de la lluvia (d), se calcula el coeficiente de corrección [$Cd(d)$] según la siguiente ecuación (Ver Figura 28):

Para $d < 3\text{hs}$

$$CD_{(d)} = \frac{0.6208d}{(d + 0.0137)^{0.5639}}$$

Para $d > 3\text{hs}$

$$CD_{(d)} = \frac{1.0287d}{(d + 1.0293)^{0.8083}}$$

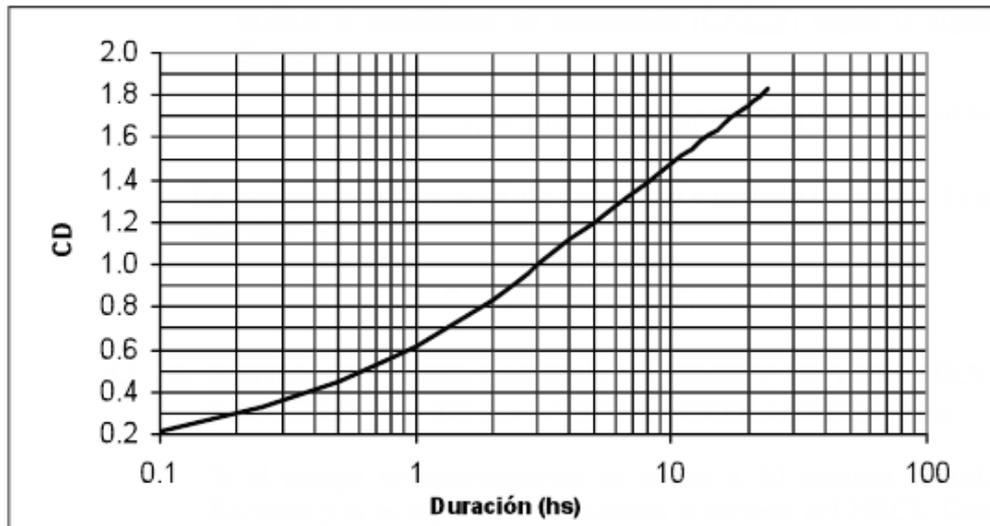


Figura 28. Coeficiente de corrección según la duración. (DINAGUA, 2011)

- d. A partir de la superficie de la cuenca (Ac) y la duración de la lluvia (d), se calcula el coeficiente de corrección [$CA_{(Ac,d)}$] según la sgte. ecuación (Ver Figura 29):

$$CA_{(Ac,d)} = 1.0 - 0.3549d^{-0.4272}(1.0 - e^{-0.00015Ac})$$

La precipitación [$P_{(d,Tr,p)}$], de duración d y período de retorno Tr en el punto p está dada por:

$$P_{(d,Tr,p)} = P_{(3,10,p)} CT_{(Tr)} CD_{(d)} CA_{(Ac,d)}$$

4.3.1.3. Estimación del caudal máximo y el volumen de escorrentía de la avenida extraordinaria

Si el tiempo de concentración es menor a 20 minutos se aplica el método Racional y si es superior a 20 minutos el método del NRCS. Cuando el tiempo de concentración sea mayor a 20 minutos y el área de la cuenca de aporte sea menor a 400 has se deben verificar ambos métodos.

*La Figura 31 y 32, muestran información hidrológica del Perú. En la página 77, se presenta el mapa de isoyetas medias anuales del Perú (Figura 32), con la finalidad de hacer un contraste con el mapa de isoyetas de Uruguay.

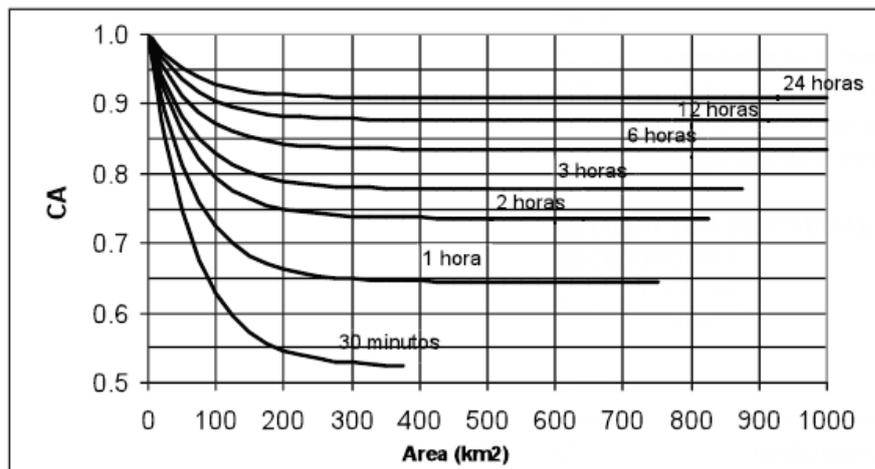


Figura 29. Coeficiente de corrección según la superficie de la cuenca. (DINAGUA, 2011)

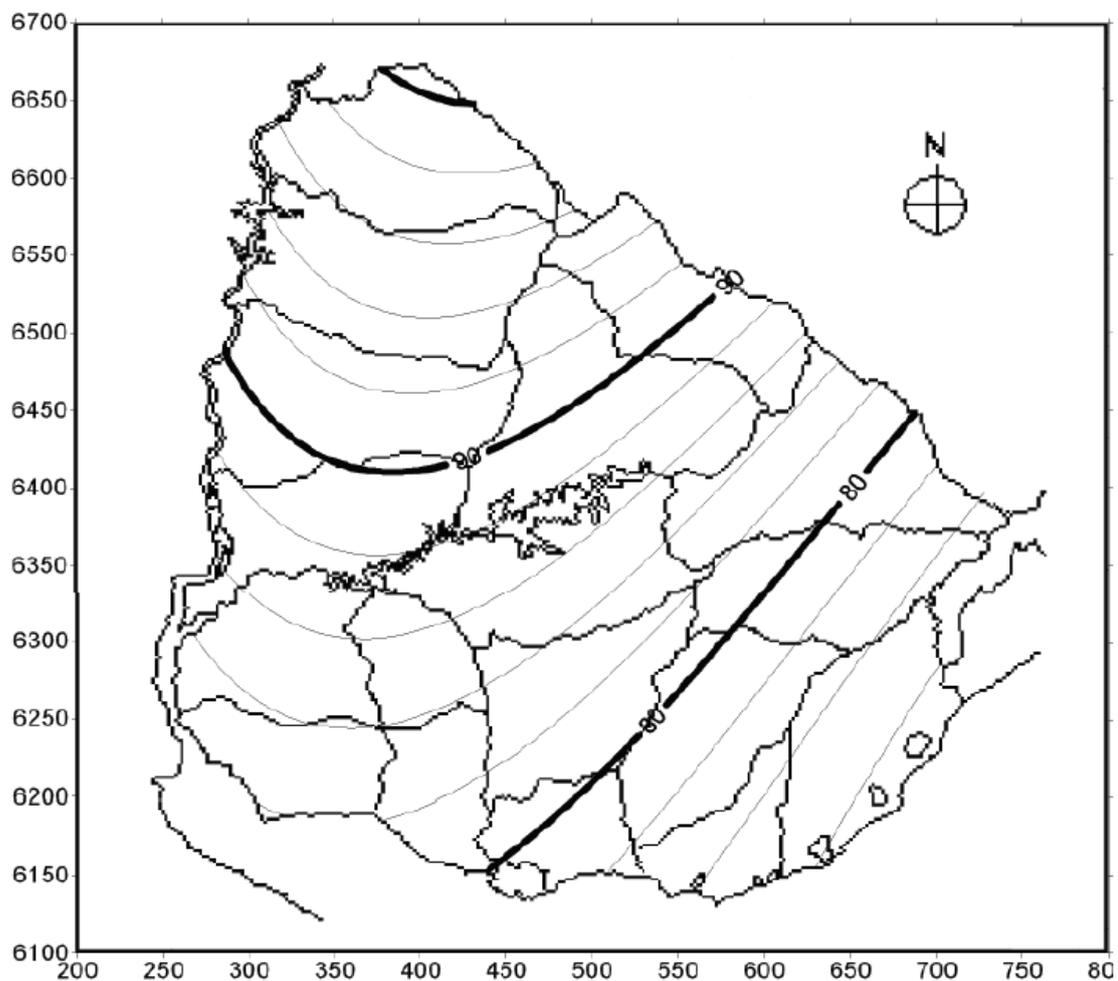


Figura 30. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Precipitación de 3 horas de Duración y 10 años de Período de Retorno. (DINAGUA, 2011)



Figura 31. Cuencas hidrográficas del Perú

Fuente. <http://www.senamhi.gob.pe>

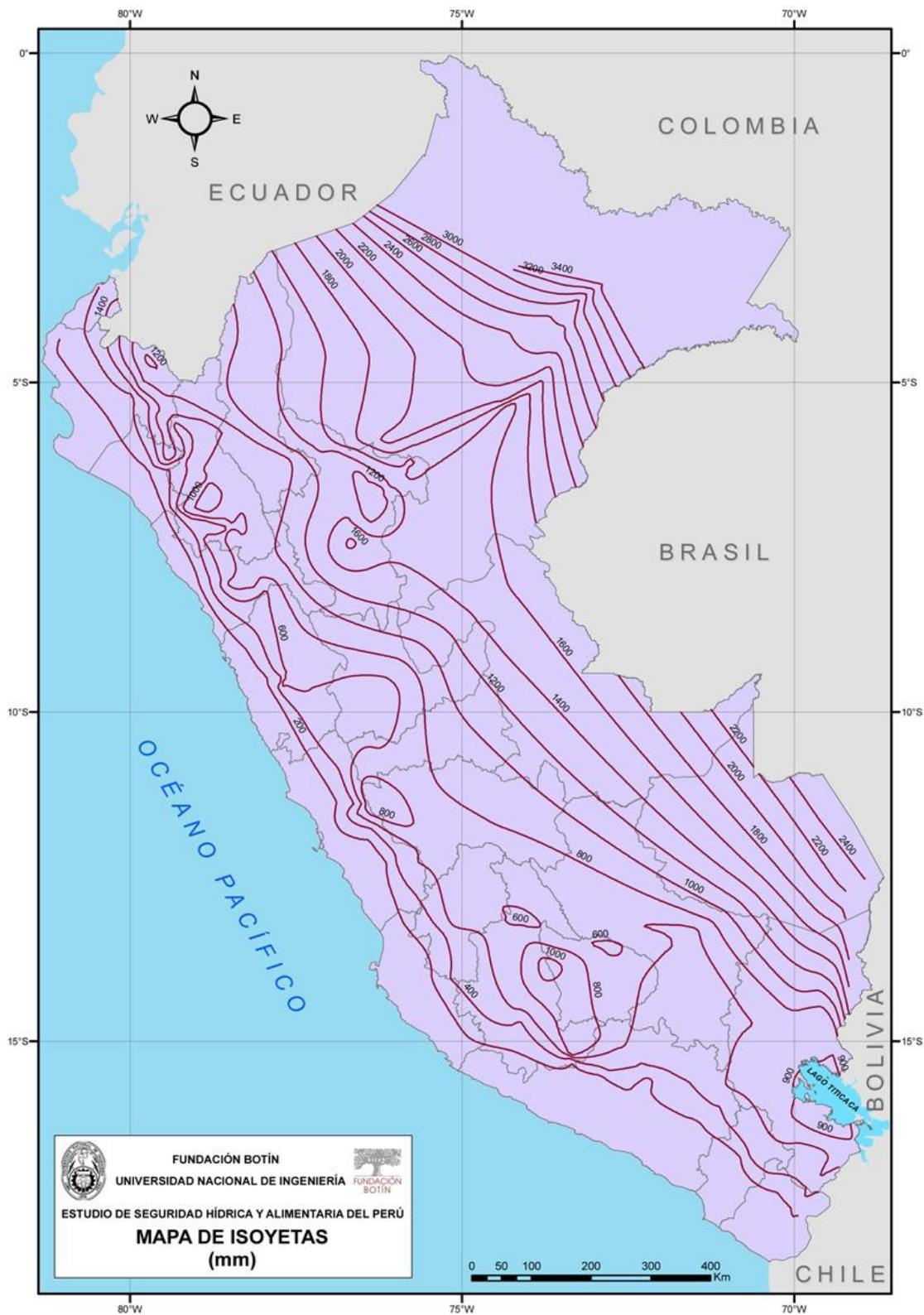


Figura 32. Isoyetas medias anuales (mm) en el Perú.

Fuente. http://ponce.sdsu.edu/800_mm_isoyeta_unheval.html

4.3.1.3.1. Por el método racional

Pendiente media de la cuenca

Para determinar el parámetro del Método Racional (coeficiente de escorrentía C) se utiliza la Tabla 6, por lo cual es necesario estimar la pendiente de la cuenca:

$$P_{cuenca} = 10 \frac{LCN * DH}{A_C}$$

Donde:

- P_{cuenca} - pendiente de la cuenca (%)
 DH - diferencia de cotas entre las curvas de nivel seleccionadas (m)
 LCN - longitud de todas las curvas de nivel con separación DH (Km)
 A_C - superficie de la cuenca (Ha)

Tabla 6. Coeficientes de escorrentía.

Características de la superficie	PERÍODO DE RETORNO (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50 % del área)							
Plano, 0-2 %	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7 %	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente superior a 7 %	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75 % del área)							
Plano, 0-2 %	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7 %	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7 %	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75 % del área)							
Plano, 0-2 %	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7 %	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente superior a 7 %	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Áreas de cultivos							
Plano, 0-2 %	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7 %	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente superior a 7 %	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2 %	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7 %	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7 %	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2 %	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7 %	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente superior a 7 %	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente. (DINAGUA, 2011)

Estimación de caudal máximo y del volumen de escorrentía

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{C * i * A_c}{360} \qquad V_{esc} = \frac{4.81 * Q_{m\acute{a}x} t_c}{1000}$$

Donde:

Q_{max}	- caudal máximo	(m ³ /s)
C	- coeficiente de escorrentía, Tabla 6	(adim.)
$i = [P_{(Tc, Tr, p)} / t_c]$	- intensidad para $d = t_c$	(mm/h)
V_{esc}	- volumen de escorrentía	(Hm ³)

4.3.1.3.2. Por el método del NRCS (USDA-NRSC,2007)

Número de curva

El número de Curva del método del NRCS en la cuenca (Tabla 7) se estima a partir del Grupo Hidrológico del suelo y de su uso y cobertura.

Para determinar el Grupo Hidrológico se debe:

- Identificar la Unidad de suelo sobre la Carta de suelos del Uruguay y luego identificar el Grupo Hidrológico que le corresponde en la Tabla 8, o
- Directamente identificar la cuenca en el Mapa de la Clasificación de los Grupos Hidrológicos de los suelos del Uruguay.

Caudal máximo de la avenida extraordinaria

Se determinó la función aproximada del caudal máximo unitario específico:

$$q_{m\acute{a}x} = 0.786 \frac{\left(1.223 - \frac{I_a}{P}\right)^2}{1.223 + 4 \frac{I_a}{P}}$$

Y a partir del método del Hidrograma unitario triangular se calcula el caudal máximo de la avenida extraordinaria:

$$Q_{m\acute{a}x} = 0.310 \frac{q_{m\acute{a}x}}{t_c} P_{(tc,Tr,p)} A_c 10^{-2}$$

Donde:

I_a	- Retención en el suelo al inicio del escurrimiento	(mm)
$P_{(tc,Tr,p)}$	- Precipitación para $d = t_c$	(mm)
A_c	- Superficie de la cuenca	(Ha)
t_c	- Tiempo de concentración	(horas)
$q_{m\acute{a}x}$	- Caudal unitario específico	(m ³ /s/mm/Ha)
$Q_{m\acute{a}x}$	- Caudal máximo de la avenida extraordinaria	(m ³ /s)

Tabla 7. Número de Curva del Método del NRCS.

NUMERO DE CURVA PARA LAS DIFERENTES COMBINACIONES HIDROLOGICAS DE SUELO - VEGETACION (para la cuenca en condiciones II, y $P_o = 0.2 S$)						
Uso de suelo hidrológico y cubierta	Tratamiento o método	Condición Hidrológica	Grupo hidrológico del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivos en hileras (maíz, sorgo, soya, tomates, remolacha azucarera)	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	CyT	Mala	66	74	80	82
	CyT	Buena	62	71	78	81
Granos pequeños (trigo, avena, lino, cebada)	SR	Mala	65	76	84	88
	SR	Buena	63	75	83	87
	C	Mala	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	CyT	Mala	61	72	79	82
	CyT	Buena	59	70	78	81
Legumbres tupidas ¹ o rotación de praderas (Alfalfa)	SR	Mala	66	77	85	89
	SR	Buena	58	72	81	85
	C	Mala	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	CyT	Mala	63	73	80	83
	CyT	Buena	51	67	76	80
Pradera o pastizal (césped, parques ² , campos de golf ³)		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	C	Mala	47	67	81	88
	C	Regular	25	59	75	83
	C	Buena	6	35	70	79
Hierba con baja densidad y arbustos.			30	58	71	78
Bosques cubierta pobre ⁴		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
cubierta buena ⁵			59	74	82	86
Cascos de los ranchos			98	98	98	98
Parqueadores pavimentados, techos.						
Calles y carreteras:						
Pavimentadas con cunetas y alcant.			98	98	98	98
Grava			76	95	89	91
Tierra			72	82	87	89
Áreas comerciales (85% impermeable)			89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeable)			81	88	91	93
Residencial:						
< 0.05 Ha 65% impermeable			77	85	90	92
0.1 Ha 38% impermeable			61	75	83	87
0.13 Ha 30% impermeable			57	72	81	86
0.2 Ha 25% impermeable			54	70	80	85
0.4 Ha 20% impermeable			51	68	79	84

Fuente. (DINAGUA, 2011)

Tabla 8. Grupo Hidrológico (según el NRCS) de los suelos del Uruguay.

Unidad Cartográfica de Suelos		GRUPO	Unidad Cartográfica de Suelos		GRUPO
Alferez	AF	C	Lechiguana	Le	D
Algorta	Al	C/D	Libertad	Li	C
Andresito	An	B	Los Mimbres	LM	C
Angostura	Ag	A/D	Manuel Oribe	MO	C
Aparicio Saravia	AS	C	Masoller	Ma	C
Arapey	Ay	D	Montecoral	Mc	D
Arroyo Blanco	AB	C	Palleros	Pll	C/D
Arroyo Hospital	AH	C	Paso Coelho	PC	D
Bacacua	Ba	B	Paso Palmar	PP	B
Bañero Jaureguiberry	BJ	A	Pueblo el Barro	PB	D
Bañado de Farrapos	BF	D	Puntas de Herrera	PdH	C
Bañado de Oro	BO	C	Queguay Chico	QCh	D
Baygorria	By	C	Rincon de la Urbana	RU	C
Bellaco	Bc	D	Rincon de Ramirez	RR	D
Bequeló	Bq	C	Rincon Zamora	RZ	B/C
Blanquillo	Bl	C	Rio Branco	RB	D
Cañada Nieto	CñN	D	Rio Tacuarembó	RT	D
Capilla de Farruco	CF	B/D	Risso	Ri	D
Carapé	Ca	B	Rivera	Rv	B
Carpinteria	Cpt	D	Salto	St	D
Cebollati	Cb	C	San Carlos	SC	C
Cerro Chato	CCh	B	San Gabriel-Guaycurú	SG-G	B
Colonia Palma	CP	C	San Jacinto	SJc	C
Constitución	Ct	A	San Jorge	SJo	C
Cuaró	Cr	D	San Luis	SL	D
Cuchilla Caraguatá	CCa	C	San Manuel	SM	C
Cuchilla Corrales	CCo	C	San Ramón	SR	D
Cuchilla de Corralito	CC	C/D	Santa Clara	SCI	B
Cuchilla de Haedo-P de los Toros	CH-PT	D	Sarandi de Tejera	SdT	B/C
Cuchilla Mangueras	CM	C	Sierra de Aiguá	SAG	D
Cuchilla Santa Ana	CSA	C	Sierra de Animas	SA	B
Curtina	Cu	D	Sierra de Mahoma	SMh	B
Chapicuy	Ch	B	Sierra de Polanco	SP	B/C
Ecilda Paullier-Las Brujas	EP-LB	C	Tacuarembó	Ta	C
El Ceibo	EC	D	Tala-Rodriguez	TI-Rd	C/D
El Palmito	EPa	C	Toledo	Tol	C
Espinillar	Ep	C	Tres Bocas	TB	C
Fraile Muerto	FM	C	Tres Cerros	TC	B/C
Fray Bentos	FB	C	Tres Islas	TI	B
India Muerta	IMu	D	Tres Puentes	TP	B/C
Isla Mala	IM	C	Trinidad	Tr	C/D
Islas del Uruguay	IU	D	Valle Aiguá	VA	C
Itapebi-Tres Arboles	I-TA	D	Valle Fuentes	VF	C
Jose Pedro Varela	JPV	C	Vergara	Ve	D
Kiyu	Ky	C/D	Villa Soriano	VS	C
La Carolina	LC	C/D	Yí	Yi	B/C
La Charqueada	LCh	D	Young	Yg	C
Laguna Merin	LMe	D	Zapallar	Zp	C
Las Toscas	LT	B	Zapicán	Za	C
Lascano	La	D			

Fuente. (Durán, 1996)

4.3.2. Laminado de avenida extraordinaria - cálculo simplificado

Se asume que el hidrograma de la avenida extraordinaria es triangular, caracterizado por el caudal máximo (Q_{\max}) y el volumen de escurrimiento (V_{esc}) y se considera que el vertido es lineal hasta alcanzar el caudal máximo vertido ($Q_{v\max}$). En el anexo del laminado se realiza sin éstas simplificaciones, las cuales se consideran adecuadas para el diseño de tajamares y presas pequeñas.

El grado de laminación ($Q_{v\max}/Q_{\max}$) se determina a partir del volumen laminado (V_L), ver Figura 33, el que corresponde al volumen almacenado entre la cota de inicio del vertido (H_V) y la cota máxima de vertimiento (H_{V+E}) que se asume.

$$V_L = V(H_V + E) - V(H_V)$$

$$Q_{v\max} = (1 - V_L / V_{\text{esc}}) Q_{\max}$$

Donde:

H_V	- Cota de inicio de vertido	(m)
E	- lámina máxima de vertido	(m)
$V(H)$	- Función de volumen de almacenamiento	(Hm^3)
V_L	- volumen laminado	(Hm^3)
V_{esc}	- volumen de escurrimiento	(Hm^3)
Q_{\max}	- Caudal máximo de la avenida extraordinaria	(m^3/s)
$Q_{v\max}$	- Caudal máximo vertido	(m^3/s)

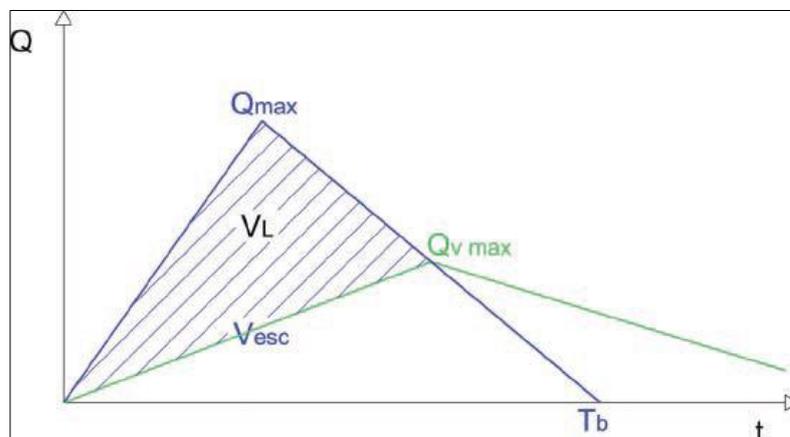


Figura 33. Determinación del caudal de máximo vertido. (DINAGUA, 2011)

4.3.3. Caudal específico del vertedero

La estructura de vertimiento corresponde a un canal trapezoidal descrito por el ancho (b , m), la pendiente (s , adim.) y la rugosidad de Manning (n) (Ver Figura 34a.).

En la Figura 34 b. se presenta la solución gráfica de las ecuaciones de vertimiento, que determinan el caudal específico (q , $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) por unidad de ancho del vertedero y la velocidad en el canal (v , m/s), asociada a una lámina de vertido en el embalse (e , m).

Para limitar la erosión en el canal, la velocidad debe cumplir las restricciones de la Tabla 9. En forma aproximada el cálculo se puede realizar por las ecuaciones:

$$\text{Si } K = (S/n^2)^{1/2} (2/3E)^{1/6} / g^{1/2} < 1 \quad q = K(3/(2 + K^2))^{5/3} (2/3E)^{3/2} g^{1/2}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad v = K(3/(2 + K^2))^{2/3} (2/3E)^{1/2}$$

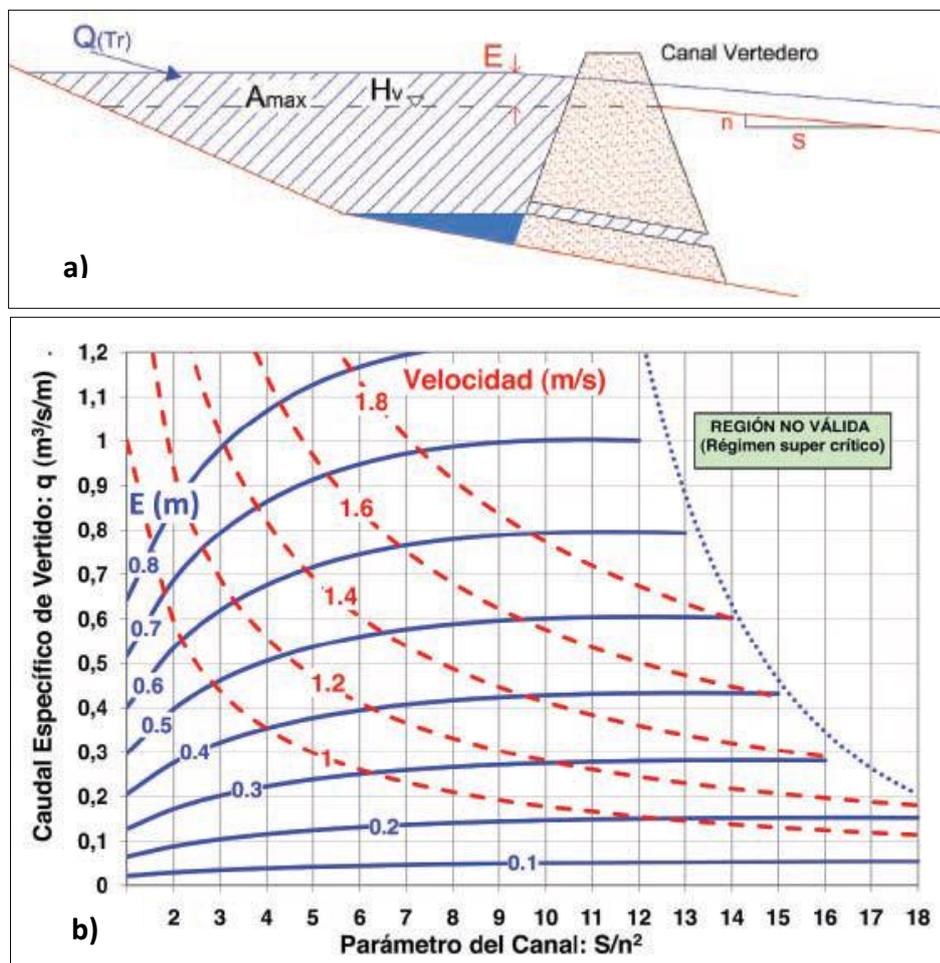


Figura 34. a. y b. Determinación del caudal específico (q) en el canal vertedero. (DINAGUA, 2011)

Tabla 9. Velocidades máximas en suelos empastados. (DINAGUA, 2011)

CUBIERTA VEGETAL	VELOCIDAD (m/s)
Escasa	Menor a 1.0
Por siembra	1.0 a 1.2
Variable	1.2 a 1.5
Bien establecida	1.5 a 1.8
Condiciones muy especiales	1.8 a 2.1

4.3.4. Determinación del ancho del vertedero

Del laminado de la avenida extraordinaria se tiene el caudal máximo vertido y de la ley de vertimiento se tiene el caudal específico por unidad de ancho, por tanto el ancho del vertedero queda definido por:

$$B = \frac{Q_{V\text{máx}}}{q}$$

Donde:

$Q_{V\text{máx}}$:	Caudal vertido máximo	(m ³ /s)
q	:	Caudal específico por unidad de ancho del vertedero	(m ³ /s/m)
b	:	Ancho del vertedero canal	(m)

A su vez, a partir de la cota de vertido, la pendiente del canal de vertido y la topografía aguas debajo de la represa se determina la longitud del canal de forma de restituir el agua al cauce natural.

4.4. Obras de toma

4.4.1. Posición de las obras de toma en relación con los niveles del agua en el vaso

El establecimiento del nivel de la toma y de las elevaciones de los controles de las salidas y de los medios de conducción, en relación con los niveles de almacenamiento en el vaso, dependen de muchas circunstancias (Bureau Of Reclamation, 1970):

En primer lugar, con objetivo de obtener la capacidad de descarga necesaria, la toma debe colocarse a una distancia mínima abajo del nivel de operación del vaso, para la circulación en la obra de toma.

Las obras de toma para las presas pequeñas de almacenamiento se construyen cerca del nivel del cauce, generalmente porque normalmente no se dispone de un almacenamiento permanente, excepto para la retención de limo. (Estas obras de toma pueden construirse sin compuertas para retardar las descargas, cuando el vaso almacena temporalmente el grueso del escurrimiento de la avenida, o pueden tener compuertas para regular las descargas de las aguas temporalmente almacenadas). Si el objetivo de la presa es únicamente elevar y derivar el agua que llega, la obra de toma principal es generalmente una estructura de toma o de regulación a un nivel elevado, y se construye un conducto o una pequeña derivación de salida, para surtir de agua al río aguas abajo o para dar salida al agua de la presa durante las estaciones en que no es necesario almacenarla.

En las presas que se almacena agua para riego, uso doméstico o para la conservación de elementos naturales, las obras de toma deben colocarse lo suficientemente bajas para vaciar todo el espacio destinado a almacenamiento; sin embargo, se pueden colocar a una altura algo mayor que la del lecho del río, lo que depende de la elevación mínima establecida para el almacenamiento en el vaso.

Es una costumbre común dejar un espacio en el vaso inactivo para el depósito de sedimentos, para la conservación de los peces y de los animales salvajes y para

recreo. En este caso, la posición del umbral de la entrada adquiere mucha importancia, porque debe tener la altura necesaria para evitar interferencia con los depósitos de sedimentos, pero al mismo tiempo debe estar lo suficientemente baja que permita un vaciado parcial o completo debajo de la superficie superior del almacenamiento inactivo.

El tamaño de la salida de un conducto para una descarga dada, varía de acuerdo con una relación inversa con la carga disponible para efectuar la descarga. Esta relación se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$H_T = K_1 h_v \quad \text{o} \quad H_T = K_2 \frac{Q^2}{a^2}$$

Donde:

H_T = carga total disponible para producir la circulación

Q = descarga que debe producir la obra de toma

a = área necesaria del conducto

Cuando se coloca una toma al nivel del lecho del río para dejar lugar para la construcción del sistema de derivación, el umbral de operación puede colocarse a un nivel más elevado, para cualquier otro almacenamiento inactivo. Durante el período de construcción se puede dejar una abertura provisional en la base de la entrada para manejar los gastos de la corriente derivada, que después se cierra con un tapón. Para vaciar el vaso, se puede instalar una derivación alrededor de la entrada en el lecho del río, que puede descargar en la porción inferior del conducto o pasar debajo de él. La descarga a una calar a un nivel mayor se puede hacer por medio de un tubo vertical que conecte el conducto al canal.

4.5. Orificios de purga

De acuerdo con los apuntes del curso: “Diseño de obras hidráulicas” (DOH), los embalses debido a la sedimentación natural que ocurre aguas arriba de la presa, deben limpiarse cada cierto período de tiempo (puede ser anualmente o un tiempo estimado que evite la colmatación de sedimentos en el embalse) (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Una alternativa de limpieza de sedimentos sería utilizar: Orificios de fondo (Ver Figura 35), los cuales son aberturas u orificios debidamente dimensionados que se encuentran sumergidos y ubicados en la parte inferior de la presa.

4.5.1. Criterios de diseño

Se tienen las siguientes consideraciones para el dimensionamiento, que permiten contar con el volumen útil requerido y poder mantenerlo durante la operación de la central hidroeléctrica:

- En las alternativas que contemplen orificios de purga, éstos deben estar situados a una altura mayor del nivel de agua para condiciones naturales del río (caudal decamilenario), por experiencia se recomienda por lo menos a 10 metros por

encima del fondo. Este criterio se basa en que los niveles de agua y sedimentos aguas debajo de la descarga de los orificios no obstruya su salida.

- La toma estará ubicada a una cierta altura por encima del nivel del techo de los orificios de purga, de existir éstos.
- La toma debe tener dimensiones suficientes para captar el caudal de diseño.
- La toma debe tener garantizada una debida sumersión de carga para la captación del caudal de diseño
- Mantener el embalse útil por lo menos 50 años.
- Realizar purgas anuales de los sedimentos de arrastre y suspensión.
- No generar erosiones desmedidas en el río aguas abajo de la presa.
- No generar destrucciones en el paramento aguas abajo de la presa.
- Permitir operar la presa ante la variación de caudales en el río de una manera simple.
- La cota de fondo absoluta de la presa está fijada por la cota topográfica de la sección.

4.5.2. Predimensionamiento

Se ha realizado un dimensionamiento de los orificios de purga, en base a las fórmulas teóricas conocidas, experiencia en obras y a investigaciones en modelos físicos.

Se han analizado caudales y condiciones diferentes en obras hidráulicas realizadas en laboratorio del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura, como es el caso del Embalse Tablachaca y la Presa Puente Cincel, obteniéndose de esta forma, el coeficiente de descarga “c” (Ver Anexo B), el cual es un parámetro importante cuando se evalúan los caudales de descarga.

4.5.3. Análisis de la purga

El funcionamiento de la presa durante los procesos de purga anuales se analizará con el caudal máximo anual, equivalente al de período de retorno establecido y también se debe analizar mediante modelación numérica y su capacidad de arrastre.

4.5.4. Dimensionamiento de una presa

A continuación se presentan 3 alternativas de dimensionamiento de una presa²²:

En la primera alternativa (Figura 35), se tiene una presa con orificios de fondo, y por lo mencionado anteriormente, estos orificios contribuyen a la purga de los sedimentos que se puedan acumular en el embalse.

En la segunda alternativa (Figura 36), se presenta la presa con un aliviadero móvil, el cual permite evacuar el caudal de excedencia (generalmente cuando existen períodos de lluvia y se presentan grandes avenidas).

La diferencia que existe entre ambas alternativas, es que en la primera, los orificios de purga se encuentran ubicados debajo del nivel de la toma, por lo que se puede eliminar los sedimentos que se depositan en el embalse, pero a su vez funciona como

²² En este caso, la presa en cuestión es referencial y tiene como fin, mostrar y comparar las alternativas de dimensionamiento que se mencionan.

un aliviadero, permitiendo de esta manera la evacuación del caudal de excedencia, sin embargo se corre el riesgo de que el embalse llegue a colmatarse de igual forma. Es por esto que lo ideal sería unir ambas alternativas, tal y como se muestra en la Figura 37, con el fin de poder obtener un óptimo comportamiento del embalse.

Alternativa N°1:

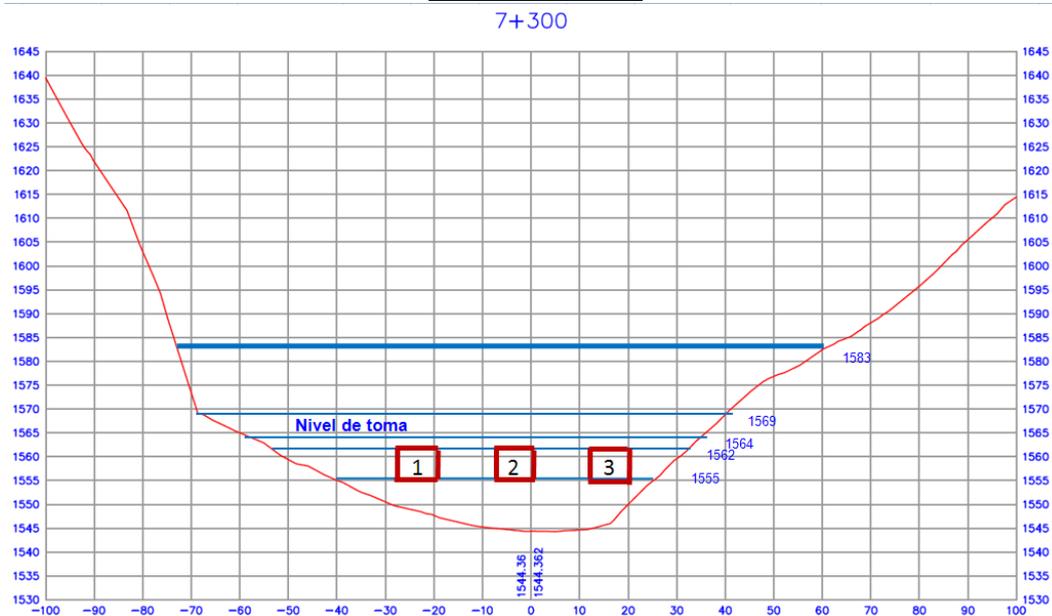


Figura 35. Presa únicamente con descargas de fondo. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Alternativa N°2:

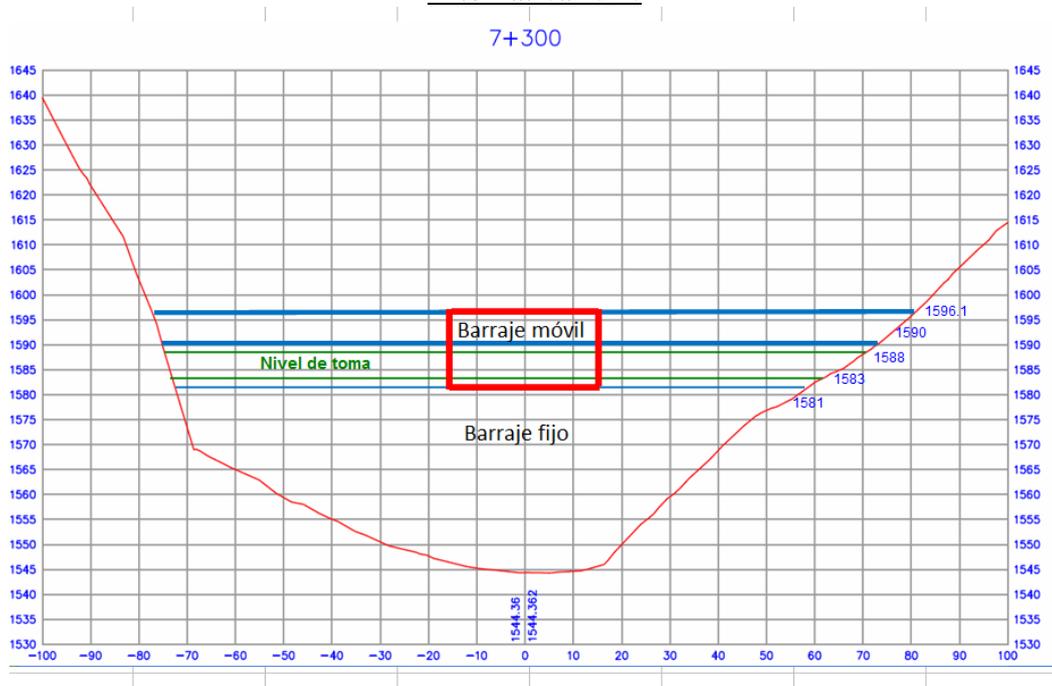


Figura 36. Presa con aliviadero móvil. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Alternativa N° 3:
7+300

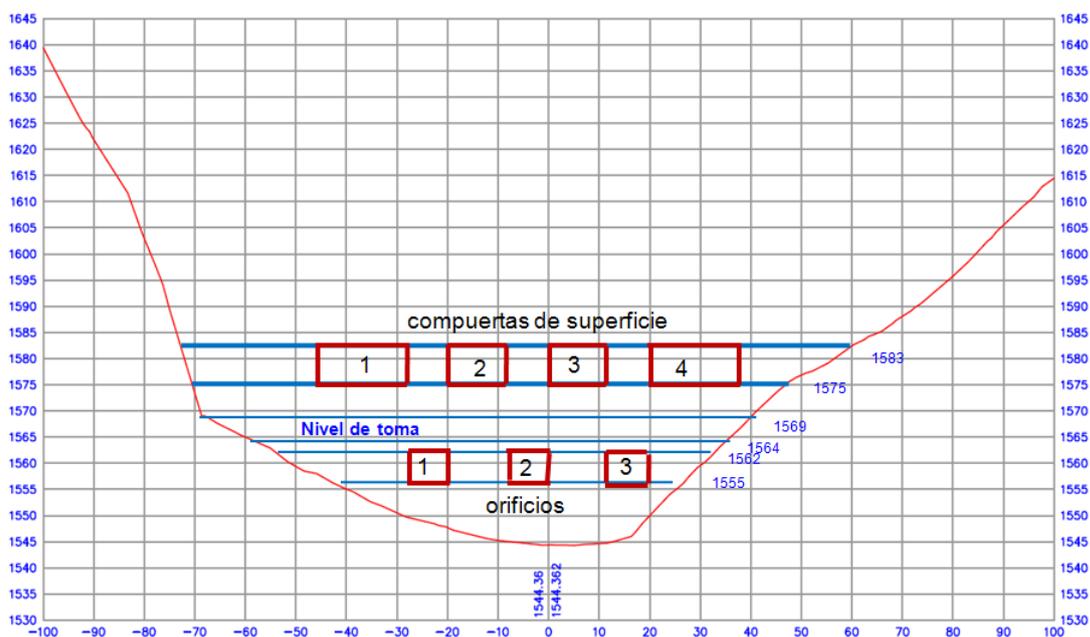


Figura 37. Presa con aliviadero móvil y descargas de fondo. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

4.6. Altura definitiva y normas de operación

Finalizado el diseño preliminar se debe hacer una simulación a nivel mensual de la operación de la presa durante un período crítico para verificar su funcionamiento. Para esto se hace una tabla de embalse y desembalse. En esta simulación se puede suponer la ocurrencia de un período crítico histórico o se pueden considerar años generados estadísticamente. La Figura 38 muestra un caso teórico de normas de operación considerando situaciones de años secos, medios y abundantes, y simulando estas situaciones con un modelo de tránsito de crecidas como la rutina del HEC-1 o del HMS (Fattorelli & Fernandez, 2011).

4.7. Modelos

Existen muchos modelos que simulan las operaciones de los embalses y entre ellos, los principales que se encuentran a disposición son: HEC-1 y HMS; HEC-ResSim (Reservoir System Simulation) Dambrk; Breach; FLdwav, Hec-RAS, TELEMAC.

- a. **Modelo HEC-1:** Tiene una rutina de tránsito por embalses que trabaja con la ecuación de continuidad. Este modelo fue superado por el HMS.
- b. **Modelo HEC-RESSIM (Reservoir System Simulation):** Este modelo, para simular operación de embalses, es de la serie de “new generation” del HEC. La última versión (software y el manual del usuario) se encuentra disponible en internet en la página del HEC (www.hec.usace.army.mil).
 - Modelación de la cuenca (“Watershed Setup”), el cual es una colección de datos asociados con un sistema particular de embalse bajo estudio.

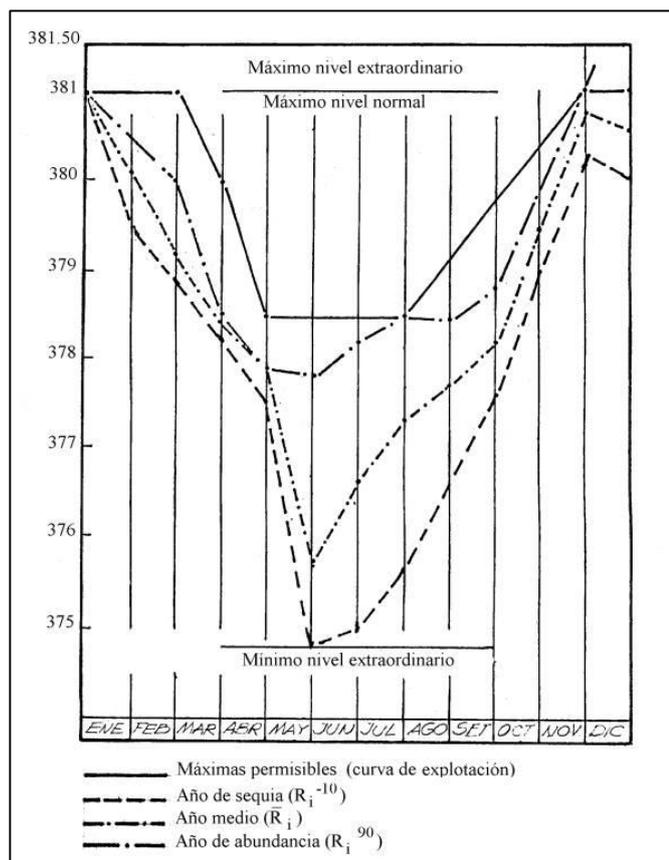


Figura 38. Variación del nivel de un embalse. (Diseño Hidrológico, 2011).

- Redes de embalses (“Reservoir Network”) es un módulo que permite la posibilidad de simular diferentes operaciones y alternativas.
- Simulación (“Simulation”) es el módulo donde se genera la simulación del embalse.

Este modelo permite obtener salidas en forma tabular o gráfica.

- Modelo HEC-RAS versión 4.0:** (marzo 2008) incluye opciones de rotura de presas y de terraplenes y márgenes.
- SSIIM (Sediment Simulation In Intakes With Multiblock Option):** modela la zona de estudio por medio de una malla y parámetros como topografía, caudal, rugosidad, entradas y salidas de agua, etc. y arroja resultados de velocidades horizontales, verticales, de corte, parámetros de turbulencia, tirantes de agua, etc.
- Telemac:** TELEMAC-MASCARET, es un programa de modelación hidráulica basado en el método del elemento finito, el cual se combina con otras herramientas para realizar análisis más específicos (El software fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica, un departamento de la División de Investigación y Desarrollo de Electricidad de Francia. Actualmente es de gratuito y de código abierto). TELEMAC utiliza un modelo digital de elevaciones a base de puntos (extensión .xyz) para modelar el terreno. Se convirtió el MDE proporcionado por INEGI al formato “.xyz” mediante Global Mapper. Después se importó a la interfaz gráfica del TELEMAC (BlueKenue).

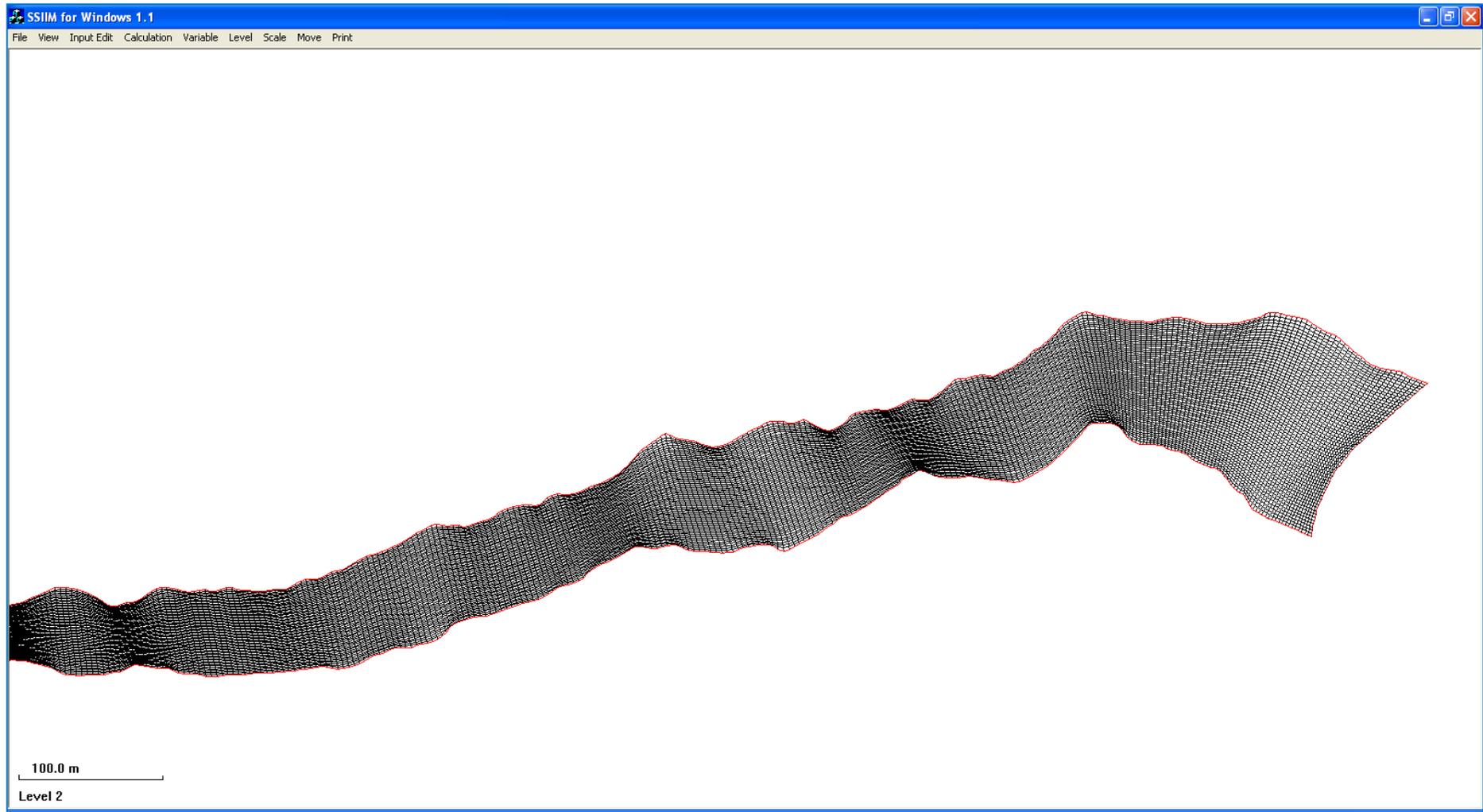


Figura 39. Malla computacional del embalse Chaglla. (Reyes Salazar, UDEP 2014).



Figura 40. Curvas de nivel del cauce del embalse. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

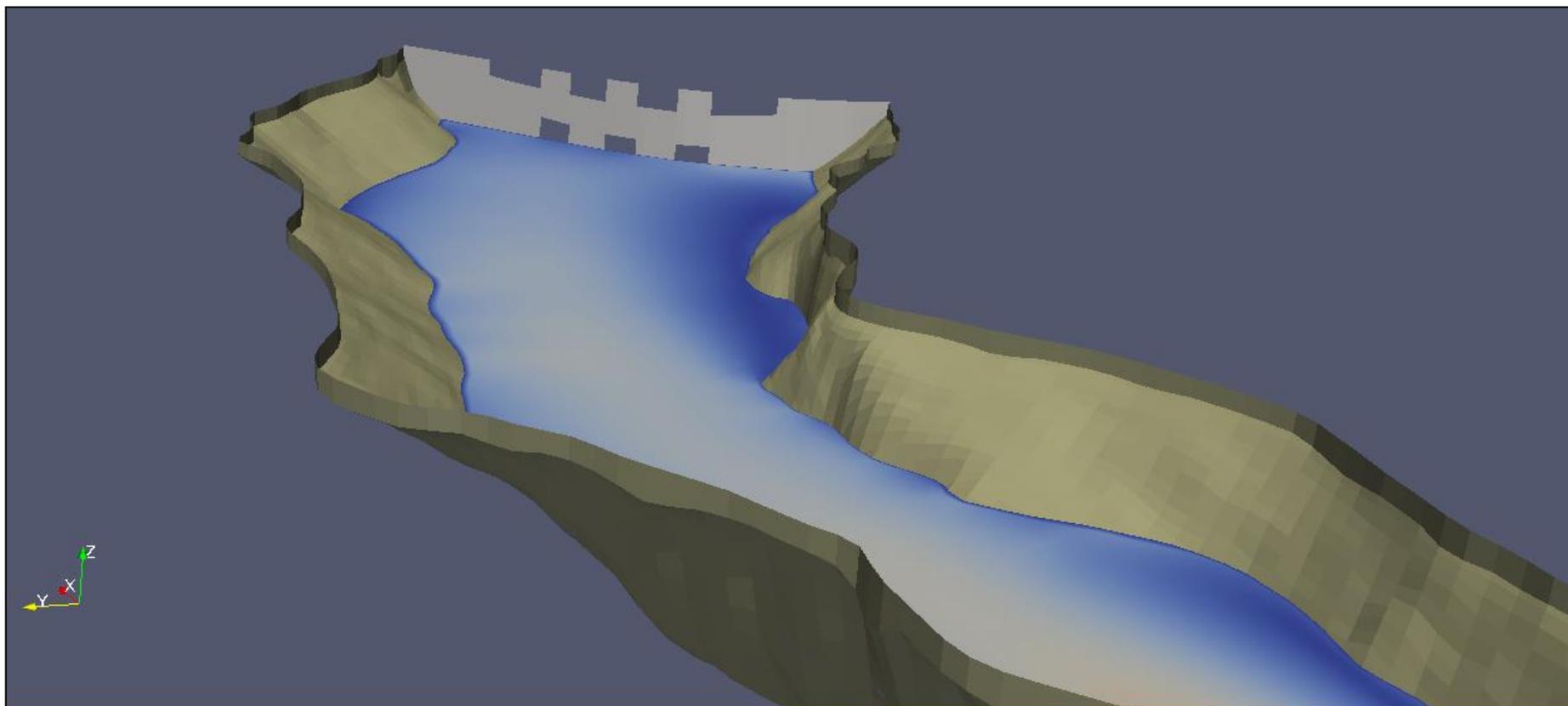


Figura 41. Vista tridimensional aguas arriba de la presa. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Capítulo 5.

Nueva metodología de Diseño de embalse

Generalmente el diseño de un embalse se centra en temas netamente hidráulicos e hidrológicos, enfocando toda su atención en la capacidad de almacenamiento, descarga y distribución del agua que puede tener el embalse en cuestión. Es por ello que el diseño de un embalse, no contempla la consideración debida a los impactos ambientales que se pueden generar en las distintas fases del proyecto (particularmente en la construcción y operación del embalse).

En este tipo de obras hidráulicas, por ser de gran envergadura y de suma importancia para la población, se realiza un Estudio de Impacto Ambiental, EIA (Visto en el Capítulo 2), manejándose de modo independiente el tema medio-ambiental y el tema de diseño del proyecto. Lo que se busca en este capítulo, es obtener una sinergia²³, uniendo ambos temas y generando una nueva metodología de diseño de embalses, proporcionando algunas alternativas o variantes, con respecto a la metodología habitual.

En la nueva metodología se presentan alternativas que fueron ejecutadas actualmente y que arrojan unos resultados, en donde se puede observar una mejoría en comparación con la metodología antigua. Así también, se proponen algunas alternativas propias del autor, que si bien no cuentan con resultados que permitan saber si resultaría rentable o no adoptarlas, incluyen un planteamiento racional, que con el debido financiamiento podrían resultar buenas opciones para evitar efectos ambientales adversos de parte del embalse mismo.

5.1. Aspectos hidráulicos - hidrológicos

Las características físicas principales de un embalse son las curvas: “Cota-Volumen” y “Cota-Área”, vistas en el capítulo 1 (sección 1.9). Dependiendo de las características del valle que contenga al embalse, los efectos de los impactos ambientales varían.

En zonas altas y abruptas, el embalse ocupa tierras deshabitadas, en cuyo caso los impactos ambientales son limitados o inexistentes. En otros casos, especialmente si el valle es amplio y abierto, las áreas inundables pueden ocupar zonas densamente pobladas, o áreas fértiles para la agricultura. En estos casos, antes de construir la presa, debe evaluarse muy objetivamente sus ventajas y desventajas, mediante un Estudio de impacto ambiental (EIA), ejercicio que no siempre se ha hecho en el pasado.

²³ Coordinación de actividades cuyo rendimiento es superior que si se realizaran por separado.

Por lo comentado anteriormente, se puede concluir que la inundación de las aguas del embalse, es un tema de vital importancia y que se le debe brindar la consideración debida. Es por ello que a continuación se presentan 2 alternativas de solución o variantes en el diseño de un embalse, que toma en cuenta el área de inundación de las aguas del embalse y que pretende evitar principalmente los retiros de pobladores cercanos al valle. Una de ellas es la representación gráfica: Área de inundación vs. Altura de presa y la otra es la generación de embalses en cadena.

5.1.1. Curva “Área de inundación vs Altura de presa”.

Es una representación gráfica que relaciona 2 parámetros importantes, tanto para el diseño del embalse (altura de la presa), como para el ambiente que rodea a la presa (área de inundación de las aguas del embalse).

Consiste en colocar en el eje de las abscisas varias alturas virtuales de la presa y en el eje de las ordenadas colocar las áreas de inundación del agua del embalse que generarían dichas alturas. Con esta curva se obtiene un panorama diferente al que se tenía con las curvas Cota–Volumen y Cota–Área, de esta forma se pueden tomar medidas correctivas si es que el área de inundación de las aguas del embalse afecta a zonas aledañas (más adelante se plantea una alternativa de solución para este problema).

A continuación se presenta la curva Área de inundación vs Altura de la presa de uno de los embalses más importantes de la región Piura, el Reservorio San Lorenzo (Ver Figura 42). Para esto se necesitan los datos que se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos hidráulicos del Reservorio de San Lorenzo.

Cota (m)	Altura de presa (m)	Área de inundación (x10³ m²)
252	0	0.04
254	2	0.63
256	4	206.77
258	6	457.07
260	8	616.16
262	10	754.04
264	12	1122.13
266	14	1805.20
268	16	2528.02
270	18	3201.11

Cota (m)	Altura de presa (m)	Área de inundación (x10³ m²)
272	20	4261.31
274	22	5499.53
276	24	6484.98
278	26	7793.27
280	28	8959.51
282	30	10273.77
284	32	11804.42
286	34	12999.50
288	36	14247.86
290	38	15459.02

Fuente. Estudio batimétrico (JUSHAL²⁴, 2008).

²⁴ **JUSHAL:** Junta de Usuarios Sistema Hidráulico Menor de San Lorenzo.

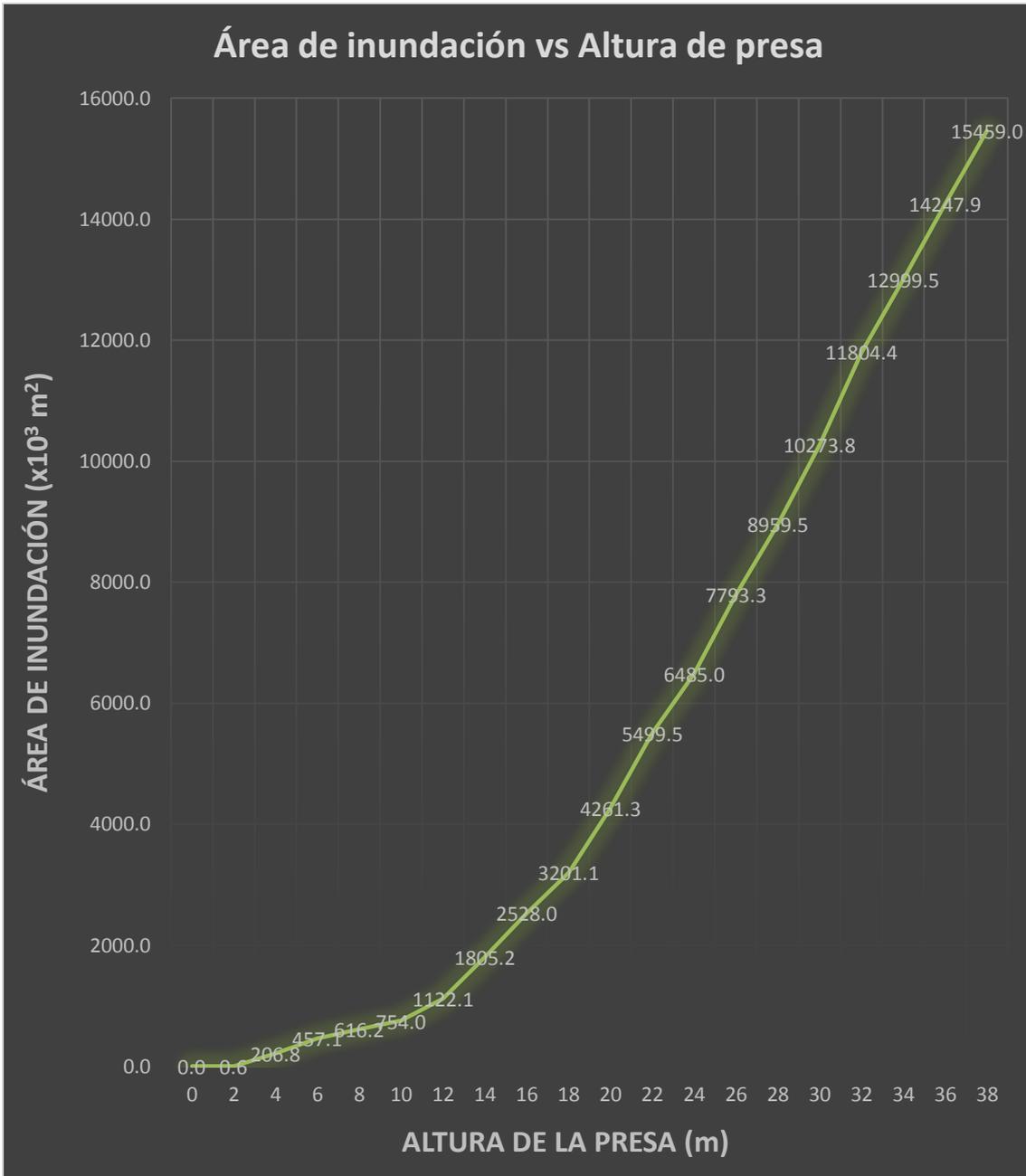


Figura 42. Curva Área de inundación vs Altura de presa, del Reservoirio San Lorenzo.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Cadena de embalses

Actualmente existe un gran número de grandes embalses en el mundo debido a que tienen la capacidad de acumular mayor cantidad de agua y de producir más energía eléctrica (si es que se tratase de una presa hidroeléctrica). Construir grandes embalses comprende a su vez generar más impactos ambientales como los mencionados en el capítulo 2, especialmente, aquellos embalses que presentan una elevada altura de presa, que tienden a inundar gran parte del valle asociado a

dicho reservorio, generando de esta forma problemas que afectan principalmente a los pobladores que viven cerca de esa zona.

Cuando se diseña un embalse, se determina la capacidad óptima para abastecer el consumo de agua de la población que lo requiere. Si este volumen obtenido a través de cálculos hidrológicos e hidráulicos, resulta ser muy grande, implicaría por lo tanto construir una represa de gran tamaño que permita contener el volumen encontrado.

La alternativa de solución que se plantea en este trabajo es la de generar embalses en cadena que contengan la misma capacidad de agua requerida. Es decir, en lugar de tener un embalse de gran envergadura, construir varios embalses más pequeños y que sumando sus volúmenes iguale a la capacidad del embalse de gran tamaño. En la Figura 43, se observa un embalse de gran envergadura con una capacidad de embalse “V”, esta capacidad es el volumen de agua total, es decir incluye el volumen muerto, útil, de crecida y el extraordinario.

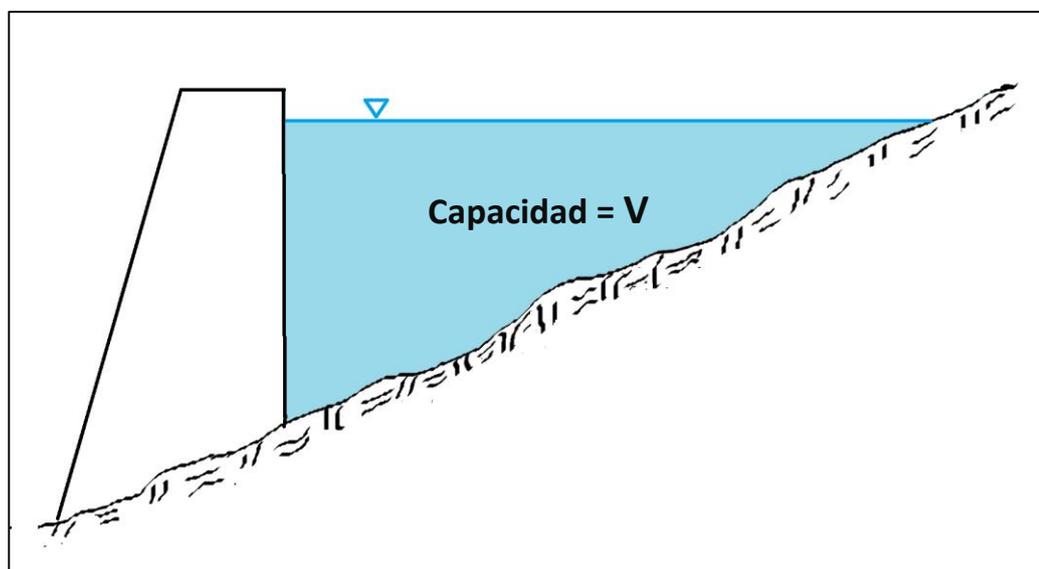


Figura 43. Vista de perfil de un Embalse de gran tamaño.

Fuente. Elaboración propia.

Lo que se plantea es lo siguiente: Reemplazar el gran embalse de capacidad “V” por varios embalses pequeños.

En la Figura 44 se aprecian 3 embalses: “V₁”, “V₂”, “V₃”, los cuales sumados tendrían el mismo volumen de agua que el embalse grande.

Es decir:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

El número de embalses en este caso fue 3, pero para determinarlo se debería hacer un estudio detallado, teniendo en cuenta principalmente la topografía, la geología y también se tendría que analizar si resulta factible realizar cierto número de represas.

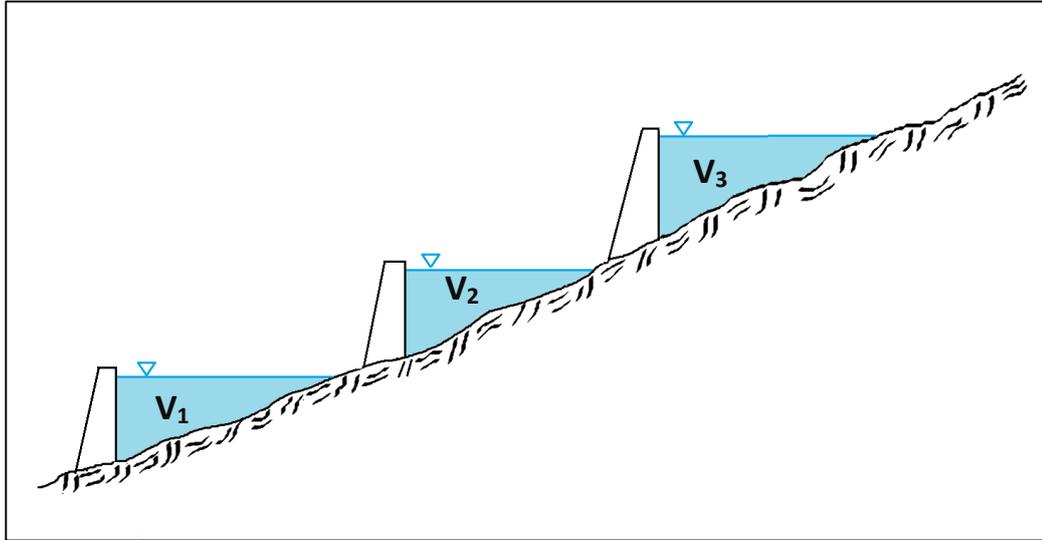


Figura 44. Vista de perfil de una Cadena de embalses.

Fuente. Elaboración propia.

Esta alternativa es recomendable adoptarla en terrenos con morfología variable, que presente zonas cóncavas que retengan el agua del embalse. En la Figura 45 se observa que la altura de la presa es " H_{PRESA} ". Esta altura viene a ser la óptima, debido a que el agua embalsada, que se encuentra en la zona central, no afecta a las zonas colindantes, donde el terreno es más continuo y homogéneo, evitando de esta forma el contacto con zonas agrícolas o viviendas adjuntas al pequeño embalse.

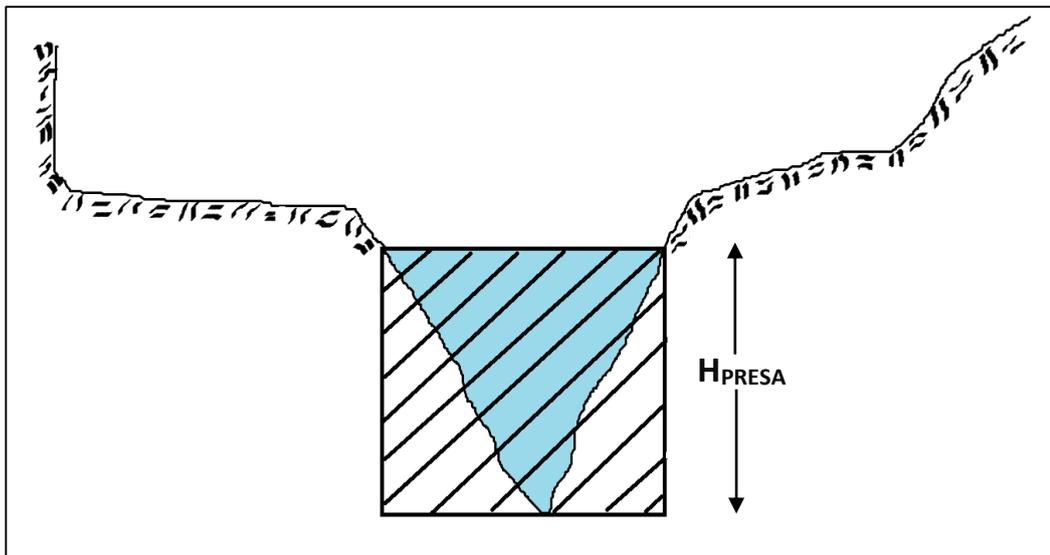


Figura 45. Vista de perfil de un embalse pequeño.

Fuente. Elaboración propia.

5.2. Aspectos sedimentológicos

La importancia que tiene el tratamiento racional de las cuencas hídricas como unidad de manejo y sus efectos en los proyectos de obras hidráulicas, ha evidenciado la necesidad de incorporar nuevas técnicas que analicen y solucionen los inconvenientes causados por la degradación de dichas cuencas.

Los registros o datos batimétricos de los embalses con fines hidroeléctricos, constituyen un material de gran valor para evaluar los efectos erosivos que se están produciendo en las cuencas de aporte y proporcionan además, el conocimiento de:

- La estimación actual del volumen del embalse.
- La variación de su capacidad.
- La limpieza de descargadores de fondo.
- La reconstrucción de las curvas de áreas-volúmenes.
- Tiempo estimado para su total colmatación.

Ésta es una información necesaria para la adecuada planificación de sus operaciones, Así como también, el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados aporta información sobre el mecanismo de colmatación que están sufriendo los embalses.

Las nuevas tecnologías disponibles para el registro de posiciones espaciales con mayor precisión, representan un nuevo escenario y un reto para la aplicación de mejores metodologías en los levantamientos batimétricos con destino al conocimiento de la tasa de colmatación de los embalses hidroeléctricos.

5.2.1. Aplicación de Nuevas Metodologías Batimétricas

El Dr. Sergio Gustavo Mosa, en compañía del Lic. Virgilio Núñez y el Dr. Miguel Ángel Boso, recibieron el 23 de julio de 2009, el premio “Ing. Eduardo E. Baglietto”²⁵ edición 2008, por su trabajo: “Colmatación de los Embalses de Generación Hidroeléctrica del Noroeste Argentino - Aplicación de Nuevas Metodologías Batimétricas”.

El trabajo se basa en una tarea claramente de aplicación a un problema de ingeniería, que utiliza modernas técnicas de posicionamiento espacial que permiten obtener con mayor certeza la evolución de los procesos de colmatación por sedimentos en los embalses de grandes presas.

Este tipo de determinación tiene una gran importancia en los aspectos técnicos, económicos y de impacto ambiental, que mejoran la operación y mantiene la vida útil de las presas.

Los autores presentan en su trabajo, los estudios efectuados en embalses de grandes presas ubicados en el noroeste argentino: El Cadillal y Escaba, en la provincia de Tucumán; Cabra Corral y El Tunal, en Salta; y Río Hondo, en Santiago del Estero.

²⁵ Premio que tiene por objeto distinguir al mejor trabajo desarrollado en el campo de la Geodesia o la Geofísica, publicado o presentado en una reunión técnica de elevada jerarquía, por un ingeniero, licenciado o agrimensor argentino con título universitario reconocido por el Estado.

Algunas conclusiones básicas que surgen de los relevamientos efectuados en comparación con los datos históricos previos determinados con métodos convencionales, son las siguientes:

- El proceso de sedimentación en los embalses resultó muy inferior al estimado anteriormente, con tasas de reducción anuales diferentes para cada embalse. Este aspecto es de vital importancia para evaluar la vida útil de las obras.
- El estudio del tipo y distribución de sedimentos realizados en los embalses define con mayor certeza los procesos erosivos que se producen en la cuenca de aporte y permite la planificación de obras de corrección y atenuación de los efectos de impacto ambiental.
- La definición más precisa del aporte y nivel de sedimentos en las inmediaciones de las presas y obras de toma, y de los órganos de seguridad como los descargadores de fondo, permite la programación anticipada de tareas correctivas y de mantenimiento para aumentar la capacidad operativa y minimizar el riesgo de obstrucción de los elementos de control de crecidas.

A continuación se analizan las metodologías utilizadas antiguamente para los levantamientos batimétricos basadas en la realización de transectas²⁶ transversales al espejo de agua de los embalses y se comparan con una nueva propuesta metodológica introducida por los autores en el año 2005; la cual se basa en la realización de un registro muy denso de posiciones espaciales y de la profundidad (x, y, z) en forma de espiral para cada embalse. Dichos datos son completados con la línea de costa obtenida de la banda del infrarrojo cercano de una imagen satelital actualizada, cuya cota de máximo embalsado es conocida para la fecha correspondiente.

Todos los datos planialtimétricos son usados para la generación de los Modelos Digitales de Profundidad – MDP - de los embalses. La información obtenida para cada batimetría fue comparada con la planimetría original de cada embalse y de los anteriores levantamientos para determinar los espesores de sedimentos depositados. En laboratorio se procesaron las muestras colectadas con una draga de fondo para determinar las fracciones granulométricas de los sedimentos.

Se estudiaron los embalses de El Cadillal y Escaba en la Provincia de Tucumán, los de Cabra Corral y El Tunal en Salta y el de Río Hondo en Santiago del Estero (Tabla 11).

Estos resultados contrastaron fuertemente con los cálculos de sedimentación obtenidos en forma secuencial a partir del cierre de cada embalse siendo muy inferiores a los calculados previamente. El Cadillal tuvo una reducción del 36,8 % de su volumen original, Escaba posee una colmatación del 20,9 %, mientras que Cabra Corral está colmatado un 15,6 %. El Tunal tiene una colmatación del

²⁶ Herramienta para estudiar distintos aspectos perceptivos de un espacio o territorio. Se desarrolla en un recorrido lineal predefinido, cuya secuencia es establecida por cortes verticales. Se trata de poner en evidencia una sucesión espacial mediante un recorrido perceptivo o sensorial. Se elige un tema y se mapean distintas situaciones para reconstruir el espacio y sus características.

24,0 % y el embalse de Río Hondo tiene una reducción de su capacidad original del 13,0 %.

Esta información nos da una idea de los procesos erosivos que ocurren en las cuencas hídricas de cabecera y de la importancia de sus efectos negativos, especialmente sobre la vida útil de los embalses.

Tabla 11. Condiciones iniciales de los embalses estudiados.

Embalse	Potencia generadora instalada (MW)	Fecha de cierre	Cota de máximo embalse (msnm)	Volumen Útil inicial (hm³)	Superficie inicial (ha)
Río Hondo	17,5	Enero de 1968	274	1.658,0	29.563,3
El Cadillal	13,6	Febrero de 1966	607,50	287,2	1.229,2
Escaba	24,0	Septiembre de 1949	630	140,8	539,0
Cabra Corral	102,0	Julio de 1973	1.037	3.297,0	12.244,9
El Tunal	10,4	Julio de 1991	474	221,3	3.277,9

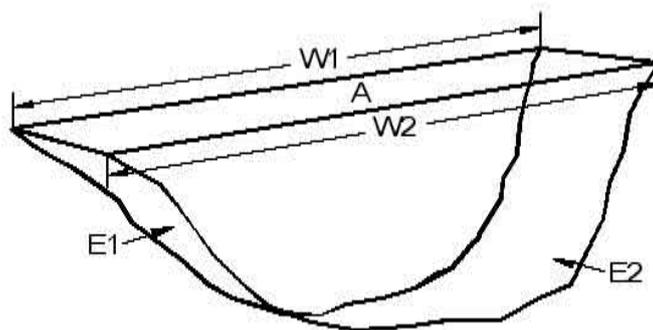
Fuente. Elaboración propia.

5.2.1.1. Antigua metodología

Tradicionalmente los estudios batimétricos se realizaban registrando las posiciones y profundidades sobre una serie de transectas transversales al cuerpo de agua, sobre puntos fijos preestablecidos en la costa de los embalses. A partir de dichas transectas se registraba el perfil del fondo a intervalos regulares utilizando algún sistema para la ubicación del punto (por ejemplo: estaciones totales, teodolitos, distanciómetros) y una ecosonda u otro equipamiento para medir la profundidad.

Los puntos de inicio y fin de las transectas tenían coordenadas conocidas, en un sistema de referencia determinado; esto, con el objeto de utilizar los mismos puntos cada vez que se realizara una nueva batimetría.

Una vez obtenidos los datos a campo, se utilizaba la ecuación de Eakin (Palmieri, et al. 2001) para el cálculo del volumen contenido entre las superficies (perfiles) de dos transectas consecutivas.

ECUACIÓN DE EAKIN:

$$V = \sum \frac{A}{3} * \left(\frac{E1 + E2}{W1 + W2} + \frac{E1}{W1} + \frac{E2}{W2} \right)$$

V = Volumen parcial entre las transectas consideras.

A = Área entre pares de transectas.

$W1, W2, \dots Wn$ = Longitud de cada transecta batimétrica.

$E1, E2, \dots En$ = Superficie del perfil batimétrico para cada transecta.

Calculados los volúmenes parciales, se procedía a realizar la sumatoria de los mismos para obtener el volumen total del embalse; también se calculaba la superficie del espejo de agua como la sumatoria de las áreas parciales.

El método de Eakin padece del siguiente inconveniente: serían necesarias un sinnúmero de transectas para disponer de un modelo adecuado del fondo del embalse, sobre todo en embalses irregulares como por ejemplo el Cabra Corral. Por otra parte, si las transectas se encuentran muy distantes, no había registro de la situación del fondo del embalse entre aquellas. Tampoco se disponía de una **línea de costa**²⁷ completa para todo el embalse, sino solo de algunos puntos sobre las transectas – próximos al inicio y final de cada una - registrados el día del levantamiento. Debe tenerse en cuenta que el método de Eakin se utilizaba debido la inexistencia de equipamientos alternativos y la carencia de algoritmos con potencia de cálculo; inclusive, las mediciones de longitudes y áreas se realizaban con instrumental analógico, planímetros y curvímetros.

También sobre los datos colectados en las transectas se realizaba la comparación de las profundidades entre levantamientos batimétricos de diferentes fechas y de

²⁷ La línea de costa es la línea en la superficie de la Tierra que define el límite entre el mar y la tierra firme. Históricamente ha sido uno de los principales elementos registrados por la Cartografía, debido al límite que la línea de costa ha representado para el desarrollo de las actividades humanas.

la situación inicial del embalse, pero eran solo para los sitios representados por los perfiles y los mismos se extrapolaban a todo el embalse.

5.2.1.2. Nueva metodología

A. Modelo Digital de Profundidades

Para los embalses del noroeste argentino, los autores utilizaron por primera vez un software específico (IDRISI KILIMANJARO®) para la generación de Modelos Digitales de Profundidades – MDP – por interpolación de los datos batimétricos.

Para la interpolación de los datos batimétricos de campo se utilizó el método de la red irregular de triángulos TIN (*Triangulated Irregular Network*) – conocido también como *The Delaunay Triangulation* - para generar un modelo MDP en formato raster con una resolución de 10 metros, algoritmo provisto por los software IDRISI KILIMANJARO® y Arc Map 9®. A partir de dicho modelo digital se obtuvieron las curvas de nivel del fondo del embalse y los datos para los cálculos de las superficies ocupadas y los volúmenes almacenados cada 10 cm.

Alvarez et al. (1991) para el estudio de monitoreo batimétrico en el embalse de Vigía (Portugal), realizaron una evaluación de diferentes métodos de interpolación de datos puntuales para la generación del MDP. Los métodos evaluados fueron:

- IDW (*Inverse Distance Weighted*), la inversa de la distancia ponderada (cuadrática o cúbica), con diferente número de vecinos y con radios de diversas dimensiones.
- Spline, *mínima curvatura* con la opción de 12 vecinos.
- TIN (*Triangular Irregular Network*), red irregular de triángulos.
- El comando TOPOGRID de Arc/Info.

Para la evaluación de los diferentes métodos y la elección del más adecuado, los autores realizaron una valoración cruzada sobre una muestra del 10 %. Calculadas las superficies (MDP) se compararon los valores obtenidos – superficies - con los valores reales de la grilla utilizada durante el levantamiento batimétrico. Implicó asimismo la comparación de diferentes parámetros estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson, error medio, error porcentual absoluto medio y error cuadrático medio. También fueron comparados los parámetros estadísticos descriptivos: promedio, mediana, desvío estándar, mínimo y máximo.

Los resultados obtenidos revelan que los métodos que mejor representan el relieve de fondo corresponden a TOPOGRID y TIN, mientras que para la generación de las curvas de nivel resultaron más adecuados los métodos TOPOGRID y Spline, por su capacidad para suavizar los contornos dando un aspecto más natural. Considerando además otras fuentes bibliográficas, en la Tabla 12 se presenta la comparación de los métodos TIN y GRID.

Tabla 12. Comparación de los métodos de interpolación TIN y GRID.

	TIN	GRID
Ventajas	<p>Habilidad para describir la superficie a diferentes niveles de resolución.</p> <p>Eficiencia en el almacenamiento de datos.</p>	<p>Fácil de guardar y manipular.</p> <p>Fácil integración con bases de datos raster.</p> <p>Suavizado de apariencia más natural.</p>
Desventajas	<p>En algunos casos requiere una inspección visual y control manual de la red.</p>	<p>No es posible usar grillas de diferentes tamaños que permita reflejar la complejidad del relieve.</p>

Fuente. *Environmental Systems Research Institute, Inc*

A partir de las consideraciones referidas en la Tabla 12 y teniendo en cuenta que el método de registro batimétrico propuesto (espirales o rulos) no es una grilla ortogonal, el interpolador que más se ajusta a dicha distribución espacial es la red de triángulos irregulares – TIN – por su capacidad para representar el relieve a partir de una grilla irregular.

Este método también fue utilizado por los autores en otros embalses de la región y por otros autores (Vilhena et al. 2003) para la generación de MDP de embalses.

En base a estos resultados el interpolador TIN fue el utilizaron los autores para el método batimétrico basado en los espirales o rulos propuesto como forma de registro de las posiciones espaciales y de profundidad para la generación del MDP (Figura 46).

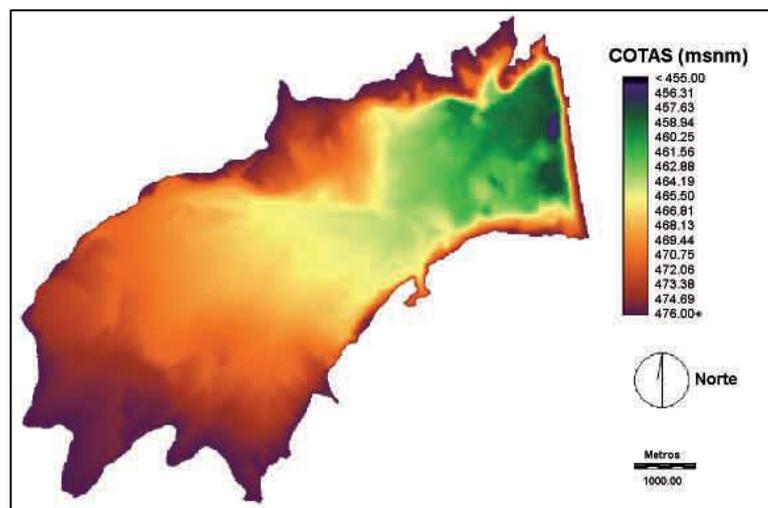


Figura 46. Modelo Digital de Profundidades (MDP) generado para el embalse El Tunal. (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2009)

En el año 2005, los autores compararon también los métodos de Eakin y el MDP encontrando diferencias sustanciales entre ambos (Tabla 13). Dichas diferencias se deben a la pobre representación del relieve del vaso del embalse El Tunal por la falta de datos entre las transectas.

Tabla 13. Diferencia entre métodos para el embalse de El Tunal, para las transectas 2 y 3.

DIFERENCIA ENTRE LOS MÉTODOS	Volumen (hm³)	Diferencia (hm³)	Proporción de la diferencia
Método de Eakin	17.9		
Método del MDP	17.9	0.9	5.4

B. El método de espirales o rulos

Dadas las deficiencias observadas y evidentes en el método de las transectas (Eakin) para la estimación del volumen embalsado y las áreas ocupadas por cada plano de cota, se resolvió evaluar un nuevo método que permitiera el registro de posiciones y profundidades con una mejor distribución de los mismos en todo el espejo de agua y que resultase operativamente ejecutable a costos razonables.

Además, con el método de espirales o rulos se pretende seguir las curvas de forma del valle embalsado con el objeto de registrar la mayor cantidad de variaciones en el relieve de fondo (Figura 47).

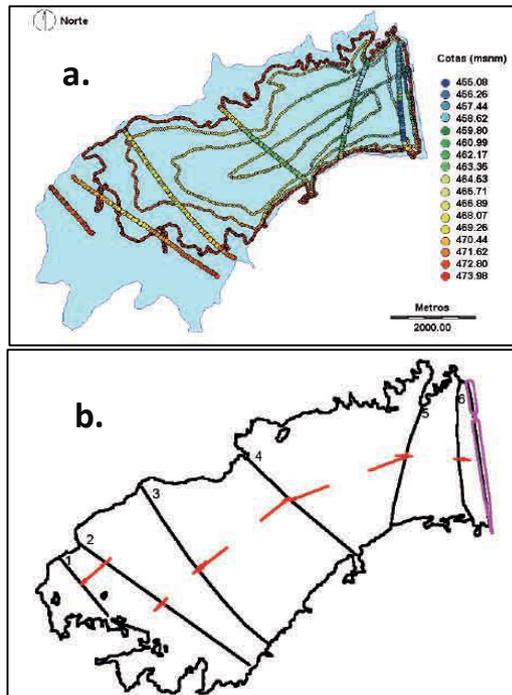


Figura 47. Comparación entre los métodos de (a) espirales o rulos y (b) transectas.

Por otra parte, la actual disponibilidad de equipamientos que permite el registro simultáneo y en tiempo real de la posición y la profundidad mediante la integración de GPS y ecosonda resuelve una serie de inconvenientes ya que se dispone de una gran cantidad de datos en formato digital con precisiones más que aceptables para los levantamientos batimétricos.

A diferencia del método de las transectas, los espirales o rulos permiten la comparación de la sedimentación en cualquier sitio del embalse ya que la interpolación genera un modelo cuasi continuo del fondo.

C. El uso de la imagen satelital para el cierre del modelo

Los autores utilizaron una imagen satelital georreferenciada para obtener la línea de ribera de los embalses para hacer el cierre de los MDP. Esta situación representa un avance significativo respecto a las formas tradicionales de cálculo. La información generada por la batimetría fue completada con el perillado obtenido de una imagen satelital actualizada, que provee la cota superior que no estuvo relevada en los días de trabajo de campo. La ventaja de la utilización de los datos satelitales se basa en la información provista por la banda 4 de las imágenes satelitales LANDSAT 5 TM y 7 ETM+ utilizada; dicho canal radiométrico, correspondiente al primer infrarrojo cercano, permite un perfecto delineado de las costas (separación entre agua y tierra o vegetación), las que corresponden a una curva de nivel o cota precisa en función de la fecha de la imagen y de su resolución (Figura 48).

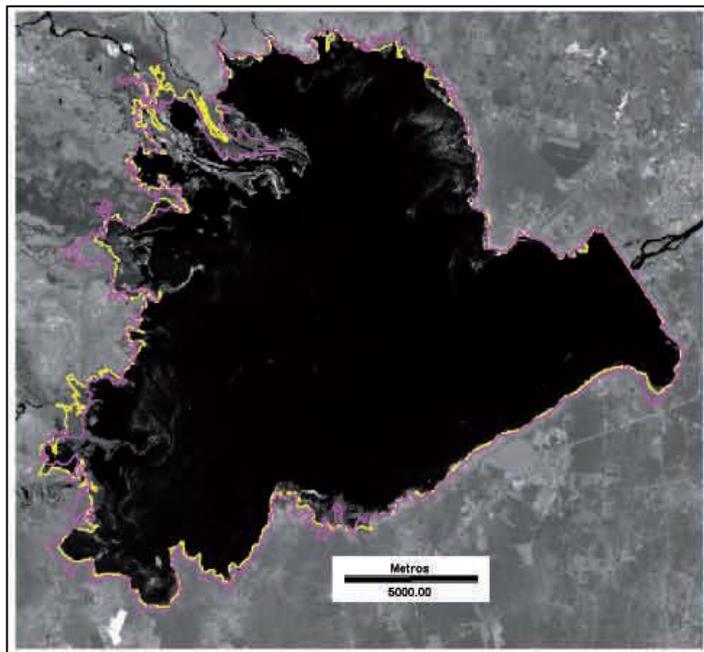


Figura 48. Superposición de la curva de 275 msnm (en color magenta) tomada del levantamiento original del vaso del embalse de Río Hondo con la curva de 274,05 tomada de la imagen satelital LANDSAT 5 TM 230 079 - 25-MAY-2007.

En la Figura 48, se presenta de fondo el 1° infrarrojo cercano (banda 4). Obsérvese como la curva de 275 se superpone en varios sectores con la curva de 274,05 actual, debido al proceso de colmatación que sufre el embalse, principalmente en la formación de deltas en las áreas distales. Por este motivo, la cota 275 original no se utilizó para la estimación del volumen actual.

D. Pasos de la nueva metodología

En síntesis los pasos de la nueva metodología en la evaluación de los cálculos de los volúmenes de cada embalse, propuesta y desarrollada por los autores, se compone de los siguientes pasos:

- a. Georreferenciación de una imagen satelital a partir de puntos de campo, de coordenadas conocidas en un sistema de referencia determinado;
- b. Procesamiento de una banda del infrarrojo cercano (Ej. Banda 4 del satélite LANDSAT 5 TM o 7 ETM+) para obtener el perímetro del embalses en la fecha correspondiente a la imagen, dato de cota que se consulta a la empresa concesionaria de la presa;
- c. Programación de la navegación mediante la creación de rutas de navegación prefijadas que son incorporadas al GPS, con la correspondiente configuración, lo que permite repetir las mismas rutas en los diferentes levantamientos;
- d. Navegación de todo el espejo de agua, registrando las coordenadas y profundidades con intervalos regulares entre 10 y 40 m, según la resolución deseada (nivel del levantamiento y extensión del embalse). En el sector del descargador de fondo de la presa, se realiza un muestreo de detalle de las profundidades para conocer la colmatación en dicho sitio. Durante la etapa de campo se colectan también

- muestras de los sedimentos del fondo del embalse – en sitios preestablecidos – para su posterior análisis y presentación de resultados;
- e. Pre-procesamiento y análisis de los datos colectados para la eliminación de puntos con posicionamiento dudoso o incorrecto y profundidades anómalas por comparación con las vecinas;
 - f. Generación de un MDP - Modelo Digital de Profundidades – por interpolación y a partir de los datos de campo y del perímetro obtenido de la imagen satelital; la interpolación se obtiene utilizando el método TIN utilizando los software IDRISI KILIMANJARO® y Arc Map 9®. El MDP es generado con una resolución espacial de 10 m y con una resolución en profundidad de 10 cm;
 - g. Cálculo de los volúmenes almacenados en el embalse para las cotas con equidistancia de 10 cm y de las superficies ocupadas por cada una de las cotas. Las cotas extremas consideradas son: la mínima como el nivel de base actual del embalse y, la máxima, al nivel superior por debajo del aliviadero; dicha cota corresponde al máximo nivel de generación de energía;
 - h. Generación de las curvas de cota volumen y cota superficie para las situaciones original y actual. A partir de los datos de las cotas vs. volumen y superficie, se obtienen la ecuaciones matemáticas mediante el software GRAPHER V 2.02® (con polinomios de grado 10) con un r de ajuste superior al 0,9999 %;
 - i. Cálculo de las diferencias de volúmenes con respecto a la situación original y generación de la curva correspondiente.
 - j. Comparación de diferentes perfiles (transectas) del embalse en las situaciones original y actual, para conocer la evolución de la sedimentación en diferentes sitios – pérdida de la capacidad de embalsar agua – que afecta a la generación de energía, la disponibilidad de agua para riego y a la vida útil del embalse.
 - k. Análisis de las muestras de sedimentos, que fueran colectadas durante el levantamiento de campo, para determinar: contenido y porcentaje de humedad; contenido y porcentaje de materia orgánica; y, la granulometría - contenido y porcentaje de arena, contenido y porcentaje de limo y, contenido y porcentaje de arcilla. Con esta información, se preparan tablas que caracterizan los diferentes tipos de sedimentos y su distribución en el embalse.
 - l. Preparación del informe final del estudio, con los resultados y las correspondientes recomendaciones. Como parte de los anexos se presenta un mapa topográfico – curvas de nivel –y el MDP del embalse.

E. Resultados

Las tareas desarrolladas posibilitaron reconocer la capacidad y superficie de cada embalse, la identificación de los espesores de sedimentos acumulados como así también donde se distribuyen. Por otra parte, el levantamiento más detallado efectuado en las proximidades de la presa, permitió establecer la relación entre el fondo del embalse y las obras de toma.

CONCLUSIONES

- Según el artículo 3 del Reglamento del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) del Ministerio del Medio Ambiente, los grandes proyectos como son los embalses, deben someterse a una Evaluación de Impacto Ambiental, y lo harán presentando una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), ya sea detallado o semi-detallado, dependiendo de los efectos, características o circunstancias, que pueda generar el proyecto en cuestión, contempladas en el artículo 11 de la Ley 19.300.
- Es de suma importancia tener en cuenta el tema medio-ambiental, desde el inicio hasta el final del proyecto de un embalse, ya que con ello podemos identificar y predecir qué efectos ejercerá sobre el ambiente, y de esta forma prevenir, controlar, mitigar y compensar los posibles impactos negativos que puedan generarse. No hacerlo responsablemente se cae en un error, como generalmente ocurre hoy en día, en que los impactos ambientales, simplemente se consideran para obtener el permiso o aprobación para la ejecución de la obra.
- Para ejecutar una óptima gestión ambiental, se debe elaborar un adecuado cronograma y un apropiado presupuesto, con el fin de que las actividades y políticas, dirigidas a manejar de modo integral el medio ambiente, contribuyan con el desarrollo sostenible del mismo en un tiempo establecido y con el recurso monetario previsto, evitando de esta forma, retrasos o incumplimientos que generalmente ocurren.
- Para que no existan problemas entre la empresa que ejecutará el proyecto y la comunidad que se encuentra en la zona del proyecto, se deben realizar charlas y conversaciones entre ambas partes, en las cuales, la empresa no sólo brinde información acerca del proyecto y que el diálogo se torne unilateral; sino más bien, que permita la participación de los Stakeholders (grupos de interés) y pobladores, para que haya un debate en donde ambas partes realicen sus comentarios y expresen sus apreciaciones sobre el proyecto, para entre ambos, generar alternativas de solución y se pueda llegar a un mutuo acuerdo.
- Para que haya un buen debate entre ambas partes, sería conveniente realizar una evaluación previa a los Stakeholders o grupos de interés, y saber cuáles son sus pretensiones o que buscan obtener con la ejecución del proyecto, para que la empresa pueda negociar con ellos y no se generen inconvenientes durante la realización de la obra.
- Si el embalse es de gran tamaño y se tiene que inundar una amplia zona geográfica, la empresa a cargo de la ejecución de la obra, deberá contemplar un Programa de Reasentamiento de la Población afectada, haciendo entrega de viviendas o módulos, y a su vez se deberá realizar un Programa de Expropiación de Terrenos, indemnizando y remunerando a los pobladores afectados por sus terrenos inundados.
- Se han mencionado a lo largo del presente trabajo: Medidas de mitigación para los probables impactos ambientales, así como también, se ha propuesto alternativas de solución que eviten algunos de los impactos ambientales más importantes que se pueden dar durante la construcción y operación de los embalses. Con lo cual queda demostrado que existen formas de reducir sustancialmente los efectos de algunos

impactos ambientales en una obra de gran envergadura, y que los embalses siguen siendo una opción trascendente cuando de almacenar agua y generar energía se trate.

RECOMENDACIONES

En la búsqueda de bibliografía para la realización del presente trabajo, se investigó, en primer lugar, la bibliografía local (peruana), acudiendo a libros y a los organismos de recursos hídricos, más importantes del país, encontrando poca información.

Lo que se hizo fue averiguar sobre embalses en bibliografía de otros países, encontrando: manuales sobre diseño de embalses y listas con medidas de mitigación de los impactos ambientales generados por estos. Esta información fue hallada en textos de Uruguay, Colombia, Chile, E.E.U.U y España; lo que implica que en Perú no se le da la importancia debida a obras hidráulicas tan importantes como son las represas. Si bien en nuestro país no hay represas de gran envergadura, el mal funcionamiento de estas represas, podría ocasionar impactos ambientales irreversibles a la zona en la que se encuentren.

Se recomienda que el tema acerca de *embalses*, específicamente el diseño de estos, sea objeto de estudio por más personas en nuestro país, así como también, de las entidades reguladoras de los recursos hídricos, con el fin de elaborar:

1. Un *Manual de diseño de embalses del Perú*, que cuente con las características de cada región y que a su vez considere los impactos ambientales que se puedan generar.
2. Un *Reglamento Nacional sobre Seguridad de Presas y Embalses*, normativa que permita obtener y mantener en el tiempo la mayor optimización del recurso agua dentro de unos niveles de seguridad aceptados por la sociedad.

Así mismo, los estudios de Impacto Ambiental deben considerar, como actuar en el caso de ocurrencia de situaciones de emergencia, como el caso de un sismo, rotura de la presa, avenidas extraordinarias, etc.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACA. 2003. Caracterització i propostes d'estudi dels embassaments catalans segons la Directiva 2000/60/CE del Parlament Europeu. Agència Catalana de l'Aigua, Barcelona, Spain.
2. Ainzúa, A. (07 de Diciembre de 2007). *Embalses por causas naturales*. Obtenido de Monografias.com: <http://www.monografias.com>
3. Alvarez M. A., Fernandes S., Mariano A. C., Pimenta M. T. y Verissimo M. R. 1991. Monitorização batimétrica em albufeiras. ESIG 2001. Sao Paulo, pp.1-11.
4. Alvarez, M. C., & SA, P. (s.f.). *Impacto de embalses de centrales hidroeléctricas y balance de producción de gases de efecto invernadero*. Obtenido de <http://www.mecanica-cdl.org/>
5. Arango Tobón, J. C. (s.f.). *Las obras de captación para riego*. Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/4785/13/70064307._2002_5.pdf
6. Armengol, J. (2007). *La gestión de los embalses en relación con la calidad del agua en condiciones de sequía extrema. VII Encuentro de Cáceres*. España.
7. Bureau Of Reclamation, U. S. (1970). *Proyecto de Presas Pequeñas*. Madrid: Dossat.
8. Burneo Borrero, N. (2013). Manejo Ambiental de la central hidroeléctrica ingeniero "Carlos Mora Carrión": Fase de Operación y Mantenimiento. *Tesis Doctoral*.
9. Bustamante Fernández, C. A. (2010). Efectos ambientales generados por la construcción y operación de un embalse. *Tesis Doctoral*. Bogotá.
10. Bustamante, J. (1996). *Manual de obras menores de riego*. Santiago de Chile: Antártico.
11. Cánovas Del Castillo, E. V. (1998). *Tratado básico de presas* (4ta ed.). Madrid.
12. (2011). *Construcción de presas, represas y embalses con capacidad mayor a 200 millones de m3*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Dirección de Licencias Permisos y Trámites Ambientales, BOGOTA, D.C. Obtenido de http://www.bdlaw.com/assets/htmldocuments/Colombia%20-%20term_ref_construccion_embalses.pdf
13. Davis, C.V., Sorensen, K.E. (ed) (1969) "Handbook of Applied Hydraulics". Mc Graw-Hill.

14. de Célix Caballero, M. R., & del Campo Benito, J. (2006). Programa de seguridad de presas y embalses. *Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente*(58), 40-46. Obtenido de http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_AM/AM_2006_58_40_45.pdf
15. DINAGUA. (2011). Diseño de las obras necesarias, Aliviadero. En DINAGUA, *Manual de Diseño y Construcción De Pequeñas Presas* (Vol. 1, págs. 32 - 45). Montevideo, Uruguay: 2da. Edición (Edición Digital). Obtenido de <http://www.mvotma.gub.uy/dinagua/manualdepequenaspresas>
16. DOUROJEANNI, M. J. (Diciembre, 2011). *Amazonia probable y deseable: ensayo sobre el presente y futuro de la Amazonia*. Lima: Universidad Inca Garcilaso de la Vega.
17. Estudio de impacto ambiental y Evaluación ambiental Estratégica. (s.f.). *FORUM SOLIDARIDAD PERÚ*.
18. Fattorelli, S., & Fernandez, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. 2da. Edición (Edición Digital). Obtenido de http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf
19. Gamarra, T. (10 de Octubre de 2014). *Tipos de presas*. Obtenido de Academia.edu: https://www.academia.edu/8981172/Tipos_de_presas-tania
20. Genta J.L., Charbonnier F., Rodríguez A. (1998). "Precipitaciones máximas en el Uruguay". Congreso Nacional de Vialidad, 1998.
21. Giraldo Betancourt, J. S. (2014). *Operación óptima de una cadena de plantas hidráulicas de generación con embalses*. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/4922/1/6213121G516.pdf>
22. Guevara, M. (2000). Embalses. En *Estructuras Hidráulicas* (págs. 1-31). Obtenido de http://www.academia.edu/7223828/Obras_hidraulicas._Embalses
23. Han, B.P., Armengol, J., Garcia, J. C., Comerma, M., Roura, M., Dolz, J., Straskraba, M. 2000. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecological Modelling*, 125(2-3), 109-122.
24. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, I. (Enero de 2012). *Presas de hormigón*. Obtenido de Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: <http://www.ciccp.es>
25. Junta de Usuarios del Distrito de Riego San Lorenzo (2008). Informe batimétrico. Piura.

26. Lane, E.W. y Koelzer V.A. (1953). Density of Sediments Deposited in Reservoirs. Report No. 5 of Study of Methods used in Measurement and Analysis of Sediment Loa Streams, St.Paul, U.S. Engr. Dist. Sub-Office Hydr. Lab., Univ. of Iowa, Iowa City.
27. Moreno-Ostos, E., Marcé, R., Ordóñez, J., Dolz, J., Armengol, J. 2008. Hydraulic Management Drives Heat Budgets and Temperature Trends in a Mediterranean Reservoir. *International Review of Hydrobiology*, 93(2), 131-147.
28. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, l. C. (Septiembre de 2009). Colmatacion de los embalses de generación hidroeléctrica del noereste argentino aplicacion de nuevas metodologías batimétricas. *Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe, II*, 93-104.
29. Palau, A. 2006. Integrated environmental management of current reservoirs and regulated rivers. *Limnetica*, 25(1-2), 287-302.
30. Palmieri A., F. Shah y Dinar A. 2001. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journ. Environm. Manage.* Vol 61 2, pp. 149-163
31. Prats, J., Armengol, J., Dolz, J., & Morales-Baquero, R. (2014). Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. *Ingeniería del Agua*, pp. 80-94. Obtenido de <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-01128334/document>
32. Prats, J., Val, R., Armengol, J., Dolz, J. 2010. Temporal variability in the termal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors. *Journal of Hydrology*, 387(1-2), 105-118.
33. Reyes Salazar, J. D. (UDEP 2014). *Dimensionamiento de una presa, orificios de purga y comportamiento sedimentológico del embalse*. Apuntes del curso DOH, Piura.
34. Rocha Felices, A. (Mayo 2011). Los embalses laterales y sus aspectos sedimentológicos, aplicación al reservorio de Palo Redondo. *IV Congreso Internacional HIDRO 2011, Obras de Saneamiento, Hidráulica, Hidrología y Medio Ambiente*. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG).
35. Roldán Pérez, G., & Ramirez Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. (2 ed., Vol. 15). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
36. Sherman, B., Todd, C. R., Koehn, J.D., Ryan, T. 2007. Modelling the impact and potential mitigation of cold water pollution on Murray Cod populations downstream of Hume Dam, Australia. *River Research and Applications*, 23(4), 377-389.

37. Thornton, K. W., Kimmel, B. L., & Payne, F. E. (1990). *Reservoir limnology: ecological perspectives*. John Wiley & Sons.
38. Tundisi, J. G. (1986). *Ambiente, represas e barragens*. 5(27), 48-54.
39. USBR. (1987) "Design of Small Dams"
40. USDA - NRCS. (1997). "Agriculture Handbook 590: Ponds - Planning, Design, Construction". United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
41. Vilhena R. M., Roig H. L. y Meneses P. R. 2003. Determinação do assoreamento de reservatório utilizando técnicas de geoprocessamento, o caso do reservatório de Funil – RJ. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte-MG, CDROM, pp. 2649-2651.

Anexo A

Matriz Para Identificación De Impactos Ambientales En Presas

Anexo B

Determinación Del Coeficiente De Descarga

Determinación del coeficiente de descarga

Se han analizado caudales y condiciones diferentes en obras hidráulicas como el Embalse Tablachaca y la Presa Puente Cincel, obteniéndose un coeficiente de descarga promedio de $c = 0.84$.

Embalse Tablachaca

El embalse de Tablachaca inició su operación en el año 1973, conjuntamente con la puesta en servicio de la primera etapa (342 MW) de la central Santiago Antúnez de Mayolo (SAM) del Complejo Mantaro.

La segunda etapa de la central SAM (456 MW) se puso en servicio en 1978 y a fines de 1984 inició su operación la central Restitución (RON), con 210 MW instalados, que constituye la segunda central del Complejo Mantaro, el cual dispone en la actualidad de un total de 1008 MW instalados.

El embalse de Tablachaca permite regular en forma diaria y semanal los caudales del río Mantaro y su volumen total disponible inicial fue del orden de los 17 hm^3 , siendo el volumen útil actual de aproximadamente $7,53 \text{ hm}^3$.

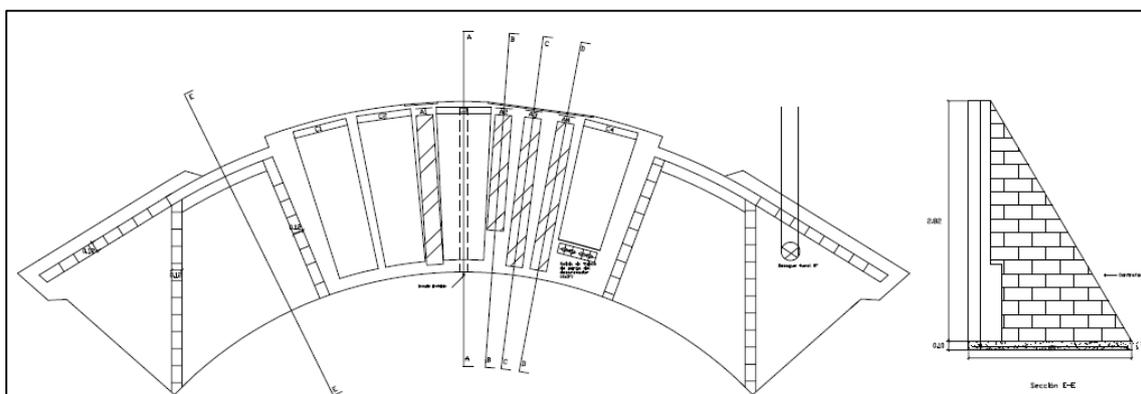


Figura 49. Planta de la presa Tablachaca. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

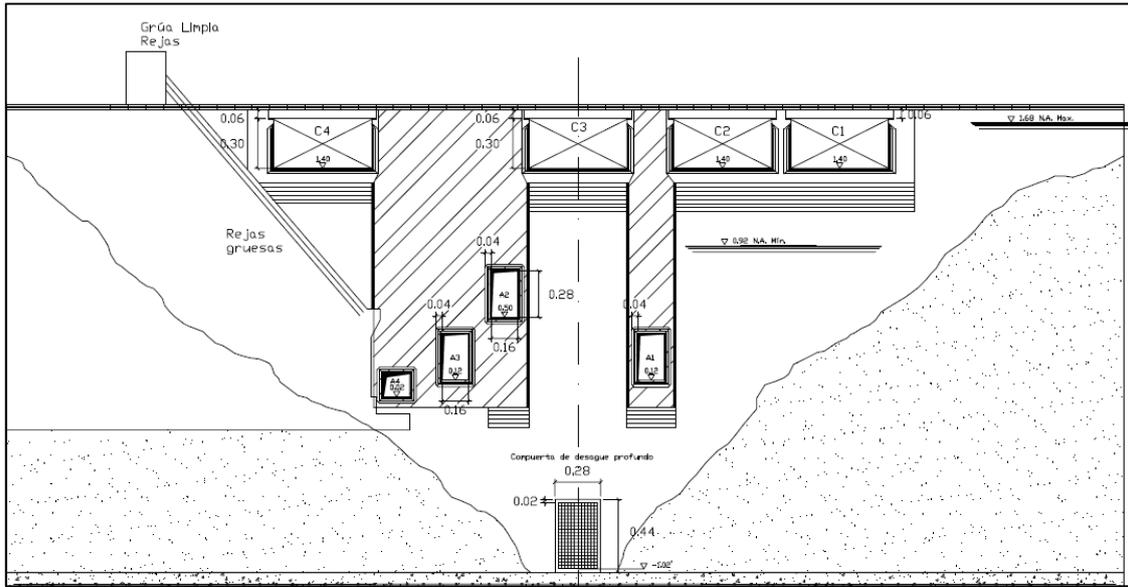


Figura 50. Presa mostrando los 4 aliviós y las 4 compuertas. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

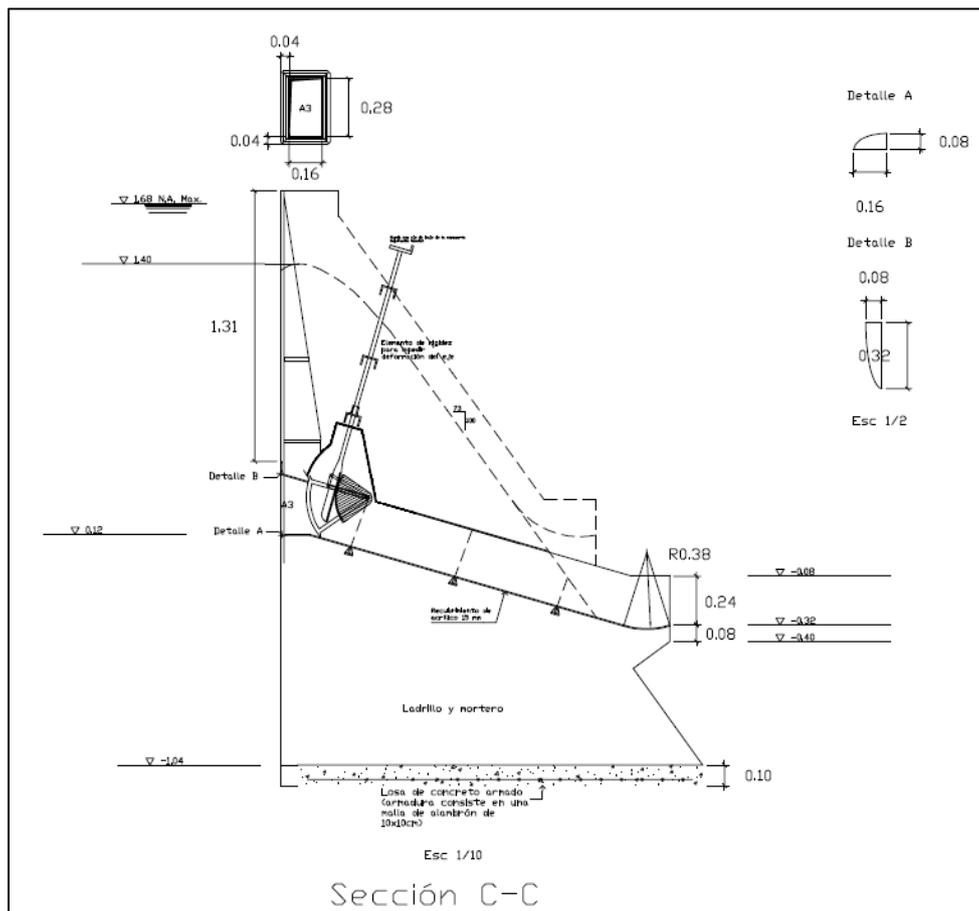


Figura 51. Sección de la presa mostrando el alivió A3. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

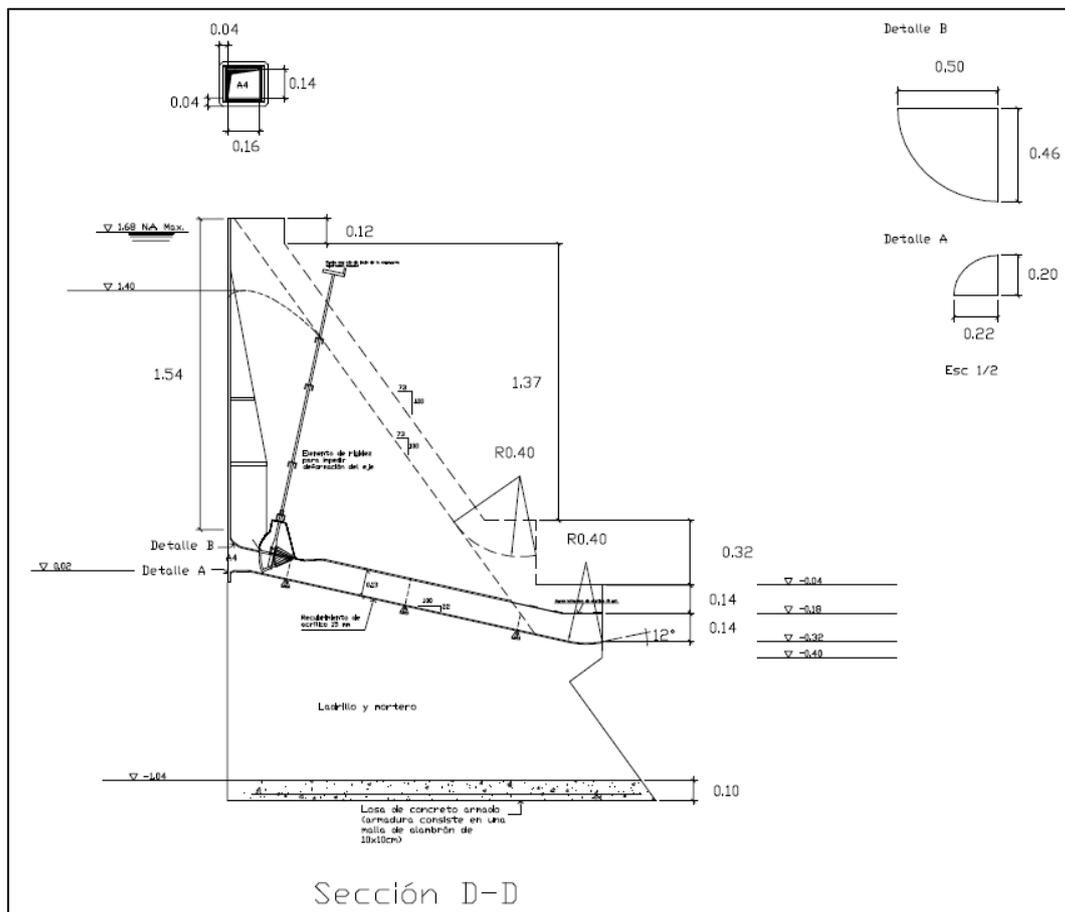


Figura 52. Sección de la presa Tablachaca mostrando el alivio A4. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Tabla 14. Cálculo del coeficiente de descarga promedio en el Embalse Tablachaca. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Alivio	base	altura	área	abertura	altura	área	nivel agua	nivel entrada	H	H-a	Vs (m/s)	Q teórico	Q real	C
1	4	5.6	22.4	42%	2.35	9.41	2676	2,656.0	20	17.65	18.6	175.1	126.0	0.72
2	4	5.6	22.4				2676	2,665.5	10.5					
3	4	5.6	22.4				2676	2,656.0	20					
4	4	2.5	10.0	100%	2.50	10.00	2676	2,653.5	22.5	20.00	19.8	198.1	183.0	0.92
												373.2	309.0	0.83
Alivio	base	altura	área	abertura	altura	área	nivel agua	nivel entrada	H	H-a	Vs (m/s)	Q teórico	Q real	C
1	4	5.6	22.4				2676	2,656.0	20					
2	4	5.6	22.4				2676	2,665.5	10.5					
3	4	5.6	22.4	38%	2.13	8.51	2676	2,656.0	20	17.87	18.7	159.4	125.5	0.79
4	4	2.5	10.0	100%	2.50	10.00	2676	2,653.5	22.5	20.00	19.8	198.1	183.0	0.92
												357.5	308.5	0.86
Alivio	base	altura	área	abertura	altura	área	nivel agua	nivel entrada	H	H-a	Vs (m/s)	Q teórico	Q real	C
1	4	5.6	22.4	100%	5.60	22.40	2676	2,656.0	20	14.40	16.8	376.5	326.0	0.87
2	4	5.6	22.4				2676	2,665.5	10.5					
3	4	5.6	22.4	85%	4.76	19.04	2676	2,656.0	20	15.24	17.3	329.2	244.2	0.74
4	4	2.5	10.0	100%	2.50	10.00	2676	2,653.5	22.5	20.00	19.8	198.1	183.0	0.92
												903.8	753.2	0.83
Alivio	base	altura	área	abertura	altura	área	nivel agua	nivel entrada	H	H-a	Vs (m/s)	Q teórico	Q real	C
1	4	5.6	22.4				2676	2,656.0	20					
2	4	5.6	22.4				2676	2,665.5	10.5					
3	4	5.6	22.4	100%	5.60	22.40	2676	2,656.0	20	14.40	16.8	376.5	313.3	0.83
4	4	2.5	10.0	100%	2.50	10.00	2676	2,653.5	22.5	20.00	19.8	198.1	183.0	0.92
												574.6	496.3	0.86
Alivio	base	altura	área	abertura	altura	área	nivel agua	nivel entrada	H	H-a	Vs (m/s)	Q teórico	Q real	C
1	4	5.6	22.4	100%	5.60	22.40	2676	2,655.0	21	15.40	17.4	389.4	326.0	0.84
2	4	5.6	22.4				2676	2,665.5	10.5					
3	4	5.6	22.4	100%	5.60	22.40	2676	2,655.0	21	15.40	17.4	389.4	313.3	0.80
4	4	2.5	10.0	100%	2.50	10.00	2676	2,652.0	24	21.50	20.5	205.4	183.0	0.89
												984.1	822.3	0.84
														0.84

Presa Puente Cincel

La Presa Puente Cincel está ubicada en el río Chili, a 2.5 km aguas debajo de la descarga de la C.H. Charcani V regula el caudal turbinado mediante un reservorio de 0.3 hm³ durante la operación de 5 horas punta.

Con la finalidad de mantener en el río un curso casi inalterado respecto a su estado natural, la presa incluye dos salidas de fondo que tienen una sección de 4.0 m por 4.2 m cada una y son controladas por compuertas radiales (Figura 53, Figura 54 y Figura 55).

Sus registros de caudales y niveles han permitido estimar el coeficiente de descarga (Figura 56 y Tabla 15), obteniéndose $c = 0.84$.

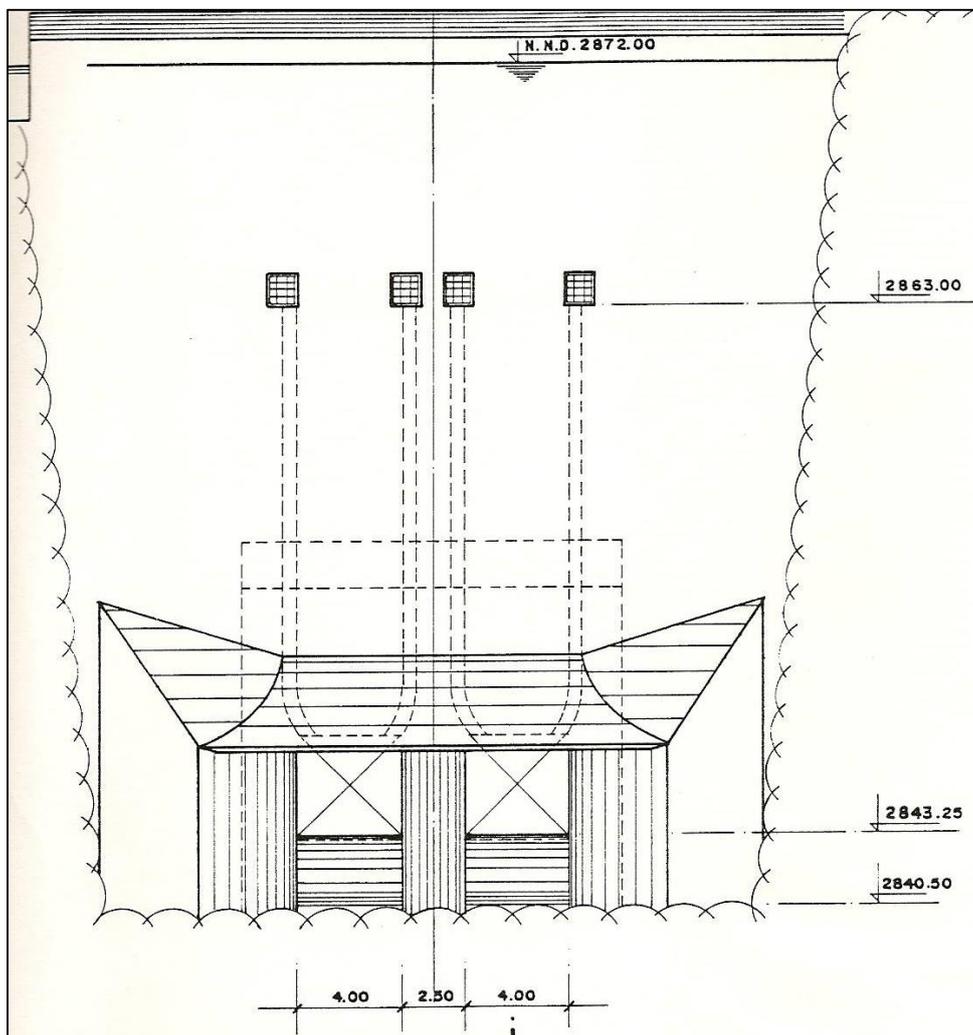


Figura 53. Presa Puente Cincel. Diseño 1. Vista frontal. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

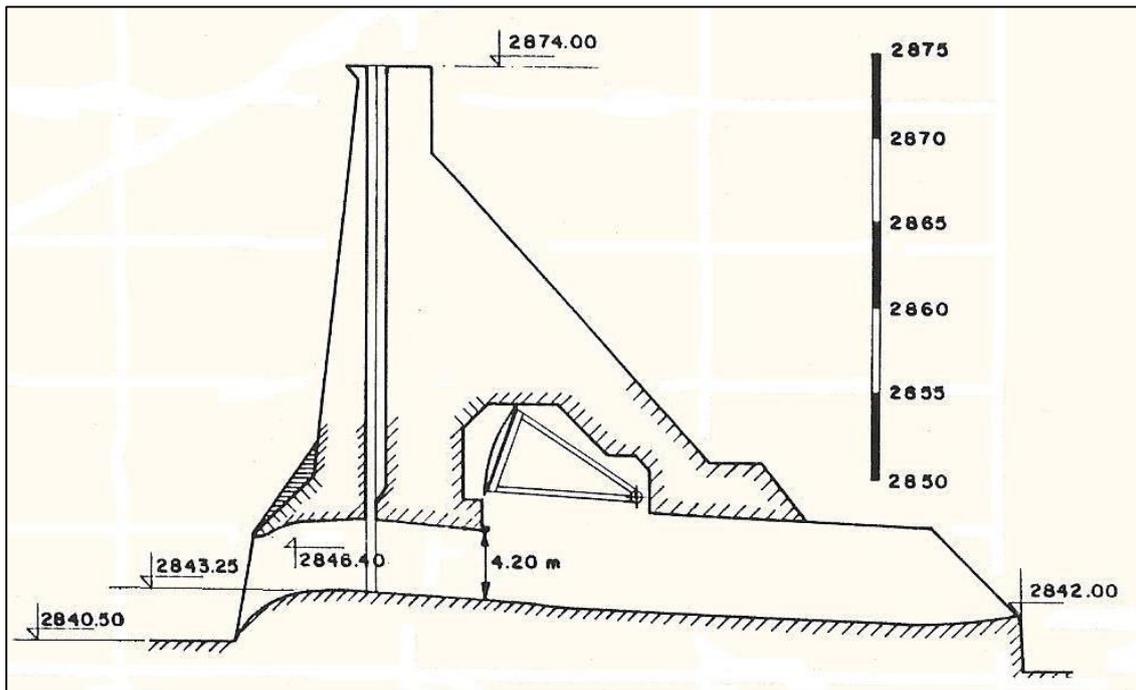


Figura 54. Presa Puente Cincel. Diseño 1. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

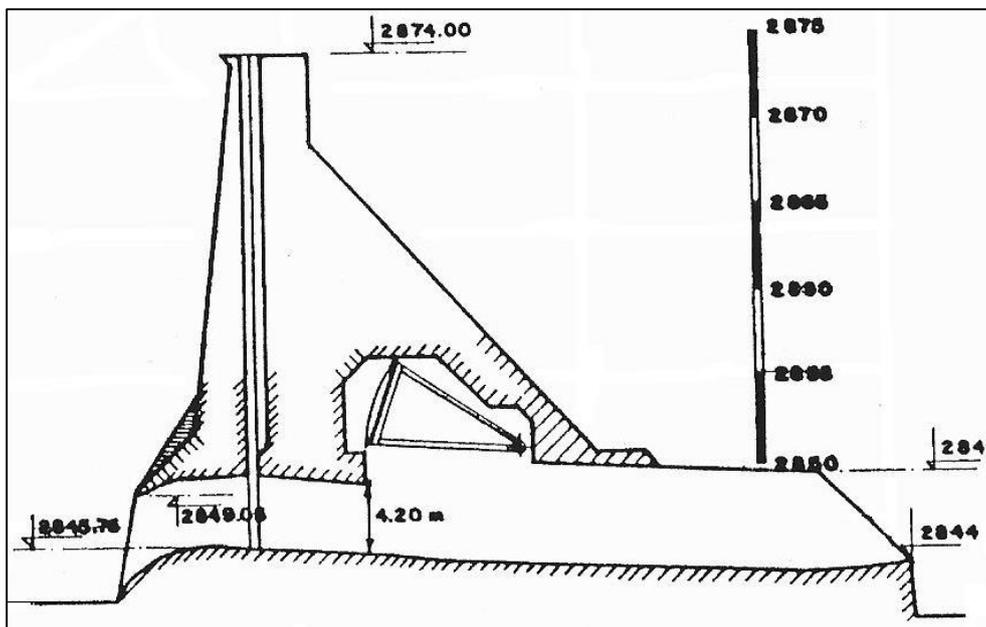


Figura 55. Presa Puente Cincel. Diseño 2. (Reyes Salazar, UDEP 2014).



Figura 56. Vista de las descargas de fondo operando. (Reyes Salazar, UDEP 2014).

Tabla 15. Cálculo del coeficiente de descarga promedio en la Presa Puente Cincel. (Reyes Salazar, UDEP 2014).**Diseño 1**

Nivel agua	Nivel entrada	H (m)	a	H-a (m)	Aa	Va	E va	E vs	Vs (m/s)	As (m2)	Q teórico	Q real	c
2,863.94	2,843.25	20.69	4.2	16.49	484.13	1.03	0.05	16.54	18.0	33.6	605.3	500.0	0.83
2,857.70	2,843.25	14.45	4.2	10.25	338.13	1.18	0.07	10.32	14.2	33.6	478.1	400.0	0.84
2,853.10	2,843.25	9.85	4.2	5.65	230.49	1.30	0.09	5.74	10.6	33.6	356.5	300.0	0.84
2,849.89	2,843.25	6.64	4.2	2.44	155.38	1.29	0.08	2.52	7.0	33.6	236.5	200.0	0.85
2,848.05	2,843.25	4.80	4.2	0.60	112.32	0.89	0.04	0.64	3.5	33.6	119.1	100.0	0.84
													0.84

Diseño 2

Nivel agua	Nivel entrada	H (m)	a	H-a (m)	Aa	Va	E va	E vs	V (m/s)	Área (m2)	Q teórico	Q real	c
2,866.06	2,845.76	20.30	4.2	16.10	475.03	1.05	0.06	16.16	17.8	33.6	598.2	500.0	0.84
2,860.00	2,845.76	14.24	4.2	10.04	333.22	1.20	0.07	10.11	14.1	33.6	473.3	400.0	0.85
2,855.50	2,845.76	9.74	4.2	5.54	227.92	1.32	0.09	5.63	10.5	33.6	353.1	300.0	0.85
													0.84

