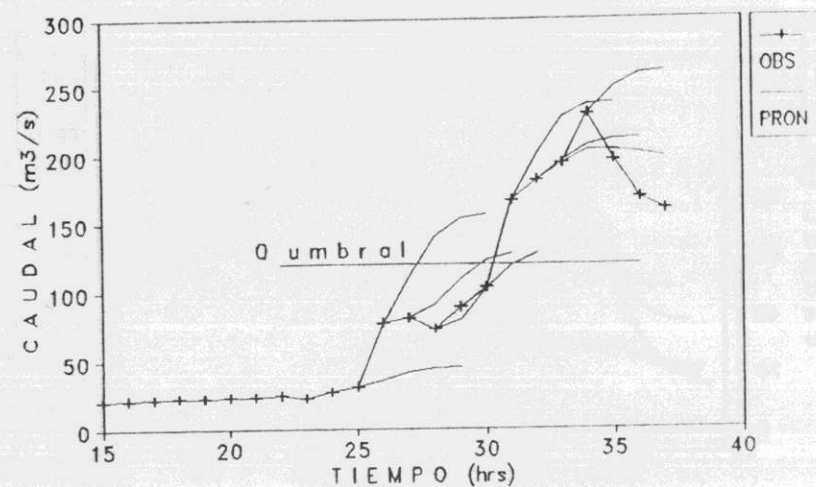


FIG. 6: PRONOSTICOS EN TIEMPO REAL
CRECIDA 13 - 14 JULIO 1987



ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL CONTROL DE CRECIDAS CON EMBALSES

CASOS DE VIÑA DEL MAR Y SANTIAGO

LUIS ARRAU DEL CANTO (1)

JAIME CALCAGNO BASTIDAS (2)

RESUMEN

Las crecidas de invierno ocasionan frecuentemente graves daños a lo largo del territorio nacional. Existen numerosas obras y medidas no estructurales factibles de ejecutar para mitigar los efectos destructivos, las que se citan brevemente en el presente trabajo. Se postula que el conjunto de ellas deriva en un caudal de punta a escurrir en la zona a proteger y si este es superior a la capacidad máxima factible del cauce en esta zona, la solución planteada es la reducción del caudal peak por medio de tranques controladores de crecidas. Se comentan algunas características básicas que es necesario tener presente en el diseño, se hace referencia a algunos embalses de riego en el norte de Chile que han evitado catástrofes mayores y pueden seguir cumpliendo el doble propósito de riego y control de crecidas y, finalmente, se presentan dos casos propuestos para lograr una importante reducción de los daños por inundaciones en las ciudades de Viña del Mar y Santiago.

(1) Ingeniero Civil, Jefe Departamento de Proyectos, Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas. Profesor de la Cátedra de Ingeniería de Riego en la U. de Chile.

(2) Memorista Ingeniería Civil, U.Fco. Santa María, Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas.

1.- INTRODUCCION.

Cada cierto tiempo, nuestro país se ve enfrentado en numerosas regiones a problemas de graves inundaciones, como producto de las crecidas de invierno de los ríos. Estas crecidas se caracterizan en general por ser de relativa corta duración, pero con grandes caudales de punta y altas velocidades de escurrimiento. Los daños provocados se ven muchas veces aumentados debido al uso indebido de los cauces de los ríos con plantaciones agrícolas, viviendas, etc.

El control o la mitigación de los efectos destructivos de las crecidas, constituye un problema complejo, existiendo numerosas obras o acciones posibles de considerar en cada caso, tales como regular el uso de los cauces, encauzamiento con pretilles, gaviones, o muros, limpieza y mantención permanente de la sección del río a través de dragados, etc. En otros países se llega a soluciones más sofisticadas, como la adaptación de cuencas de retardo de los peak, cauces artificiales adicionales al natural del río en los sectores más conflictivos, manejo interconectado de ríos desviando las aguas de un sector a otro según las características de los temporales, estaciones de bombeo, modificación de la pendiente de los ríos en algunos tramos mediante la construcción de pequeñas presas retenedoras de los arrastres sólidos, etc.

Sin embargo, todo el conjunto de obras y acciones deriva finalmente en el parámetro de evaluación fundamental en el análisis, cual es la capacidad de conducción del río en el tramo de interés vs. la crecida que se produce en ese tramo para un cierto período de retorno, para la cual se ha definido que no se desean inundaciones, o el nivel de los daños no debe sobrepasar un mínimo aceptable.

Si la crecida así considerada es mayor que la capacidad del río y esta última es muy poco factible aumentarla, como es en el caso de las grandes ciudades, aparece como la gran alternativa de solución el embalse controlador de crecidas. En este

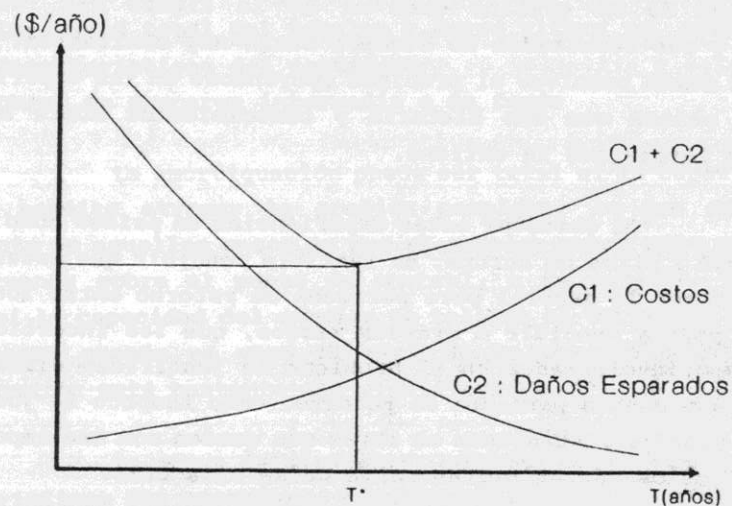
trabajo se hace referencia a las características básicas de este tipo de obras desde el punto de vista de su dimensionamiento y de su operación, se citan algunos casos de embalses existentes en Chile, que cumplen en parte con el propósito, y se exponen brevemente 2 alternativas que se han analizado y propuesto para reducir en forma considerable las inundaciones de las ciudades de Viña del Mar y Santiago.

2.- CARACTERISTICAS DE LOS EMBALSES PARA CONTROL DE CRECIDAS.

2.1.- Elección de un período de retorno.

El objetivo básico que se intenta lograr con este tipo de obras es generalmente de orden económico, por ejemplo minimizando la suma de los daños esperados durante su vida útil más los costos involucrados, lo que determina el período de retorno a considerar según se ilustra en la Figura N° 1. Es así como la obra

FIGURA N°1
Elección del Período de Retorno



resulta rentable si se verifica que la suma de los costos asociados a la inversión, mantención y operación de la obra, más los daños esperados durante su vida útil, presenta una forma tal como la de la figura, con un mínimo para un período de retorno no nulo. Sin embargo, existe una gran cantidad de variables aleatorias que inciden en el análisis, bastante difícil de cuantificar. Solamente en el cálculo de la crecida ya aparecen incertidumbres en una serie de parámetros: Humedad de los suelos al comienzo de la crecida, distribución espacial y temporal de la tormenta, curva de infiltración, ubicación de la línea de nieves en la cordillera y temperaturas durante las precipitaciones, etc. Por otra parte, en el daño esperado, está involucrado de alguna manera el concepto de "bienestar de la población", bastante difícil de cuantificar, porque no sólo se trata de calcular el daño asociado a cada crecida, sino que de ofrecer las garantías para que la gente se desarrolle y habite tranquila un determinado sector, lo que agrega al análisis un factor de aversión al riesgo de la ciudadanía. Finalmente, siempre habrá un grado importante de incertidumbre asociado al costo de las obras para cada período de retorno.

Existen teorías y modelos estocásticos para resolver todos los problemas descritos anteriormente, pero normalmente la elaboración de un gráfico como el de la Figura N°1 resultará complejo y sus resultados no siempre serán muy confiables. Por lo tanto, es común resolver el problema apoyándose en las experiencias de otros países con una historia y conocimientos sobre el tema mucho más largos que la chilena.

Al observar estas experiencias en países como Japón, Canadá, USA y otros de Europa, es factible concluir que estas obras se diseñan por lo general para períodos de retorno entre 100 y 200 años. Se podría concluir a grandes rasgos, que las incertidumbres y objetivos involucrados en el problema no justifican dimensionar obras para pequeños períodos de retorno, como tampoco se justifica realizar grandes inversiones en obras que queden con una importante capacidad ociosa durante gran parte de su vida útil.

Un caso especial lo constituyen los embalses de multiuso, en los cuales se trata de compartir una parte o todo el volumen disponible entre 2 o más propósitos. Por lo general, se trata este caso como un problema netamente económico, existiendo una buena compatibilidad entre los embalses de riego y el control de crecidas. Esta compatibilidad se debe a que la temporada de crecidas viene a continuación de la temporada de riego, y los embalses han entregado agua disponiéndose en forma natural de un volumen de reserva para control de crecidas. Por lo tanto, el problema del período de retorno se traduce en estos casos a determinar si este volumen "natural" es suficiente, o bien se justifica incrementarlo en desmedro de la disponibilidad de agua para riego, u otro uso. Una metodología general para resolver este problema (Arrau y Kaliski, 1982) ya ha sido desarrollada y aplicada al Sistema Paloma, en la cuenca del río Limarí, IV Región.

2.2.- Parámetros que determinan el efecto regulador

Se puede postular que el efecto regulador, o capacidad del embalse de amortiguar crecidas, depende de 3 parámetros fundamentales de diseño, en cuyo dimensionamiento inciden fuertemente las reglas de operación. Estos son:

- Capacidad total del embalse y curva altura vs. volumen
- Características del vertedero
- Obras de descarga intermedia o de fondo

La amortiguación puede ser total si la capacidad del embalse permite atrapar la crecida completa, lo que suele ser importante en aquellos casos en que el embalse cubre sólo una parte de la cuenca sobre el punto de control, o de interés. Por otra parte, si la capacidad del embalse es tal que el vertedero comienza a funcionar cuando ya pasó el peak de la crecida afluente, la amortiguación será bastante más significativa.

La curva de altura vs. volumen, en conjunto con las características del vertedero, constituyen también un parámetro de

gran relevancia en el efecto regulador. Normalmente, la curva de capacidad está fijada por las condiciones de la naturaleza y el diseñador define las características del vertedero. Este último puede ser con compuertas o sin ellas, existiendo el riesgo en el primer caso que los caudales descargados puedan ser mayores que el máximo afluente. En el segundo caso, se logra una mayor amortiguación con longitudes pequeñas de vertedero, pero esto requiere una mayor revancha, lo que aumenta el costo del muro. Nuevamente, el análisis involucra un problema técnico-económico, ya que es necesario considerar adicionalmente limitaciones para el caudal unitario, etc.

Las obras de descarga intermedia y de fondo tienen dos objetivos fundamentales:

i) No permitir que el volumen de reserva para control se comience a utilizar antes que se produzcan los grandes caudales afluentes, de modo que cuando estos se manifiesten, los caudales vertidos sean mínimos.

ii) Vaciar en forma controlada el embalse después de la crecida, lo más rápidamente posible, para recuperar su capacidad de control ante un nuevo temporal.

2.3.- Reglas y criterios de operación.

Todos los parámetros antes citados deben ser analizados y dimensionados de acuerdo con las reglas de operación, que pueden alterar notablemente las dimensiones de las obras y deben ser definidas según las características de cada caso.

Si se define como "eficiencia" de la regla de operación a la relación "caudal amortiguado / costo de las obras", la mayor eficiencia se tendrá en el caso de una operación telecomandada. Este concepto consiste en regular las descargas del embalse, sobre la base de información al instante de los caudales de los diferentes cursos de agua de la cuenca y de las precipita-

ciones en la zona, de modo que en ningún momento se sobrepase el caudal especificado en el punto de control. La idea se basa en que es conveniente descargar el máximo caudal posible mientras no se sobrepase el límite permitido en el punto de control. Una operación de este tipo es bastante eficiente en teoría, pero lleva asociado un alto grado de incertidumbre, que puede eventualmente conducir a errores en la operación. Para resolver este problema de las compuertas, se ha desarrollado anteriormente una metodología basada en la teoría de decisiones bajo condiciones de incertidumbre (Arrau, 1983).

La menor eficiencia se produce en la situación "sin operación", que consiste en que el tranque permanece con sus compuertas de fondo cerradas en todo momento. En este caso, la garantía de no sobrepasar el caudal especificado se produce solamente si se dispone de una gran cantidad de embalse para absorber la crecida.

Entre ambas situaciones extremas, existe un amplio rango de alternativas como, por ejemplo, el caso en que hay un operador "aislado", quien está "desinformado" de lo que está ocurriendo, pero tiene la misión de maniobrar las compuertas de modo de descargar lo máximo posible, con un límite superior previamente especificado. O bien, no existe un operador y se deja permanentemente abiertas las compuertas de fondo, etc.

La regla de operación definitiva dependerá de las características del problema y de la seguridad que se tenga para la correcta operación en tiempo real, de acuerdo con lo previsto. Es necesario tener presente, por ejemplo, que un tranque controlador de crecidas tiene un funcionamiento bastante eventual y puede no justificarse mantener un operador permanente, etc. Sin embargo, cualquiera sea el diseño final que se adopte, tanto para las obras como para la operación, se deben respetar en todo momento los siguientes principios básicos:

- No crear una crecida artificial mayor que la natural.
- Recuperar lo más rápidamente posible la capacidad reguladora del tranque a fin de estar preparados para nuevas tormentas.

3.- ALGUNOS EJEMPLOS EN CHILE.

En nuestro país, aún no se han construido embalses con propósito único de control de crecidas. Sin embargo, algunos embalses de riego en el norte, han cumplido roles relevantes evitando catástrofes mayores. Tal es el caso del embalse Lautaro en la III Región, que en 1985 controló completamente un aluvión que se originó en el río Mamflas y que, de no haber sido controlado en el embalse, habría causado graves pérdidas por destrozos en los parronales del río Copiapó, con riesgo de pérdidas de vidas humanas, (Arrau, 1986). Este mismo embalse, controló las crecidas de 1987, minimizando las pérdidas.

Más al norte, en la cuenca del río Loa, II Región, se ubica el embalse Conchi, de 22 millones de m³ de capacidad. El río se ve prácticamente todos los años afectado por violentas crecidas altiplánicas, que pueden ser controladas por el embalse antes que produzcan serios daños a los sistemas de riego de los oasis de Lasana y Chiu-Chiu, así como de los sectores de Calama y Quillagua. Para estos efectos se estudió el problema (Arrau, 1977) y se resolvió operar el embalse Conchi todos los meses de verano con un volumen de reserva para controlar crecidas del orden de 4 millones de m³, suficiente para los objetivos perseguidos y que no producen mayores alteraciones en la disponibilidad de aguas para los otros usos.

Finalmente, se puede citar el caso del embalse Paloma, en la cuenca del río Limarí, que es el mayor de los tres embalses del Sistema Paloma, con 750 millones de m³ de capacidad. En este caso, se desarrolló una metodología bastante elaborada (Arrau y Kaliski, 1982), con objetivos desde un punto de vista regional, concluyéndose la conveniencia de destinar 50 millones de

m³ durante los meses de invierno, mayo a agosto, para el control de crecidas. Lo anterior significa que si hay temporales de invierno que llenan el embalse, es conveniente bajar su volumen de 750 a 700 millones de m³ lo más rápidamente posible. Lo más probable es que el embalse se llene nuevamente con los deshielos y el volumen para control de crecidas no ha provocado, entonces, pérdidas al sector riego.

4.- CASO DE VIÑA DEL MAR.

El estero Viña del Mar, también conocido como Marga Marga, cruza por el centro de la ciudad y su capacidad de porteo no supera los 350 m³/s, en circunstancias que la crecida de 50 años de período de retorno tiene un caudal máximo de 734 m³/s. El período de retorno asociado a la capacidad máxima del estero es del orden de 4 años.

Lo anterior significa que la ciudad sufre de frecuentes inundaciones que provocan grandes destrozos, principalmente en el sector céntrico. Es así como se planteó el objetivo de analizar la posibilidad de construir un embalse para control de crecidas, que permitiera que en Viña no se sobrepasen los 350 m³/s para un período de retorno apropiado.

La Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas, analizó en forma integral el problema sobre la base de la información disponible (Dirección de Riego, 1988). El estudio concluyó que la solución más recomendable es un embalse emplazado en el estero Marga Marga antes de su confluencia con el estero Quilpué, más las siguientes obras en las cuencas urbanas:

- Construcción de un tranque decantador en una de las quebradas que acceden a Von Schroeders.
- Construcción de dos tranques decantadores en la quebrada Quinta.
- Peraltes menores en algunos sectores de los bordes del estero Viña del Mar.

El embalse se planteó de manera que controle que en el estero no escurran caudales superiores a su capacidad, 350 m³/s, bajo una crecida centenaria. La cuenca no controlada por el embalse aporta 290 m³/s para este periodo de retorno. Se estudiaron las capacidades requeridas de embalse para 4 reglas de operación:

- Telecomandada, descargando lo más posible sin que se sobrepasen 350 m³/s en Viña.
- Con operador, que se encarga de regular las compuertas de fondo, de manera de descargar lo más posible hasta un máximo de 60 m³/s.
- Sin operador, con compuertas abiertas, calculadas de manera que no sean descargados más de 60 m³/s.
- Sin descarga durante la crecida, absorbiéndola completamente.

Los resultados más relevantes de estos estudios se entregan en Tabla N°1 .

Al revisar los resultados, la solución más atractiva resulta ser la telecomandada, que requiere comparativamente de un volumen pequeño de embalse y permite un vaciado rápido. Sin embargo, para materializarla es necesario instalar un completo sistema de medición de caudales porque los aportes a la crecida en Viña no provienen solamente de los esteros Quilpué y Marga Marga antes de su confluencia, sino que también de numerosas quebradas intermedias. Además, se debe invertir en la instalación del sistema y en su mantención y operación, lo que tiene un alto costo en infraestructura y en recursos humanos, por la especialización requerida. En todo caso, el sistema no es nuevo y se aplica en otros países desarrollados desde hace varios años: Existe una oficina central que cuenta con paneles electrónicos con indicación instantánea de los caudales en los diferentes puntos de interés, con pantallas de televisión donde se observan directamente los ríos y las obras, (lo que asegura que la operación indicada por el panel de control se ha producido), con información de radares acerca de la tormenta, y con computadores que se alimentan telefónicamente de la información e indican como operar.

Tabla N°1
Control de Crecidas en Viña del Mar
Resultados de la Operación de 4 Alternativas

	REGLA DE OPERACION			
	Teleco- mandada	Con ope- rador	Sin ope- rador	Sin des- carga du- rante la crecida
Caudal Máximo en Vi- ña (m ³ /s)	350	350	350	290
Volumen de embalse (mill.m ³)	17	29	30	42
Valor de las obras (mill. US\$)	5,2	7,2	7,3	9,4
Caudal Máximo descar- gado durante la cre- cida (m ³ /s)	260	60	60	0
Tiempo de vaciado(días)	3	9	9	9

La elección de la solución definitiva requiere de una evaluación en la cual se integren todas las inversiones y costos de operación y mantención en cada caso. Sin embargo, por la seguridad y simplicidad en la operación, aparece en principio como bastante atractiva una solución intermedia, de costo aproximado 7,5 millones de dólares en total, cuyos diseños finales y construcción se completarían en 2,5 años. El próximo paso, si se adopta esta solución, sería proceder directamente a los diseños o, en su defecto, realizar un estudio de factibilidad que permita definir con adecuada precisión la real conveniencia y justificación de las obras.

5.- CASO DE SANTIAGO

Los desbordes del río Mapocho a la entrada de la ciudad de Santiago, han sido motivo de preocupación permanente de

los diversos organismos relacionados con el tema. Es así como se ha mejorado las secciones de escurrimiento, se ha construido un encauzamiento del río a base de gaviones en varios sectores, existe la preocupación de mantener permanentemente el cauce limpio y expedito, etc. Con todo, el caudal máximo seguro de conducir sin provocar problemas en su paso por la ciudad de Santiago, bordea los 900 m³/s de acuerdo con antecedentes del Departamento de Obras Fluviales de la Dirección de Vialidad. Este caudal es insuficiente para enfrentar los grandes temporales, razón por la cual se estudió la posibilidad de construir uno o más embalses controladores de crecidas (Calcagno, 1991), determinándose como periodo de retorno de diseño 200 años. El objetivo fue entonces dimensionar las obras de modo que en su paso por la ciudad de Santiago el río no sobrepase los 900 m³/s para este periodo de retorno.

El estudio, realizado como tesis para optar al título de Ingeniero Civil de la U. Fco. Santa María y patrocinado por la Dirección de Riego, comenzó con el cálculo de las crecidas afluentes. Se empleó el método del hidrograma unitario sintético, con las recomendaciones para su aplicación a cuencas chilenas (Benitez y Arteaga, 1986), tormentas de diseño de acuerdo con hietogramas propuestos (Varas, 1987), curvas de infiltración deducidas para cuencas cercanas, y un análisis probabilístico de la ubicación de la línea de nieves, que determina el área aportante. Realizados los análisis pertinentes, se determinó una crecida en Santiago de 1411 m³/s, que incluye los aportes de los esteros El Arrayán y Las Hualtatas. El objetivo final fue entonces, controlar las crecidas de modo de rebajar el peak de 1411 m³/s a 900 m³/s.

Se estudiaron varios sitios de embalse en los ríos Mapocho, Molina y San Francisco, llegándose a la siguiente conclusión :

- Existen 2 sitios apropiados para construir un embalse en el río Mapocho : Uno se ubica en las inmediaciones de la ciudad y compromete terrenos habitados. El otro se ubica a 3 km aguas abajo

de la confluencia de los ríos San Francisco y Molina. Al no existir ventajas comparativas del primero, con la sola excepción que cubre una mayor cuenca, se descartó del análisis en primera instancia.

- En el río San Francisco no existen lugares apropiados, ya que su cauce inferior es bastante encajonado y con fuertes pendientes.
- En el río Molina existe un lugar apropiado un poco antes de su confluencia con el San Francisco, que compromete solamente un pequeño sector de suelos agrícolas.

Los estudios hidrológicos indicaron que no es posible lograr los objetivos solamente con el tranque en el río Molina, puesto que la cuenca que quedaría sin control, ríos San Francisco y río Mapocho con sus quebradas afluentes, aporta más de 900 m³/s para T = 200 años. Por otra parte, el tranque en el río Mapocho tiene limitaciones de capacidad máxima debido a algunas instalaciones importantes aguas arriba de su ubicación como, por ejemplo, la descarga de la central La Hermita.

Por lo tanto, se propuso un control de la crecida por medio de los 2 tranques, en río Molina y río Mapocho, actuando en forma combinada con una regla de operación "con operador", lo que permite una mayor posibilidad de vaciamiento rápido. En tabla N° 2 se entregan los principales parámetros de diseño.

TABLA N° 2
Características de los Embalses

Parámetro	Molina	Mapocho
Capacidad (mill. m3)	22	11
Altura muro (m)	91	80
Longitud Muro (m)	444	279
Altura del Umbral Vert.(m)	86	75
Longitud del Vert. (m)	35	40
Capacidad Descarga Fondo(m ³ /s)	100	100
Diámetro Túnel Desviación (m)	5,0	5,5
Longitud Túnel Desviación (m)	380	250
Costo estimado obras (mill.US\$)	55	25

Los costos fueron estimados a partir de diseños a nivel de anteproyecto, realizados sobre la base de ortofotos a escala 1 : 5.000, suponiendo en ambos casos que las presas serán de hormigón rodillado, el cual se adecúa bastante bien al tipo de fundación y disponibilidad de materiales.

6.- COMENTARIOS FINALES

Los embalses para control de crecidas como propósito único están muy de moda en varios países desarrollados. Por lo general, resultan obras onerosas, pero también pueden cumplir propósitos adicionales, tales como la recreación, si se mantiene un lago adecuado en verano. Este último uso es bastante atractivo en los casos presentados de Viña del Mar y Santiago.

La evaluación es compleja y aún no existe en Chile una legislación clara para la construcción y explotación de este tipo de obras. El desarrollo de las poblaciones y actividades productivas junto a los ríos, hace imperiosa la necesidad de un tratamiento más profundo del tema en el país.

Finalmente, con respecto al diseño se ha hecho mención a una serie de aspectos relacionados con la operación de los embalses, pero no mayormente a los aspectos de diseño estructural. Al respecto, cabe citar que los principios básicos son los mismos que para cualquier embalse mayor, pero con una exigencia adicional: Deben permitir frecuentes vaciados más rápidos que lo normal en otros tranques y deben dar total seguridad no sólo a los ingenieros, sino que también a la población. Desde este último punto de vista, podrían ser preferibles las presas autovertedoras construidas en hormigón u hormigón rodillado.

7.- BIBLIOGRAFIA

1. Arrau, Luis, 1977, "Volumen de Reserva para Control de Crecidas en el embalse Conchi", Documento de Trabajo de la Dirección de Riego.
2. Arrau, Luis - Kaliski, Enrique, 1982, "Operación del Sistema Paloma Considerando Control de Crecidas", Publicación CRH82-10-E del Centro de Recursos Hidráulicos de la U. de Chile.
3. Arrau, Luis, 1983, "Modelo de Operación de Compuertas de un Vertedero ante crecida pluvial". Anales del VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, págs. 659 - 674.
4. Benítez, Andrés y Arteaga, Francisco, 1986, "Método para la determinación de hidrogramas unitarios sintéticos (H.U.S.) en Chile", Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Volumen 1, Número 1, págs. 11 a 23.
5. Arrau, Luis, 1986, "The Importance of Alluvion Control, Lautaro Storage Dam Case", ICID BULLETIN, Vol 35, N°1, págs. 43 - 47.
6. Varas, Eduardo, 1987 "Tormentas de Diseño", Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Volumen 2, Número 1, págs. 39 - 55.
7. Dirección de Riego - MOP, 1988, "Análisis y Solución a las Inundaciones en Viña del Mar", Publicación interna, disponible en Archivo Técnico de la Dirección de Riego.
8. Calcagno, Jaime, 1991, "Estudio de un Embalse Regulador de Crecidas en el río Mapocho", Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, U. Fco. Santa María.