

Manual para el diseño y la construcción de Tajamares de Aguada



Mario García Petillo / Pancracio Cánepa / Carlos Ronzoni

Manual para el diseño y la construcción de Tajamares de Aguada

**Mario García Petillo (1),
Pancracio Cánepa (2)
Carlos Ronzoni (3)**

- (1) Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Agregado de Hidrología,
Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía
- (2) Ingeniero Agrónomo, Dirección General de Recursos Naturales Renovables,
Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
- (3) Ingeniero Agrónomo, Coordinador del Fondo de Prevención de los Efectos de
la Sequía, Proyecto Producción Responsable.

Primera edición, febrero de 2008. Montevideo, Uruguay

Proyecto Producción Responsable - MGAP

18 de Julio 1496, primer piso

Tels.: 402 63 34 / 402 63 24 | Fax: 402 63 35

Diseño y diagramación: Ana Laura Suescun

Fotografías: Producción Responsable - MGAP

Impreso en: 4 TINTAS

ISBN 978-9974-563-39-1

“Una tremenda sequía asola nuestro territorio y las autoridades se hacen eco de la justificada alarma de productores y de la población en general, adoptando medidas extraordinarias.

Por unanimidad de sus miembros se dicta la siguiente resolución, ante la ansiada expectativa de todos: Implorar de la divina Misericordia, haciendo rogativas, con novenario a los Santos Patronos, para que por su mediación y ruegos consiga este Pueblo la lluvia que necesita”

Resolución del Cabildo de Montevideo
13 de abril de 1793.

Prólogo

Agradecemos a los Ingenieros Agrónomos Pancracio Cánepa y Mario García el haber elaborado este Manual, que aporta conocimientos técnicos de gran utilidad al Fondo de Prevención de los Efectos de la Sequía y que contribuye a rescatar y fundamentar el diseño y construcción de los embalses, más conocidos como "tajamares", de tanta utilidad a los productores ganaderos beneficiarios del Proyecto Producción Responsable - MGAP.

Esta obra, ya ha sido muy útil y lo será aún más, en los talleres de capacitación y como guía de muchos técnicos y productores que hoy diseñan, construyen o dirigen obras, utilizando recursos naturales como el suelo y el agua. La introducción de este emprendimiento aporta saber humano a los tajamares, tan necesarios para los ganaderos del norte uruguayo.

Sin duda, este material técnico será enriquecido con nuevas propuestas y variantes propias de nuevas situaciones geográficas y humanas.

Reiteramos, en nombre de la dirección del Proyecto Producción Responsable, el gesto desinteresado de los autores de aportar sus conocimientos; su mayor gratificación será verlos hechos realidad, en los millones de metros cúbicos de agua embalsada, en predios de pequeños y medianos productores ganaderos.

Ing. Agr. Carlos Ronzoni

Coordinador de Fondo de Prevención de los Efectos de la Sequía.

Proyecto Producción Responsable.

Tabla de contenidos

Introducción	9
Tajamares.....	11
Selección de la ubicación.....	12
Volumen máximo a almacenar en el lago	14
Altura del Tajamar para el “volumen útil”	17
Determinación de la altura del Tajamar para el “volumen útil”	27
Eliminación de los excesos de agua	28
Borde libre o “revancha”.....	47
Altura definitiva de la cortina	48
Ancho de la cortina.....	50
Dentellón de anclaje	51
Cálculo del volumen de tierra.....	52
Cálculo de la eficiencia del Tajamar	56
Obras complementarias.....	56
Construcción	59
Informe técnico.....	60
Anexo.....	61
Bibliografía	63

Introducción

La nutrición del ganado es un tema que se estudia en profundidad en nuestro país, tanto en la Facultad de Agronomía como en la de Veterinaria.

Sin embargo, al agua como nutriente se le ha prestado poca atención, basado en el supuesto que, cuando existe una fuente de agua cercana, los requerimientos de los animales están siendo cubiertos. Debido a esto, raramente son cuantificados los requerimientos de agua de diferentes categorías en pastoreo y difícilmente se tiene la certeza de si la fuente de agua los está cubriendo satisfactoriamente.

Según Beretta y Bruni (1998), desde el punto de vista productivo, una restricción en el consumo de agua respecto a lo que el animal requiere redundará en una merma del producto respecto al potencial esperado. Por lo tanto, enfatizan en la necesidad de revalorizar el rol del agua como nutriente para el animal y el manejo del agua en el sistema de producción como herramienta que garantice un consumo acorde a los requerimientos.

Carámbula y Terra (2000), expresan que de nada vale contar con cantidades ilimitadas de forraje si no se dispone de suficiente agua de bebida en cada pastura del establecimiento. Sólo de esta manera se podrá hacer una utilización eficiente del alimento disponible en el predio.

En épocas críticas como las sequías prolongadas siempre se producen crisis forrajeras. En este caso entre otras estrategias, se puede importar el alimento desde otros establecimientos, desde otras regiones del país o aún desde el exterior. Esta estrategia es prácticamente impracticable en el caso del agua con la que se debe contar en el predio.

La provisión y ubicación del agua de bebida es también un factor de manejo. Valentine (1947) citado por Stuth (1993), sostiene que el área óptima de pastoreo es aproximadamente circular y su radio generalmente no supera los 800 m desde la fuente de agua.

La consecuencia directa de un suficiente y seguro abastecimiento de agua de calidad será una potenciación del impacto productivo de las demás técnicas que se estén aplicando.

Las fuentes de agua pueden ser básicamente:

1. Aguadas naturales

En este caso es necesario que pase por el predio un río, arroyo, cañada, etc., que nunca se corte en los períodos de seca.

2. Pozos

Es necesario que exista un acuífero que de el caudal suficiente, y a una profundidad tal que haga su explotación rentable. En este caso, el sistema debe necesariamente contar con una bomba que eleve el agua (generalmente de pistón, accionada por un molino de viento) y probablemente con un tanque australiano para almacenar el agua.

3. Tajamares

Los tajamares son obras de ingeniería agrícola que interceptan y almacenan el escurrimiento. Cuando no se dispone de aguadas naturales que no se corten a menos de 800 m de distancia ni se dan las condiciones expresadas en el literal anterior, la construcción de un tajamar es generalmente la mejor opción como aguada.

Este trabajo tiene por finalidad explicar cómo se diseña y construye un tajamar que provea una aguada segura tanto en cantidad como en calidad de agua.

Tajamares

Los tajamares son obras que consisten en unir dos laderas que se aproximan mediante una cortina de tierra bien apisonada, que detiene el escurrimiento de las aguas de lluvia, formando una laguna (Ghiggia, 1976).

De esta definición se desprenden las condiciones necesarias para la construcción de estas obras: i. que haya una topografía adecuada, ondulada; ii. que haya tierra capaz de ser apisonada y formar una pared de muy baja permeabilidad y iii. que se produzcan escurrimientos capaces de ser interceptados y almacenados. En la mayor parte de nuestro territorio se dan simultáneamente estas tres condiciones.

Debido a esto, ya en 1951 la misión del BIRF y FAO en su informe "Recomendaciones para el desarrollo agrícola del Uruguay" citado por Ghiggia (1976) expresaba: "Debe adoptarse un programa de construcción de tajamares y embalses económicos para abrevaderos del ganado en la mayor parte de las praderas onduladas del Uruguay, con el objeto de suplir las necesidades derivadas de la sub-división de los pastos. Se ha demostrado que estos embalses constituyen una solución práctica del problema en praderas semejantes de otros países. Contrariamente a la creencia popular, el agua almacenada en esta forma es perfectamente satisfactoria para el ganado".

La variabilidad es una característica importante de las precipitaciones en Uruguay. Ello comprende tanto a la frecuencia (número de días de lluvia), a sus valores (diarios y mensuales) como a sus intensidades (mm por hora). El país tiene períodos de ocurrencia de precipitaciones que exceden notablemente a las normales y también períodos altamente deficitarios. Ambos fenómenos pueden ocurrir simultáneamente en el territorio uruguayo: una región acumula precipitaciones muy por encima de los valores esperados mientras que otra registra déficit importante dentro del mismo lapso.

Un informe del IMFIA, citado en el Plan de Lucha Contra la Sequía (MGAP-MVO-TMA, 2005) establece que la variabilidad entre años es cuatro veces menor que la variabilidad entre meses lo cual expresa que la variabilidad interanual se reduce fuertemente cuando se consideran varios meses acumulados; ésta es la principal justificación de la construcción de embalses para la regulación hídrica interestacional.

La Dirección Nacional de Hidrografía del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (DNH-MTOP), organismo rector en esta temática, clasifica los embalses en función del área de la cuenca de aporte, la altura de la obra y el volumen máximo embalsable de agua en dos categorías: tajamares y represas. A su vez, dentro de cada una de éstas define las subcategorías chico, mediano y grande (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de embalses según la DNH-MTOP de acuerdo al área de la cuenca de aporte a la obra (A, has.); la altura de la obra (H, m) y el volumen máximo embalsable de agua (V, m3).

	A < 4	4 ≤ A < 40	40 ≤ A < 200	200 ≤ A < 500	500 ≤ A < 1000	1000 ≤ A < 5000	5000 ≤ A < 15000	A ≥ 15000	
H < 3	V < 12.000 = Tajamar Chico								
	12.000 ≤ V < 120.000 = Tajamar Mediano								
	V ≥ 120.000 = Tajamar Grande								
3 ≤ H < 5	Tajamar Chico	Tajamar Mediano	Tajamar Grande	120.000 ≤ V < 600.000 = Represa Chica					
				V ≥ 600.000 = Represa Mediana					
5 ≤ H < 15	V < 120.000 = Tajamar Grande			Represa Chica	Represa Mediana	Represa Grande I	Represa Grande II		
H ≥ 15	V ≥ 120.000 = Represa Chica						Represa Grande II	Represa Grandelll	

Los Ingenieros Agrónomos están autorizados a diseñar tajamares, mientras que para hacer represas es necesaria la firma de un Ingeniero Civil.

Las obras para aguada que se tratarán en este trabajo, entran todas dentro de la categoría Tajamares.

Selección de la ubicación

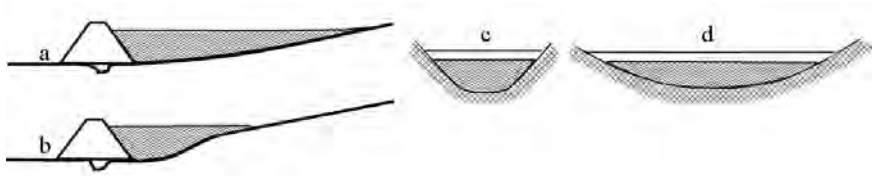
Se define la eficiencia de un tajamar como el cociente entre el volumen máximo de agua embalsada y el volumen de tierra compactado.

Desde el punto de vista económico, la mejor ubicación de un tajamar es la que genera la máxima eficiencia, es decir, que para almacenar un cierto volumen de agua se debe mover la menor cantidad de tierra. Se debe recordar que el principal costo de un tajamar es justamente el movimiento de tierra.

La eficiencia depende de la topografía del sitio. Un buen sitio es el que resulta de una cortina o terraplén corto, donde las pendientes transversales son altas pero la pendiente de la vía de drenaje es baja.

Esto se ejemplifica en la Figura 1, en la cual la situación ideal sería la representada en (a) y (c).

TAJAMARES DE AGUADA



**Figura 1. Corte longitudinal con baja (a) y alta pendiente (b).
Corte transversal con alta (c) y baja pendiente (d).**

Es recomendable seleccionar los dos o tres sitios más convenientes a priori, para hacer un análisis más detallado de cada uno de ellos, y seleccionar el definitivo con más elementos de juicio.

La metodología para la selección de los sitios dependerá de los materiales de base que se disponga.

Si se tiene un plano topográfico del predio, es muy fácil y seguro elegir el mejor lugar. Si sólo se dispone de un par de fotos aéreas, por estereoscopia se pueden seleccionar los sitios más promisorios.

Si no se tiene ninguno de estos materiales, se deberá recorrer el campo siguiendo los bajos, buscando aquellos sitios que quedan más "encajonados" entre dos laderas.

El otro factor que influye en la eficiencia es el tamaño de la obra. En un mismo sitio, cuanto mayor sea el tajamar mayor será su eficiencia, pues cada metro de altura que se agrega resultará en un aumento del volumen de agua más que proporcional. Debido a esto, los tajamares de aguada tienen, en general, eficiencias muy bajas.

Este efecto se visualiza en la Figura 2, que resume la eficiencia de algunas obras analizadas por el Ing. Luis Teixeira en su consultoría sobre el programa PRENADER. Las obras analizadas en este caso fueron represas de riego, de un tamaño muy superior a los tajamares de aguada.

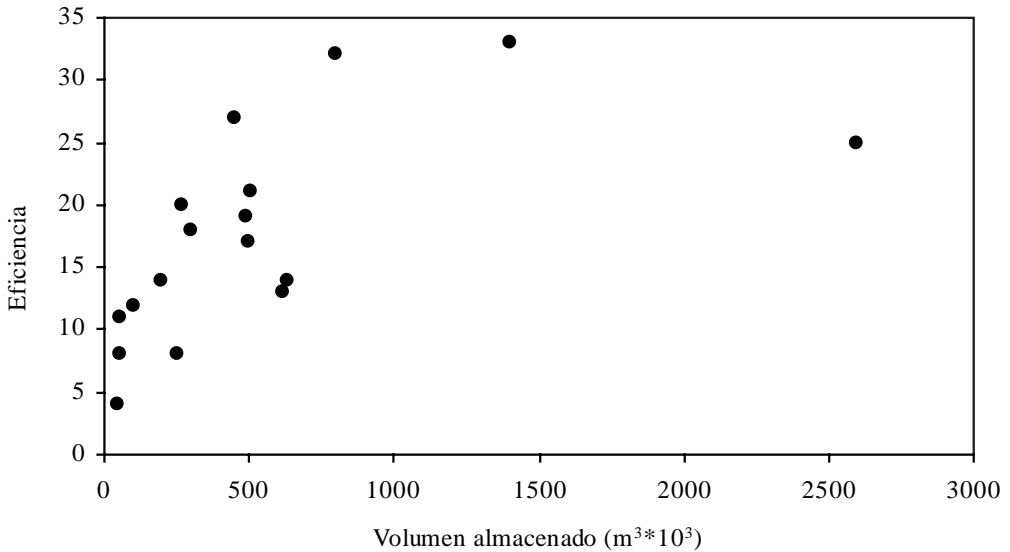


Figura 2. Relación entre el volumen almacenado y la eficiencia, en algunas obras construidas por el programa PRENADER.

Más allá de la eficiencia, existen otras consideraciones que se deben hacer al momento de elegir la ubicación, como por ejemplo, cercanía a los potreros.

Volumen máximo a almacenar en el lago

Una vez elegidos los sitios promisorios, si no se dispone de un plano topográfico, se deberá hacer el levantamiento de la zona en que se va a construir la cortina, la zona que será ocupada por el lago, y sus alrededores.

En la Figura 3 se muestra un plano como el señalado, incluyendo la alineación de la futura cortina (a-a').

El siguiente paso es medir el área encerrada entre cada cota y la cortina del tajamar. En el ejemplo, el punto más bajo del tajamar está en la cota 33.90, por lo que se debe medir el área encerrada en las cotas 34, 35, 36 y así sucesivamente.

La medición de áreas se hará con un planímetro, y en el caso muy probable que no se disponga de dicho aparato, se pueden contar los puntos encerrados mediante una cuadrícula de puntos, o los cuadrados encerrados mediante un papel cuadrículado. El número de puntos, corregido por la escala, indicará cada superficie.

TAJAMARES DE AGUADA

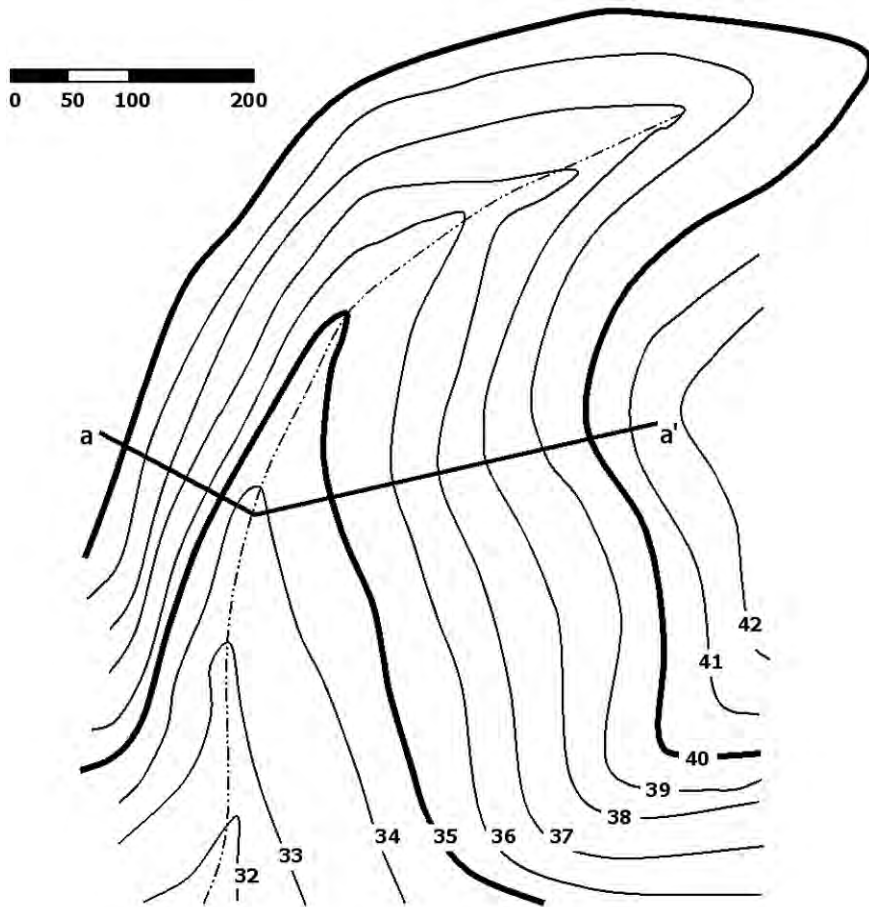


Figura 3. Plano de curvas de nivel y alineación de la cortina del tajamar.

Con los valores de área así hallados, se calculará el volumen de agua del lago (Tabla 2). La semisuma de la superficie de dos cotas consecutivas, multiplicada por el intervalo vertical entre esas cotas, da el volumen encerrado entre ellas.

Procediendo así con las distintas cotas y sumando los volúmenes parciales obtenidos, se obtendrá el volumen total para la altura de la cota máxima considerada.

Tabla 2. Cálculo de los volúmenes parciales y acumulados, del tajamar representado en la Figura 3.

Cota	Área encerrada en cada cota (m ²)	Semisuma áreas sucesivas (m ²)	Intervalo vertical (m)	Volumen Parcial (m ³)	Volumen Acumulado (m ³)
33.90	0	0	0	0	0
34	100	50	0.1	5	5
35	5000	2550	1	2550	2555
36	22500	13750	1	13750	16305
37	40000	31250	1	31250	47555
38	66875	53438	1	53438	100993
39	95000	80938	1	80938	181930

Con los valores así obtenidos es útil confeccionar una gráfica que permite obtener, para cualquier altura considerada, el área de lago y el volumen almacenado que le corresponden (Figura 4).

Estas curvas responden a una ecuación potencial, del tipo $y = a \cdot x^b$, que son las que utiliza el programa "Balance de un tajamar de aguada.xls" (García, M. 2007) para estimar la altura del lago para cierto volumen embalsado, y la superficie del lago para cierta altura del mismo.

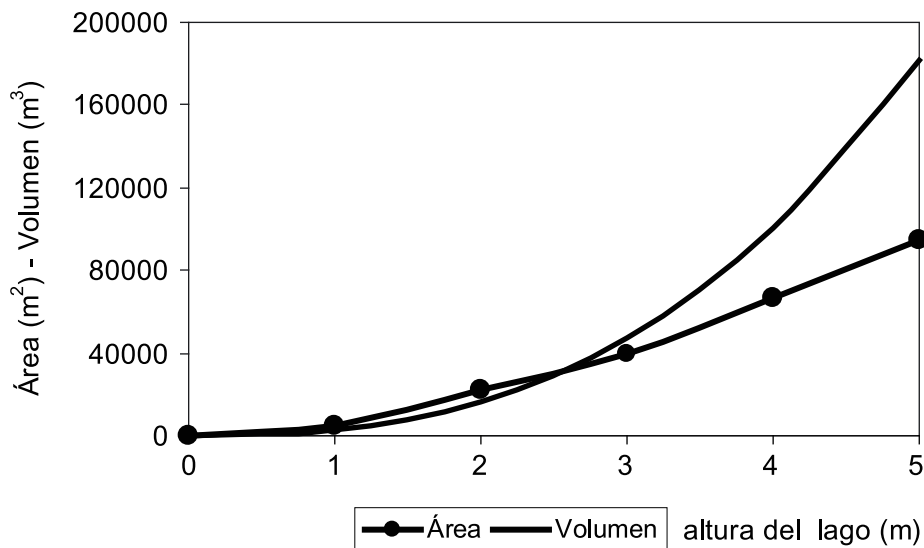


Figura 4. Curvas altura/área y altura/volumen

Altura del Tajamar para el “volumen útil”

El tajamar es un depósito que está teniendo en forma casi permanente aportes de agua (escorrentía superficial, precipitación directa sobre el lago) y extracciones (evaporación directa del lago, consumo de los animales). La infiltración por el fondo del lago, o a través de la cortina, se considera despreciable en un tajamar bien construido y asentado.

Por lo tanto es más correcto, para el diseño de estas obras, analizarlo en forma dinámica como un balance entre los aportes y extracciones, que de la forma más “tradicional” que consistía en almacenar un determinado volumen antes del verano, que sólo iba a tener extracciones durante el mismo.

Debido a que hacer un balance diario, considerando cada lluvia individual, sería muy poco práctico, se recomienda hacer este balance en términos mensuales.

Los distintos componentes de este balance se calculan de la siguiente manera:

1. Precipitación directa

Todo lo que llueve un mes determinado sobre el lago es aporte útil. El volumen (en m^3) se calcula como la altura de precipitación (m) multiplicado por la superficie del lago (m^2) en ese mes.

2. Evaporación directa

Se calcula como la evaporación del Tanque "A" (m) más cercano, multiplicado por el factor 0,7. Se pasa a volumen multiplicado ese valor por la superficie del lago (m^2) en ese mes.

3. Esguerrimiento

Se propone utilizar el modelo Precipitación-Esguerrimiento mensual de Temez. Este modelo ha sido calibrado en Uruguay con datos de 12 cuencas hidrográficas (Genta et al., 2003).

Para la aplicación del modelo en una cuenca determinada es necesario disponer de los siguientes datos:

Precipitación en la cuenca (P_i) (mm/mes)

Se debe disponer del dato de precipitación mensual del pluviómetro más cercano a la cuenca. Esta información está disponible en la Dirección Nacional de Meteorología y se recomiendan por lo menos 30 años de los registros más recientes. Con el programa "Balance de un tajarar de aguada.xls" se suministra una base de datos pluviométrica.

Área de la cuenca de aporte (A_c) (ha)

Si la cuenca es relativamente grande, utilizando las cartas del Servicio Geográfico Militar se delimita la misma y se determina su superficie. En cuencas menores se trazan los límites por estereoscopia en fotos aéreas y se mide su área con planímetro o papel cuadrulado o milimetrado. En cuencas muy chicas, se puede delimitar directamente en el campo. En todos los casos, se puede medir directamente en el campo utilizando un GPS, con un nivel de error más que aceptable a estos efectos.

Agua disponible de los suelos (AD) (mm)

Se calcula el valor de agua disponible de los suelos de la cuenca ponderando por la respectiva área ocupada (Tabla 3).

TAJAMARES DE AGUADA

Tabla3. Agua Disponible de las tierras del Uruguay

Unidad Cartográfica de Suelos (escala 1:1.000.000)		Grupo	Agua Disp. (mm)	Unidad Cartográfica de Suelos		Grupo	Agua Disp. (mm)
Alfárez	AF	C	124,7	Lechiguana	Le	D	113,3
Algorta	Al	C/D	123,7	Libertad	Li	C	146,7
Andresito	An	B	63,7	Los Mimbres	LM	C	100,1
Angostura	Ag	A/D	155,1	Manuel Oribe	MO	C	145,8
Aparicio Saravia	AS	C	139,7	Masoller	Ma	C	52,1
Arapey	Ay	D	136,8	Montecoral	Mc	D	84,7
Arroyo Blanco	AB	C	101,0	Palleros	PII	C/D	116,5
Arroyo Hospital	AH	C	86,1	Paso Cohelo	PC	D	147,4
Bacacué	Ba	B	97,1	Paso Palmar	PP	B	88,2
Balneario Jaureguiberry	BJ	A	134,5	Pueblo del Barro	PB	D	131,6
Bañado de Farrapos	BF	D	178,7	Puntas de Herrera	PdH	C	85,8
Bañado de Oro	BO	C	89,0	Queguay Chico	QCh	D	32,7
Baygorria	By	C	110,5	Rincón de la Urbana	RU	C	131,1
Bellaco	Bc	D	146,2	Rincón de Ramirez	RR	D	73,3
Béquelo	Bq	C	138,2	Rincón de Zamora	RZ	B/C	148,3
Blanquillo	Bl	C	114,6	Río Branco	RB	D	102,0
Cañada Nieto	CñN	D	146,4	Río Tacuarembó	RT	D	161,0
Capilla de Farruco	CF	B/D	35,4	Risso	Ri	D	150,6
Carapé	Ca	B	41,5	Rivera	Rv	B	179,6
Carpintería	Cpt	D	139,0	Salto	St	D	107,2
Cebollatí	Cb	C	167,6	San Carlos	SC	C	78,0
Cerro Chato	CCh	B	78,6	San Gabriel - Guaycurú	SG-G	B	92,4
Colonia Palma	CP	C	108,9	San Jacinto	SJc	D	83,1
Constitución	Ct	A	73,6	San Jorge	Sjo	D	141,2
Cuaró	Cr	D	93,2	San Luis	SL	D	176,2
Cuchilla Caraguatá	Cca	C	71,2	San Manuel	SM	C	117,3
Cuchilla Corrales	Cco	C	160,6	San Ramón	SR	D	152,7
Cuch. de Haedo – Pº de Los Toros	CH-PT	D	21,5	Santa Clara	SCI	B	63,6
Cuchilla del Corralito	CC	C/D	119,8	Sarandí de Tejera	SdT	B/C	50,0

Cuchilla Mangueras	CM	C	150,2	Sierra de Aguá	SAg	D	42,6
Cuchilla Santa Ana	CSA	C	51,8	Sierra de Animas	SA	B	50,1
Curtina	Cu	D	55,2	Sierra de Mahoma	SMh	B	43,9
Chapicuy	CH	B	100,1	Sierra Polanco	SP	B/C	73,0
Ecilda Paullier - Las Brujas	EP-LB	C	136,7	Tacuarembó	Ta	C	168,4
El Ceibo	EC	D	78,6	Tala - Rodríguez	TI-Rd	C/D	130,9
El Palmito	Epa	C	142,3	Toledo	Tol	C	118,7
Espinillar	Ep	C	141,0	Tres Bocas	TB	C	110,8
Fraile Muerto	FM	C	133,4	Tres Cerros	TC	B/C	85,1
Fray Bentos	FB	C	115,4	Tres Islas	TI	B	96,6
India Muerta	Imu	D	171,1	Tres Puentes	TP	B/C	103,4
Isla Mala	IM	C	102,1	Trinidad	Tr	C/D	148,4
Islas del Uruguay	IU	D	183,0	Valle Aguá	VA	C	102,8
Itapebí -Tres Árboles	I-TA	D	124,2	Valle Fuentes	VF	C	131,4
José Pedro Varela	JPV	C	87,2	Vergara	Ve	D	117,1
Kiyú	Ky	C/D	154,7	Villa Soriano	VS	C	173,3
La Carolina	LC	C/D	156,1	Yí	Yi	B/C	71,0
La Charqueada	LCh	D	95,2	Young	Yg	C	145,0
Laguna Merín	Lme	D	169,3	Zapallar	Zp	C	153,2
Las Toscas	LT	B	177,5	Zapicán	Za	C	84,8
Lascano	La	D	126,4				

Segunda Aproximación. Mayo de 2001, J.H. Molfino; A. Calífra,
División Suelos y Aguas, Dirección General de Recursos Naturales Renovables,
Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca

Evapotranspiración media mensual (ETPm) (mm/mes)

La evapotranspiración media mensual se determina localizando en el mapa de la Figura 5 el valor correspondiente a la cuenca.

Ciclo anual medio de evapotranspiración potencial (ETPi) (mm/mes)

Se obtiene multiplicando el valor de ETPm por los coeficientes de distribución del ciclo anual medio (Tabla 4).



Foto 1. Inspección en Paraje Topador, Artigas



Foto 2. Marcación de la obra



Foto 3. Construcción de terraplén



Foto 4. Inauguración de Tajamar en Salsipuedes, Tacuarembó

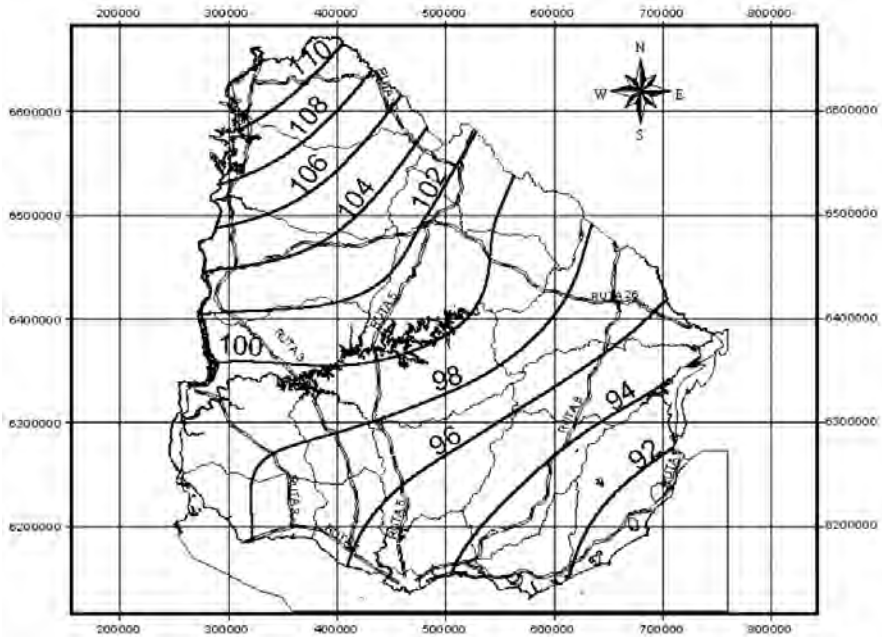


Figura 5. Isoclinas de evapotranspiración media anual (ETPm, mm/mes)

Tabla 4. Coeficiente de distribución del ciclo anual

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1.88	1.56	1.37	0.88	0.58	0.36	0.37	0.47	0.61	0.94	1.25	1.72

3.1. Estructura del modelo

El modelo de Temez es un modelo de balance hídrico agregado, que estima el escurrimiento mensual de una cuenca a partir de la precipitación, el almacenamiento en el suelo y la evaporación potencial.

La estructura del modelo se observa en la Figura 6. Una parte del agua que precipita (P) forma el excedente (T) y el resto del agua (P-T) es almacenada en la primera capa del suelo, en la que se genera la evapotranspiración real (ETR). Del excedente (T) una parte sale como escorrentía superficial (Asup) y el resto ingresa a un almacenamiento subterráneo (V) a través del cual se traspasa agua de un mes a otro. La descarga del almacenamiento subterráneo (Asub) y la escorrentía superficial (Asup) conforman la escorrentía total (AT).

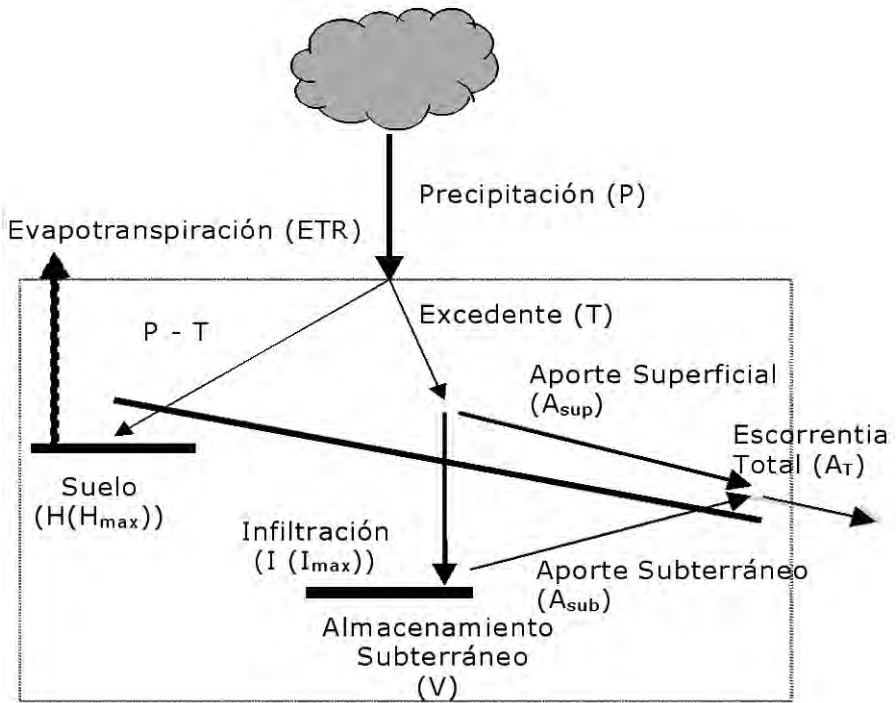


Figura 6. Estructura del modelo de Temez precipitación – escurrimiento de paso mensual

3.1. Operación del modelo

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \quad \text{si } P_i > P_{oi}$$

Máxima cantidad de agua que puede no participar del escurrimiento

$$\delta_i = H_{\text{Max}} - H_{i-1} + ETP \quad H_{\text{Max}} = \text{CAD} * \text{AD}$$

Precipitación mínima para que exista escurrimiento

$$P_{oi} = \text{CPO} (H_{\text{Max}} - H_{i-1})$$

Humedad del suelo al final del mes

$$H_i = \text{Max} (0; H_{i-1} + P_i - T_i - \text{ETP}_i)$$

Evapotranspiración real

$$\text{ETR}_i = \text{min}(\text{ETP}_i; H_{i-1} + P_i - T_i)$$

Infiltración al almacenamiento subterráneo

$$I_i = I_{\text{max}} \frac{T_i}{T_i + I_{\text{max}}}$$

Escorrentamiento superficial

$$A_{\text{sup } i} = T_i - I_i$$

Aporte subterráneo

$$A_{\text{sub } i} = V_{i-1} - V_i + I_i$$

Escorrentamiento total

$$A_{T_i} = A_{\text{sup } i} + A_{\text{sub } i}$$

Volumen del almacenamiento subterráneo

$$V_i = V_{i-1} * e^{-\alpha t} + I_i * e^{\frac{-\alpha t}{2}}$$

3.3. Calibración del modelo en Uruguay (12 cuencas):

$$\text{CAD} = 0.916$$

$$\text{CP}_0 = 0.30$$

$$\alpha = 2.325$$

$$I_{\text{MAX}} = 386$$

4. Consumo por los animales

Los requerimientos netos de agua de un animal están dados por la cantidad de agua necesaria para mantener el balance corporal. Las mismas equivalen a la suma de las pérdidas de agua en heces y orina, pérdidas evaporativas para disipar el calor, el agua retenida en el cuerpo en tejidos para crecimiento y

preñez, así como la secretada en leche. Estas cantidades no son fijas, sino que varían en función de numerosos factores. La interacción de todos éstos determina que los requerimientos de agua sean muy variables, dependiendo de las diferentes combinaciones de factores que se presenten (Beretta y Bruni, 1998).

Para vacas lecheras, los autores citados presentan la siguiente fórmula:

$$CA = 5.99 + 0.90*PL + 1.58*CMS + 0.05*Na + 1.20*T$$

CA - Consumo de agua (l/animal/día)

PL - Producción de leche (kg/día)

CMS - Consumo de materia seca (kg/día)

Na - Contenido de sodio de la dieta (g/día)

T - Temperatura ambiente (°C)

Dado que a los fines prácticos sería dificultoso estimar diariamente el consumo de materia seca y el contenido de sodio de la dieta, en el programa "Balance de un tajamar de aguada.xls" se simplificó la fórmula, quedando así:

$$CA = 35 + 0.90*PL + 1.20*T$$

Utilizando la ecuación anterior, se constata que para vacas lecheras de alta producción, en los días más cálidos del verano, el consumo podría superar los 100 l/día.

Para bovinos de carne, Beretta y Bruni citan el siguiente cuadro (Tabla 5), adaptado de Winchester y Morris (1956).

Tabla 5. Consumo diario aproximado de agua (l/animal) en ganado de carne

Temp. °C	Vacas		Animales en		Animales en	
	lactando	secas preñadas	crecimiento		terminación	
	409 kg	409 kg	182 kg	273 kg	364 kg	454 kg
4.4	43.1	25.4	15.1	20.1	27.6	32.9
10.0	47.7	27.3	16.3	22.0	29.9	35.6
14.4	54.9	31.4	18.9	25.0	34.4	40.9
21.1	64.0	36.7	22.0	29.5	40.5	47.7
26.6	67.8		25.4	33.7	46.6	54.9
32.2	61.3		36.0	48.1	65.9	78.0

Koolhaas (2003) sugiere los siguientes valores de consumo de agua por cabeza:

Ovinos – 8 l/día

Equinos – 45 l/día

Determinación de la altura del Tajamar para el “volumen útil”

Se hace correr el programa “Balance de un tajamar de aguada.xls” para una serie de 30 años, para lo cual se calculan mensualmente los aportes de lluvia y escurrimiento y las extracciones por evaporación y consumo.

Se va aumentando el volumen embalsado hasta que en ninguno de los 30 años simulados se tenga déficit de agua. (En cualquier caso, en la hoja Balance Tajamar, se puede consultar en qué mes se produjeron los déficit).

Aunque se cumpla la condición anterior con una altura de agua menor, se debe diseñar siempre con una altura mínima de 2 m.

Esta condición no es sólo para asegurar la cantidad (que puede estar sobredimensionada), sino fundamentalmente la calidad del agua embalsada. En efecto, esa profundidad mínima disminuye la proliferación de algas y mantiene más fresca la temperatura del agua.

Con el mismo objetivo, cuando se corre el programa, en la hoja “Resumen”, se puede poner como altura mínima del lago (celda E24) 1 m, de forma de asegurar siempre esa altura mínima.

El tajamar presentado en la Figura 3, con 2 m de altura de agua (cota 35.90) forma un lago de 1.82 ha y almacena un volumen de 14.300 m³ (Tabla 2, Figura 4).

Si asumimos que la altura de la toma de agua está a 0.50 m, el volumen que queda almacenado por debajo (350 m³) no es aprovechable, por lo cual el volumen útil son 14.300 – 350 = 13.950 m³, el cual es claramente sobredimensionado en cualquier hipótesis de dotación animal del predio. La superficie del lago y el volumen almacenado se determinan con precisión ingresando en el programa un volumen tal (14.300 m³ en este caso) que la altura correspondiente del lago sea 2 m. Igual procedimiento para el volumen no aprovechable con una altura de 0.50 m.

La altura de agua para la cual se diseña el tajamar se conoce como Máximo Remanso Estático (MRE).

Eliminación de los excesos de agua

El agua no debe pasar nunca por encima de la cortina de tierra. Para evitarlo, es necesario construir las obras necesarias para evacuar las aguas que lleguen al embalse cuando éste está lleno.

Siempre debe existir un canal vertedero en tierra, protegido por césped, que sea capaz de evacuar los excesos producidos por las máximas tormentas. Esta obra se llama vertedero o aliviadero de máximas.

Puede construirse también un aliviadero de mínimas, que elimine pequeños aumentos de nivel en el lago ocasionados por lluvias menores, y cuya función principal es proteger el vertedero de máximas.

En efecto, en ausencia del aliviadero de mínimas, cada lluvia que ocurre con el lago lleno será evacuada por el vertedero de máximas, que estará entonces durante mucho tiempo saturado de agua, debido a ello mal empastado y por lo tanto en una condición muy erosionable ante tormentas de alta intensidad.

Las represas deben tener algún dispositivo que permita evacuar hacia el cauce natural el caudal de servidumbre (llamado caudal ecológico), a efectos de satisfacer las necesidades naturales de los predios situados aguas abajo. Este caudal es de 0.4 l/s/km^2 (0.004 l/s/há), por lo que en cuencas tan pequeñas como las de los tajamares de aguadas no se considera.

Aliviadero de mínimas

El aliviadero de mínimas es un tubo vertical, cuya boca de entrada por donde evacuará los excesos está a la altura del MRE, en nuestro ejemplo 2 m. Para estas obras se usan tubos de 200 a 250 mm de diámetro. La entrada debe protegerse con una malla que trabaje como filtro para evitar la entrada de basura que pueda obturarlo.

Este tubo vertical conecta en la parte inferior, por medio de una "T" con una tubería del mismo diámetro que atraviesa el muro en la parte más profunda y evacua el exceso de agua del otro lado del terraplén (Figura 7a y 7b).

Debido a las dificultades constructivas de instalar un tubo vertical en la parte más alta del terraplén, en el caso de tajamares chicos se puede sustituir por un tubo horizontal que aguas debajo de la pared se eleva hasta tener la boca a la altura del MRE (Figura 7c).

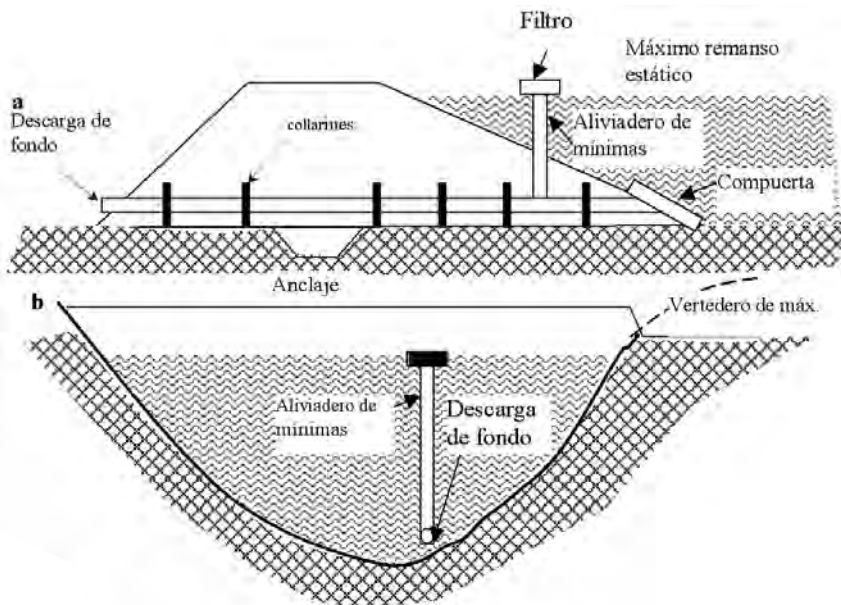
TAJAMARES DE AGUADA

Todos los tubos que atraviesen la pared deben estar provisto de collarines antifiltrantes dispuestos cada 2 m, que eviten la tubificación producida por la circulación del agua entre la tierra y la pared exterior del tubo. En el caso de tajamares grandes, estos collarines deberán ser de mampostería, mientras que en el caso de obras pequeñas podrán ser de nylon (bolsas, p.ej.) o de goma (cámaras viejas de tractor), unidos al tubo atándolos con tiras de goma.

La decisión de construir o no el aliviadero de mínima dependerá de un balance entre el aumento de las dificultades constructivas en caso de hacerlo, y el riesgo de aumentar la erodabilidad del vertedero de máximas en caso de no hacerlo.

A un nivel superior a la boca de entrada del tubo vertical (si se construyera el mismo) se ubica el fondo del vertedero de máximas para dar salida a los grandes excesos.

Una variante constructiva del aliviadero de mínimas es hacerlo como un pequeño canal en tierra, dentro del vertedero de máximas. En este caso, el fondo (plantilla) del vertedero de mínimas estará "d" cm más bajo que el fondo del vertedero de máximas. El vertedero de mínimas se deberá construir contra el borde del vertedero de máximas más alejado de la cortina (Figura 7d).



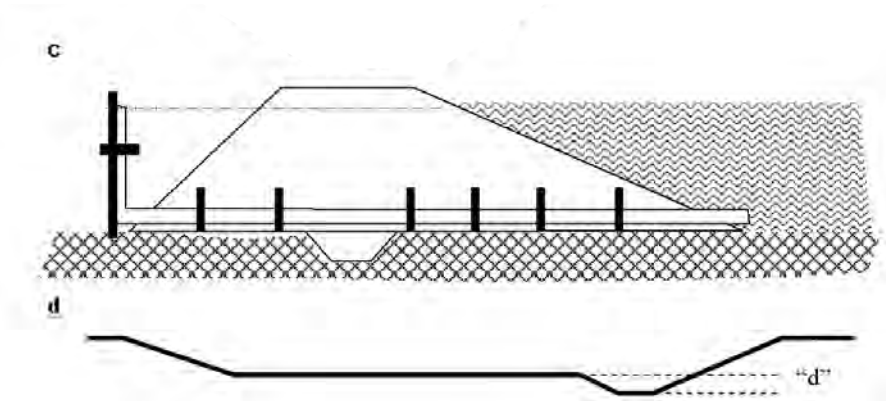


Figura 7. Diferentes diseños de aliviaderos de mínima

Cálculo de la distancia "d"

La distancia vertical entre la boca del aliviadero de mínimas y el fondo del vertedero de máximas determina el volumen que puede quedar almacenado en el lago, sin salir por el vertedero de máximas, y que se irá evacuando lentamente por el aliviadero de mínimas.

Por lo tanto, cuando mayor sea esa altura (llamada distancia "d"), menos veces en el año va a ser utilizado el vertedero de máximas, por lo tanto se disminuirá su riesgo de erosión, pero aumentará la altura total de la cortina, por lo tanto el volumen de tierra a mover y el costo de la misma.

Proponemos que esa altura sea la suficiente para almacenar un volumen de escurrimiento correspondiente a 10 mm.

Para seguir con el ejemplo, supondremos una cuenca de 8 hás.

Una altura de 1 mm equivale a un volumen de 10 m^3 por hectárea. O sea que los 10 mm en las 8 hás producen un volumen de escurrimiento de 800 m^3 .

Si a los 14.300 m^3 que almacena el lago en los 2 m le sumamos estos 800, nos da un total de 15.100 m^3 , que de acuerdo a la relación altura/volumen (Figura 4) corresponde a una altura de 2.04 m (distancia $d = 0.04 \text{ m}$). Esta altura se puede determinar con más precisión utilizando el programa "Balance de un tajamar de aguada.xls" ingresando el volumen 15.100 m^3 .

A esta altura se ubica el fondo del vertedero de máximas (FVM).

Diseño del vertedero de máximas

El vertedero de máximas es un canal en tierra, de perfil trapezoidal, con una relación de taludes (z) de 4 a 1 (Figura 8). Este canal se debe mantener empastado. El motivo para que los taludes sean tan horizontales, es darle más resistencia a la erosión. Adicionalmente, esta forma permite el tránsito de vehículos sobre la cortina.

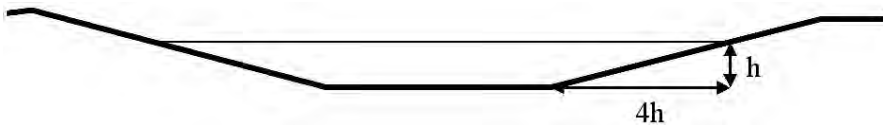


Figura 8. Perfil transversal del vertedero de máximas.

Si las laderas tienen pendiente diferentes, como en el caso de nuestro ejemplo, el vertedero se construirá en la ladera de menor pendiente. Sin embargo, si éstas son similares, se podrán hacer dos vertederos, uno en cada ladera, y cada uno de ellos de un ancho de la mitad del calculado.

Después de pasar la cortina, el agua vertida debe ser conducida hasta su cauce natural. Para evitar que el agua erosione el talud de aguas abajo del tajamar, el canal vertedero deberá tener un lomo o camellón a lo largo de su lado inferior, llamado bigote (Figura 15.a). Este bigote tendrá la misma pendiente que la que se calcula para el vertedero de máximas.

En algunas circunstancias especiales, especialmente en la zona de basalto el mejor emplazamiento de la cortina hace que en las zonas próximas a la misma donde se ubica el o los vertederos ocurran suelos muy superficiales con roca consolidada a pocos centímetros de profundidad. La presencia de roca no permite la excavación y el uso de explosivos para lograr una plantilla horizontal del canal vertedero es muy caro.

En estos casos se puede adoptar una solución de compromiso, sin tocar el terreno y manteniendo el empastado natural y diseñando el vertedero con sección triangular. El emplazamiento del vertedero siempre se hará sobre la ladera más suave. El bigote funciona en estos casos como un tramo de canal de ladera y hay que definir una pendiente que no genere una velocidad erosiva. En este caso se deberán hacer cálculos hidráulicos particulares utilizando la ecuación de Manning, que superan el alcance de este manual, por lo que se deberán hacer consultas con técnicos especializados.

1. Cálculo del caudal pico de escurrimiento

Para diseñar este canal vertedero, se debe conocer primero cuál es el caudal que se deberá evacuar. Este será el caudal máximo o pico que puede producir la cuenca. El mismo se calcula utilizando el Método Racional:

$$Q = C * I * A / 3600$$

- Q** - Caudal pico de escurrimiento (m³/s)
- C** - Coeficiente de escorrentía (adimensional)
- I** - Intensidad máxima de lluvia para una duración igual al Tiempo de Concentración de la cuenca y un determinado Período de Retorno (m/h).
- A** - Área de la cuenca (m²).

Los supuestos que asume este método son que a) llueve en toda la cuenca con la misma intensidad, y b) que llueve a la misma intensidad durante todo el Tiempo de Concentración.

Estos supuestos son válidos para cuencas chicas (<400 há), por lo que éste será el método de cálculo seguido.

1.1. Selección del coeficiente de escorrentía "C"

Para obtener el coeficiente de escorrentía "C" de tabla, es necesario previamente estimar la pendiente de la cuenca y fijar el período de retorno a utilizar.

$$s = \frac{\sum LCN * IV}{Ac}$$

s – Pendiente de la cuenca (%)

LCN – Longitud de todas las curvas de nivel (m)

IV – Intervalo vertical entre las curvas de nivel (m)

Ac – Área de la cuenca (m²)

En nuestro ejemplo consideramos que la pendiente es del 3,5%.

El período de retorno (T) a utilizar está relacionado con la vida útil (vu) de la obra, y con el riesgo (r) que se esté dispuesto a asumir (de que ocurra una lluvia superior a la tormenta de diseño) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - r)^{1/vu}}$$

Para tajamares de aguada se recomienda utilizar un período de retorno de 25 años.

Con estos valores, y considerando que la cuenca está ocupada con pasturas, se obtiene el coeficiente de escurrimiento "C" de la Tabla 6, que es 0,42.

Tabla 6. Coeficientes de escorrentía "C" para ser usados en el Método Racional.

Características de la superficie	Período de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Área 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: Chow, V.T., 1994. Hidrología aplicada.

1.2. Cálculo del Tiempo de Concentración de la cuenca (TC)

La máxima intensidad de lluvia se calcula para una duración igual del Tiempo de Concentración (TC) de la cuenca, por lo tanto, primero se debe estimar éste.

El TC es el tiempo que demora una gota de lluvia que cayó en el punto más lejano de la cuenca en llegar a la salida. En ese momento, toda el área de la cuenca está aportando escorrentía.

Éste parámetro es uno de los que está más sujeto a errores en su estimación, por lo que se presentarán dos métodos diferentes de cálculo del mismo. Se recomien-

da calcular el TC por ambos métodos, y elegir, como medida de seguridad, aquel que haya dado un valor menor (por lo tanto se diseñará para una mayor I).

1.2.1. Método de distancia/velocidad

El método consiste en medir la distancia máxima que tiene que recorrer el agua hasta la salida de la cuenca, y dividirla entre la velocidad que toma el agua.

$$TC(s) = d(m) / V(m/s)$$

La distancia de recorrido del flujo se mide en la carta topográfica, en la foto aérea o en el campo.

La velocidad del agua se determina mediante la Tabla 7.

Tabla 7. Velocidad del agua en función de la cobertura y la pendiente

Condiciones de la superficie	Pendiente (%)			
	0 - 3	4 - 7	8 - 11	12 - +
<i>Flujo no concentrado</i>				
Bosques	0-0.46	0.46-0.76	0.76-0.99	0.99-+
Pasturas	0-0.76	0.76-1.07	1.07-1.30	1.30-+
Cultivos	0-0.91	0.91-1.37	1.37-1.67	1.67-+
Pavimentos	0-2.59	2.59-4.11	4.11-5.18	5.18-+
<i>Flujo concentrado</i>				
Canales naturales mal definidos	0-0.61	0.61-1.22	1.22-2.13	2.13-+
Canales naturales bien definidos	Calcular por fórmulas			

Fuente: Chow, V.T., 1994. Hidrología aplicada.

1.2.2. Método del NRCS

El Tiempo de Concentración se calcula utilizando la fórmula

$$TC = 0.91 * \sum (L K (S^{-0.5}))$$

Donde:

TC - tiempo de concentración (horas)

L - longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo) (km)

S - pendiente (%)

K - coeficiente de cobertura del suelo (Tabla 8)

Tabla 8. Coeficiente K del método del NRCS

Cobertura del suelo	K
Bosques con espeso mantillo sobre el suelo	3.95
Barbecho de hojarasca o cultivos de mínimo laboreo	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

Continuando con el ejemplo que se venía desarrollando, con una cuenca de 8 has, vegetación de pasturas y pendiente promedio del 3.5%. Supondremos una longitud máxima del flujo de 350 m.

Utilizando el método de distancia/velocidad, seleccionamos de la Tabla 7.

$$V = 0.76 \text{ m/s, por lo que } TC = 350 / 0.76 = 460 \text{ s} = 7.67 \text{ min} = 0.13 \text{ hs.}$$

Utilizando el método el NCRS seleccionamos de la Tabla 8. $K = 1.41$ por lo que

$$TC = 0.91 * 0.35 * 1.41 * 3.5^{-0.5} = 0.24 \text{ hs}$$

Se elige el valor menor, $TC = 0.13 \text{ hs}$

1.3. Cálculo de la intensidad máxima de precipitación (I)

Se debe calcular la intensidad de precipitación para una tormenta con una duración (d) de 0.13 hs y un Período de Retorno (T) de 25 años.

De acuerdo a la ubicación geográfica de la cuenca, se selecciona la precipitación de duración $d = 3$ horas y $T = 10$ años, utilizando el mapa de isoyetas de la Figura 9.

Para continuar con el ejemplo, supondremos que la cuenca se ubica en Salto, por lo que la precipitación con $d = 3$ horas y $T = 10$ años son 94 mm ($P_{(3, 10)} = 94 \text{ mm}$).

Ese valor hallado se debe corregir por un coeficiente de corrección por período de retorno (CT) y por un coeficiente de corrección por duración (CD), tal que:

$$P_{(d, T)} = P_{(3, 10)} * CT_{(T)} * CD_{(d)}$$

En nuestro caso:

$$P_{(0.13, 25)} = P_{(3, 10)} * CT_{(25)} * CD_{(0.13)}$$

Ambos coeficientes de corrección se pueden seleccionar de las Figuras 10. y 11., o se pueden calcular con más precisión mediante las siguientes ecuaciones:

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

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

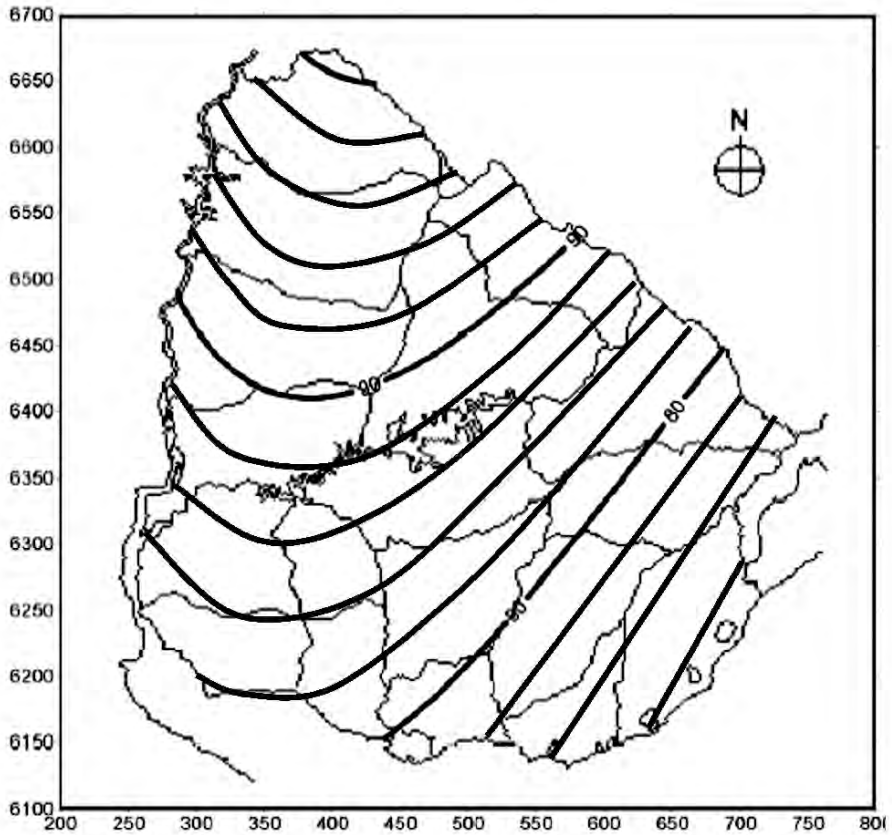


Figura 9. Precipitación de 3 horas de duración (d) y 10 años de Período de Retorno (T)

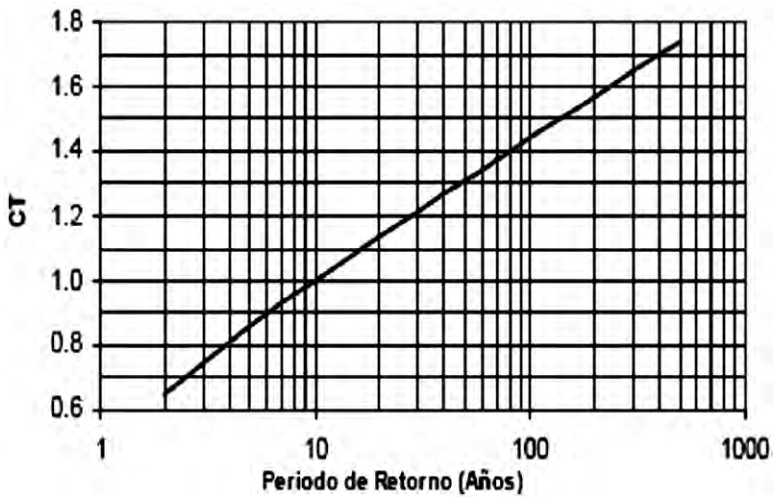


Figura 10. Coeficiente de corrección según el Período de Retorno (T)

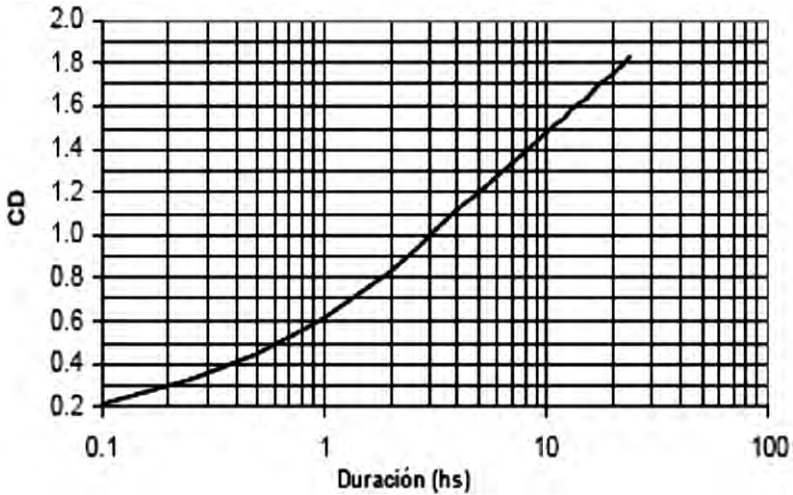


Figura 11. Coeficiente de corrección según la duración (d)

En nuestro ejemplo, $CT(25) = 1.18$ y $CD(0.13) = 0.24$ por lo que

$$P(0.13, 25) = 94 * 1.18 * 0.24 = 27 \text{ mm}$$

O sea que en las 0.13 horas llueven 27 mm, por lo que la Intensidad será:

$$27 \text{ mm} / 0.13 \text{ h} = 208 \text{ mm/h}$$

Ahora estamos en condiciones de calcular el caudal pico de escurrimiento:

$$Q = C * I * A / 3600$$

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 0.42 * 0.208(\text{m/h}) * 80000(\text{m}^2) / 3600 = 1.94 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Cálculo del volumen total escurrido

Mediante el Método Racional se puede calcular también el volumen total de esorrentía, utilizando la siguiente ecuación:

$$Vesc = 4810 * Q_{\text{máx}} * TC$$

Donde:

Vesc - Volumen de esorrentía total (m^3)

Q_{máx} - Caudal pico de escurrimiento (m^3/s)

TC - Tiempo de Concentración (h)

En nuestro ejemplo

$$Vesc = 4810 * 1.94 * 0.13 = 1213 \text{ m}^3$$

3. Cálculo del caudal máximo vertido

El caudal pico o máximo antes calculado (1.94 m³/s) es el que llega al lago. Sin embargo, no todo el mismo pasa por el vertedero. En efecto, a medida que llega el escurrimiento al lago una parte desagua por el vertedero, mientras que el resto produce un crecimiento del volumen embalsado, con una altura mayor que el fondo del vertedero. Este volumen está almacenado en forma transitoria, e irá desaguando al terminar la tormenta. Este fenómeno se llama laminado.

En cuencas muy grandes con lagos muy pequeños, este efecto del laminado es muy limitado y el caudal vertido máximo es muy similar al caudal pico. Por el contrario, en cuencas pequeñas con lagos relativamente muy grandes, el laminado puede ser muy importante, por lo que finalmente se tendrá un caudal máximo vertido muy inferior al caudal pico.

El volumen laminado será entonces el que puede almacenar el lago entre la cota del fondo del vertedero (HV) y la cota máxima que alcanza el lago en la tormenta de diseño (HV+E). Se desprende entonces que "E" es la altura máxima de vertido. Estas medidas se esquematizan en la Figura 12.

A los fines de diseñar el vertedero de máximas, se deberá entonces calcular el caudal vertido máximo.

$$QV_{\text{máx}} = \left(1 - \frac{VL}{V_{\text{esc}}}\right) * Qm_{\text{Ex}}$$

Donde:

QV_{máx} - Caudal máximo vertido (m³/s)

Q_{máx} - Caudal máximo de escurrimiento (m³/s)

VL - Volumen laminado (m³)

V_{esc} - Volumen total escurrido (m³)

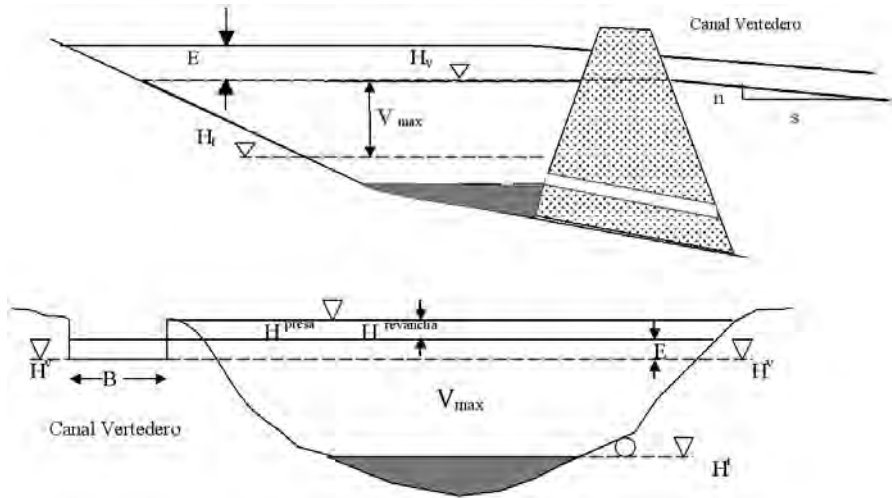


Figura 12. Corte longitudinal y transversal de un tajamar mostrando las diferentes dimensiones mencionadas en el texto.

4. Cálculo del caudal específico del vertedero

El movimiento del agua en los canales a cielo abierto está regulado por la fórmula de Manning.

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * s^{1/2}$$

Donde:

V - Velocidad del agua en el canal (m/s)

n - Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional, Tabla 9.)

R - Radio hidráulico (m) (cociente entre la sección y el perímetro mojado del canal)

s - Pendiente (m/m)

Tabla 9. Valores del coeficiente de rugosidad “n” de Manning

Superficie	Condición de las paredes		
	Buena	Regular	Mala
En tierra, rectos y uniformes	0.020	0.0225	0.025 *
En roca, lisos y uniformes	0.030	0.033 *	0.035
En roca, con salientes, sinuosos	0.040	0.045	
Sinuosos de escurrimiento lento	0.025 *	0.0275	0.030
Dragados en tierra	0.0275 *	0.030	0.033
Lecho pedreg, bordes tierra y maleza	0.030	0.035 *	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.030 *	0.033 *	0.035

* Valores corrientemente usados en la práctica

El vertedero debe ser diseñado de forma tal que el caudal máximo vertido circule por él a una velocidad que no lo erosione. Como límite se tomarán las velocidades presentadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Velocidades máximas en vertederos empastados, con relación de taludes $z = 4$

Cubierta vegetal	Velocidad m/s
Escasa	< 1,0
Por siembra	1,0 – 1,2
Variable	1,2 – 1,5
Bien establecida	1,5 – 1,8

Genta desarrolló la solución gráfica de la ecuación de Manning (Figura 13), que permite trabajar simultáneamente con la pendiente (s), el coeficiente de rugosidad (n), la velocidad del agua (V) y la lámina o altura de vertido sobre el fondo del vertedero (E).

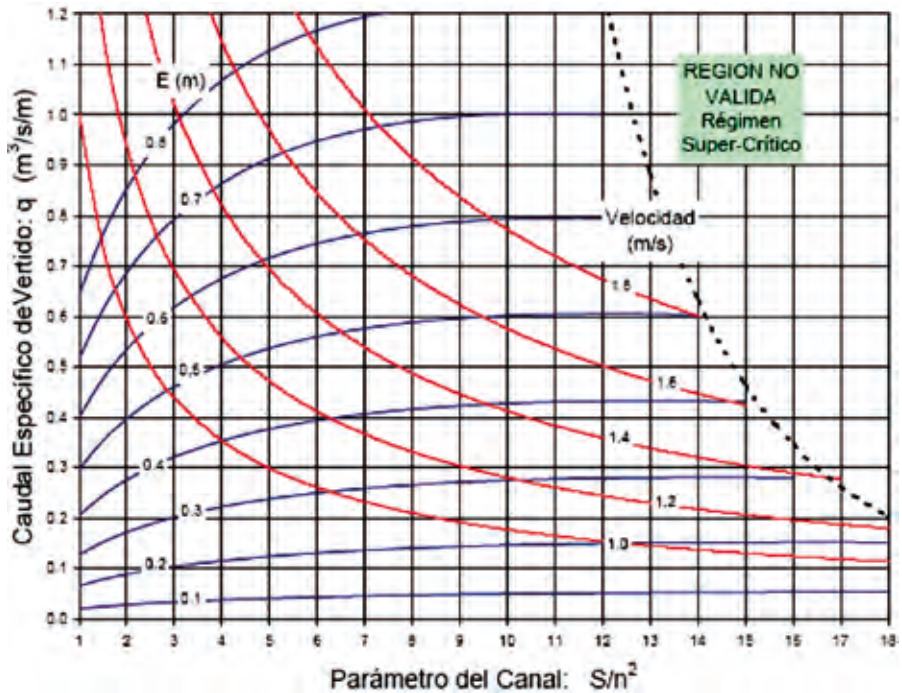


Figura 13. Determinación del caudal específico (q) en el canal vertedero.

Para continuar con el ejemplo del diseño del tajamar, supongamos que se traza el vertedero por la ladera izquierda (tomada según el sentido en que corre el agua), y le damos una pendiente del 1% (0.01 m/m) y que de acuerdo a la Tabla 9. asumimos un valor de "n" de 0.033.

Con esos datos se calcula el parámetro del canal $s/n^2 = 0.01/0.033^2 = 9.2$.

Con ese valor 9.2 se entra al gráfico de la Figura 13. y se elige una velocidad (V) o una altura de vertido (E), ya que al elegir una de ambas, la otra queda automáticamente definida.

A modo de ejemplo, y entrando con el valor 9,2, se puede elegir una velocidad de 1.0 m/s y queda determinado $E = 0.24$ m, para una velocidad de 1.2 m/s y queda $E = 0.32$, para $V = 1.4$ queda $E = 0.40$.

De la misma forma, se puede fijar una altura de agua y queda fijada la velocidad:



Foto 5. Tajamar Colonia Rubio, Salto.



Foto 6. Cercado perimetral



Foto 7. Paraje Amarillo, Rivera.



Foto 8. Agua de Calidad. Campo de Recría CALTIECO, Paysandú.

TAJAMARES DE AGUADA

si $E = 0.2$ entonces $V < 1.0$; si $E = 0.3$, $V = 1.08$; si $E = 0.4$, $V = 1.4$.

Se debe considerar que cuanto mayor sea E , mayor será V , por lo que para un determinado caudal será menor el ancho del vertedero (menos volumen de tierra a excavar) pero mayor su altura, y por lo tanto la altura final de la pared (más volumen de tierra a apisonar). También se debe considerar que la tierra excavada del vertedero se utilizará para la construcción de la cortina, por lo que puede no ser un costo adicional.

Continuando con el ejemplo, supongamos que asumimos, basados en la Tabla 10., una velocidad máxima de 1.2 m/s, lo que nos determina que $E = 0.32$ m.

Debemos calcular ahora el caudal vertido máximo. Para ello debemos calcular el volumen laminado. Éste, como se recordará, es el que queda transitoriamente almacenado entre la cota del fondo del vertedero de máximas (2.04 m) y la máxima altura que llega el lago ($2.04 + 0.32 = 2.36$ m). Ese volumen se determina gráficamente con las curvas de la Figura 4. Se puede estimar más precisión con la ecuación potencial altura/volumen del tipo $y = a * x^b$, utilizando el programa "Balance de un tajamar de aguada.xls" y aumentando el volumen almacenado hasta que la altura sea 2.36 m.

Haciendo esto, con $H = 2.04$ m (fondo del vertedero), el volumen es 15.200 m^3 ; con $H = 2.36$ m, $\text{Vol} = 22.500 \text{ m}^3$. Por lo tanto el volumen laminado es $22.500 - 15.200 = 7.300 \text{ m}^3$.

$$QV_{\text{máx}} = \left(1 - \frac{Vl}{V_{\text{esc}}}\right) * Qm \cdot Ex$$

$$QV_{\text{máx}} = \left(1 - \frac{7300}{1213}\right) * 1,94 = \text{Valor negativo.}$$

El cálculo del caudal vertido da un valor negativo, lo que no es racional. ¿Por qué dio este resultado?. Porque el volumen que puede laminar el lago en los 0.32 m superiores (7300 m^3) es mayor que todo el volumen de agua que escurre en la tormenta de diseño (1213 m^3). Esto ocurre, como ya fue comentado en el apartado correspondiente, cuando la superficie del lago (1.9 há) es relativamente muy grande respecto a la superficie total de la cuenca (8 há).

Esta relación nos permite entonces, elegir un tirante menor, y abaratar la obra.

Para continuar con el ejemplo, ahora tomamos la altura de agua en el vertedero

más baja; $E = 0.10$ m, entonces $V \ll 1.0$ (Figura 13.), y el volumen almacenado con $H = 2.04 + 0.10 = 2.14$ m son 17.200 m^3 . Por lo tanto el volumen laminado es $17.200 - 15.200 = 2.000 \text{ m}^3$, que sigue siendo mayor que todo el volumen escurrido.

Tenemos pues una situación tan desproporcionada entre área del lago/área de la cuenca, en que el lago es capaz de actuar como un "pulmón" que almacena transitoriamente todo el escurrimiento generado por la cuenca en una tormenta máxima, aún con una altura tan pequeña como 0.10 m.

En este caso extremo, se hará entonces un vertedero de 10 m de ancho y 0.10 m de altura.

A los efectos simplemente de ver el procedimiento de diseño para casos más "normales", supongamos que la cuenca es mayor a la de nuestro ejemplo, y que nos produce un caudal pico y un volumen total de escurrimiento 10 veces mayor a los calculados ($Q_{\text{máx}} = 19.40 \text{ m}^3/\text{s}$, $V_{\text{esc}} = 12130 \text{ m}^3$). Mantengamos entonces nuestra elección inicial de $E = 0.32$ m y $V = 1.2$ m/s, lo que determinaba un volumen laminado de 7.300 m^3 .

$$QV_{\text{máx}} = \left(1 - \frac{7300}{12130}\right) * 19,4 = 7.72 \text{ m}^3/\text{s}$$

El ancho del vertedero (B) se calcula como

$$B = QV_{\text{máx}} / q$$

Siendo "q" el caudal específico por metro de ancho del vertedero.

En el gráfico de la Figura 13. vemos que para un parámetro del canal de 9.2 y una velocidad de 1.2 m/s (o un $E = 0.32$ m), el caudal específico vertido son $0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

$$\text{Entonces } 7.72 \text{ m}^3/\text{s} / 0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} = 25.7 \text{ m}.$$

En este caso es vertedero debería tener 25.7 m de ancho y 0.32 m de altura.

Borde libre o “revancha”

El borde libre es la distancia vertical entre el máximo nivel del agua en el lago y la creta de la cortina. Debe ser suficiente para prevenir la altura de las olas y su efecto al reventar contra la cortina. La altura de la ola puede ser determinada por la fórmula de Hawksley:

$$hola = 0.0138 * f^{1/2}$$

hola – altura de la ola en condiciones de viento máximo (m)

f – fetch, máxima longitud entre la cola de la laguna y la cortina, medida en línea recta (m). (Figura 14.).

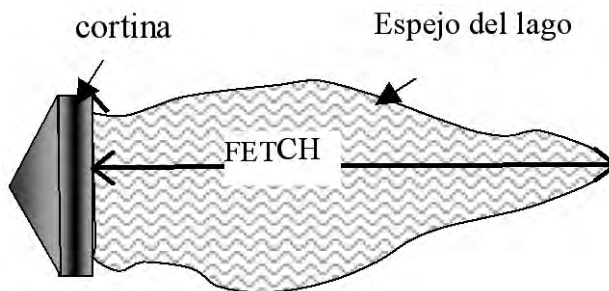


Figura 14. Fetch para el cálculo de la altura de la ola.

En tajamares para aguada asumimos un borde libre igual a la altura de la hola (BL = hola).

En nuestro ejemplo, cuando el lago llega a su mayor altura (2.14 m) en la máxima tormenta, el fetch es de 300 m (Figura 3.), por lo que el borde libre será:

$$BL = 0.0138 * 300^{1/2} = 0.24 \text{ m}$$

Altura definitiva de la cortina

La altura total de la cortina estará dada por la suma de los distintos factores que hemos considerado:

- a) Altura para almacenar el "Volumen Útil" (incluye 0.50 m de volumen no aprovechable). Máximo remanso estático - en el ejemplo, 2.00 m.
- b) Altura "d" entre la boca del aliviadero de mínimas y el fondo del vertedero de máximas – 0.04 m.
- c) Altura "E" en el vertedero que corresponde a la máxima descarga. A esta altura corresponde el máximo nivel que alcanzará el agua en el lago – 0.10 m.
- d) Borde libre – 0.24 m.

Por lo tanto la altura total de la cortina (H) será $2.00 + 0.04 + 0.10 + 0.24 = 2.38$ m (Figura 15).

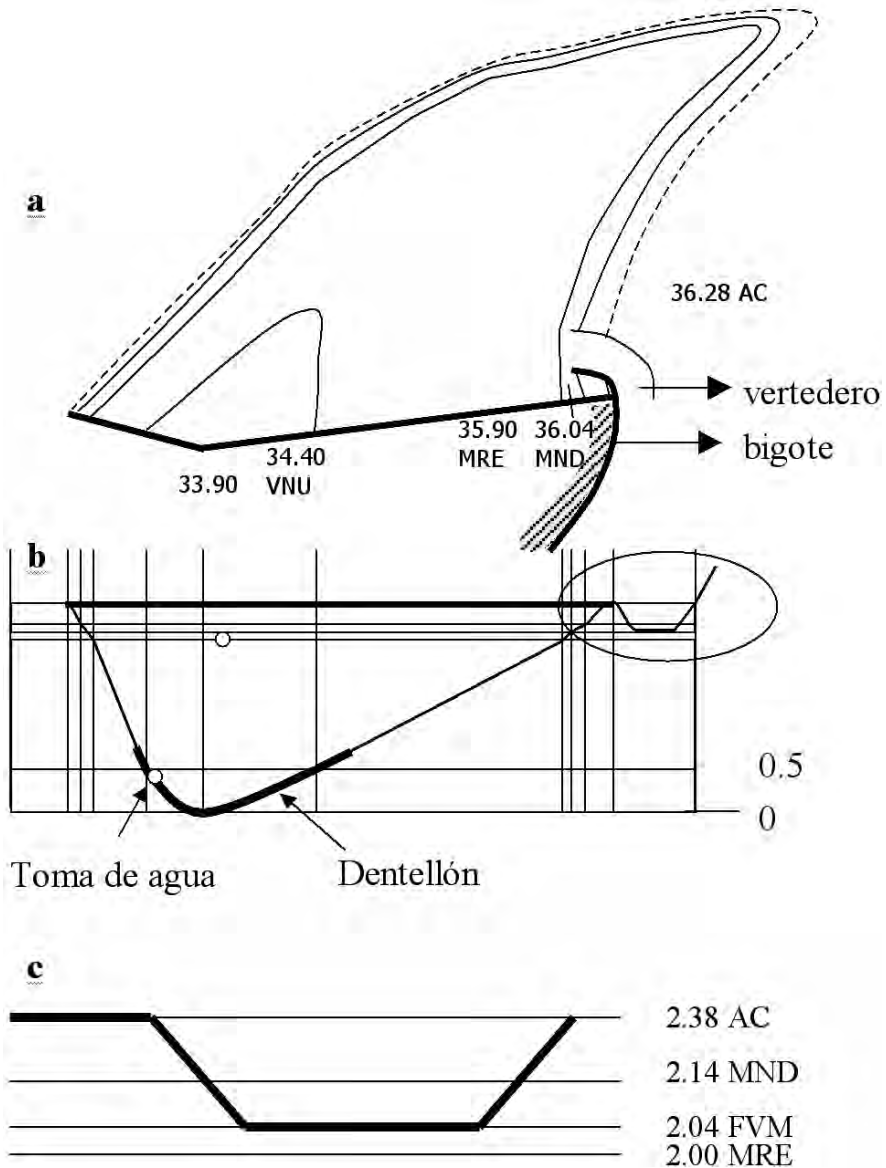


Figura 15. a. Vista en planta del lago y el eje de la cortina, b. perfil longitudinal de la cortina y c. detalle del vertedero.

Se esquematizan las diferentes alturas desarrolladas en el texto.

VNU – volumen no utilizable,

MRE – máximo remanso estático,

FVM – fondo del vertedero de máximas,

MND – máximo nivel dinámico,

AC – altura de coronamiento.

Ancho de la cortina

1. Ancho de coronamiento (C)

El "C" es el ancho que tiene la cortina en su parte superior, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$C = 1.1 * \sqrt{H} + 0.91$$

Siendo H la altura de la cortina en metros.

Como la altura de la cortina decrece desde el centro a los extremos, el ancho de coronamiento seguirá también esa tendencia. No obstante, es práctico hacer el ancho uniforme con la dimensión que corresponde a la máxima altura.

El ancho de coronamiento así calculado es un mínimo necesario para la estabilidad de la obra. En caso que se vaya a utilizar para transitar con rodados sobre la cortina, se podrá incrementar el mismo en la medida necesaria.

En nuestro ejemplo:

$$C = 1.1 * \sqrt{2.38} + 0.91 = 2.60 \text{ m}$$

2. Ancho de la base

En las cortinas de tierra se fija una inclinación de taludes de 2 a 1 para el talud de aguas abajo y de 3 a 1 para el de aguas arriba, o sea hacia el lago (Figura 16).

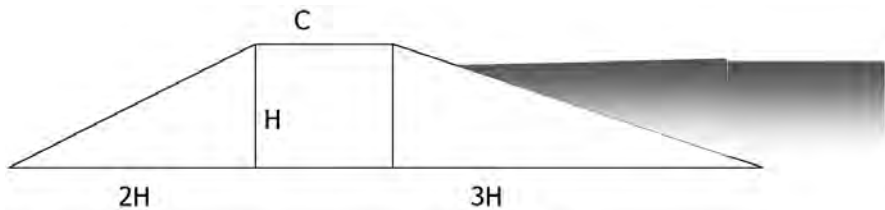


Figura 16. Perfil transversal de la cortina

Aplicando esas relaciones, las dimensiones totales y el peso de la cortina exceden en mucho a la resistencia que deben ofrecer para asegurar la estabilidad de la obra, pero son necesarios para la estabilidad de los taludes.

El ancho de la base (B) en una sección determinada, será entonces igual a:

$$B = 2H + C + 3H = 5H + C$$

TAJAMARES DE AGUADA

Para el ejemplo desarrollado, el ancho de la cortina en el punto de la máxima altura será:

$$B = 5 * 2.38 + 2.60 = 14.50 \text{ m}$$

Dentellón de anclaje

Es una zanja que corre a lo largo del eje de la cortina. Tiene por finalidad prevenir el desplazamiento de la pared y minimizar las pérdidas por filtración.

De acuerdo a las diferentes fórmulas de cálculo, para tajamares de agua nunca sería necesaria su construcción. A pesar de ello, y dada la seguridad que brinda, se recomienda su construcción aún en estos casos.

Se construye no a lo largo de todo el eje, sino sólo en la parte de la cortina que va a tener al menos 1.50 m de agua (Figura 15 .b).

En nuestro ejemplo, la altura máxima de agua en el lago son 2.14 m, por lo que van a tener al menos 1.50 m los 0.64 m inferiores ($2.14 - 1.50 = 0.64$).

Dado que el fondo del tajamar está en la cota 33.90, el dentellón deberá llegar sólo hasta la cota 34.54 ($33.90 + 0.64 = 34.54$).

Basados en la práctica, se recomienda un dentellón con el siguiente perfil (Figura 17.)

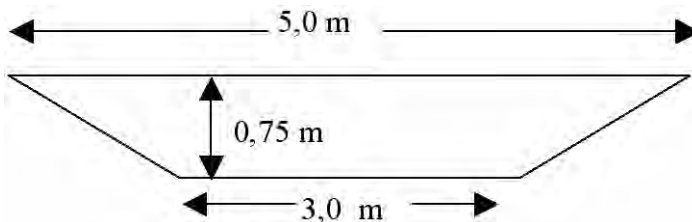


Figura 17. Perfil transversal del dentellón de anclaje.

Cálculo del volumen de tierra

1. Volumen de tierra de la cortina

En corte transversal, una cortina tiene un perfil trapezoidal con una base mayor B, una base menor C y una altura H. B y H son variables a lo largo de la cortina, decreciendo desde el centro a los bordes, mientras que C es fijo.

Para calcular el volumen de tierra de la cortina, primero se calcula la superficie de cada trapecio en cada punto de altura conocida (en cada cota), y se mide en el plano la distancia entre ellos (Figura 18.).

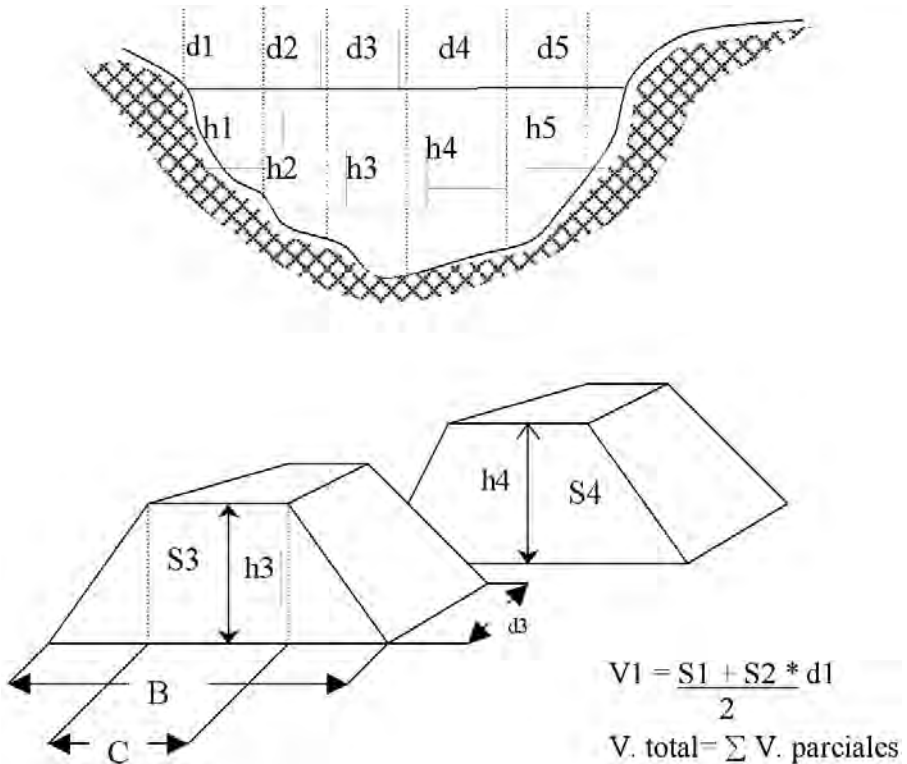


Figura 18. Cálculo del volumen de tierra de la cortina de un tajamar

TAJAMARES DE AGUADA

El volumen encerrado entre dos de estos trapecios es la semisuma de sus áreas, multiplicada por la distancia entre ellos. El volumen total será la sumatoria de todos los volúmenes parciales. El procedimiento para el cálculo del volumen de tierra de la cortina del tajamar del ejemplo se detalla en la Tabla 11.

Tabla 11. Planilla de cálculo del volumen de tierra de la cortina del tajamar del ejemplo.

Cota	(1) Altura (m)	(2) Base mayor (B) (m)	(3) Sección (m ²)	(4) Semisuma secciones (m ²)	(5) Distancia (m)	(6) Volumen parcial (m ³)	(7) Volumen acumulado (m ³)
36.28	0.00	2.60	0.00	0.00	0	0	0
36.00	0.28	4.00	0.92	0.46	5	2	2
35.00	1.28	9.00	7.42	4.17	15	63	65
34.00	2.28	14.00	18.92	13.17	15	198	263
33.90	2.38	14.50	20.35	19.64	10	196	459
34.00	2.28	14.00	18.92	19.64	10	196	655
35.00	1.28	9.00	7.42	13.17	50	659	1314
36.00	0.28	4.00	0.92	4.17	55	230	1544
36.28	0.00	2.60	0.00	0.46	10	5	1548

- (1) $Altura_{(i)} = Cota \text{ de coronamiento (36.28)} - Cota \text{ del punto}_{(i)}$
- (2) $B(i) = C + 5 * H_{(i)} \quad B_{(i)} = 2.60 + 5 * H_{(i)}$
- (3) $Sección(i) = ((B_{(i)} + C) / 2) * H \quad Sección = ((B_{(i)} + 2.60) / 2) * H$
- (4) $Semisuma \text{ secciones}_{(i, i-1)} = (Secc_{(i)} + Secc_{(i-1)}) / 2$
- (5) $Distancia_{(i, i-1)} - \text{Se mide en el plano}$
- (6) $Volumen \text{ parcial}_{(i, i-1)} = Semisuma \text{ secciones}_{(i, i-1)} * Distancia_{(i, i-1)}$
- (7) $Volumen \text{ acumulado} = \sum_{i=1}^{I=n} Volúmenes \text{ parciales}_{(i)}$

Es decir que queda una cortina de 170 m de longitud, y un volumen de 1548 m³.

2. Volumen de tierra del dentellón

Como ya fue dicho en el apartado correspondiente, el dentellón llega sólo hasta la cota 34.54, por lo que tiene una longitud (medida en el plano) de 55 m.

Su sección es la de un trapecio con las medidas dadas en la Figura 18., por lo que su sección es de $((5 + 3) / 2) * 0.75 = 3 \text{ m}^2$ y su volumen es $55 * 3 = 165 \text{ m}^3$.

3. Volumen de tierra del vertedero

En el lugar donde se construirá el vertedero, la pendiente promedio de la ladera es aproximadamente 3%.

Como el vertedero del ejemplo tiene 10 m de ancho, la diferencia de nivel de un borde al otro del mismo son 0.30 m. Como el fondo del vertedero debe ser horizontal en el sentido transversal, se deberá excavar la sección esquematizada en la Figura 19.

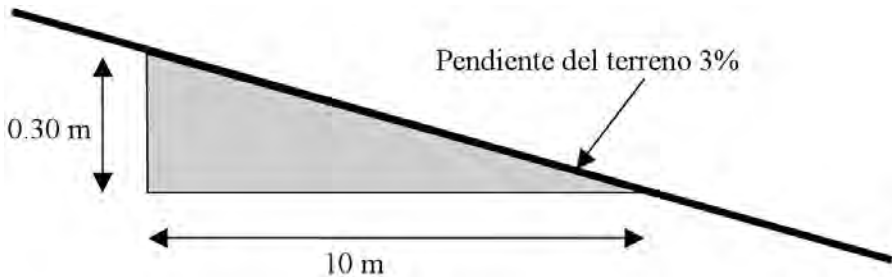


Figura 19. Perfil transversal de la excavación para el vertedero de máximas.

El área de esta sección triangular es $10 * 0.30 / 2 = 1.50 \text{ m}^2$.

El volumen total de excavación será el producto de esta sección por la longitud que se le vaya a dar.

Como ya fue dicho anteriormente, la tierra que se excava del vertedero se puede utilizar para la cortina, por lo que en este caso no la consideraremos un costo adicional.

4. Volumen de tierra del desmonte

Antes de comenzar a construir la cortina se debe remover toda la capa de suelo vegetal (horizonte A) pues es muy porosa, no impide la infiltración, y no hace una buena unión con la tierra que será apisonada.

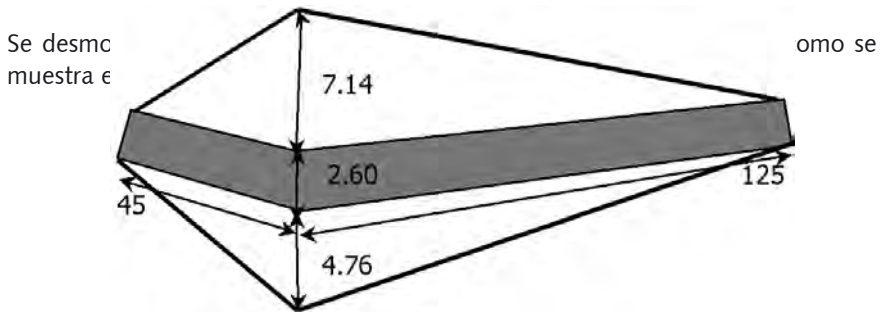


Figura 20. Planta de la cortina, dimensiones en m.

Si asumimos que se removerán los 0.30 m superiores del suelo, que el largo total de la cortina son 170 m, y que el ancho máximo de la misma son 14.50 m, el volumen aproximado será:

$$(170 * 14.50) / 2 * 0.30 = 370 \text{ m}^3.$$

5. Volumen de tierra por la compactación

Por mejor que se apisona la cortina al momento de su construcción, al pasar el tiempo se va compactando más. Esta compactación será mayor cuanto mayor sea la altura de tierra. Es así que si se termina la obra con el coronamiento horizontal, luego de un tiempo en el centro de la cortina ésta estará más baja, corriéndose el riesgo que en una tormenta el agua pase por esta depresión, que está justamente en su parte más delicada.

Para evitar este problema, se termina la cortina con un 10% más de altura en el coronamiento, como se muestra en la Figura 21.

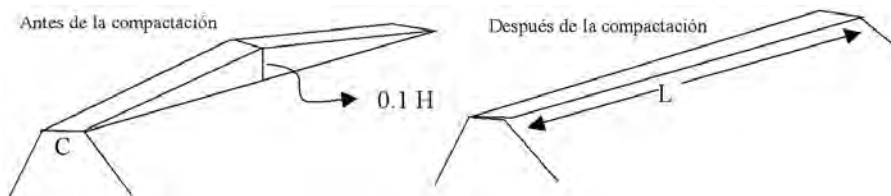


Figura 21. Volumen de tierra extra para compensar la compactación

Este volumen extra se calcula como $(C * L * 0.1H) / 2$.

Con los datos de nuestro ejemplo: $(2.60 * 170 * 0.1 * 2.38) / 2 = 53 \text{ m}^3$.

6. Volumen total de tierra

Es la suma de todos los componentes reseñados.

Volumen total de tierra = Volumen de la cortina + Volumen del dentellón + Volumen del vertedero + Volumen del desmonte + Volumen extra por compactación.

Siguiendo con nuestro ejemplo:

Volumen total = $1.548 + 165 + 0 + 370 + 53 = 2.136 \text{ m}^3$.

Cálculo de la eficiencia del Tajamar

Como ya fue discutido en el apartado correspondiente, se define la eficiencia como:

Volumen de agua almacenada (m^3) / Volumen de tierra movido y apisonado (m^3).

Entonces, recordando que el volumen almacenado de agua en el MRE son 14.300 m^3 ,

Eficiencia = $14.300 / 2.136 = 6.7$

Si se compara con los valores de la Figura 2., se ve que 6.7 es una eficiencia buena para un tajamar de este tamaño.

Obras complementarias

1. Tubería de descarga de fondo

Ocasionalmente es necesario vaciar el tajamar por dos motivos:

- a. Remover el material que colmata el lago. El agua de escurrimiento trae materiales en suspensión. Al llegar al lago pierde velocidad y los materiales decantan. Esta acumulación irá haciendo perder paulatinamente capacidad de embalse al lago. La mayor o menor velocidad con que ocurra este fenómeno dependerá de las características de la cuenca (tamaño relativo al lago, tipo de

TAJAMARES DE AGUADA

suelo, pendiente, pero principalmente si son pasturas o se realizan laboreos). El gasto sólido se puede estimar, en promedio, en 1 tm ha⁻¹ año⁻¹.

- b. Reparar la cortina. El efecto del oleaje en el talud de la cortina va erosionándolo paulatinamente. Después de cierto tiempo, se forma un escalón en el talud del lago. Para repararlo, primero hay que excavar el mismo hasta llegar a la tierra fresca, y luego sobre ésta comenzar a apisonar nueva tierra, igual que se hizo en el momento de la construcción. Otras soluciones técnicas, como el enrocado o el uso de geotextiles sobre el talud del lago, son mucho más caras que estas reparaciones periódicas.

Para vaciar el tajamar se precisa entonces la descarga de fondo. Ésta es una tubería de 200 a 250 mm que atraviesa la cortina en su punto más bajo.

La existencia de una tubería tiende a provocar filtraciones a lo largo de la misma. El agua circula preferencialmente por la unión de la tubería con el suelo, arrastrando los materiales más livianos. Esto a su vez facilita aún más el flujo de agua, aumentando su velocidad y arrastrando por lo tanto materiales cada vez más pesados. Finalmente la tubería queda separada de la tierra, formando un verdadero túnel, por lo que la obra se comienza a erosionar desde abajo, colapsando finalmente. Este proceso se conoce como tubificación.

Para evitarlo, se construyen collarines antifiltrantes, tal cual se discutió en el apartado del aliviadero de mínimas.

En el caso de tajamares de aguada, no es imprescindible la construcción de la descarga de fondo.

2. Toma de agua

Es totalmente inconveniente el acceso directo de los animales al lago. En la época de calor los animales tienden a permanecer en el mismo, infectando el agua con sus deyecciones. El permanente pisoteo contribuye a formar zonas barrosas, que deterioran más aún la calidad del agua, y en la cual los animales se entierran. Más peligroso aún es el pisoteo de los animales en el vertedero de máximas, que lo deja en una condición muy erosionable ante futuras tormentas.

Es necesario entonces suministrar el agua en bebederos. Aquellos que estén en potreros ubicados aguas abajo del tajamar se alimentarán directamente por gravedad. Para los que estén a una cota superior, se deberá elevar el agua a un depósito (p.ej. un tanque australiano o un tanque elevado), y desde éste se distribuirá por gravedad a los bebederos.

La tubería de toma atravesará la cortina y tendrá su extremo dentro del lago a una cota 0.50 m por encima del fondo, para mejorar la calidad del agua tomada. Será de PVC, de pared gruesa (PN 10) para tener mayor resistencia al aplastamiento. El diámetro dependerá del número de bebederos que tenga que servir, pudiendo ser de 40, 50, 63 o 75 mm de diámetro nominal. Igual que en el caso de las tuberías antes mencionadas, deberá llevar collarines antifiltrantes.

Para facilitar la entrada de agua limpia la toma puede efectuarse introduciendo la punta de la tubería dentro de un tanque o tarrina de 200 l. Este tanque se llena de grava de 10 a 20 mm y se perfora en su mitad superior con agujeros o ranuras de 5 a 10 cm para facilitar la entrada de agua.

El mismo efecto se puede conseguir atando la punta de la tubería a un poste clavado en el fondo del lago, a 50 cm de altura. En este caso la punta del tubo debe estar cubierta por algún accesorio que actúe como filtro.

Aguas abajo de la cortina, el extremo de salida de la tubería se tapaná con un tapón de rosca a efectos de poder proceder al lavado de la misma. Un tubo vertical derivará a los bebederos, en los cuales se colocará una válvula de flotador para permitir el flujo de agua. Antes de la derivación a los bebederos se colocará una llave de paso que permita cortar el flujo para reparaciones u otras emergencias (Figura 22.).

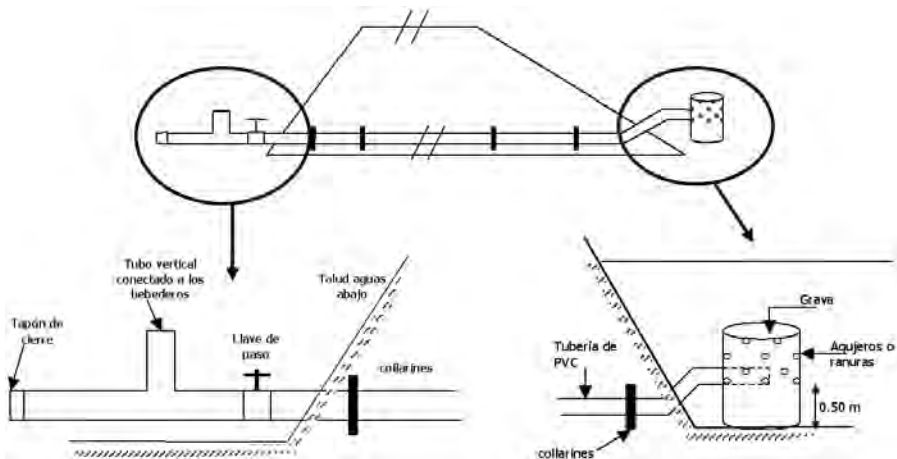


Figura 22. Vista general de las obras de toma de agua, mostrando detalles constructivos de la entrada y salida.

3. Alambrados

Para evitar la entrada de animales y para defensa de la obra, hay que cercar la misma, inclusive el vertedero de máximas.

Construcción

1. Fijar un mojón como cota de referencia fuera de la obra. Este mojón es conveniente fijarlo cuando se hace el levantamiento topográfico del área del vaso. Será la referencia permanente para controlar el desarrollo de la obra.
2. Marcar el eje de la cortina
3. Hacer cateos a lo largo del eje y en el vaso del lago. Éstos se harán con taladro holandés perforando a la máxima profundidad posible, incluso es conveniente usar un taladro con extensión. Es imprescindible determinar si por debajo del suelo el material es impermeable o no (p.ej. arenas, toscas, etc.). En este último caso, no se debe remover el horizonte B ni en el eje de la cortina ni en el fondo del lago.
4. Marcar la planta de la cortina. En cada punto ($C/2+3H$) hacia aguas arriba y ($C/2+2H$) hacia aguas abajo.
5. Desmontar dicha planta, hasta toda la profundidad del horizonte A. (15–30 cm)
6. Volcar el material al pie aguas debajo de la cortina (actuará como filtro) o después de construida la cortina se cubre con el mismo para facilitar el arraigamiento de pastos que la protejan.
7. Excavar el dentellón de anclaje y volcar el material arcilloso a lo largo del eje de la cortina.
8. Determinar las zonas de préstamo. Deben estar cerca de la cortina, preferentemente dentro del vaso del lago (si el cateo muestra que así se puede hacer), pero contra las orillas y no en las zonas más profundas del mismo.
9. Se levanta la cortina aplicando capas finas (20-30 cm), esparciéndolas y compactándolas. Se rellena el dentellón con material pesado, los materiales más porosos se vuelcan al pie de cortina. Se tratará de utilizar el material más arcilloso para el núcleo en el eje de la cortina. Si la tierra está excesivamente seca, se deberá regar para lograr una buena compactación.

10. Cuando se llega a una altura algo superior a la que van las tuberías (descarga de fondo, tuberías de toma) se hace una zanja atravesando la cortina, se coloca la tubería con los collarines, se rellena nuevamente la zanja y se compacta en forma manual.
11. Una vez tapadas las zanjas se continúa levantando la cortina.
12. El material de excavación para el(los) vertedero(s) de máxima, se utilizará para la cortina y el bigote.
13. Se termina con el coronamiento 10% más alto en el centro que en los extremos.

Informe técnico

El informe técnico de este tipo de obra, debería contener:

- Dotación de animales y estimación del consumo de agua.
- Plano con delimitación de la cuenca de captación extraído de cartas del Servicio Geográfico Militar, fotos aéreas u otro material base.
- Plano taquimétrico del embalse, con cotas referidas a un mojón de referencia.
- Cálculo hidrológico de los aportes de la cuenca (Método de Temez, programa Balance de un tajamar de aguada.xls)
- Cálculo del vertedero
- Planos técnicos con: a) perfil transversal de la obra en la sección de máxima altura; b) características del vertedero (cota, ancho, pendiente); c) trazado del mismo en el plano; d) características de las obras de toma (cotas, diámetros de tuberías, zanjeado, etc.).

Anexo

Instrucciones para el manejo de la planilla BALANCE DE UN TAJAMAR-Aguada.XLS

1. En la hoja ALTURA/VOLUMEN

- Ingresar cotas y superficies encerradas en cada una (ROJO) Las gráficas no deben incluir los valores de 0 (en las columnas de altura, superficie encerrada o volumen acumulado), por razones de ajuste de la ecuación potencial.
- Los gráficos dan las ecuaciones potenciales ($y = a \cdot x^b$) de las curvas de altura/área del lago, volumen/altura y altura/volumen. Los coeficientes a y b de dichas ecuaciones se ingresan en las celdas I2, K2; I3, K3; I4, K4, respectivamente. (AZUL)

2. En la hoja RESUMEN

- Ingresar la Unidad de Suelo (carta de suelos 1:1.000.000); el agua disponible en el perfil (M.G.A.P. – D.S.A.); la Evapotranspiración media (mapa); el número de animales por categoría; la producción de leche (sólo en el caso de vacas lecheras), el área de la cuenca; la altura sobre el fondo del lago a la que está ubicada la toma de agua y un valor cualquiera inicial del volumen máximo en el tajamar. (ROJO)

3. En la hoja DEMANDA DE AGUA

- Ingresar la temperatura media mensual (°C) promedio para cada mes, de la zona donde va a trabajar. (ROJO)

4. En la hoja ESCURRIMIENTO

- Ingresar los valores históricos de Precipitación (PP) y Evaporación de Tanque "A" (EV"A") para cada mes y año en la zona donde va a trabajar. (ROJO)

5. En la hoja RESUMEN

- Se comienzan a cambiar los datos en ROJO (número de animales por categoría, producción de leche, tamaño de cuenca, volumen máximo, altura de la toma de agua), y se obtienen los déficit anuales.
- Para ver en que mes se dan esos déficit, se puede ir a la hoja BALANCE TAJAMAR
- Precaución – Se puede cometer el error de iniciar el balance con un volumen máximo muy grande, de forma tal que no de déficit en toda la serie de años, pero que la cuenca no sea capaz de reponer los consumos anuales. En este

caso, año a año iría disminuyendo el volumen almacenado. En una situación real, esto es imposible, pues ese volumen tan grande no se podría haber almacenado en un año. La forma más práctica de asegurarse de no cometer este error, es verificando que todos o casi todos los años de la serie, exista un cierto volumen de excedente (Columna B, Filas 30 y siguientes), lo que indica que el escurrimiento de la cuenca fue suficiente para llenar nuevamente la obra.

Nota:

- Los valores en ROJO son datos a ingresar.
- Los valores en AZUL son coeficientes a ingresar que surgen de las ecuaciones de los gráficos.
- Los valores en VERDE OSCURO son datos que la propia planilla trae de otra hoja, por lo que no se deben modificar allí.
- Los valores en NEGRO no se deben modificar.
- Los valores en FUCSIA son rótulos, son explicativos y no afectan los cálculos.
- Los valores en VERDE CLARO son parámetros calibrados que no se deben modificar.

De esta forma se puede diseñar un tajamar (altura, volumen) tal que para la cuenca y dotación animal dados garantice un suministro seguro de agua para las condiciones climáticas de una serie histórica de 30 años. Se debe recordar que la altura debe ser ≥ 2 m.

Otras posibilidades serían, dado un tajamar ya construido, definir la máxima dotación animal que el mismo soportaría con garantía de suministro de agua.

Otra posibilidad es estudiar, dado un determinado tajamar, cuánto se debería aumentar la cuenca mediante canales robadores, para cumplir con la demanda de una determinada dotación.

Bibliografía

- BERETTA, V. Y BRUNI, M.A. (1998) Manejo del agua de bebida en sistemas lecheros y ganaderos. Cartilla N° 12:8. 1998
<http://www.planagro.com.uy/publicaciones/uedy/Publica/Cart12/Cart12.htm>
- BIRF y FAO (1951) "Recomendaciones para el desarrollo agrícola del Uruguay", Informe de la Misión Técnica, Montevideo.
- BUREAU OF RECLAMATION (1966) Diseño de presas pequeñas. Compañía Editorial Continental S.A. México
- CARÁMBULA, M. y TERRA, J. (2000). Las sequías antes, durante y después. INIA, Boletín de Divulgación 74
- CHOW, V.T. (1964) Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D. y MAYS, L. (1994) Hidrología aplicada. McGraw- Hill Interamericana S.A.
- GARCÍA, M. Balance de un tajamar 2.
<http://www.fagro.edu.uy/dptos/suelos/hidrologia>
- GENTA, J. L. (Coordinador) Directivas de diseño hidrológico – hidráulico de pequeñas represas (borrador). MTOP-IMFIA.
- GENTA, J.L.; CARBONNIER, F.; FAILACHE, N. y ALONSO, J. (2003). Modelo precipitación-escorrentía de paso mensual, I.M.F.I.A., Facultad de Ingeniería.
- GHIGGIA, R.A. (1976). Tajamares. Facultad de Agronomía.
- KOOLHAAS, M. (2003). Embalses agrícolas. Diseño y construcción. Ed. Hemisferio Sur.
- MGAP-MVOTMA (2005). Plan de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertifi-

cación y la Sequía. 151 pp.

MOLFINO, J.H. Y CALIFRA, A. (2001) Agua disponible de las tierras del Uruguay, Segunda aproximación. División Suelos y Aguas, Dirección General de Recursos Naturales Renovables, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

RODRIGUEZ FONTAL, A. (1984) Fórmulas lluvia-duración-retorno-riesgo en las ocho subregiones del Uruguay. (Aplicación a la agricultura). Agua en la agricultura N° 2.

SCHWAB, G.O., FREVERT, R.K., EDMINSTER, T.W. y BARNES, K.K. (1990) Ingeniería de conservación de suelos y aguas. Editorial Limusa S.A.

STUTH, J. (1993) Grazing Management: an ecological perspective. In: Grazing Management (ed. by Rodney K.Heitschmidt and Jerry W.Stuth). Chapter 3. Timber Press, Portland, Oregon.

TEIXEIRA, L. Consultoría "Evaluación del componente de desarrollo del riego de PRENADER". FAO – Facultad de Agronomía – Facultad de Ingeniería.



Este manual, es publicado por el Proyecto Producción Responsable, del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

En diciembre de 2006 se crea el Fondo Especial de Prevención de los Efectos de la Sequía, para mitigar los efectos que la falta de agua provoca en el norte del país. Este Fondo, provee recursos para la confección de obras de almacenaje y alumbramiento de agua para el ganado, en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Rivera y Tacuarembó y está dirigido a pequeños y medianos productores ganaderos.

Los autores, Ings. Agrs. Mario García y Pancracio Cánepa, especialistas en la construcción y diseño de tajamares, contribuyen con los contenidos de esta publicación, para que las obras de almacenamiento de agua para abrevadero del ganado, tengan las dimensiones y características adecuadas, para un correcto manejo de los excesos hídricos y para que los productores ganaderos puedan enfrentar, en mejores condiciones, las sequías que periódicamente afectan al campo uruguayo.