

Capítulo 12

Presas de hormigón a gravedad con vertido incorporado cimentadas sobre suelo

Los sistemas fluviales de derivación sin embalse para acumular los volúmenes excedentes de agua, normalmente incluyen una presa vertedero que, a más de elevar el nivel de agua en el río hasta la cota requerida, opera como aliviadero permitiendo evacuar sobre su perfil hacia el tramo aguas abajo los volúmenes excedentes de agua.

Estos sistemas están constituidos por un conjunto de estructuras hidráulicas que además de las dos funciones mencionadas permiten:

- Controlar los parámetros hidromecánicos del flujo de agua en los tramos aguas arriba y aguas abajo.
- Controlar y evacuar hacia aguas abajo los sedimentos transportados evitando el ingreso de sus fracciones no permisibles a las estructuras de captación.
- Derivar o captar desde el cauce natural los caudales de agua para satisfacer el gráfico de demanda del usuario o usuarios del sistema, con el nivel de garantía establecido en tiempo y volumen.
- Evitar la erosión de laderas y la socavación del fondo del río en los tramos aguas arriba y abajo.

12.1. Clasificación de los orificios de desagüe en las presas vertedero

Los sistemas de obras fluviales que incluyen una presa con vertido incorporado (presa vertedero), en el caso más general pueden tener varios orificios que operan como desagües con diferente objetivo. Existen algunas clasificaciones de estos orificios. El primer lugar, *dependiendo de la profundidad* a la que se encuentra el orificio bajo el nivel aguas arriba se distinguen:

- Orificios vertedero, denominados también superficiales, con flujo de superficie libre o abiertos.
- Orificios confinados, denominados también profundos, sumergidos, cerrados o con flujo a presión.

En adelante, esta clasificación adopta las identificaciones: *orificio superficial* y *orificio sumergido*.

En segundo lugar, *dependiendo de la finalidad* se distinguen los siguientes orificios:

- Temporales de construcción, para desviar los caudales del río durante el periodo de construcción de la presa.
- Orificios temporales sanitarios, para captar durante el periodo de construcción los caudales sanitarios.
- Orificios permanentes de operación, los mismo que se clasifican en: *orificio de captación*, a través del cual ingresa el agua a la obra de toma o captación, que abastece al usuario o usuarios del sistema con los caudales requeridos, de acuerdo con el gráfico de demanda; *orificios de servicio* que permiten el funcionamiento satisfactorio del propio sistema de obras del que forman parte, a través del lavado de sedimentos, evacuación de objetos flotantes, desagüe de los excedentes de agua que ingresan a las obras, disminución del nivel de agua para trabajos de mantenimiento o reparación; *orificio del aliviadero* que permite evacuar los volúmenes excedentes de agua, hasta la magnitud de la crecida de diseño.

Finalmente, por las características constructivas se distinguen los siguientes orificios:

- Sin compuertas.
- Con compuertas.

En el diseño de la presa, como norma, se tiende a unificar los orificios temporales con los permanentes, así como los de operación con los de servicio. En consecuencia, un mismo orificio puede cumplir varias funciones.

A partir de las funciones y el régimen de operación previsto, para cada orificio se establece el caudal de diseño. A partir de este caudal, al utilizar las ecuaciones formuladas en la hidráulica aplicada (mecánica de fluidos), se determinan las dimensiones del orificio considerado.

Para seleccionar la posición altimétrica del orificio (ver nro. 1 de este apartado) se consideran las particularidades de los orificios superficiales o sumergidos. En particular, se toma en cuenta que, en caso de los orificios vertedero (superficiales), las compuertas y sus mecanismos de maniobra deben ser los de menor complejidad posible, además deben ser accesibles para revisión-reparación; en cambio, en los casos de orificios sumergidos se tiene la posibilidad de evacuar caudales hacia el tramo aguas abajo con niveles del agua en el tramo aguas arriba, más bajos que en el caso de los orificios superficiales.

Los orificios superficiales de entrada a los aliviaderos con frecuencia incluyen compuertas. Como se ha evidenciado en el apartado correspondiente a aliviaderos, la experiencia en diseño y construcción de sistemas hidráulicos ha demostrado que los orificios con compuertas con frecuencia, finalmente, llevan a soluciones más económicas (disminuye la altura de la presa y también la superficie inundada en el tramo aguas arriba).

12.2. Algunos esquemas constructivos y de implantación de las presas vertedero cimentadas en suelo



Figura 12.1. Presa vertedero con compuertas cimentada en suelo.

Fuente: Soboll, S. V., Ezhkov, A. N. y Soboll, I. S., Estructuras de los sistemas hidráulicos fluviales, NNGASU, 2018.



Figura 12.2. Presa vertedero sin compuertas cimentada en suelo.

Fuente: Soboll, S. V., Ezhkov, A. N. y Soboll, I. S., Estructuras de los sistemas hidráulicos fluviales, NNGASU, 2018.

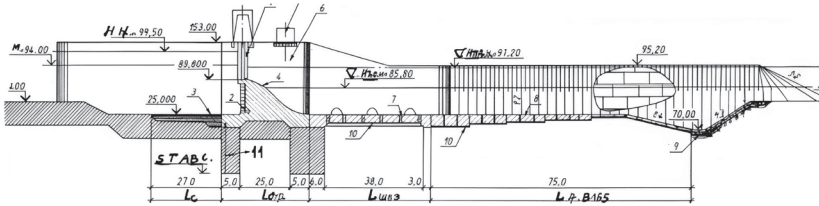


Figura 12.3. Principales elementos de una presa con vertido incorporado cimentada en suelo.

1- presa vertedero; 2- galería; 3- carpeta; 4- compuerta; 5- puente vial; 6- pila; 7- tramo de disipación; 8- tramo postresalto; 9- cono de erosión controlada; 10- drenaje horizontal; 11- tablestaca.
Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

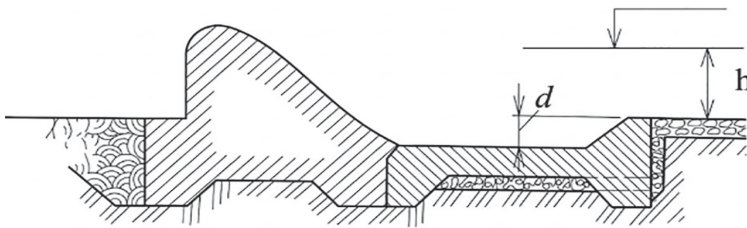


Figura 12.4. Sección transversal de presa con pozo de disipación.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

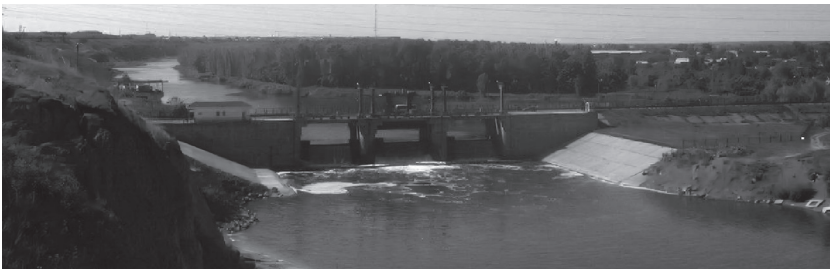


Figura 12.5. Protección de las márgenes aguas debajo de una presa- vertedero pequeña, de carga pequeña (las márgenes aguas abajo del tramo de disipación, protegidas con piedra, han sido parcialmente erosionadas en el proceso de operación.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

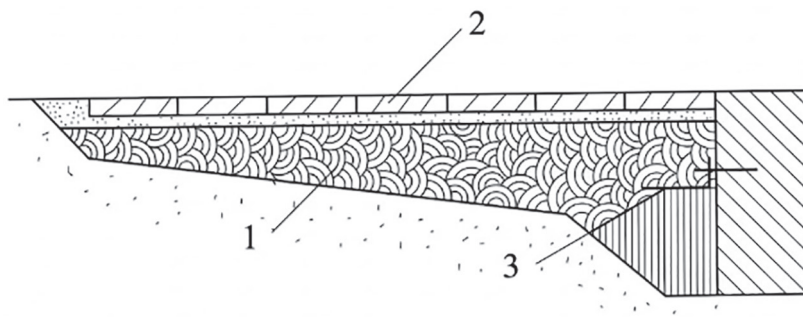


Figura 12.6. Carpeta flexible.

1- carpeta de arcilla; 2- losas de hormigón de la capa protectora, implantadas sobre una base de arena; 3- elemento de bitumen en el contacto de la arcilla con el hormigón.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

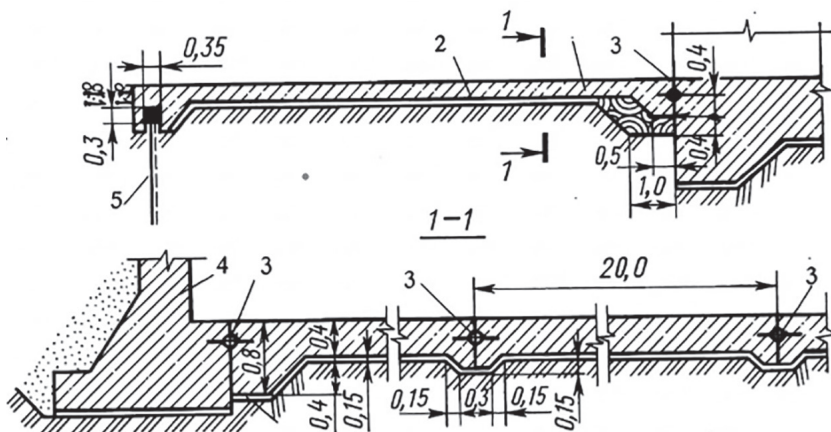


Figura 12.7. Esquema de una carpeta rígida de hormigón u hormigón armado

1-losa de hormigón armado; 2- base de hormigón; 3- sellado de las juntas; 4- muro de enlace; 5- tablestaca bajo la carpeta.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.



Figura 12.8. Muros y pilas.

De derecha a izquierda: muro divisorio, pilas.

Fuente: Soboll, S. V., Ezhkov, A. N. y Soboll, I. S., Estructuras de los sistemas hidráulicos fluviales, NNGASU, 2018.



Figura 12.9. Juntas de deformación en presas de hormigón cimentadas en suelo.

Fuente: Soboll, S. V., Ezhkov, A. N. y Soboll, I. S., Estructuras de los sistemas hidráulicos fluviales, NNGASU, 2018.

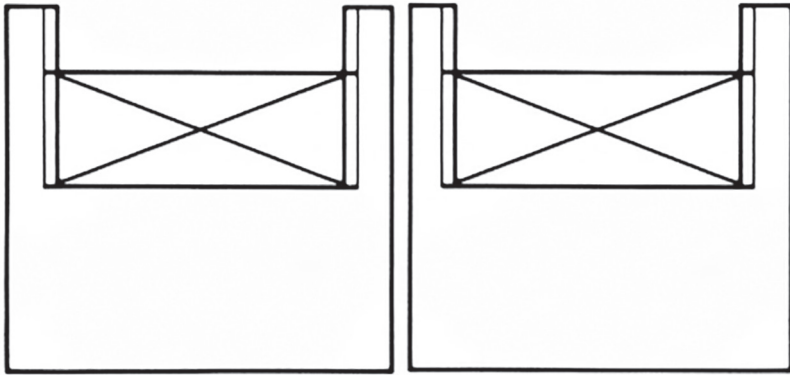


Figura 12.10. Ejemplo de una junta de deformación: 1,0-1,5 cm en la base y 3-4 cm en la corona.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

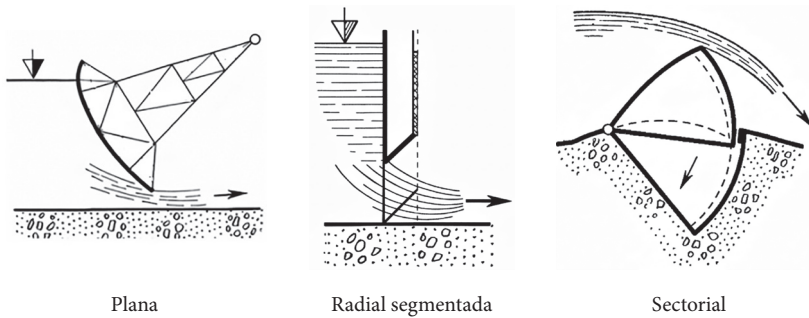


Figura 12.11. Esquemas de compuertas en presas vertedero.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

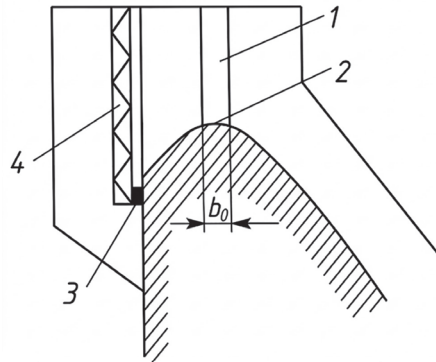


Figura 12.14. Variante de ubicación de las compuertas en la cresta de la presa
 1- guías de la compuerta de operación; 2- franja horizontal; 3- sello; 4 - compuerta de emergencia.
 Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

12.3. Determinación preliminar del frente de una presa vertedero

Como ya se ha mencionado, una presa vertedero en la práctica cumple dos funciones: de obra de contención —al igual que una presa cualquiera— y de aliviadero de excedentes. El frente de vertido de las presas vertedero, a través del que se evacúa la crecida de diseño, está limitado por muros que separan dicho frente de las márgenes del sitio (muro de enlace) o de otras estructuras que forman parte del frente de contención muro divisorio (central hidroeléctrica, presa ciega y otras).

La presa vertedero con frecuencia está dividida en secciones con ayuda de muros intermedios especiales denominados “pilas”. En este caso, dichas secciones están cubiertas por compuertas metálicas. En consecuencia, el frente de vertido se determina bajo los mismos criterios que el frente de un aliviadero de excedentes. Las presas cimentadas en suelo por obvias razones son de altura pequeña y, en consecuencia, como ya se ha indicado, en la mayoría de los casos no son presas de regulación, sino de derivación y, por consiguiente, no originan un embalse. Por esta razón, el caudal de diseño de la presa vertedero en la mayoría de los casos es igual al caudal pico de la crecida de diseño:

$$Q_{DIS} = Q_{CRC.MAX} \quad (11.1)$$

Cuando son representativos los caudales que ingresan a través de los orificios de operación Q_{op} y de servicio Q_{ser} , es razonable considerarlos para determinar el caudal de diseño:

$$Q_{DIS} = Q_{CRC.MAX} - Q_{op} - Q_{ser} \quad (11.1a)$$

De lo indicado se desprende que, en el caso de presas sin compuertas, la cota de la cresta de la presa vertedero es el nivel normal de operación (NN), que a su vez es nivel máximo de operación normal. Cuando es evacuada la crecida de diseño el nivel se eleva hasta nivel forzado (NF), que origina la carga necesaria para que sea evacuada dicha crecida. A esta carga se la denomina carga de diseño H_{DIS} .

Por tanto, conocido el caudal máximo de la crecida de diseño a partir del estudio hidrológico, el frente de la presa vertedero se determina con la expresión:

$$B = \frac{Q_{DIS}}{q} \quad (11.2)$$

Donde:

q : caudal unitario, es decir, el caudal por cada metro del frente de la presa vertedero.

La magnitud de este caudal depende principalmente de las características geomecánicas del macizo de cimentación y en rigor debe ser consecuencia de un análisis técnico económico. En efecto, a mayor valor del caudal unitario corresponde menor frente de la presa vertedero y, por consiguiente, menor costo de la presa, pero en cambio el costo de la estructura de disipación es mayor; por su parte, a menor valor del caudal unitario corresponde mayor frente de vertido y mayor costo de la presa, en tanto que el costo de la estructura de disipación es menor.

Para el dimensionamiento preliminar se puede adoptar el caudal unitario q entre $10 \text{ m}^3/(\text{s. m})$ y $30 \text{ m}^3/(\text{s. m})$; en algunos casos de suelos aluviales el caudal unitario puede llegar a 40 a $50 \text{ m}^3/(\text{s. m})$. Estos valores referenciales provienen de la práctica de diseño de presas vertedero cimentadas en suelo. Cuando la cimentación es roca el caudal unitario generalmente llega a 80 a $120 \text{ m}^3/(\text{s. m})$.

El frente B obtenido con la ecuación (11.1) debe ser compatible con las condiciones topográficas, es decir, debe ser posible la implantación constructiva de dicho frente en el sitio de presa adoptado en el cauce del río. En caso de que no sea posible implantar el frente B obtenido, entonces, se requiere tomar medidas como:

- Incrementar el caudal q dentro de rangos aceptables.
- Considerar una presa vertedero con configuración curvilínea en planta, a fin de lograr implantar el frente b obtenido.
- Seleccionar otro sitio de presa.

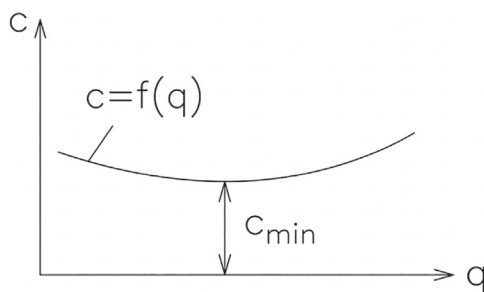


Figura 12.15. Gráfico del análisis técnico- económico para determinar el caudal unitario óptimo.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGROPROMIZDAT.

Como se ha indicado, en rigor el frente de vertido de la presa debe determinarse sobre la base de un análisis técnico-económico en el que, por una parte, se considere el costo de la presa vertedero y el de la presa ciega (generalmente de material del lugar) en caso de que esta sea necesaria incorporar al frente de cierre del río y, por otra parte, el costo

de la obra de disipación. La alternativa óptima será aquella en la que el costo sumatorio sea el menor, como se ilustra en el siguiente gráfico del costo (C) como función del caudal unitario q siendo el caudal unitario económico q_{econ} el que corresponde al menor costo total C_{min} .

12.4. Determinación preliminar de la cota de la cresta de la presa vertedero

En caso de una presa con compuertas, cuando están totalmente abiertas las compuertas, esta operará como un vertedero, generalmente de perfil práctico tipo Creager, no sumergido, en cuyo caso el coeficiente de caudal o descarga $m \approx 0,5$, aun cuando en algunos casos puede tratarse de un vertedero de pared ancha, $m \approx 0,32 - 0,35$ (en los casos cuando el frente de contención está estructurado básicamente por compuertas) que puede ser sumergido o no sumergido, dependiendo de las condiciones concretas. Las ecuaciones para el análisis hidráulico de los vertederos de diferentes tipos son conocidas en mecánica de fluidos o hidráulica aplicada. A partir de dichas ecuaciones puede ser obtenida la cota de la cresta de la presa vertedero, cuando son conocidos el nivel forzado aguas arriba NF , el frente de la presa vertedero B y el caudal de diseño Q_{DIS} .

A continuación, nos referiremos exclusivamente a las presas con perfil práctico tipo Creager, por ser las de mayor aplicación. En estos casos, para el escenario más general:

$$Q = m\varepsilon\sigma B\sqrt{2g}H_o^{3/2} \quad (11.3)$$

Donde:

m : coeficiente de caudal (de descarga) del vertedero que depende de las características geométricas del vertedero.

ε : coeficiente de contracción lateral, que considera el efecto de los muros y pilas en el flujo de agua.

σ : coeficiente de sumersión que considera el efecto del flujo aguas abajo en la capacidad de evacuación del vertedero.

H_o : carga total del vertedero, así:

$$H_o = H + \frac{v_o^2}{2g} \quad (11.4)$$

Donde:

v_o : velocidad de acercamiento del flujo al vertedero.

En primera instancia, cuando aún se desconocen todos los elementos geométricos del vertedero se puede asumir $m = 0,5$. Este valor debe ser ajustado una vez conocidos los parámetros geométricos del vertedero. Luego de definir la carga geométrica H , se determina la cota de la cresta de la presa vertedero:

$$\nabla_{CR.PR} = \nabla_{NF} - H \quad (11.5)$$

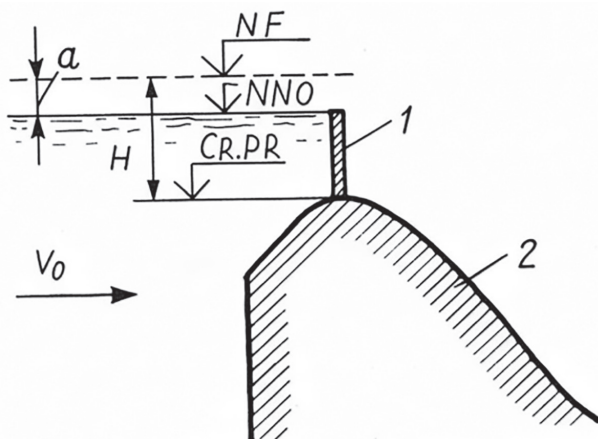


Figura 12.16. Determinación de la cota de la cresta de la presa vertedero.

1- compuerta; 2- presa.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

En los casos de presas con compuertas, para dividir el frente de vertido en secciones, las dimensiones de estas deben guardar correspondencia con las de las compuertas que, generalmente son fabricadas por empresas especializadas. En la práctica es normal adoptar orificios de iguales dimensiones, a fin de adquirir compuertas del mismo tipo y tamaño. Para el efecto se formulan una serie de variantes de división del frente de vertido B obtenido; a continuación, estas variantes son comparadas desde los puntos de vista técnico, económico y de operación. Como resultado se selecciona la alternativa más ventajosa. Al resolver este problema con frecuencia es necesario realizar un ajuste a la cota de la cresta previamente obtenida y, consecuentemente, a los valores de H , q y B .

12.5. Selección definitiva del ancho del frente de vertido y de la cota de la cresta de la presa

Como resultado de la división del frente de vertido de la presa en secciones (en el caso de presa con compuertas) los valores inicialmente adoptados de B y H pueden tener alguna variación. Los nuevos valores del frente de vertido y de la carga deben ser verificados con los correspondientes cálculos hidráulicos (para la evacuación del caudal de diseño Q_{DIS} con la cota dada del nivel forzado ∇NF), tomando en cuenta el valor mejor aproximado del coeficiente de contracción lateral ε (este coeficiente es posible definir con mayor precisión conociendo el número y geometría de las pilas). La verificación definitiva de la capacidad de flujo de los orificios, es posible únicamente luego de ser establecido no solo el número de las pilas, sino también su configuración, así como el perfil transversal de la presa vertedero, elementos de los cuales depende el coeficiente de caudal m .

En el párrafo anterior se ha partido del supuesto que todos los orificios de vertido y las compuertas que los obstruyen son iguales. Sin embargo, este enfoque para el diseño del frente de vertido no siempre puede ser justificado, particularmente cuando es considerable el número de compuertas.

Al respecto, la realidad es que el caudal de diseño Q_{DIS} para el cual es calculado el frente de vertido, se presenta muy rara vez (por ejemplo, una vez cada 10 000, 5000 o 1000 años, dependiendo de la probabilidad de ocurrencia asumida en función del nivel de importancia de la presa). Por esta razón, por ejemplo, en el caso de cimentación rocosa, cuando no existe riesgo de erosión del cauce en el tramo aguas abajo, la mayor parte de compuertas puede ser de construcción simplificada y mantenerlas cerradas. Normalmente, los caudales anuales de crecida (considerablemente menores a Q_{DIS}) en este caso pueden ser evacuados a través de pocos (por ejemplo, 1-3) orificios especiales, equipados con compuertas especiales de operación permanente.