

CAPITULO I:

CONSIDERACIONES BÁSICAS

PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO

1. CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO

1.1 Generalidades para el diseño de un sistema de riego

Para el buen y duradero funcionamiento de un sistema de riego, sus obras hidráulicas deben estar adaptadas a las condiciones de su entorno y uso. En las zonas montañosas esto implica que las obras deben acomodarse a la topografía ondulada y quebrada, las condiciones climáticas variantes (frío – calor), (seco – húmedo), la estacionalidad de los caudales, la fuerza destructiva del agua en las laderas y el arrastre de materiales sólidos. En cuanto a lo productivo, las zonas montañosas se caracterizan por épocas marcadas de producción, un acentuado minifundio y condiciones desde relativa hasta extrema pobreza de la población rural. En cuanto a la gestión social, los sistemas en zona montañosa son autogestionados por el grupo de usuarios sin interferencia o subsidio de otra institución.

Son estas condiciones generales de las zonas montañosas que forman el marco en el que tienen que desempeñarse las obras de riego. Es sabido ya, que si no se adaptan a las condiciones locales, las obras no perduran o son causa continua de conflictos y problemas. Entonces una de las tareas principales del diseñador es la de generar compatibilidad entre las obras de riego y su entorno, adecuándolas al entorno físico e hidrológico y a los requerimientos y capacidades de los usuarios. Sólo si se garantiza que las obras duren y que los usuarios puedan usarlas y mantenerlas, éstas conformarán un sistema sostenible.

Para compatibilizar las obras con su entorno, los diseñadores deben recoger toda la información posible sobre los factores que influirán en su futuro funcionamiento. Después, se inicia la elaboración de propuestas para las obras, para luego escoger las alternativas más adecuadas y proceder con el cálculo de sus detalles. Una de las herramientas que ayuda a concretizar las propuestas técnicas es la sistematización de las experiencias de diseño y construcción de obras civiles ya ejecutadas.

Cabe mencionar que la elaboración de propuestas de diseño y construcción no es responsabilidad solo del diseñador, sino que requiere de un proceso de concertación colectiva con participación de los usuarios y de carácter iterativo. Para tal proceso se precisa de un equipo de diseño con amplia capacidad de análisis y síntesis de los factores que están inmersos en el riego, con experiencia en el asesoramiento a grupos regantes en su análisis de propuestas y con las capacidad técnica para convertir los conceptos generales para el mejoramiento del riego en propuestas técnicas adecuadas.

1.1.1 Diseño de la Gestión Campesina del Riego

En las últimas décadas, en nuestro país se ha observado una creciente demanda para rehabilitación y mejoramiento de sistemas de riego por parte de las comunidades rurales.

A pesar de que las fuentes de agua están siendo aprovechadas de alguna u otra manera, gracias al esfuerzo propio de las familias campesinas, todo parece indicar que el recurso agua ha disminuido en cantidad y calidad mientras que las necesidades de riego en las comunidades rurales se han incrementado.

Las instituciones por su parte, han realizado esfuerzos para satisfacer la creciente demanda campesina a través de la formulación de programas y

proyectos, que en su mayoría se caracterizan por ser proyectos de mejoramiento de sistemas de riego existentes.

En esta dinámica institucional, las propuestas de mejoramiento de los sistemas de riego, se concentraron en el mejoramiento de la infraestructura orientadas a solucionar los problemas técnicos relacionados con el funcionamiento de la infraestructura y muy poca atención se ha prestado a las actividades de gestión de los sistemas mejorados.

Los resultados alcanzados, han mostrado que no se han logrado los objetivos planteados: las ofertas de agua propuestos en los proyectos, el número de familias a los que se pretendió llegar con riego, las áreas que se pensó regar, no fueron alcanzados tal como se propuso en los proyectos y sobre todo los cambios esperados en términos de producción agrícola no se concretaron en las magnitudes esperadas.

1.1.2 Principales elementos de la gestión base para el diseño

Diseñar la gestión de riego, como se ha mencionado anteriormente, es establecer acuerdos entre la gente involucrada en el sistema, sobre los principales aspectos de la gestión de riego, es decir, sobre las formas de definición de los derechos, la modalidad de distribuirse el agua, las formas por las que se operarán las estructuras físicas del sistema y finalmente cómo los usuarios establecerán sus aportes para encarar las actividades de mantenimiento.

Sin embargo, en el diseño de la gestión, además de existir una estrecha relación con el tipo de infraestructura a construir, se debe tomar en cuenta las características del contexto que le rodea al sistema, puesto que los componentes externos, en mayor o menor grado, influyen en los componentes de la gestión de riego.

Por lo anterior mencionado, para diseñar la gestión de riego es necesario conocer, en primer lugar, las características del entorno en la cual se desempeña el sistema de riego y tener idea sobre el grado de influencia que tienen estos componentes sobre los principales elementos de la gestión. En segundo lugar, el conocimiento de la gestión de riego campesino, para la práctica de riego, debe constituirse en el punto de partida para establecer cualquier propuesta. La gestión de riego en su forma operativa está relacionada con el conjunto de actividades que los campesinos, acorde a sus formas de comportamientos y costumbres particulares, realizan para hacer funcionar los sistemas de riego, esto se concretiza cuando los usuarios asumen la totalidad de las responsabilidades en los aspectos relacionados a la operación y distribución de agua en el sistema, la definición de los derechos al agua, la distribución de las responsabilidades para el mantenimiento de la infraestructura de riego y finalmente participan en la definición de las formas organizacionales del grupo beneficiario y en el proceso de toma de decisiones.

Cada uno de estos elementos facilita a visualizar la gestión y posibilita conocer de manera rápida la gestión en cada sistema de riego, por cuanto son las actividades concretas que aparecen durante la práctica del riego. En lo que sigue se hace breve resumen de las características de cada uno de estos elementos funcionales de la gestión campesina de riego:

1.1.2.1 Derechos al agua de riego

Los derechos al agua de riego, no debe confundirse con los derechos legales sobre el uso del agua que otorga el Estado, estos acuerdos y normas están relacionados con la normativa local que existe en cada región o comunidad, basa en las costumbres y tradiciones de la gente involucrada en los sistemas de riego, como tal, cada sistema de tiene sus propias particularidades de funcionamiento, no solo porque se trata de diversos grupos culturales:

Quechuas, Aymaras o Guaraníes; sino también por las características agroecológicas del lugar que difieren en cuanto a la ciclicidad del agua para riego y finalmente por las condiciones económico productivas del sistema agrícola propia del lugar.

Por otra parte, es frecuente observar que el ejercicio de los derechos no depende solamente del cumplimiento de las actividades programadas para la gestión de riego del sistema, sino que los derechos están vinculados con otras actividades a nivel comunitario, razón por la cual, no se puede aislar del resto de las relaciones sociales y productivas de las comunidades campesinas.

1.1.2.2 Modalidades de operación y distribución de agua en el sistema de riego

En los sistemas de riego campesino, las modalidades de distribución de agua siguen más o menos lo que se ha establecido para la distribución de los derechos al agua de riego.

Especialmente en sistemas donde los derechos se encuentran expresados en términos cuantitativos, los usuarios saben más o meno cuanta agua les tocará en un determinado periodo de riego o por lo menos cómo será la disponibilidad de agua en el periodo de estío.

Sin embargo, la preocupación central es cómo conducir, el agua que está expresado en un derecho, desde la fuente hasta las parcelas y distribuir entre los usuarios en forma equitativa.

Los campesinos de los sistemas de riego, a fin de establecer modalidades de distribución equitativa y justa, han desarrollado una diversidad de formas de operar y distribuir el agua de riego, en función a las características agroecológicas de la zona. Los criterios comunitarios aplicados para alcanzar

la equidad entre sus miembros son parte de la forma de vida y cultura local de los usuarios.

En este contexto de los sistemas de riego campesino, las actividades de distribución de agua es la que cobra mayor importancia que la operación misma de la infraestructura, puesto que estos sistemas de riego, básicamente consisten en tomas directas de río y canales de tierra que no requieren de muchas destrezas y habilidades para el manipuleo de las obras. En cambio, la distribución de agua, debido a los diferentes arreglos que se realizan en torno al acceso, requiere una mayor atención, para que cada usuario reciba lo que le corresponde.

1.1.2.3 La organización de los usuarios

Una característica generalizada de los sistemas de riego en todo Bolivia, es que en cada sistema de riego existe una organización de usuarios encargada del reparto de agua, del mantenimiento de la infraestructura y de hacer cumplir los aspectos relacionados con la resolución de conflictos específicos sobre el riego.

En la mayoría de los sistemas de riego en Bolivia, las organizaciones de base como los sindicatos agrarios y las organizaciones originarias, son las que asumen esta función específica de la gestión de riego, cuando los beneficiarios del sistema coinciden con la organización comunitaria.

En sistemas de riego pequeños, la autoridad de agua se reduce a un solo cargo, juez de aguas o alcalde de aguas, inserto en la misma organización comunitaria. Un aspecto que resalta en la generalidad de los sistemas de riego campesinos en nuestro país, es que la gestión del agua de riego es fundamentalmente de tipo comunitario, esto quiere decir que las actividades de gestión son acciones colectivas que obedecen al consenso de los usuarios.

Cuando los sistemas de riego involucran a más de una comunidad campesina, se generan instancias organizativas superiores que aglutina a varias comunidades incluso regiones, vinculados específicamente con el reparto de agua entre las comunidades campesinas.

1.1.2.4 Actividades de mantenimiento del sistema de riego

Un último elemento, sin que sea menos importante, está relacionado con las actividades del mantenimiento, que implica la participación directa de los regantes en todas las actividades de reparación o mejoramiento de la infraestructura, de manera que la infraestructura para riego permita conducir el agua desde las fuentes hasta las parcelas sin interferencias.

Las actividades centrales del mantenimiento, en sistemas de riego campesino, están relacionadas con las limpiezas de canales y habilitación permanente de tomas directas de los ríos. Las actividades consisten en el perfilado de los canales, reconstrucción de los azudes de derivación de las tomas y también se aprovecha para establecer acuerdos en cuanto a las actividades de gestión para la campaña agrícola entrante. Durante las limpiezas de canales, los miembros de las organizaciones de riego realizan las evaluaciones de la gestión de riego pasado, para que en base a ello, se tomen decisiones de nombramiento de nuevas autoridades.

La participación en las actividades del mantenimiento de la infraestructura, para las comunidades campesinas, se constituye en la actualización permanente del ejercicio de los derechos al agua de riego, implica también la confirmación del uso y acceso a los derechos al agua de riego al interior de la comunidad organizada.

1.1.3 La sostenibilidad de los sistemas de riego

Todo proyecto produce cambios a todo nivel (infraestructura, diferentes aspectos de la gestión del agua). La sostenibilidad desde la visión de los campesinos sería:

La capacidad de conversar, de volver a sintonizarse en las nuevas condiciones del sistema de riego.

Es decir es la complementariedad y el equilibrio entre la organización social, el paisaje y su territorio y las fuentes de agua e infraestructura.

El diseño de sistemas de riego debe estar necesariamente orientado a lograr la sostenibilidad, pero esto no solo significa durabilidad de las obras, sino también la sostenibilidad ambiental, económica y socio cultural.

1.1.3.1 Sostenibilidad ambiental

Los campesinos han desarrollado formas de acomodo a esa gran diversidad agroecológica, como una cultura agrícola en base a la crianza de la biodiversidad. En este sentido, la “optimización” se interpreta como la priorización de la cosecha de agua, captándola para múltiples usos, mediante la utilización de diversos métodos.

Conciliar la cosecha y crianza de agua, la salud del paisaje, así compatibilizar el manejo del agua con la diversidad de cultivos de la chacra campesina es parte fundamental de la sostenibilidad del ecosistema.

1.1.3.2 Sostenibilidad económica

La sostenibilidad económica de las comunidades campesinas están basadas en las estrategias de producción, en la crianza de la biodiversidad y la seguridad alimentaria, es así que las estrategias de las economías familiares

y comunales en base a relaciones de reciprocidad, intercambio y redistribución constituyen verdaderos potenciales.

1.1.3.3 Sostenibilidad socio cultural

La base de los sistemas de riego es la gente, entonces el modo de vivir de los campesinos es un aspecto central en la sostenibilidad socio-cultural. EN este sentido, la simbiosis entre la comunidad humana y la naturaleza, las relaciones de reciprocidad, la comunidad como modo de vida, la capacidad de autogestión y la afirmación del territorio son los potenciales de las culturas para la sostenibilidad de la vida.

1.2 Diseño conceptual del sistema y de las obras

El diseño de un sistema de riego consiste en el desarrollo de las obras hidráulicas de forma simultánea con la definición de los derechos de agua, las modalidades de distribución de agua y el fortalecimiento de la organización de los usuarios (Beccar et al, 2002). Además, implica verificar de manera continua si los usuarios son capaces de manejar, operar y mantener las obras propuestas.

El proceso de diseño inicia con su diseño conceptual, que describe las principales características del sistema y su funcionamiento. El punto de partida para el diseño conceptual es la información sobre la fuente de agua, los beneficiarios del sistema, las parcelas por regarse, los usos que se requiere dar al agua en la producción agrícola y las características generales del terreno. Sobre la base de estos datos, el diseñador y los usuarios desarrollan primeras ideas sobre los derechos de agua de cada uno de los usuarios, las unidades por regarse, los periodos de riego y las modalidades o caudales de distribución del agua.

1.3 Características del proceso de diseño

A causa de la variedad de temas por definirse en el diseño y en vista que las decisiones sobre cada elemento tiene consecuencias para los demás, el proceso de diseño debe ser:

- Un proceso colectivo de concertación. En el proceso de diseño participan distintos actores con distinto rol y responsabilidad en su desarrollo. De una parte, participan profesionales técnicos, que tienen la responsabilidad de producir un diseño que se adecue a los deseos y capacidades de los regantes quienes dan información sobre sus prácticas y capacidades de gestión y evalúan las propuestas de los profesionales técnicos.
- Organizar una efectiva coordinación entre estas partes, exige de ambas insistencia, paciencia y grandes esfuerzos de entendimiento mutuo (Beccar et al, 2002)
- Un proceso iterativo. En un proceso iterativo, después de tomar decisiones preliminares sobre un componente, se estudian sus consecuencias para los demás componentes, incluyendo los que ya fueron definidos, hasta generar compatibilidad entre todos. Se distingue claramente de un proceso lineal en que no se reabren fases ya concluidas.
- Un proceso que va de “líneas gruesas” hacia mayor detalle. En las distintas fases del proceso iterativo las decisiones se vuelven cada vez más concretas y de mayor detalle. Después de un diseño conceptual de todo el sistema, se pasa a las fases de diseño detallado de la gestión y el diseño hidráulico y constructivo de las obras.

1.4 Construcción de las obras

En el proceso de construcción de las obras, se convierten las obras diseñadas en obras reales. Es normal que en el proceso de construcción se adecuen detalles del diseño de las obras. Si el proceso de diseño fue bien llevado y sus resultados concertados entre proyectistas y usuarios, las adecuaciones solo conciernen cambios de detalle, como ajustes de pendiente de una rápida o cambio de posición de una compuerta. Si el diseño no fuera concertado, las adecuaciones en el momento de la construcción suelen ser mayores por ser el momento en el que los beneficiarios ven cómo y dónde se van a construir las obras. Existen proyectos donde se tuvo que cambiar hasta los emplazamientos de los canales y las demás obras, porque no se concertó el derecho de paso. Por razones de eficiencia del trabajo y rentabilidad económica, tales cambios hay que evitar a todo costo. Es mejor invertir más tiempo y dinero en la concertación de un diseño, que volver a repetir todo en el momento de la construcción.

En la construcción de los proyectos de riego participan los beneficiarios y empresas constructoras. Es importante definir una buena división de trabajo entre ellos, haciendo el uso más efectivo y eficiente de las capacidades de cada uno. En la división de trabajo debe mantenerse cierta independencia entre las actividades de ambos, para evitar que el retraso de uno afecte en el cumplimiento del otro. Es sabido que en todos los proyectos, tanto las empresas constructoras como los beneficiarios demoran en el cumplimiento de sus tareas. La suma de sus demoras genera el retraso excesivo, tan usual en la fase de construcción.

Para que resulten las obras de buena calidad, es imprescindible que la construcción de las obras cuente con especificaciones detalladas y vaya acompañada de una supervisión continua y minuciosa por parte de los ingenieros responsables y experimentados.

Está comprobado que la mayoría de los defectos en las obras son consecuencia de una deficiente construcción y no tanto de malos diseños. Existen múltiples ejemplos de soleras y paredes descascarándose a consecuencia de mezclas pobres o fraguado inadecuado del hormigón. Tales problemas no se resuelven con mejores diseño, sino con un control estricto y reglas de responsabilidad de los constructores y supervisiones.

Durante la prueba hidráulica se efectúa un primer ensayo de la calidad de las obras. Es buena práctica involucrar a los futuros usuarios en el control de calidad de sus obras, para asegurar su conformidad con los resultados de la construcción. Hay que aprovechar que los usuarios suelen tener buena idea sobre las posibles fallas en las obras, por su presencia en los trabajos y su profundo conocimiento del entorno.

1.5 Criterios generales de diseño y construcción

El diseño y la construcción de las obras de riego en los sistemas autogestionados en zonas montañosas deben basarse en los siguientes criterios generales:

- ✓ Sostenibilidad y durabilidad.
- ✓ Funcionalidad y flexibilidad.
- ✓ Manejabilidad y transparencia.
- ✓ Mantenibilidad.
- ✓ Seguridad.
- ✓ Eficiencia de costos.

1.5.1 Sostenibilidad y durabilidad

La sostenibilidad se define como la capacidad de los usuarios de asegurar que la infraestructura siga cumpliendo sus funciones en el tiempo. La sostenibilidad tiene una relación estrecha con la durabilidad de las obras, pero no es exactamente lo mismo. La durabilidad acentúa la permanencia de la obra en el tiempo. En la mayoría de los casos, ésta es una de las condiciones para la sostenibilidad, porque al contar con obras duraderas, se evita la necesidad de reponerlas. En general, entonces, debe aspirarse a la durabilidad de las obras, lo que significa que deben ser resistentes y sufrir en lo mínimo de erosión o desgaste. Además, su diseño debe basarse en la presunción que inevitablemente sufrirán algún grado de abuso de parte de los usuarios (quienes normalmente no son cuidadosos, ni puntuales en actividades de mantenimiento o reposición).

Se sabe que justamente en las zonas montañosas es difícil garantizar que todas las obras perduren por un periodo largo, a causa de la inestabilidad del entorno donde se las construye. Hay que tomar en cuenta que en condiciones de inestabilidad del terreno, a veces deben buscarse obras que en vez de ser duraderas, sean fáciles de reponer y cuyo remplazo esté dentro de las capacidades técnicas y económicas de los usuarios. Así, el sistema será sostenible, aunque no todas las obras sean duraderas.

En la búsqueda de diseños para la sostenibilidad, deben aplicarse los instrumentos de análisis de la ingeniería de riesgo para minimizar los riesgos que corren las obras y los riesgos que éstas causan. La aplicación de la ingeniería de riesgos tiene como objetivos:

- i) determinar el emplazamiento óptimo de canales y otras obras, basado en un análisis de riesgo y posibles pérdidas,
- ii) mitigar las posibles inestabilidades y riesgos generados por la construcción de las obras y

- iii) diseñar sistemas de riego que causen una mínima degradación ambiental.

La aplicación de los análisis de riesgo puede resultar en proponer medidas de protección de las obras de riego, que encarecen el proyecto, pero aumentan su sostenibilidad.

1.5.2 Funcionalidad y flexibilidad

La funcionalidad se define como la capacidad de las obras de conducir el agua en la forma deseada y de regular esas obras de forma tal que implementen las reglas de distribución acordadas. Para que las obras sean funcionales deben contar con un diseño y dimensiones para conducir los caudales extremos (mucho y poca agua) y permitir su efectiva distribución hacia los sectores del área de influencia.

Aparte de su funcionalidad auténtica, debe considerarse los otros usos que se dan a las obras construidas. Las paredes de los canales se emplean como sendas, los desarenadores y estanques como piscinas, los colchones de disipación se vuelven lavanderías y los acueductos también sirven como puentes peatonales. El diseñador debe diseñar sus obras de forma tal que por una parte estos 'usos inapropiados' no afecten su funcionalidad original, ni pongan en riesgo su durabilidad, y por otra, no se comprometa la seguridad de las personas y los animales.

La flexibilidad en el diseño se refiere a la capacidad de asimilar cambios en las condiciones y reglas de uso de la infraestructura. Las obras deben diseñarse de forma tal que permitan una cierta flexibilidad en su operación bajo cambiantes circunstancias de disponibilidad de agua (época de mayor y menor disponibilidad de agua) y variaciones en las modalidades de distribución, cédulas de cultivos y sus requerimientos de agua. Para el diseño deben estimarse las cambiantes circunstancias que puedan darse en el

desarrollo futuro del sistema (por ejemplo la extensión del área de riego, la incorporación de otros cultivos, la redistribución de derechos de agua).

1.5.3 Manejabilidad y transparencia

La manejabilidad se refiere a la capacidad de los usuarios de operar las obras de forma que éstas cumplan su función. La transparencia añade a este criterio la posibilidad que todos los usuarios puedan controlar el cumplimiento del manejo acordado. Una mayor transparencia en las obras permite a todos revisar la correcta aplicación de las reglas de distribución y evita fricciones o conflictos sobre el reparto del agua.

El criterio de manejabilidad se aplica principalmente a las obras de distribución de agua, por su parte. El criterio de transparencia es también importante en las obras de captación y conducción. Para asegurar la manejabilidad y la transparencia de las obras, éstas deben ser sencillos, fáciles de entender e inequívocas en la apreciación de su funcionamiento. Por lo demás, la manejabilidad gana importancia sólo en las pocas obras que requieren un manejo específico, como por ejemplo las cámaras de purga de un sifón invertido.

1.5.4 Mantenibilidad

La mantenibilidad se define como la capacidad de los usuarios de conservar las obras en un estado adecuado para el cumplimiento de su función y asegurar su durabilidad. Los trabajos de mantenimiento comprenden la limpieza y el mantenimiento rutinario, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo o de emergencia.

La mantenibilidad de la obra no es sólo una característica intrínseca de la obra, sino depende también de la capacidad de los usuarios para movilizar los recursos necesarios para las tareas requeridas: mano de obra, materiales

locales, dinero para materiales o servicios ajenos y conocimiento y habilidades necesarios para efectuar las reparaciones. Al diseñar las obras, proyectista y regantes deben analizar sus futuros requerimientos de mantenimiento y averiguar si los regantes son capaces de movilizar los recursos suficientes para mantener las obras.

Por otra parte, en el diseño debe asegurarse que todas las obras que requieren limpieza y mantenimiento sean accesibles y cuenten con el espacio suficiente como para efectuar las operaciones requeridas. Asimismo, debe pensarse en el espacio necesario para depositar los materiales de la limpieza, sin que estas vuelvan a obstruir las obras.

1.5.5 Seguridad

Para generar un sistema seguro, exento de todo peligro o riesgo, el proyectista debe diseñar las obras de forma tal que se asegure el buen funcionamiento del sistema, y en caso de fallo de una obra o persona no se produzcan accidentes. La seguridad toma especial relevancia en el contexto montañoso en vista de la inestabilidad de los terrenos y los altos riesgos de erosión en las laderas empinadas a causa de rebalse de agua.

Las medidas de seguridad en el diseño cubren una gama amplia: entre ellas, ubicar obras de control de flujo, reforzar las estructuras, construir obras de protección (por ejemplo muros de contención), entubar canales en zonas inestables y ejecutar medidas de protección para evitar accidentes personales (por ejemplo escaleras en los estanques). Para evitar problemas de rebalses, es necesario contemplar en diseño “rutas seguras de desagüe” que garanticen que no ocurran daños aun cuando se opere el sistema de forma inadecuada.

1.5.6 Eficiencia de costos

De entrada, se acepta que las obras de riego en la zona andina son caras y requieren altas inversiones por hectárea a causa del difícil acceso, los altos costos de transporte de materiales y gente, las condiciones climáticas que impiden avances continuos y la inestabilidad de los sitios de construcción. A estas se añade la necesidad de construir obras firmes, duraderas y seguras.

Sin embargo, en el diseño deben manejarse parámetros de costos que eviten la construcción de obras excesivamente caras. En Bolivia, para tal efecto se definieron montos máximos de inversión pública por hectárea y por familia. Dentro del margen de los montos máximos, el proyectista debe elaborar diseños alternativos que cumplan con los criterios localmente priorizados. La conveniencia de las alternativas se analiza tratando de conseguir la mayor evasión de riesgos que amenazan la sostenibilidad de las obras y la agricultura regada, y de conseguir también la mayor eficiencia de costos, entendida como la generación de un mayor volumen de agua nueva o ahorrada con un monto de inversión determinado.

En el análisis de los costos de los proyectos se diferencian i) los costos iniciales de inversión, ii) los costos de mantenimiento y iii) los costos de rehabilitación o reposición. En vista que la inversión inicial suele contar con una subvención de parte del estado o agencias de cooperación, son los dos últimos costos los que deben interesar más al proyectista a la hora de buscar un diseño económicamente eficiente.

1.6 Criterios hidráulicos y constructivos para el diseño de canales

Una vez establecidos los trazos y caudales de diseño de la red de canales, se diseñan los detalles de cada tramo (sección y pendiente). En el diseño de los tramos se consideran los siguientes criterios específicos:

- En todos los canales de riego debe mantenerse un flujo subcrítico, para evitar excesiva erosión de solera y paredes. Desniveles mayores de la topografía se salvan mediante caídas o rápidas.
- La dimensión de cada tramo se basa en los caudales máximos y mínimos por conducirse a lo largo del año.
- En canales de tierra, para fines de estabilidad se utilizan secciones trapeciales
- En canales revestidos, se prefieren secciones trapeciales por el ahorro de costos. Por razones de facilidad de construcción y menor pérdida de terreno puede optarse por canales rectangulares, pero estos tienen un costo mayor.
- Si hay una gran variación entre los caudales de una época y otra, se sugiere usar una sección trapecial, porque asegura que también con caudales menores se mantiene un tirante considerable.
- El ancho mínimo de la solera es 0.30 m para permitir el uso de las herramientas usuales para la limpieza. Sólo en caso de caudales muy pequeños (del orden de los 20 lit/s o menores) puede optarse por un ancho más reducido, aceptando que así se complica el trabajo de limpieza. Para caudales tan reducidos se recomienda el uso de tubería.
- La velocidad mínima en los canales debe garantizar que no se deposite el material sólido en el agua. Su valor absoluto depende de la cantidad y el tipo de material sólido en suspensión. En los canales de

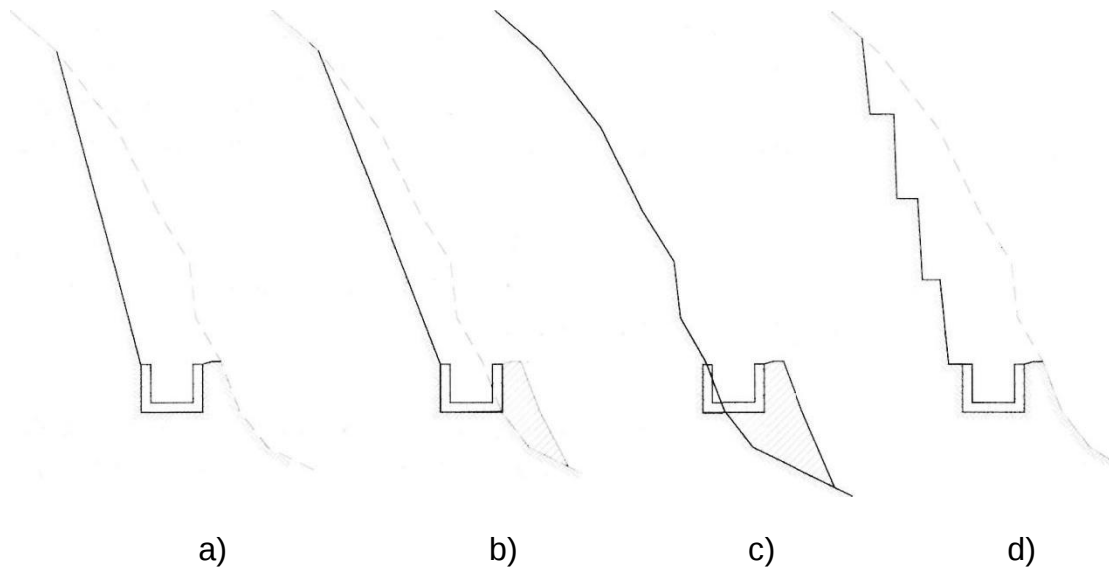
tierra la velocidad mínima debe ser 0.3 m/s, en canales revestidos 0.7 m/s.

- A lo largo de la red de canales, la capacidad relativa de transporte de material en suspensión y la capacidad de arrastre de material de fondo no deben decrecer.
- La fuerza tractiva del agua no debe exceder el límite de resistencia de solera y paredes.
- Los canales deben ubicarse en terrenos estables.
- En caso de canales en laderas escarpadas con peligro de deslizamientos o derrumbes, se los debe proteger con una tapa o losa
- Las coronas de los bordos deben tener un ancho de por lo menos 0.3 m para permitir el caminar al lado del canal. En los canales en laderas, solo el bordo exterior debe ser de 0.3 m, el bordo interior puede ser de hasta 0.2 m.

1.6.1. Construcción de canales en ladera

Los canales en ladera requieren especial atención en cuanto a la estabilidad de su construcción. Para evitar inestabilidad estructural en el canal, por lo menos la pared exterior del canal y preferiblemente también su bordo exterior, deben apoyarse dentro del perfil original de la ladera como se muestra en las situaciones a) y b) de la Figura 1 hay que evitar el emplazamiento fuera del terreno original, por la inestabilidad y permeabilidad del material de relleno (situación c). Lo óptimo es un canal en terreno firme con terraceo en la ladera (situación d). Por lo menos se debe construir una berma aguas arriba del canal, con un ancho mínimo de 0.5 m.

Figura 1 Ubicación de canales en ladera



Si bien este método es oneroso en cuanto a la relación excavación - relleno, garantiza una mayor estabilidad y durabilidad del canal, además de evitar filtraciones en el terreno recién compactado.

1.6.2 Revestimiento

Por revestimiento de un tramo de canal, se entiende la aplicación de una capa de material impermeable que reduce las filtraciones de agua y en caso de ser de material rígido da mayor firmeza a su solera y paredes.

El revestimiento de tramos de canal tiene como principales objetivos:

- Disminuir la pérdida de agua por infiltración. Se resume en una mayor disponibilidad de agua y la posibilidad de regar una superficie mayor.
- Aumentar la velocidad del agua. Es aconsejable en tramos de poca pendiente, donde una menor velocidad causaría sedimentación de los materiales sólidos en el agua. En canales revestidos, la velocidad es de 1.6 a 2 veces mayor a la velocidad en canales de tierra.

- Reducir la sección de los canales. Disminuye la sección de excavación y es especialmente recomendable en sitios donde hay poco espacio o para evitar la pérdida de terrenos agrícolas.
- Asegurar la solidez del canal, por ejemplo en caso de suelos fácilmente deslizables.
- Disminuir los costos de mantenimiento. Se limita a limpieza y reposición de revestimiento dañado.

El revestimiento tiene un costo alto, por lo que al momento de decidirse revestir o no ciertos tramos deben considerarse sus costos y beneficios (inversión de dinero versus ahorro de agua). Para disminuir el volumen de revestimiento, se busca una sección con el menor perímetro mojado por área hidráulica determinada. En este aspecto, la sección trapecial es más económica que la rectangular.

El techo de inversión de los proyectos de riego determina que en la mayoría de los proyectos de riego no es posible, aparte de no ser rentable, revestir todos los tramos de canal. La experiencia demuestra que en la mayoría de los sistemas se consigue el mayor ahorro de agua revistiendo los canales principales. Suele coincidir con el deseo de los regantes, quienes prefieren el revestimiento de los tramos troncales por ser compartidos por todos y generar ventajas por igual. En casos excepcionales puede hacerse un análisis de todos los tramos para determinar la máxima ganancia de agua con el fondo de revestimiento disponible, tomando en cuenta la eficiencia de conducción de cada uno, su tiempo de uso y los caudales que conducen.

En caso de revestir partes de un solo canal (principal), es necesario determinar los tramos de mayor urgencia comparando las pérdidas de filtración en cada uno. Después de una o dos gestiones de uso, es fácil identificar en el terreno los puntos de mayores pérdidas.

1.6.3 Materiales de revestimiento

El hormigón es uno de los materiales más resistente a la erosión, por lo que se prefiere aplicarlo en aquellos tramos de canales donde se prevén altas velocidades del agua. Con un tirante apropiado son permisibles velocidades de hasta 3 m/s. El hormigón evita el crecimiento de malas hierbas, mejorando las características del flujo y reduciendo los costos de conservación. Resiste el paso de personas y animales, que pueden causar quebraduras en canales revestidos con otro tipo de material.

Una desventaja es que el hormigón es susceptible al daño del agua con sales y a los cambios bruscos de temperatura. Otra desventaja de los revestimientos de hormigón simple es su falta de resistencia a esfuerzos de tensión o tracción. En el revestimiento se producen grietas a causa de los cambios de humedad y temperatura. También las arcillas expansivas son un gran peligro por su tendencia a levantarlos.

Para las dimensiones de muros y solera, el PRONAR recomienda un espesor de 0.20 m a fin de dar la resistencia necesaria para los trabajos de desvío de agua y para la circulación de usuarios. Sin embargo, con fines de impermeabilización y sobre todo en canales trapezoidales, las normas recomiendan como máximo espesores de 0.10 m. En canales excavados, paredes de hormigón ciclópeo de 0.15 m dan buenos resultados.

Una aplicación especial de hormigón es el canal prefabricado. Pueden fabricarse partes de canal de entre 1 a 2 metros, que después se llevan al sitio de construcción. En Bolivia hay poca experiencia con canales prefabricados. En otros países existen buenas experiencias con canales para secciones menores (hasta 150 l/s). Su aplicación en la zona montañosa es limitada por las dificultades de acceso a los sitios de construcción y los costos de transporte.

El revestimiento de mampostería de piedra da buenos resultados en cuanto a reducción de filtraciones siempre y cuando las piedras o ladrillos estén bien colocados y cuenten con una buena cobertura de hormigón. Donde hay materiales y mano de obra, la mampostería es una buena alternativa, más aun porque su mantenimiento y reparación son fáciles de ejecutar con medios locales. La mampostería de piedra es una alternativa más barata que el hormigón.

En casos especiales, puede optarse por revestimientos con tuberías (PVC, PE, hormigón o acero) o barriles: metálicos cortados. Las tuberías se prefieren en zonas de deslizamientos frecuentes o secciones de roca donde es difícil excavar una sección adecuada y más aún mantenerla.

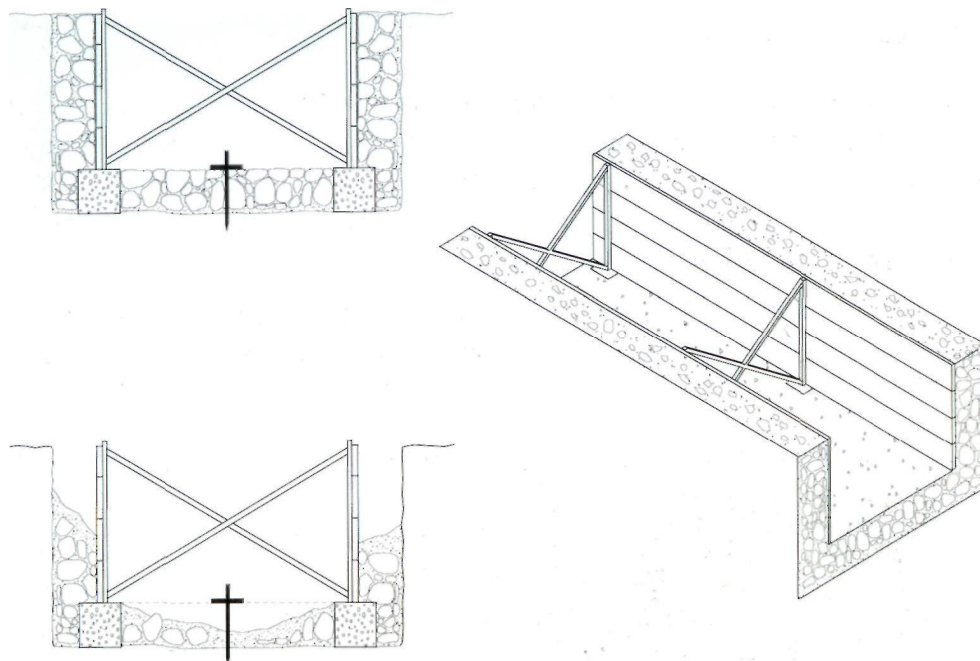
1.6.4 Construcción de canales de hormigón

Un tema de gran preocupación en la construcción de canales de hormigón es la relación entre la solera y la pared, por ser la junta donde ocurren las mayores filtraciones y por ser un enlace de débil adherencia.

Para obtener la máxima coherencia estructural y filtraciones mínimas, se recomienda vaciar solera y paredes al mismo tiempo, generando un canal de un solo cuerpo. Para este vaciado, primero se colocan dados de hormigón de 15 x 15 cm en el fondo del canal, cuya parte superior coincide con la altura de la solera. La distancia entre los dados debe ser igual a la longitud de las formaletas o maderas del encofrado. Sobre los dados se coloca el encofrado para la parte interior de la pared, apoyadas por listones transversales. La parte exterior de las paredes se apoya en el terreno, un encofrado externo o un relleno de piedras.

El vaciado se inicia desde las dos paredes. Por debajo de las formaletas, fluirá mezcla hacia el centro de la solera. Posteriormente, se añaden piedras y mezcla para igualar la solera al nivel deseado

Figura 2 Construcción de paredes y solera en un solo vaciado



En caso de no aplicarse este método, es conveniente construir primero la solera y después las paredes. En hormigón ciclópeo, se dejan piedras sobresalientes, cada 0.5 m, para aumentar la adherencia con las paredes. En hormigón simple, se aumenta la longitud de la junta entre solera y paredes, lo que también ayuda a disminuir filtraciones. Similar prolongación de la junta se recomienda aplicar en las juntas frías de construcción.

En hormigón ciclópeo se recomienda para la construcción de la solera que primero se vacíe una capa de hormigón. Sobre esta capa se colocan las piedras, siempre manteniendo una distancia mínima de 1 cm entre ellas. Después se aplica otra capa de hormigón.

En canales donde se espera una mayor tracción sobre el piso, se opta por la construcción de la solera con 'piedras ahogadas': sobre la cama de hormigón, se colocan con cierta precisión piedras contiguas. Encima de las piedras puede aplicarse una capa de hormigón opcional. Las piedras en la superficie disipan parte de la energía del agua, generando además una mayor rugosidad y menor velocidad en el canal.

Cuando se construyen canales de hormigón con encofrado en la cara externa de la pared, se recomienda rellenar el espacio exterior con material seleccionado (más fino), que se compacta manualmente.

1.6.5 Juntas de contracción

Una losa de hormigón utilizada como revestimiento está sujeta a esfuerzos combinados debido a los cambios de temperatura y humedad. Estos pueden causar agrietamientos por contracción, por los que escurrirán las filtraciones.

El control de las grietas se logra con ranuras transversales a intervalos adecuados. Las ranuras sobre el hormigón deben tener una profundidad del orden del 35% del espesor del revestimiento y un ancho de un centímetro. Para evitar las filtraciones, se sellan las ranuras con un material plástico, preferiblemente asfáltico. En canales con un espesor de revestimiento de 20 cm, las juntas de contracción se localizan cada 3 m. En revestimientos de menor espesor, las juntas son más contiguas.

1.6.6. Juntas de dilatación

Donde se juntan dos diferentes materiales de construcción (por ejemplo un canal de hormigón ciclópeo con un acueducto de hormigón armado), sus distintos coeficientes de expansión generan presiones internas que pueden causar su ruptura. Para evitar tales presiones, se construyen juntas de dilatación entre los dos cuerpos distintos. La apertura en la junta de dilatación depende de la longitud de los cuerpos y su grado dilatación. La apertura se rellena con una espuma de plástico. Para impermeabilizar la junta de dilatación se usa cinta 'waterstop', una banda flexible e imputrescible cuya forma permite su expansión sin rotura (Figura 3).

Al colocar la cinta “waterstop” hay que asegurar que a los lados de la cinta quede un espesor de revestimiento suficientemente grueso para que no se quiebre. En algunos casos se ensanchan los cuerpos en el punto de contacto para generar el espacio suficiente para acomodar armadura y “waterstop”.

Figura 3 Cinta waterstop entre canal y acueducto



1.6.7 Situaciones que conviene evitar

- El problema más frecuente en los canales revestidos es la mala calidad de su construcción, sea por mezclas mal dosificadas, mala calidad de los agregados, tamaño excesivo de las piedras desplazadoras en el hormigón ciclópeo, hormigonado a temperaturas más bajas que las permitidas o insuficiente cuidado contra la helada durante la primera etapa del fraguado. En la mampostería de piedras se observa problemas por insuficiente limpieza de las piedras, defectos en el sellado de las juntas y la insuficiente cantidad de cemento dentro del mortero.
- A causa de la mala calidad de ejecución del revestimiento, es frecuente que los valores de rugosidad del diseño no se reflejen en la construcción. En consecuencia los canales no tienen la capacidad de conducir el caudal predeterminado.

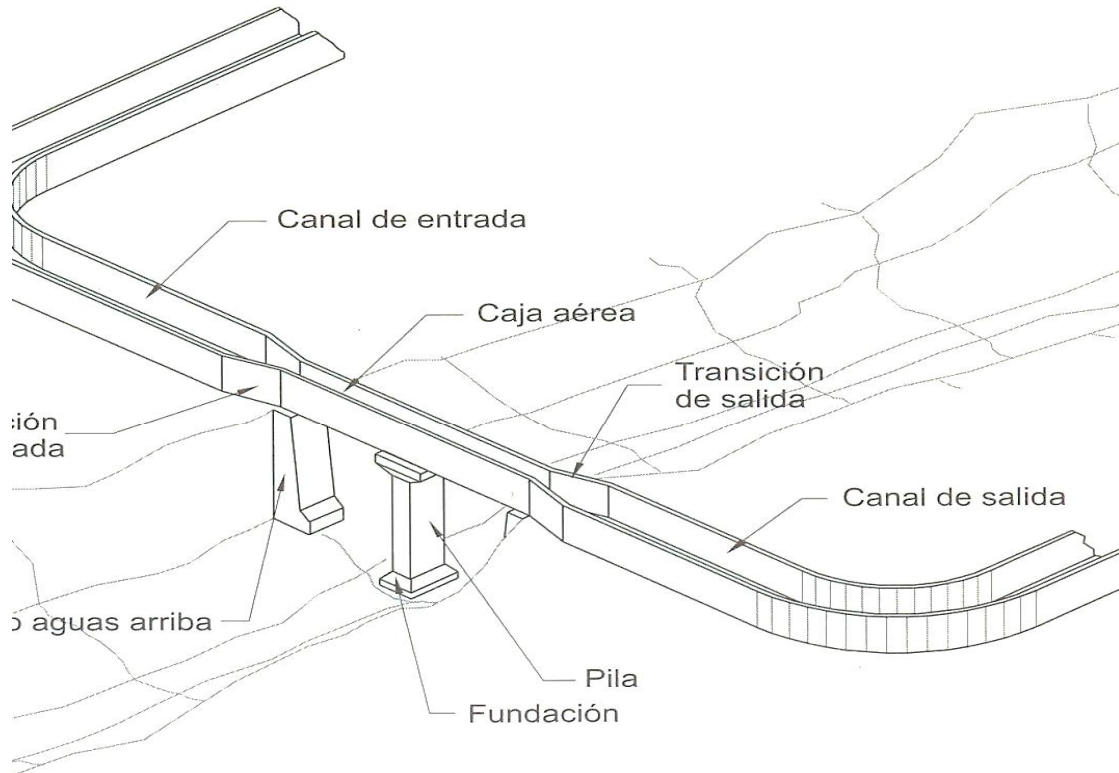
- Otro problema general es la filtración de agua por las juntas de construcción, principalmente por las entre solera y pared.
- En varios sistemas mejorados, se observa una atención deficiente al diseño del estado de flujo en los canales. A menudo se construyen tramos con un flujo supercrítico, pero sin tomar las precauciones del caso: aumentar el bordo libre, evitar curvas y generar disipadores en el cambio hacia un flujo subcrítico. En consecuencia se generan rebalses y salpicaduras que amenazan la estabilidad de las obras.
- En algunos casos, se diseñan los canales revestidos con velocidades mayores a las máximas permitidas, sobreestimándose la dureza del revestimiento. La práctica demuestra que en canales que funcionan con régimen supercrítico una solera construida para condiciones de flujo normal puede desgastarse en muy poco tiempo (menos de un año de uso) sobre todo en sistemas que funcionan con agua turbia.
- Algunos diseñadores proponen introducir en la solera de las curvas un peralte para neutralizar el efecto de la sobreelevación en la curva exterior. Esta solución no da buenos resultados, porque los peraltes no se ajustan a los distintos caudales que se conducen a lo largo del año, pero sobre todo porque las profundidades mayores al interior de las curvas se llenan rápidamente con depósitos sólidos. Además son bastante complejos de construir

1.7 Criterios hidráulicos y constructivos para el diseño de puentes canales

Un acueducto es la estructura más común para conducir agua a través de una depresión topográfica como un valle, una carretera, una quebrada, un arroyo o un río. Hidráulicamente se compone de un conducto elevado, con transiciones de entrada y salida cuando su sección es distinta a la del canal.

Estructuralmente se compone de una caja aérea o viga continua con sección constante en forma de “U”, dos estribos para apoyar sus extremos y, cuando es necesario pilas intermedias con sus respectivas fundaciones.

Figura 4 Componentes hidráulicos y estructurales de un puente canal



1.7.1 Estribos

Los estribos son los apoyos extremos de la caja aérea y su planteamiento estructural dependerá de las condiciones locales del suelo de cimentación. Así, se podrá plantear un estribo tipo muro de contención para terrenos de cimentación de mediana o gran capacidad admisible de carga. En suelos de

muy baja capacidad portante se suele utilizar estribos utilizando cajas de sedimentación.

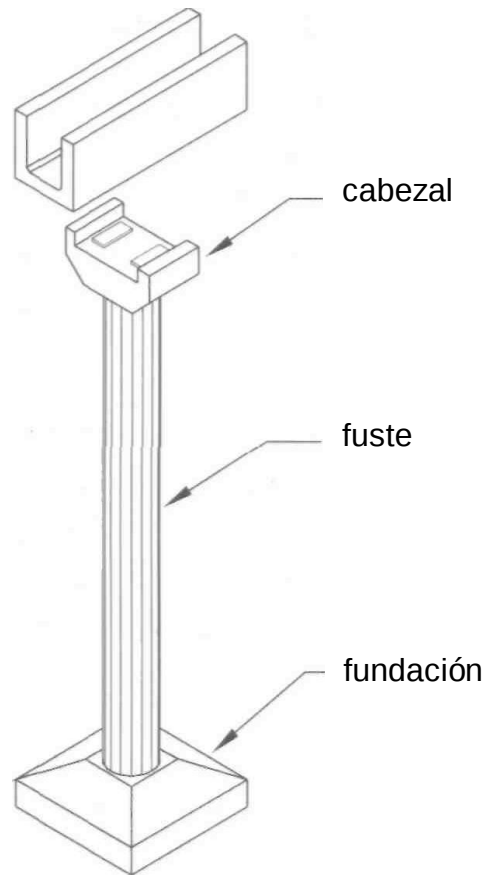
En el diseño de los estribos se destaca la relación interdisciplinaria entre el ingeniero estructural y el ingeniero de suelos para determinar con exactitud los parámetros de diseño del terreno posterior al muro, determinar la profundidad de cimentación y determinar la capacidad de carga del terreno. Ésta última depende no solo de las características propias del suelo, sino también del tamaño de la cimentación, de la excentricidad y de la inclinación de la resultante de las fuerzas actuantes.

También cabe destacar la interrelación entre el ingeniero estructural y el ingeniero hidráulico para definir con exactitud el nivel más adecuado de la caja aérea, así como el potencial erosionable del terreno ante una avenida extraordinaria en el período de retorno determinado por el estudio hidrológico.

1.7.2 Pila

La pila es un elemento estructural que sirve de apoyo intermedio de la caja aérea (Figura 5). En el caso que el acueducto cruza una quebrada o río, es recomendable evitar la necesidad de emplazar pilas dentro del cauce, para así evitar el riesgo de erosión en sus fundaciones. Si por la longitud de la luz es inevitable colocar pilas, se deben tomar todas las medidas de seguridad en el diseño, como la protección de las pilas contra la socavación de sus fundaciones y contra el deterioro del fuste por las colisiones del material que arrastre el torrente. La protección con gaviones es la más aconsejable por su economía y facilidad de instalación, como por su facilidad de reposición.

Figura 5 Componentes de una pila



Uno de los errores más comunes y notorios en el diseño de acueductos es la insuficiencia de estudios del suelo de fundación. Las características del suelo de fundación determinan las características de los elementos de fundación y condicionan la longitud de los tramos entre pilas. Cuando el diseño estructural sobreestima la capacidad portante del suelo, aparecen los problemas de asentamiento y consiguientes problemas de flujo en el acueducto.

1.7.3 Caja aérea

Tiene la función de permitir el paso elevado de las aguas del canal. Se asemeja al tablero de un puente y para su diseño se realiza dos tipos de análisis:

1.7.3.1 Análisis longitudinal

Se considera al conjunto del acueducto, idealizando la estructura como una viga simplemente apoyada, con una carga repartida equivalente a su peso propio y una carga repartida equivalente al peso del tirante del agua a lo largo de la estructura. Las paredes del acueducto y la solera actúan como vigas y se las diseña para satisfacer el estado de carga más crítico, esto es, cuando el acueducto esté lleno de agua. La experiencia recomienda evitar luces mayores a los 10 metros.

El esfuerzo más importante en el análisis longitudinal es la flexión en las paredes del acueducto. Éstas se diseñan por el Método de los Esfuerzos de Trabajo, para tener un mejor control del ancho máximo probable de las fisuras por flexión. Tratándose de una estructura que debe asegurar estanqueidad, el ancho admisible de las fisuras es de una décima de milímetro. Una fisuración mayor es inadmisibles porque las filtraciones de agua a través de la estructura, combinadas con el oxígeno y anhídrido carbónico de la atmósfera, atacan al hierro de la armadura y lo oxidan. Paralelamente, el volumen del óxido al formarse es unas ocho veces mayor que el del metal que lo origina, lo que a su vez da lugar a más fisuras (Jiménez Montoya et al, 2000). Así, el proceso de corrosión de la armadura entra en una espiral divergente.

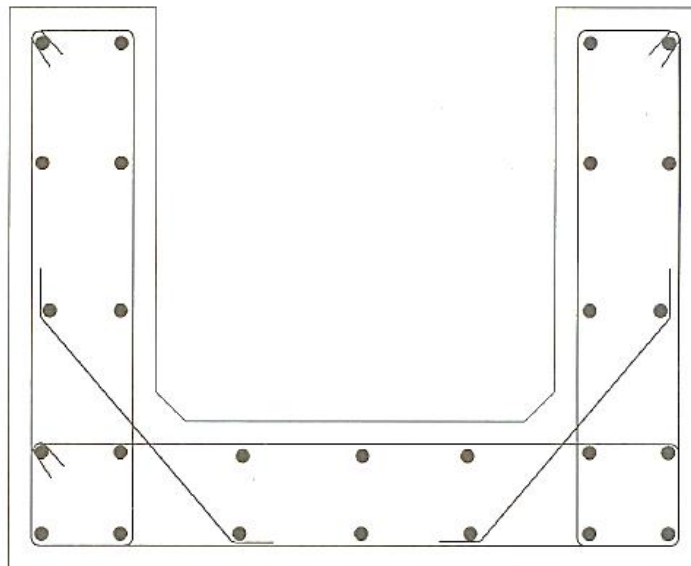
La flecha originada por flexión en un acueducto se traduce en alteraciones no previstas en el flujo y en estancamientos de agua cuando el canal no se

encuentra en operación. Una manera de minimizar el problema de la flecha es la de prever una contra flecha en el encofrado. Ésta debe tener la magnitud suficiente para que, una vez puesta la estructura en funcionamiento, las cargas permanentes de peso propio y tirante de agua flexionen la estructura hasta reponer su horizontalidad.

1.7.3.2 Análisis transversal

Para el análisis transversal, se toma una franja de ancho unitario para analizar los esfuerzos de corte y flexión transversal por la presión hidrostática en las paredes verticales y en la losa del fondo. Para ayudar en la absorción de esfuerzos transversales es beneficioso colocar, de tanto en tanto, vigas superiores que atiranten las paredes ante el empuje transversal del agua. Estas pequeñas vigas de arriostre, si están espaciadas a no más de unos 80 cm entre bordes, ayudarán al acueducto a cumplir su función secundaria de puente peatonal.

Figura 6 Sección transversal de una caja aérea con detalla de armaduras



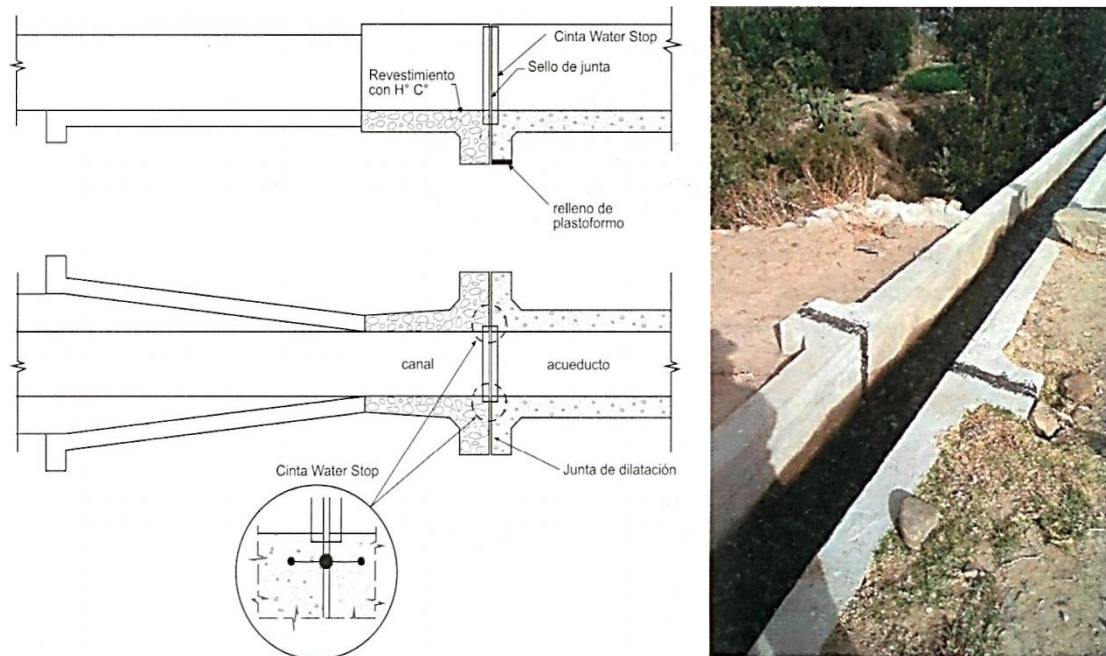
En el cálculo estructural de los acueductos se debe tomar en cuenta la actividad sísmica que ocurre en la zona montañosa de Bolivia. La mayoración de las cargas verticales y la introducción de aceleraciones horizontales deben estar de acuerdo con la zona sísmica de que se trate.

Lo usual es construir la caja aérea de hormigón armado. Existe la posibilidad de recurrir a otros materiales como madera, hormigón simple, mampostería o metal, pero esas alternativas no son prácticas. La madera tiene limitaciones de conservación y respuesta al intemperismo. El uso de hormigón simple o de hormigón ciclópeo, por su ínfima resistencia a los esfuerzos de tracción, se ve limitado a tramos muy cortos. Los acueductos de mampostería se ven también limitados en su longitud debido a la forma de su respuesta estructural a las cargas, gravitatorias y sísmicas. Los acueductos metálicos tienen la mejor relación resistencia / peso propio, permiten luces mayores pero son más sensibles al intemperismo y son costosos, especialmente cuando se necesita darles una rigidez acorde al uso peatonal.

1.7.4 Aspectos constructivos de la interfase canal – acueducto

El cambio de tipo de estructura canal-acueducto exige la disposición de juntas constructivas cuya estanqueidad se controla con cintas waterstop. Las cintas waterstop son elementos fabricados de goma, de neopreno o de policloruro de vinilo (PVC, por sus siglas en inglés Polyvinylchloride), de gran resistencia y elasticidad, que incorporados en las juntas de hormigón aseguran una perfecta estanqueidad en las obras donde se quiere resistir la acción de las presiones de agua.

Figura 7 Detalles de la conexión entre canal revestido y acueducto



Estas cintas están diseñadas con nervaduras múltiples que permiten una buena adherencia, acoplamiento y retención del hormigón. Tiene además un centro protuberante que ayuda a resistir la presión originada por los movimientos de las estructuras. Para lograr una junta impermeable, la cinta debe estar perfectamente embebida y adherida en el hormigón.

La fijación del waterstop se realiza fácilmente; es necesario sujetar la cinta a la armadura y al encofrado a fin de que no se desplace durante el vaciado del hormigón. La sujeción a los hierros de la armadura se hace mediante ataduras con alambre. En cuanto a la vinculación con el encofrado hay varias prácticas usuales, dependiendo del perfil elegido, de si se va a dejar junta cerrada o abierta y también de la secuencia de hormigonado.

Adicionalmente, algunas normas recomiendan que en juntas de construcción entre estructuras de geometría y comportamientos diferentes, como en la unión de la sección del canal con una transición, se rigidicen las zonas de

unión para aminorar el desplazamiento relativo entre las estructuras. Esta recomendación a veces forma parte de las exigencias de agencias financiadoras, pero a la vista es excesiva para los acueductos que normalmente se construyen en Bolivia.

1.7.5 Apoyos elásticos

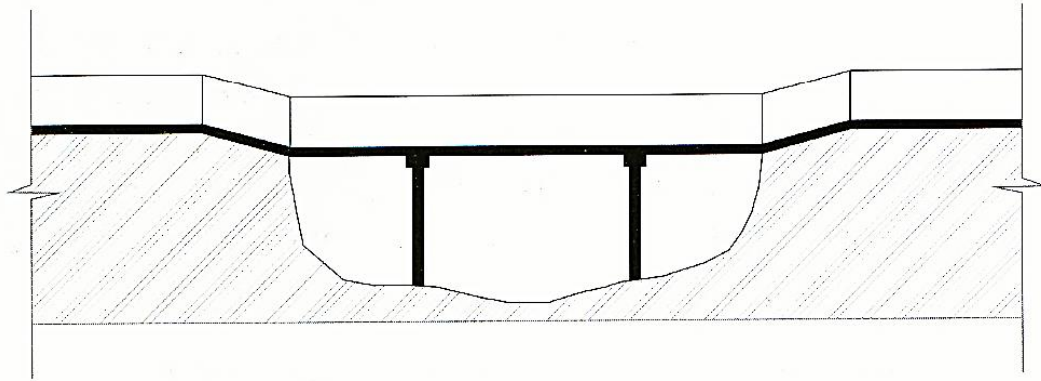
Cuando el acueducto se diseña para funcionar como viga simplemente apoyada sobre los estribos y pilas, se dispone entre vigas y apoyos unas placas elásticas, al igual que en los puentes.

Lo ideal, en términos técnicos, es recurrir a una placa con espesor aproximado de 2.5 cm de Neopreno (Policloropreno). Una ventaja importante del apoyo de neopreno es su efectividad como medio para la transferencia de la carga de tal manera que ésta se transmita sobre toda la sección transversal del apoyo y no se concentre sobre sus salientes. Pero considerando que normalmente las vigas son vaciadas en sitio, es suficiente aislarlas de los estribos colocando previamente una capa de cartón asfáltico para así permitir su libre desplazamiento. El cartón asfáltico es mucho más barato que el Neopreno pero se le reconocen solamente sus propiedades aislantes y no elásticas cuando se requiere una efectiva transferencia de carga.

1.7.6 Situaciones que conviene evitar

- En los acueductos se puede formar una curva de remanso por causa del cambio de pendiente, de sección, de rugosidad, o una combinación de éstas. Teóricamente se puede contrarrestar esta curva inclinando las transiciones de entrada y de salida como se muestra en la Figura 8.

Figura 8 Acueducto con transiciones en pendiente



Se puede anular el efecto del remanso con ese tipo de perfil, ajustando en los cálculos los valores de S_{1-2} y $S_{3-4} = -S_{1-2}$ hasta que la altura de remanso sea cero. No es recomendable esta solución debido a que encarece la obra y provoca deposición de material sólido dentro del acueducto. Además, sabiendo que los caudales en los sistemas de riego locales son intermitentes, debe evitarse el agua detenida en cualquier estructura ya que en pequeña cantidad llega a congelarse con el riesgo de dañarla. La solución más sencilla es optar por incrementar el bordo libre en el canal de entrada cuando la magnitud del remanso así lo justifique.

- En la topografía montañosa los canales discurren por las laderas hasta que en cierto punto deben cruzar una quebrada. El trazo geométrico en la entrada al acueducto suele ser una curva pronunciada, con un ángulo de deflexión cercano a los 90° , y similar en la salida. En estos casos debe aumentarse el bordo libre de la pared exterior a la curva para evitar rebalses que afecten a los estribos del acueducto.
- En algunos sistemas de riego se han diseñado acueductos que operan también como vertederos de caudal excedente. Si vienen

determinados casos se han evaluado cuidadosamente las características geotécnicas de la roca donde se fundan los estribos y donde se vierte el agua, esta práctica puede tener efectos dañinos sobre los elementos de fundación de la estructura y provocar erosión en la zona de la cascada. Es más seguro ubicar el vertedero de excedencias aguas arriba del acueducto, cuidando que su emplazamiento asegure una descarga de efectos controlados.

- Un aspecto importante para la durabilidad y buena operación de la estructura es la distancia vertical que queda libre entre la base del acueducto y el obstáculo a salvar. Para el cruce de pequeñas quebradas, esa distancia libre puede ser de medio metro, pero en cruces de quebradas importantes y ríos, debe considerarse como mínimo de un metro y medio sobre el nivel máximo de las aguas del curso inferior. La falta de espacio puede causar rebalses de agua del cauce natural por encima del acueducto y poner en riesgo su estabilidad.

1.8 Criterios hidráulicos y constructivos para sifones invertidos

Un sifón es un conducto cerrado que se eleva por encima de la línea piezométrica y en el cual la presión, en algún punto, es inferior a la atmosférica. Los 'sifones invertidos' no son sifones propiamente dichos, porque la presión en todos los puntos en el tubo es superior a la atmosférica. A pesar de ser un término inadecuado, su uso vino a ser costumbre, por lo que también lo empleamos.

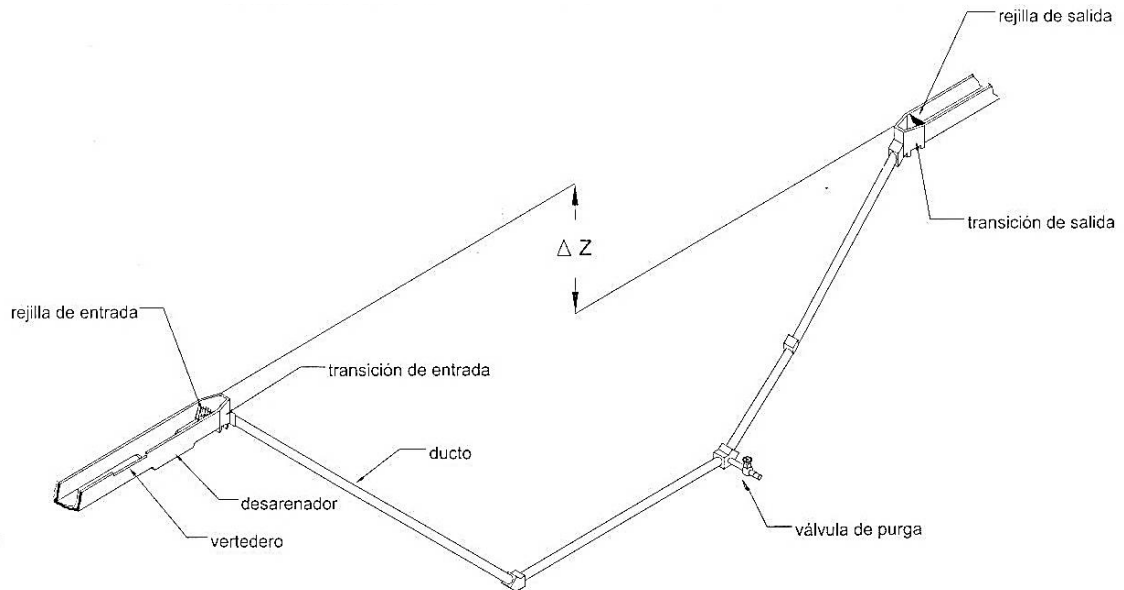
Los sifones invertidos son conductos cerrados que trabajan a presión y se emplean para conectar dos conductos o depósitos de agua pasando por un

punto más bajo entre ellos. Se usan en el cruce de un canal con una depresión topográfica como río o quebrada, un camino, otro canal, un dren u otro tipo de obstáculo que convenga sortear pasando por debajo.

A diferencia de los acueductos, los sifones invertidos tienen altas pérdidas de carga por fricción y por tanto su aplicación puede causar una reducción en el área potencial de riego. Otra desventaja es su riesgo de colmatación cuando el agua arrastra material de sedimentación en cantidades considerables. Este riesgo exige de los usuarios una particular atención para evitarlo, ya que remover el azolve de un sifón invertido es una tarea dificultosa y su reparación puede ser costosa en caso de que se hubieren producido daños.

Las ventajas de los sifones invertidos son sus bajos costos de diseño, construcción y mantenimiento. Su adopción se hace necesaria cuando el terreno no ofrece suficiente resistencia para las fundaciones de un acueducto y cuando la depresión que se debe sortear es muy profunda y extendida y bordearla con un canal supone una longitud demasiado larga y por ello costosa. También, el sifón invertido es la solución pertinente cuando la diferencia de nivel entre la superficie del agua del canal y la rasante del obstáculo a cruzar es muy pequeña, como en el cruce de caminos o ferrovías, de manera que no permita la construcción de un acueducto.

Figura 9 Perspectiva de los componentes de un sifón invertido



El diseño de los sifones invertidos depende en gran medida de criterios hidráulico-constructivos generales como se explica más adelante, sin embargo, hay algunos criterios específicos relacionados con la gestión de riego en los sistemas de montaña.

1.8.1 Caudal de diseño y dimensión del ducto

- Los sifones invertidos suelen ser los tramos críticos en cuanto a la capacidad de conducción del sistema de riego. Una vez instalados no existe la posibilidad de aumentar su capacidad a diferencia de los canales abiertos.
- En vista de que en la mayoría de los sistemas no pueden definirse los caudales de diseño con toda exactitud, es buena práctica tomar un margen de seguridad en el caudal de diseño de los sifones invertidos. En consecuencia, en el diseño no siempre se precisa la mayor optimización entre diferencia de carga, velocidad del flujo y diámetro del tubo. Sin

embargo, hay que considerar cuidadosamente el aumento en costos de construcción.

1.8.2 Desarenador

- El desarenador antes de un sifón invertido es de mayor importancia en sistemas que funcionan con agua turbia. Con éste se evita el azolvamiento y el desgaste del ducto por el material de arrastre y en suspensión.
- El desarenador debe estar a una distancia mínima de la entrada del sifón invertido para asegurar que en el tramo entre desarenador y sifón invertido no vuelva a entrar material sólido en el canal.
- La distancia mínima también permite que se combine automáticamente la limpieza del desarenador con el uso de sifón invertido.
- Si la topografía permite diseñar una estructura combinada de desarenador y vertedero de excedencias, se aconseja instalar una compuerta de fondo para el retiro fácil de material de la poza, de tal manera que el flujo de limpieza escurra hacia la estructura de salida del vertedero de excedencias.

1.8.3 Rejilla de entrada y salida

- En canales con mucho material flotante, por ejemplo a causa de vegetación cerca del canal, se recomienda colocar la rejilla de entrada en un ángulo de entre 30° y 40° respecto al fondo del canal (no en una posición vertical). Esto, para que el flujo del agua empuje el material flotante hacia la parte superior de la rejilla evitando la obstrucción acelerada de la entrada.

- Las varillas de la rejilla deben colocarse en la dirección del flujo, nunca de forma horizontal, para permitir la limpieza con herramientas y sin que la persona que haga la limpieza tenga que entrar al agua. Las varillas deben sobresalir lo suficiente con relación a las barras de apoyo horizontales para dejar el paso fácil de los dientes de un rastrillo.

Hay menos exigencias en cuanto al diseño de la rejilla de salida. Lo más práctico es una rejilla con bisagras en la parte superior, para que al subir la rejilla el material acumulado caiga en la transición de salida.

1.8.4 Vertedero de excedencias

- En vista que los sifones invertidos suelen ubicarse cerca de quebradas inclinadas, hay que dar atención especial a la seguridad del cauce de desagüe. En caso necesario hay que diseñar el vertedero a una distancia mayor de la entrada al sifón invertido.
- Es conveniente el diseño que combina el desarenador con el vertedero de excedencias en una sola estructura. Si han de estar separados, ambas estructuras deben estar alineadas entre sí a fin de no generar curvas de remanso.

1.8.5 Válvula de purga

- En el riego de la zona montañosa, la mayoría de los sifones invertidos operan de forma intermitente. Cuando no se usa el sifón invertido, el material sólido en suspensión se deposita en el fondo del ducto. Cuando se usa agua con una mayor concentración de sólidos, es imprescindible que la válvula de purga esté en el punto más bajo del ducto y permita la auto-limpieza del sifón invertido.

- La gran cantidad de material sólido en el agua puede ocasionar taponamiento en la parte baja del ducto. Donde existe este peligro, es necesario incluir tubos removibles en la parte más baja que facilitan la limpieza, por ejemplo tubos bridados o unidos mediante juntas Gibault.

1.8.6 Situaciones que conviene evitar

- En el caso de un sifón invertido, el taponamiento de la tubería suele ser muy problemático. Para evitarlo, no se puede dejar la cámara de entrada abierta, ni la rejilla suelta. Así se disminuye el riesgo que personas ajenas, como excursionistas, introduzcan objetos no deseados, como botellas de gaseosa, pelotas, etc.
- Es aconsejable enterrar el ducto de un sifón invertido en toda su longitud. En especial tubos de PVC no pueden quedarse a la intemperie. El material quemado por los rayos UV se vuelve frágil e inservible.
- En los sifones invertidos no se debe colocar la cámara de purga en otro lugar que el más bajo del ducto. Si se la coloca fuera del punto inferior, se requiere una bomba para purgar aguas remanentes y sólidos acumulados. Organizaciones de riego no suelen tener bombas, de agua ni son puntuales en la limpieza, lo que pondría en riesgo la durabilidad del sifón invertido.

1.9 Criterios de diseño y construcción de desarenadores

Los desarenadores son estructuras hidráulicas que sirven para decantar el material sólido no deseable que lleva el agua de un canal. Ese material sólido no es deseable en un sistema de riego porque a partir de ciertas cantidades y tamaños de partículas en suspensión:

- Se depositaría en el fondo de los canales disminuyendo su sección reduciendo su capacidad de conducción. Esto obligaría a realizar tareas de mantenimiento regulares, lo que se traduce en elevados costos y produce molestosas interrupciones en el servicio del canal.
- Erosionaría las paredes de canales y en especial de tuberías de conducción y sifones invertidos (efecto de abrasión).
- Obstruiría tuberías de conducción, sifones invertidos, medidores y otras obras de arte.

La cantidad de sedimentos que pasa por unidad de tiempo se llama caudal sólido. Los sólidos presentes en ríos de montaña son grandes en tamaño como en todo flujo que escurre en las cabeceras de una cuenca. Las cantidades de material sólido llevados por un río se miden ya sea en $\text{m}^3/\text{año}$ por km^2 de cuenca, en gramos por m^3 de agua o en porcentaje del caudal.

La última forma conviene más a los fines del cálculo de una obra de decantación. Para ríos que se originan en las montañas, un valor típico para una creciente puede ser 4% a 6% en volumen del caudal.

El desarenador más importante de un sistema de riego se ubica entre la obra de toma y el inicio del canal principal. La capacidad de transporte del canal aguas abajo del desarenador debería ser constante para garantizar la no-decantación del material sólido que logra pasar hacia el canal.

Por seguridad, también es recomendable emplazar desarenadores adicionales al principal, inmediatamente antes de que el flujo ingrese en conducciones cerradas como tuberías, sifones invertidos y canales tapados o en estanques.

1.9.1 Clasificación de los desarenadores

De acuerdo a su tipo de operación de limpieza, los desarenadores pueden ser:

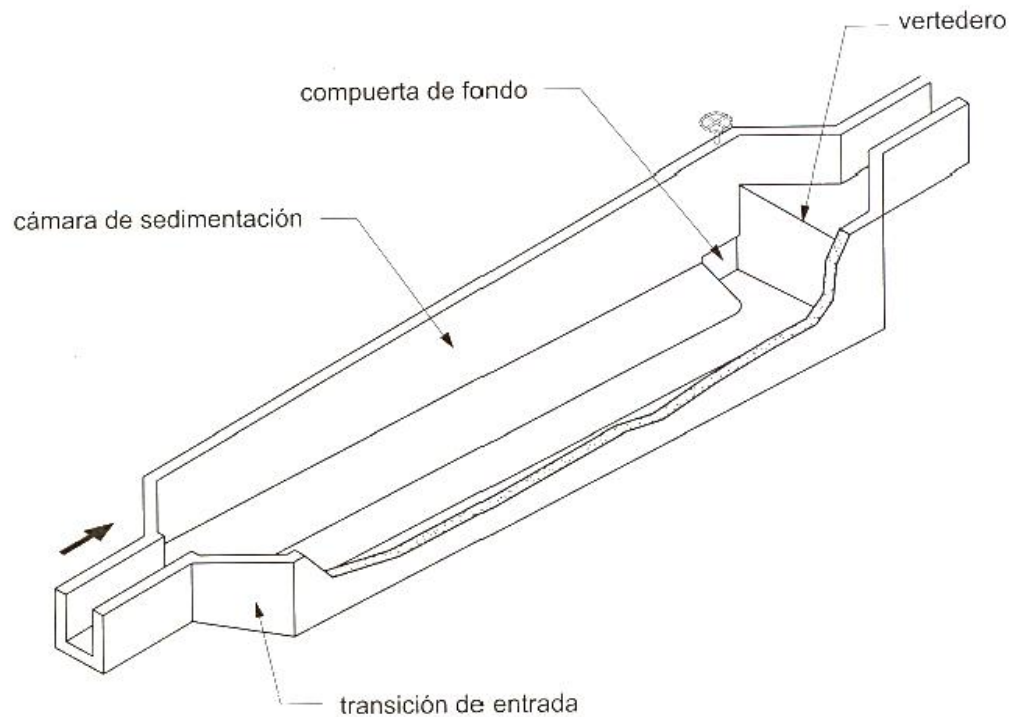
- De lavado continuo, cuando puede realizar la sedimentación y la evacuación del material sedimentado, simultáneamente.
- De lavado discontinuo o intermitente, cuando almacena el material sedimentado y luego lo expulsa, en una operación diferente. La operación de lavado se procura realizar en el menor tiempo posible para minimizar la pérdida de agua.
- De lavado enteramente manual. Cuando la operación de evacuación del material sedimentado no es efectuada por la operación de la estructura, sino por los usuarios.

En función de su velocidad de escurrimiento, los desarenadores pueden ser:

- De baja velocidad, normalmente $0.20 \text{ m/s} < v < 0.60 \text{ m/s}$.
- De alta velocidad, normalmente $1.00 \text{ m/s} < v < 1.50 \text{ m/s}$.

Los elementos que componen un desarenador son:

Figura 10 Componentes de un desarenador



1. Transición de entrada

Sirve para conducir de una manera gradual al agua que viene del canal hacia la cámara de sedimentación. Esta transición minimiza la formación de turbulencias que perjudican a la sedimentación. Para ello, se asegura que la transición tenga un ángulo de divergencia suave, no mayor de $12^{\circ}30'$

2. Cámara de sedimentación

Es donde por aumento de la sección se logra una disminución de la velocidad del flujo, que hace que las partículas sólidas se precipiten al fondo. La forma de la sección transversal puede ser cualquiera aunque generalmente se escoge la trapecial por ser más eficiente y económica ya que concentra el material decantado en el centro, facilitando el trabajo de

limpieza. La pendiente del fondo debe estar entre 2% y 6% para facilitar la evacuación de los materiales depositados.

3. Vertedero

Se construye al final de la cámara de sedimentación para captar el agua limpia de las capas superiores y entregarla al canal. La velocidad del flujo a través del vertedero debe ser también limitada (hasta 1 m/s es aceptable) para no provocar turbulencia en la cámara de sedimentación. Para esa velocidad, la altura del agua sobre la cresta del vertedero no debería sobrepasar los 25 cm. Cuando la profundidad de la cámara de sedimentación es mayor que la del canal puede simplificarse el diseño simplemente disponiendo un escalón al final de la cámara de sedimentación, hasta alcanzar el nivel de solera del canal de salida.

4. Compuerta de fondo

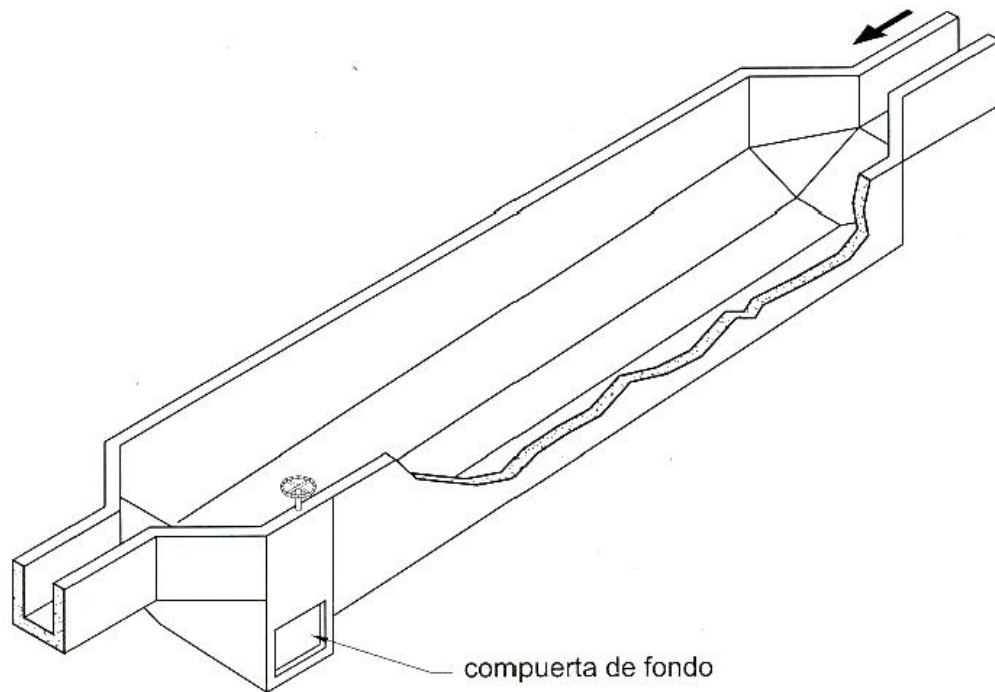
Normalmente, los desarenadores también incluyen una compuerta de lavado y un canal directo por el cual se da servicio mientras se lava el desarenador abriendo la compuerta.

La compuerta de fondo no es siempre aplicable por las siguientes razones:

- Los canales en ladera de montaña se apoyan en terreno muy erosionable. La velocidad del agua que debería desalojar el material sedimentado es demasiado elevada (de 3 a 5 m/s) y podría ocasionar serios efectos erosivos sobre las laderas. Conducir esa agua hacia lugares menos susceptibles a la erosión, significa elevar considerablemente los costos de la estructura.
- La práctica del lavado de la cámara de sedimentación implica pérdida de agua. En muchos sistemas de riego no puede permitirse ese

derroche, y menos aun en sistemas de turnos, donde un usuario en particular tendría que sacrificar su volumen de agua asignado para efectuar la limpieza en beneficio de todos. En consecuencia los usuarios prefieren limpiar el desarenador manualmente, por lo que la compuerta de fondo normalmente es prescindible.

Figura 11 Posición de la compuerta de fondo



5. Vertedero de excedencias

El desarenador no puede funcionar con exceso de agua y turbulencias provocadas por el ingreso de un caudal superior al previsto en su diseño. El vertedero de excedencias puede construirse antes de la transición de entrada o se puede usar una de las paredes de la cámara de sedimentación como vertedero, descargando el caudal de exceso a un canal paralelo que conduzca de manera controlada el flujo que rebalse la capacidad de la cámara de sedimentación. La estructura combinada desarenador-vertedero

de excedencias es práctica cuando las condiciones topográficas aseguran una descarga segura del caudal excedente.

1.9.2 Situaciones que conviene evitar

- El desarenador, teniendo en cuenta la magnitud del caudal sólido que conducen las fuentes en los sistemas de montaña, es la estructura que necesita mayor frecuencia de limpieza. La falta de limpiezas regulares provoca su pronta inoperabilidad.
- En desarenadores con compuerta de fondo, debe evitarse que la descarga pueda provocar erosión a su paso hacia el cauce natural. Esa erosión normalmente perjudica también a la propia estructura, comprometiendo su estabilidad.
- En sistemas con captación directa de una fuente torrencial, como es el caso de los sistemas que aprovechan el agua que eventualmente corre por una quebrada para embalsarla en estanques o atajados, no tiene sentido práctico emplazar un desarenador inmediatamente después de la toma. La cantidad de material sólido que ingresa es capaz de copar la capacidad del desarenador en unas pocas horas. Es preferible en esos casos ahorrar en esa estructura y considerar al canal en su primer tramo como una primera trampa del material sólido que no debe ingresar en los estanques. Luego, antes de cada estanque deberá emplazarse un pequeño desarenador cuya manutención podrá ser mejor realizada por el usuario o grupo de usuarios que aprovechan ese estanque.

1.10 Criterios de diseño y construcción para pasos de quebrada

Los canales de riego en sistemas de montaña normalmente siguen el contorno de las laderas y tienen que cruzar muchos drenes naturales como arroyos y quebradas que aportan agua al el sistema. En la región andina, normalmente esa agua escurre con excesiva velocidad y lleva una cantidad de material de arrastre en épocas durante las que la captación desde las fuentes normales es más que suficiente. El agua excedente es una amenaza para la integridad de las obras del sistema de riego. Por ello, en el riego de montaña se necesitan estructuras de drenaje transversal, que conduzcan esas aguas por debajo o por encima del canal, con el fin de evitarle daños al sistema.

1.10.1 Pasos Superiores

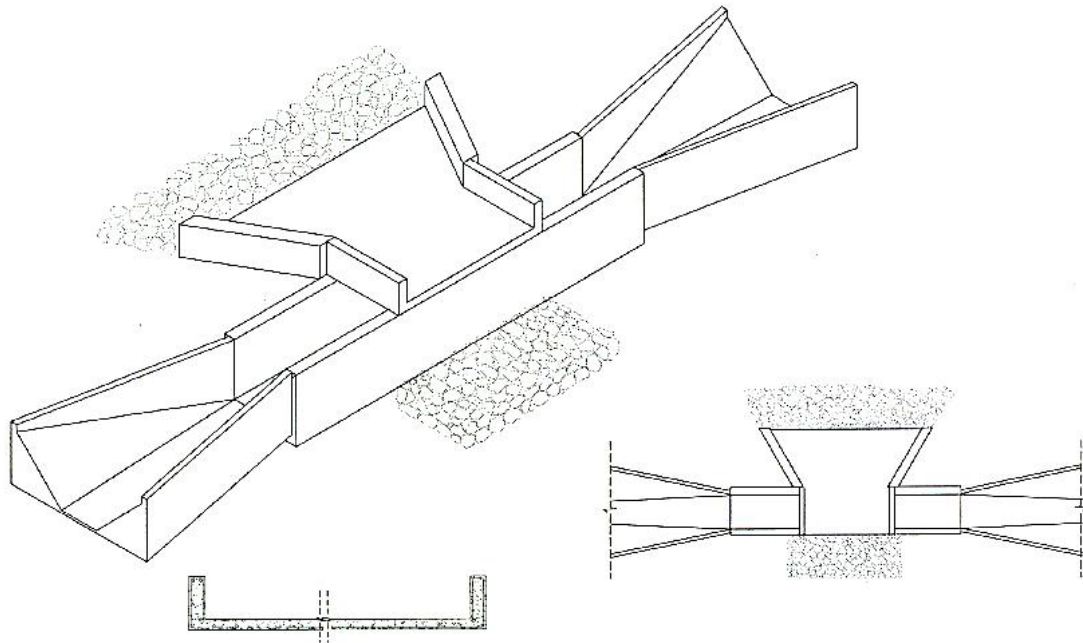
1.10.1.1 Descripción y ubicación

Un paso superior es una estructura que conduce el agua no deseada por encima del canal. Se compone de paredes y base de confinamiento del ingreso, paredes y losa sobre el canal, paredes y base de confinamiento del egreso y dissipador.

Las paredes de confinamiento del ingreso guían el torrente hacia el punto de cruce y la base guía al torrente al nivel de la losa sobre el canal.

La losa sobre el canal protege a éste del torrente a la vez que puede funcionar como puente para personas y animales de crianza. Debe ser calculada para esas solicitaciones además de su peso propio y el material de arrastre que pueda depositarse encima. Es recomendable que la losa mantenga una pendiente suficiente (del orden del 10% o igual a la del lecho del torrente natural) descendiendo hacia aguas abajo, para evitar la disminución de la velocidad del torrente en ese punto, lo que ocasionaría el depósito de material de arrastre sobre la losa.

Figura 12 Paso superior en perspectiva, en planta y en corte transversal



Las paredes y base de confinamiento del torrente que egresa, guían a éste en dirección y nivel para entregarlo otra vez al cauce natural no sin antes disminuir su velocidad por medio de un dissipador a fin de disminuir sus efectos erosivos.

Adicionalmente a la estructura misma, en laderas que no cuentan con una quebrada bien definida se excavan zanjas de coronación que concentran el agua hacia el paso superior, para evitar que el agua entre en el canal en un lugar no deseado.

1.10.2 Aspectos constructivos

El aspecto más crítico a tener en cuenta para el diseño y construcción de un paso superior, es la capacidad erosiva de los torrentes de montaña. La violencia con que el agua y el material de arrastre impactan estas estructuras exige un buen anclaje de sus fundaciones y una suficiente resistencia a los

esfuerzos de corte. Los problemas que se han detectado en este tipo de estructuras presentes en casi la totalidad de los sistemas de riego en los valles interandinos, se deben a la subestimación del poder erosivo del agua en las quebradas transversales al canal que se desea proteger.

Además, debe tenerse en cuenta que una obra de drenaje lateral como el paso superior, representa un obstáculo puntual en el flujo del torrente, por lo general cambiando su pendiente a una menor y provocando después un desnivel entre el agua que egresa de la estructura y el lecho del cauce natural al que se devuelve el flujo. Este salto necesita ser disipado eficientemente para evitar daños en la base de la estructura de confinamiento de egreso. La estructura de disipación más recomendable es el colchón de agua, cuya profundidad y longitud pueden estimarse sobre la base de los mismos criterios que se recomiendan para las estructuras de caída vertical.

Los gaviones son otra solución económica y efectiva para guiar el flujo torrencial hasta el ingreso y el egreso de la estructura de paso. También de gaviones puede construirse el colchón disipador. Sin embargo hay que tener presente que la facilidad con que las piedras que arrastra el torrente afectan el enmallado de alambre. No es recomendable recubrir el engavionado con una capa de hormigón por cuanto se combinarían una estructura flexible (gavión) con una estructura rígida (hormigón) haciendo esta última muy propensa a la rotura. Para mitigar el daño que provocan las piedras sobre el alambre conviene cubrir las partes del engavionado más expuestas, atando al enmallado, troncos, ramas, o hatos de paja que amortigüen y distribuyan la energía del impacto de las piedras sobre la estructura. Esta solución es fácil y muy económica, pero requiere mantenimiento regular por parte de los usuarios.

1.10.3 Situaciones que conviene evitar

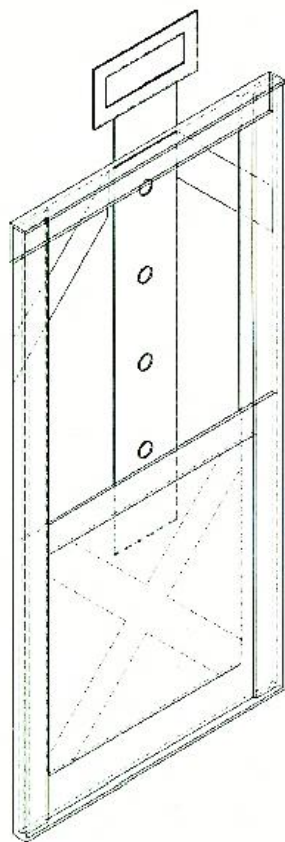
- No debe descuidarse la limpieza del encauzamiento hacia el paso superior ni de su salida. Cualquier obstáculo (arbustos, piedras grandes, etc.) puede provocar el desvío del torrente hacia lugares distintos del paso superior.
- Al construir un paso superior por encima de un canal cuyas paredes se elevan por encima del terreno, se genera automáticamente una caída vertical al finalizar el paso superior. Hay que construir una estructura de disipación que evite erosión de la ladera aguas abajo.

1.11 Criterios para el diseño y construcción de compuertas

La calidad de la construcción de las compuertas es fundamentalmente un tema de buena cerrajería en la construcción de la plancha y de las guías empotradas en las paredes del canal. La plancha debe ser de suficiente grosor para aguantar el maltrato de los usuarios y la corrosión. Por corrosión se pierde alrededor de 2 mm en 5 años. El espesor de la plancha depende principalmente de la disponibilidad de material en el mercado local.

Para aumentar la fuerza de la hoja de compuertas de tamaño mayor, se aplican rigidizadores horizontales y verticales. Los últimos sirven también como guías para el movimiento de la plancha dentro de las ranuras transversales.

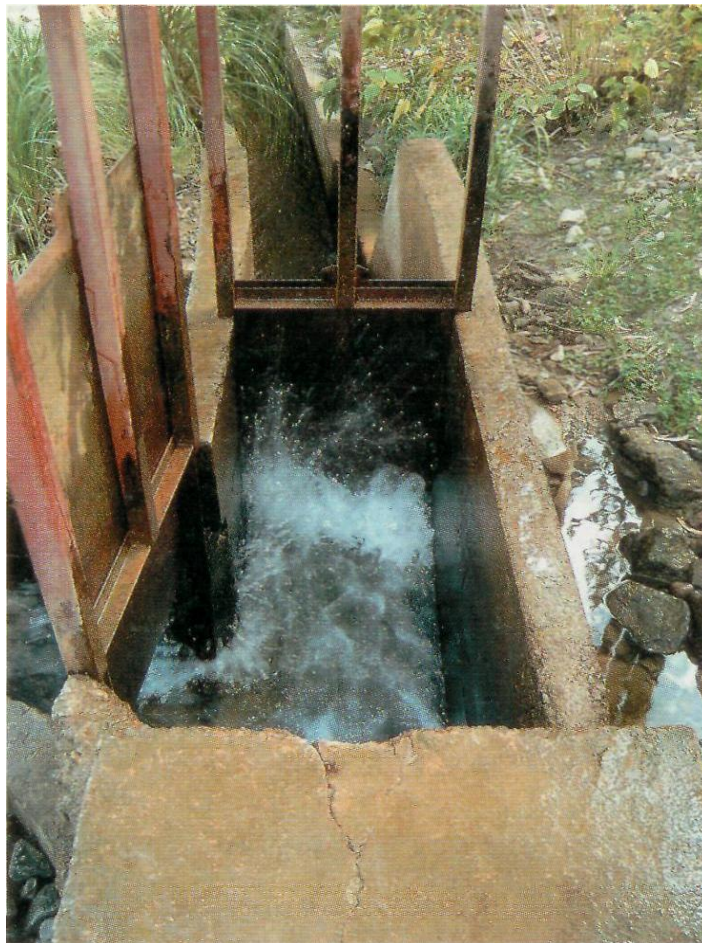
Figura 13 Dibujo constructivo de una compuerta bastón



Ninguna compuerta garantiza un hermetismo total. Se puede aumentar su impermeabilidad con una goma en la ranura del canal, pero aumenta el costo de las compuertas en alrededor de 30%. En cada proyecto hay que evaluar la importancia de eventuales filtraciones frente al costo de un cierre hermético. En la mayoría de los sistemas, no hay problemas en tapar una eventual rendija con tierra.

1.11.1 Situaciones que conviene evitar

- En el canal de entrada de una cámara de distribución no puede haber un régimen supercrítico, porque la gran velocidad del agua impide que el caudal se desvíe hacia el canal bifurcante. En caso de instalar una contracompuerta en el canal de entrada para asegurar la derivación del agua, esta sufre de golpes fuertes como efecto de la energía cinética del agua. En la Figura se muestra una compuerta en régimen supercrítico; se observa salpicadura a ambos lados del canal.



- La insuficiente robustez de las compuertas es una de las principales causas de su rápido deterioro, primero porque por frágiles pierden su funcionalidad y en consecuencia deben ser operadas con torpeza, lo que empeora su condición.

