



PROYECTO: ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN COMUNIDADES ANDINASBOLIVIANAS QUE DEPENDEN DE GLACIARES TROPICALES



ANEXO AL INFORME FINAL

Nordic Climate Facility

La Paz, Bolivia

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LOS POTENCIALES IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA EN MICRO CUENCAS SELECCIONADAS SITUADAS EN EL PARQUE NACIONAL SAJAMA:

PRODUCTO F – INFORME FINAL

ASESORAMIENTO Y DISEÑO EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES EN UN SECTOR DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA, BOLIVIA



FREDDY SORIA CESPEDES
Ingeniero civil-ambiental (M Ing., PhD)
CONSULTOR INDEPENDIENTE, ONG AGUA SUSTENTABLE
LA PAZ, NOVIEMBRE DE 2012

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCION.	4
Antecedentes.	4
Obras de toma: Fundamentos teóricos	4
2. OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 1.	5
Criterios de diseño	5
Características generales de las obras proyectadas y del sitio de emplazamiento.	5
Datos de entrada	8
Selección del tipo de obra de toma.	10
Consideraciones generales de diseño.	10
Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.	10
a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.	10
b) Estabilidad del azud.	11
c) Flujo secundario en la obra de toma.	12
d) Disipación de energía.	13
Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.	13
a) Dimensiones generales.	13
b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.	13
c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.	15
d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.	15
e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.	15
3. OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 2.	16
Datos de entrada	16
Selección del tipo de obra de toma	16
Consideraciones generales de diseño.	16
Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.	17
a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.	17
b) Estabilidad del azud.	17
c) Flujo secundario en la obra de toma.	18
d) Disipación de energía.	19
Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.	19
a) Dimensiones generales.	19
b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.	19
c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.	19
d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.	20
e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.	20
4. OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 3.	20
Datos de entrada.	21
Tipo de obra de toma.	21
5. OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 4.	22
Obra de toma	23
6. OBRA DE TOMA MANASAYA-AGUAS ABAJO: ALTERNATIVA 1.	24
Datos de entrada	24
Selección del tipo de obra de toma	25
Consideraciones generales de diseño.	25
Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.	25
a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.	25
b) Estabilidad del azud.	25
c) Flujo secundario en la obra de toma.	26
d) Disipación de energía.	27

Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.	27
a) Dimensiones generales.	27
b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.	27
c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.	27
d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.	28
e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.	28
7. OBRA DE TOMA MANASAYA-AGUAS ABAJO: ALTERNATIVA 2.	29
8. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y MATERIAL.	30
Análisis de Precios Unitarios.	30
Cantidad de material a ser empleado.	32
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	32
AGRADECIMIENTOS	33
10. REFERENCIAS	33
ANEXO 1. PLANO DE LA OBRAS DE TOMA CANAL MANASAYA (Aguas arriba).	34
ANEXO 2. PLANO DE LA OBRAS DE TOMA MANASAYA-Aguas abajo.	37
ANEXO 3. ESQUEMA DE OBRAS SAJAMA Y PAPELPAMPA.	40

ASESORAMIENTO Y DISEÑO EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES EN UN SECTOR DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA, BOLIVIA

Freddy Soria Céspedes

1. INTRODUCCION.

1.1 Antecedentes.

El “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua de micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama” es un componente importante para el logro de los alcances y objetivos del proyecto titulado “Adaptación al Cambio Climático en Comunidades Andinas Bolivianas que Dependen de Glaciares Tropicales”, ejecutado por Agua Sustentable. Para el objeto, en cumplimiento del Objetivos Específico F, se realiza el *asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles en un sector del Parque Nacional Sajama, Bolivia*. Los sitios de emplazamiento de las obras así como el tipo de obra fueron definidas mediante diálogo conjunto a través del personal técnico de Agua Sustentable y los comunarios. El material para la ejecución de las obras así como la supervisión de las mismas fueron provistas por el personal técnico de Agua Sustentable y la mano de obra para la construcción de las obras fue proporcionada por las familias beneficiadas.

En cumplimiento de los Términos de Referencia (TDR) adjuntos al Contrato de Prestación de Servicios firmado para la ejecución de la presente consultoría en fecha 26 de enero de 2012, este documento incluye la justificación, memoria técnica y planos entregados al personal técnico de Agua Sustentable para la ejecución de las obras solicitadas. Para los fines consiguientes, los planos se presentan en los Anexos y sus respectivos archivos CAD se proporcionaron a Agua Sustentable. En los Anexos también se presentan dos esquemas de las obras realizadas en Papel Pampa, y de la aerobomba de Sajama, como apoyo al Proyecto en cumplimiento a las especificaciones de los TDR; el diseño respectivo y la construcción fueron realizados por el personal técnico de Agua Sustentable.

1.2 Obras de toma: Fundamentos teóricos

La obra de toma es el conjunto de estructuras que tiene por objeto desviar las aguas que escurren sobre la solera hacia el sistema de conducción (Mattos, 1999). Es uno de los componentes más importantes de un sistema de provisión de agua (agua potable, riego, etc), debido a que su disposición y diseño establece los parámetros para los demás componentes del sistema correspondiente. Dentro de este marco, uno de los aspectos más importantes en el diseño e implementación de obras de toma en el área de estudio es la consideración del río como parte de un sistema sensible, donde cualquier intervención no analizada podrá llevar a alterar al sistema.

En general, de acuerdo a la fuente de agua existen tres tipos de obras de toma: de recurso superficial, de recurso sub superficial, y de recurso subterráneo.

- i) Obras de toma superficiales. Son del tipo: derivación directa, con canal de limpieza, de toma frontal.
- ii) Obras de toma en solera. Son del tipo: tirolesas, tipo Cáucaso.

La selección del tipo de obra depende de las características de la cuenca, las características morfológicas del río o el tipo de fuente de agua, la importancia de la obra, y las condiciones socio-

económicas del área de estudio. Para el presente Proyecto, las dos últimas condiciones señaladas son particularmente importantes en la selección del tipo de obra.

2 OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 1.

2.1 Criterios de diseño

Características generales de las obras proyectadas y del sitio de emplazamiento.

El establecimiento de las obras de toma proyectadas responden a la necesidad de establecer una estructura de derivación que permita el aprovechamiento de las aguas que fluyen por el curso superficial del canal natural Manasaya, hacia un canal artificial de derivación cuyo principal objetivo es el de ampliar el área de bofedales. El objetivo final es el de proveer las fuentes de alimento para la crianza de camélidos (la principal actividad económica de la población local).

Las características del sitio de emplazamiento de la obra de toma son: la baja pendiente longitudinal del curso superficial Manasaya (aproximadamente 1%) y la alta carga de material fino de arrastre y en suspensión debido a las características geológicas de la zona (material fino, no cohesivo). Este último aspecto es claramente observado en una de las obras de toma realizadas en las proximidades de la comunidad Sajama, cerca del canal Manasaya, donde el excesivo arrastre de sedimentos inutilizó una obra de toma donde aparentemente la inversión de recursos fue importante (ver Figuras 1 a 3).



Figura 1. Obra de toma de derivación directa, con azud derivador. La obra se encuentra sin funcionamiento, aparentemente debido a la incorrecta orientación del azud derivador (fuera del eje del curso natural del Río Sajama, ver Figura 2) y la alta carga de material fino depositado (ver Figura 3).

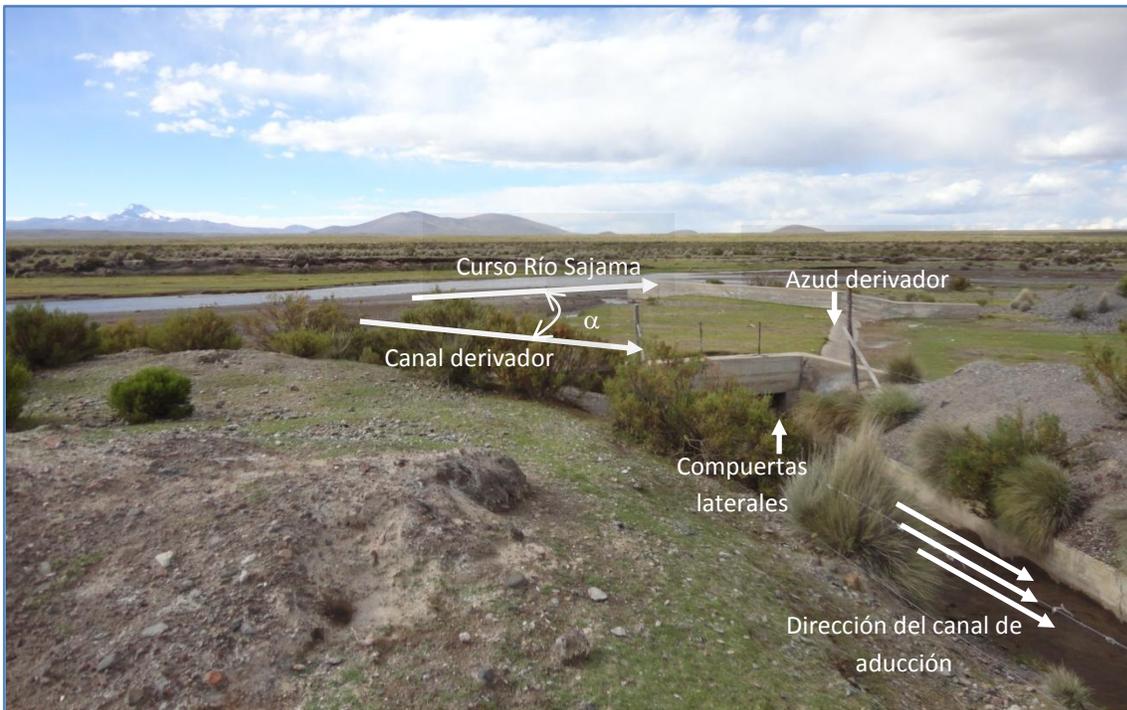


Figura 2. Orientación del azud derivador fuera del eje del curso natural del Río Sajama. Se observa la alta carga de material fino depositado.



Figura 3. Canal de aducción (sin funcionamiento) con alta carga de material depositado.

Por las dos razones expresadas, con la consideración de que el sitio de emplazamiento de la obra de toma en el canal Manasaya tiene similares características geomorfológicas (ver Figura 4), y considerando además que no se requiere alta precisión en los volúmenes de agua a ser captados, se sugiere contemplar una obra de toma mediante el establecimiento de estructuras que sean económicas y simples.



Figura 4. Sitio de emplazamiento sugerido. Abajo: Fotografía tomada en diciembre de 2011, al inicio de la época de lluvias. Arriba: Fotografía tomada en febrero de 2012, durante la época de lluvias. Nótese la diferencia en caudales entre ambas fechas, la carga de material, el rápido cambio en la cobertura vegetal y la inestabilidad en las paredes del canal natural Manasaya.

Datos de entrada

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011 (época seca)).
- La sección típica de los aforos del 5 de agosto de 2011 se muestra en la Figura 5.

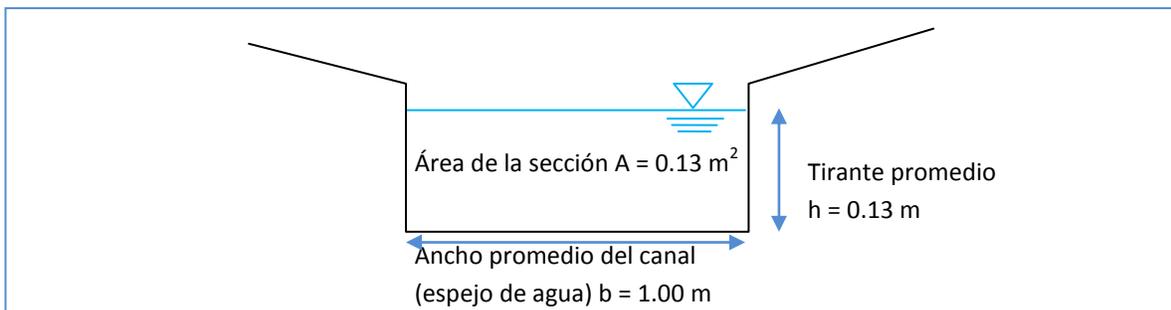


Figura 5. Sección típica levantada el 5 de agosto de 2011.

- Caudal máximo: El caudal medido al final del canal Manasaya es de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Se decide asumir un caudal máximo esperado de $Q_{max} = 750$ L/s.
- Las secciones transversales, correspondientes a las observadas en febrero de 2012, se presentan en las Figuras 6a, 6b, 6c. Distancia entre secciones transversales: 2.0 m. La sección A-A (Figura 6a) está situada aguas arriba, mientras que la sección H-H (Figura 6c) se sitúa en la sección donde está la antigua derivación hecha por los comunarios mostrada en la Figura 4.

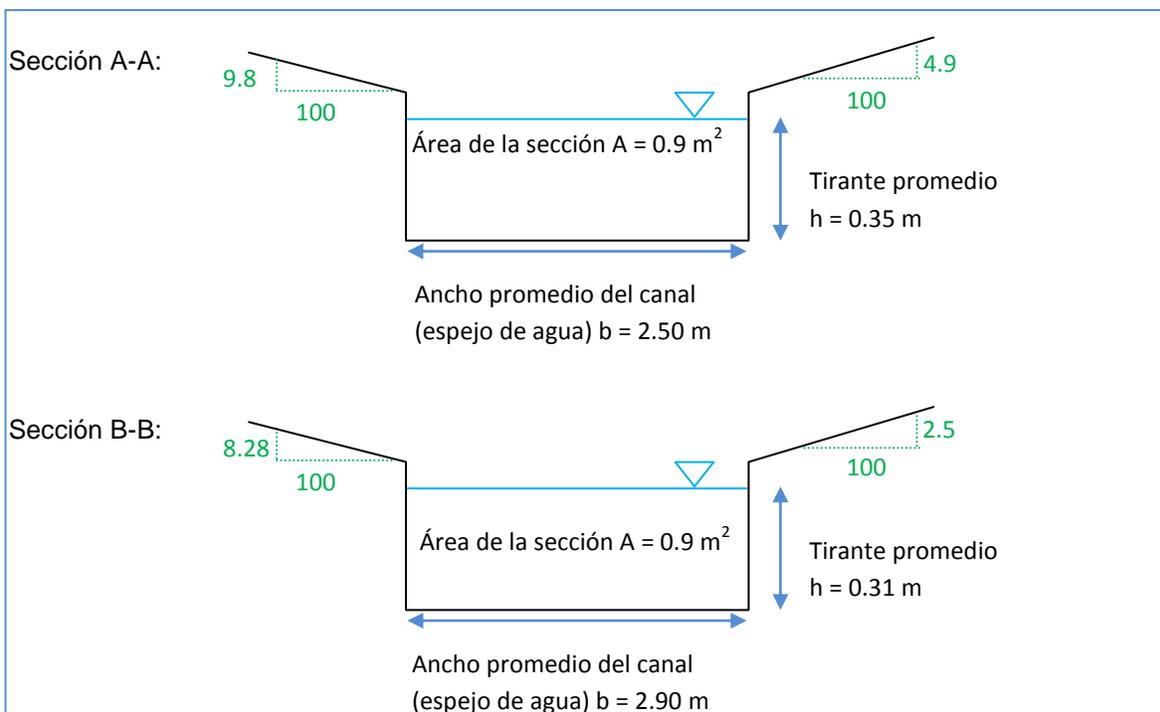


Figura 6a. Secciones transversales levantadas el 5 de agosto de 2011.

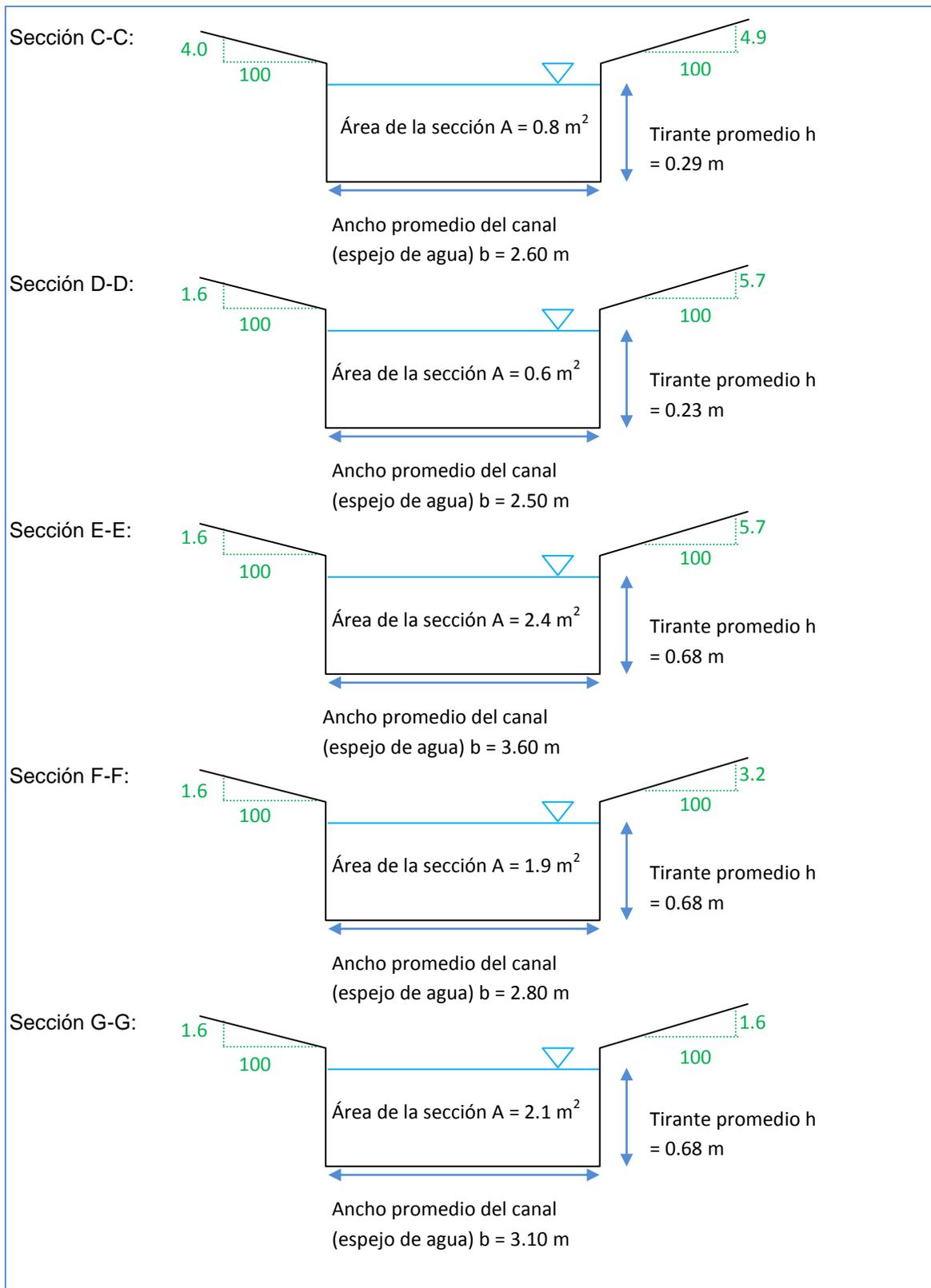


Figura 6b. Secciones transversales levantadas el 5 de agosto de 2011.

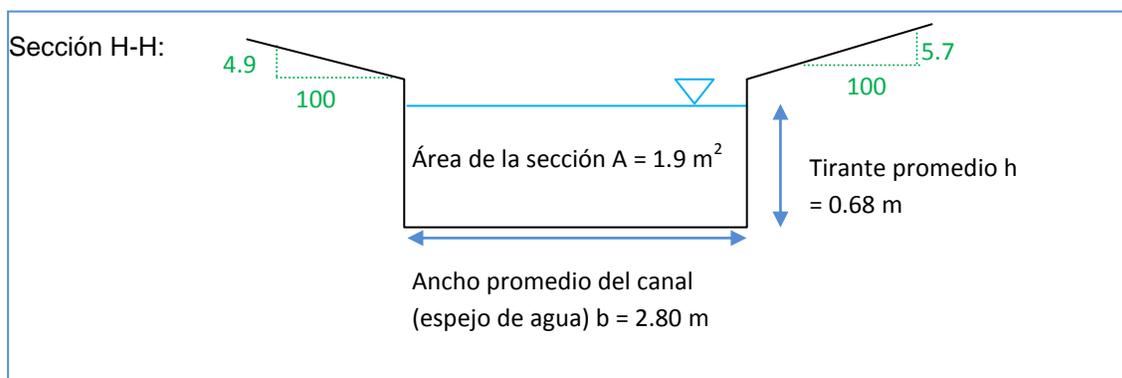


Figura 6c. Secciones transversales levantadas el 5 de agosto de 2011.

2.2 Selección del tipo de obra de toma.

Se seleccionó una toma de derivación directa, con toma lateral convencional y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la erosión y la muy probable colmatación de la obra de toma debido a la importante carga de sedimentos observada. Por la razón anterior, no se toma en cuenta una toma tipo Tirolés (útil en zonas de montaña donde existe arrastre de sedimentos gruesos), ni una toma tipo Cáucaso (debido al gran arrastre de sedimentos). Debido a que las técnicas para lograr la derivación no se diferencian de gran manera con los caso de tomas para aducción de agua potable, muchos de las consideraciones técnicas son derivadas de las normas correspondientes al diseño de aquel tipo de sistemas (e.g, Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, Reglamento Nacional NB 689, VSB, 2004).

Consideraciones generales de diseño.

- En ausencia de un criterio que indique cuál es el caudal mínimo necesario para el bofedal alimentado por el canal natural Manasaya (las mediciones en el sistema se iniciaron en Marzo de 2012), se asumen las regulaciones dadas por la Ley del Medio Ambiente (Ley 1333), donde se aconseja que el caudal aprovechado debe ser menos del 20% de la descarga mínima diaria promedio. Bajo aquel criterio, se asume que el caudal máximo derivado durante época de estiaje es el 20% del $Q_{min} = 10$ L/s (caudal de diseño).
- En época húmeda, se asume la misma consideración anterior, derivando el 20% del caudal observado = 100 L/s (caudal de crecida de diseño).

Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.

Se sugiere un dique fijo de hormigón ciclópeo (H^0C^0), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, la ecuación que describe el flujo es:

$$Q = \frac{2}{3} \mu * \sqrt{2g} * L * H^{3/2} = C * L * H^{3/2} \quad (1)$$

..donde Q es el caudal para la crecida de diseño ($Q = 100$ L/s), μ (adimensional) es el coeficiente de descarga o coeficiente de eficiencia del azud, L es la longitud neta del azud ($L = 290$ cm), H es la altura de carga, C es el coeficiente de flujo sumergido ($C = 1.5$). Por razones prácticas el

coeficiente μ se asume constante ($\mu = 0.50$). Como se muestra, μ y C dependen de la forma del vertedero. Se asume un vertedero de pared gruesa. Debido a que la obra es pequeña, se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre.

Conociendo μ , C , y L , de la ecuación (1) se determina $H = 32\text{cm}$. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), asumiendo que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 25\text{cm}$, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 * hr = 110\text{cm}$ (Figura 7).

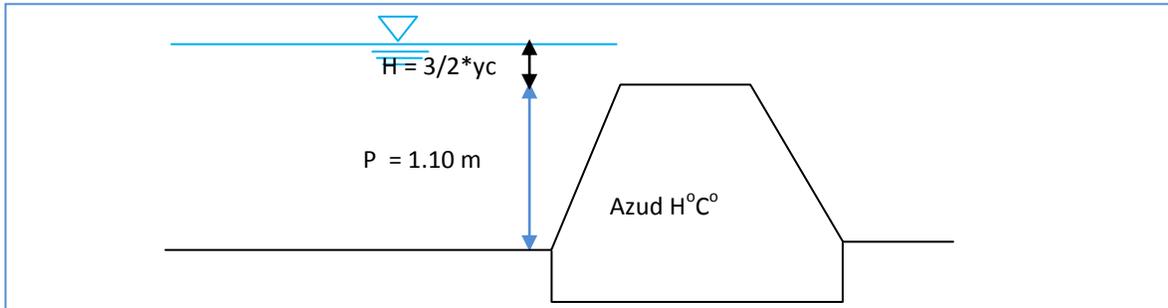


Figura 7. Esquema del azud.

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco.

$$Kv = \frac{\sum Mr}{\sum Mv} > 1.30 \quad (2)$$

..donde Mr es la suma de momentos resistentes y Mv es la suma de momentos de vuelco.

Se considera:

peso unitario del H°C° = 2200 kg/m^3 ,

peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m^3 ,

esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm^2 ,

ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30° ,

rugosidad lecho del río = 0.030 ,

pendiente longitudinal = 0.015 ,

tirante crítico $yc = 21 \text{ cm}$.

$$Kv = 1.7 > 1.3$$

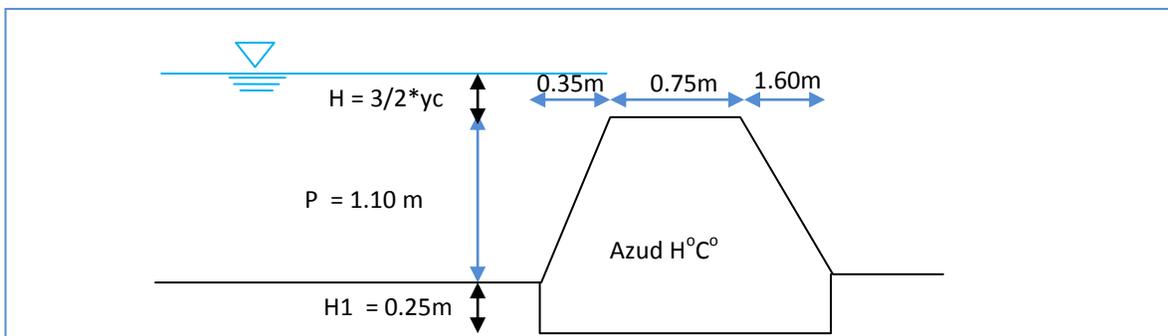


Figura 8. Esquema del azud, con dimensiones asumidas en base a consideraciones de estabilidad al vuelco.

- Estabilidad al deslizamiento.

$$Kd = f \frac{\sum Fv}{\sum Fh} > 1.30 \quad (3)$$

..donde Fv es la suma de fuerza horizontales, Fh es la suma de fuerzas verticales y f es el coeficiente de fricción entre azud y terreno ($f = 0.4$, arena limosa).

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce un dentellón de 0.10m en la cara situada aguas arriba del azud, asumiendo un ángulo de deslizamiento $\alpha = 1^\circ$ ($Kd = 2.0$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Se cumple que el esfuerzo de compresión máximo no supere la tensión máxima admisible del terreno de fundación. Además, se cumple que no existen esfuerzos de tracción al verificar que la resultante de las fuerzas actuantes pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión, cuya magnitud se calcula con la siguiente ecuación (Krochin, 1982):

$$Y + do = q/v \quad (4)$$

..donde, Y es la magnitud de la erosión, do es el calado normal, q es el caudal por unidad de ancho, y v es el producto entre la velocidad máxima de los materiales que forman el cauce (v_{adm}) y la raíz "m" del radio hidráulico R ($m = 2+R$).

Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es Y (m) = 0.60, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

La derivación del caudal ocasiona un punto de remanso que abarca una zona que se desplaza aguas arriba, y cuya influencia disminuye gradualmente (Mattos, 1999). Los flujos turbulentos generados por el plano frontera que divide el curso principal del secundario, ocasionan el transporte de sedimentos hace la zona de derivación en proporción directa al Q , por lo cual se sugiere lo siguiente para evitar el ingreso de material en suspensión a la aducción (Mattos, 1999):

- Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:
 - i) El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.
 - ii) Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.



Figura 9. Vista panorámica del sitio de emplazamiento de la obra de toma; canal (natural) Manasaya.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} se calcula con la siguiente ecuación:

$$y_{cont} = \frac{q\sqrt{1+k}}{b\sqrt{2g(H_{total}-y_{cont})}} = \quad (5)$$

...donde q es el caudal por sección unitaria. Luego:

$$y_{cont} \text{ (m)} = 0.04$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: $y_{normal} \text{ (m)} = 0.06$

Luego el tirante conjugado $y_3' \text{ (m)} = 0.6$

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada $z \text{ (m)} = 0.50$.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 2.8 m.

Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor a $2*hr = 0.85 \text{ m}$.
- Altura total umbral+ $hr = 1.10 \text{ m}$.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

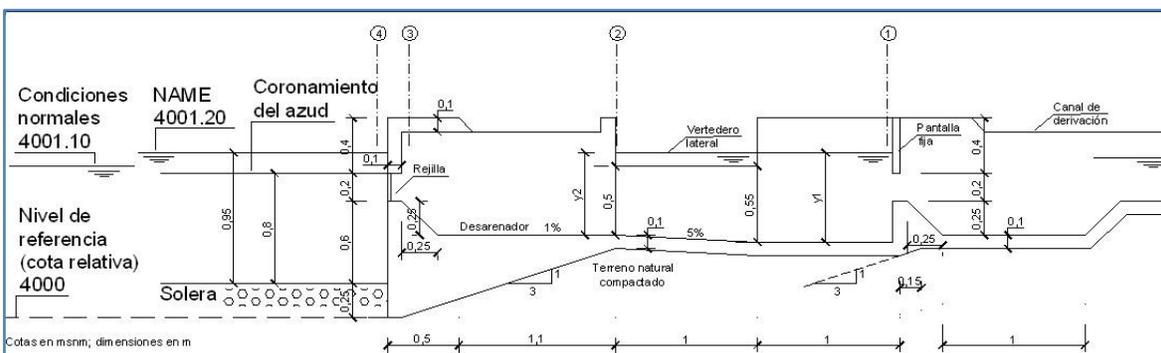


Figura 10. Predimensionamiento de la obra de toma.

Datos predimensionamiento:

- Caudal que entra al canal de derivación (condiciones normales, estiaje): $Q_c = 10 \text{ L/s}$
- Ancho desarenador, bocatoma y pantalla: $b_{\text{desar}} \text{ (m)} = 0.80 \text{ m}$
- Caudal de captación que entra al canal de derivación: $Q_c = 50 \text{ L/s}$

Tomando la sección de control, aquella que se encuentra a la entrada del canal de captación (Sección 1, Figura 6a), el cálculo se inicia mediante la inferencia de la carga necesaria para que el orificio capte Q_c en base a la fórmula de orificios (e.g., Molina, 2006):

$$Q_c = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH_1} \rightarrow H_1 = \frac{\left(\frac{Q_c}{A \cdot C_d}\right)^2}{2g} \tag{6}$$

...donde, el coeficiente de descarga es $C_d = 0.6$, y el subíndice 1 hace referencia a la sección 1.

Entre los tramos 1-2 y 2-3 se asumen únicamente pérdidas por fricción, cuyos valores se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$h_{f\ 2-1} = \left(\frac{Q_c \cdot n}{A_m \cdot R_m^{2/3}}\right)^2 \cdot L \tag{7}$$

..donde, h_f son las pérdidas por fricción, n es el coeficiente de rugosidad, A_m y R_m son las áreas y radio hidráulico medios entre las secciones donde se calculan las perdidas. En el tramo 3-4 se consideran las pérdidas por rejilla, por entrada, y por expansión (e.g., Molina, 2006).

Luego, para el cálculo de tirantes de agua “y”, se aplica el teorema de Bernoulli:

$$E_1 + h_{f\ 2-1} = E_2 + \Delta z_{1-2} \tag{8}$$

..donde E es la energía específica en la sección correspondiente, y Δz se refiere al gradiente topográfico entre las mismas secciones.

De esta manera, el prediseño final se presenta en la Figura 11.

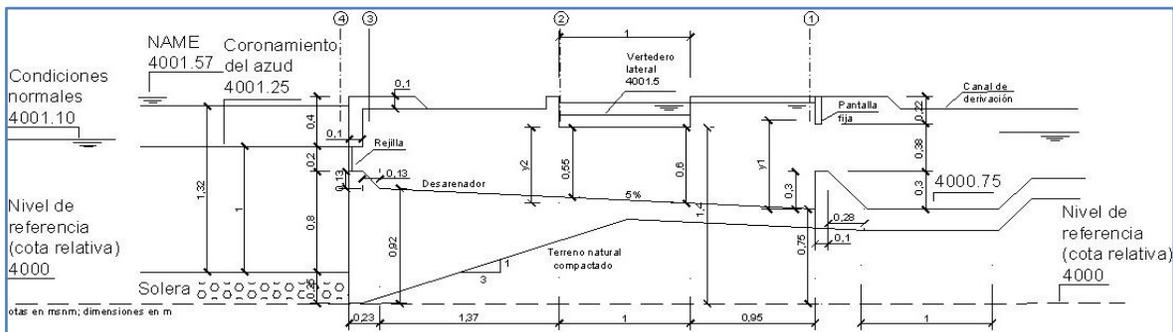


Figura 11. Predimensionamiento de la obra de toma, condiciones normales. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm.

c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.

El caudal de ingreso por el canal de derivación se calcula asumiendo flujo por un orificio no sumergido (estas condiciones se determinaron en el cálculo en condiciones normales):

$$Q_{\text{ingreso}} = Cd * An * \sqrt{2g * (H_4 - h_r)} \quad (9)$$

...donde, Cd se asume igual a 0.6, An es el área de entrada al canal, H_4 es la carga sobre la sección 4 y h_r es la altura de la rejilla (a la entrada por la sección 4). De esta manera, asumiendo que la entrada por el canal de derivación es un 20% más del caudal esperado de captación Q_c , se obtiene que el Q_c es 60 L/s. El resto es evacuado por el vertedero lateral de excedencias, cuya inclinación respecto al flujo es asumido igual a 20° , a objeto de mejorar la eficiencia del mismo.

Para un caudal de captación de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$, asumiendo un 20% adicional como un valor aceptable de captación, se confirma que el flujo es subcrítico, (Froude, $F = 0.145$). De la misma forma considerada para el diseño en condiciones normales, haciendo el balance de energía entre las secciones 1 y 2, se calcula el tirante de la sección 2, y se confirma la condición de flujo subcrítico.

Con los tirantes de las secciones 1 y 2 calculados, habiendo confirmado la condición de flujo subcrítico para ambas secciones, se asume una longitud de vertedero de 1 m. Con esta longitud de vertedero, se calcula que el caudal por el vertedero es $Q_{\text{exceso}} = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal de captación es $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{\text{vertedero}} = \frac{3 (Q_{\text{exceso}})}{2 Cw \sqrt{2g} h_m^{3/2}} \quad (10)$$

...donde, $L_{\text{vertedero}}$ es la longitud del vertedero, Cw es 0.6, y h_m es la altura de carga media para el vertedero lateral.

d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.

Para el análisis de resalto hidráulico, la longitud del tramo 2-3 debe ser mayor a la producida por el resalto (2 m), por lo que se decide re-calcular todo el proceso. De esta manera, las dimensiones de la obra (prediseño) se presentan en la Figura 12.

e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.

Se calcula que el estanque amortiguador tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). Finalmente, de la misma forma que se

realizó el cálculo del resalto hidráulico en el inciso anterior, se calcula que la longitud del estanque amortiguador es de 3 m.

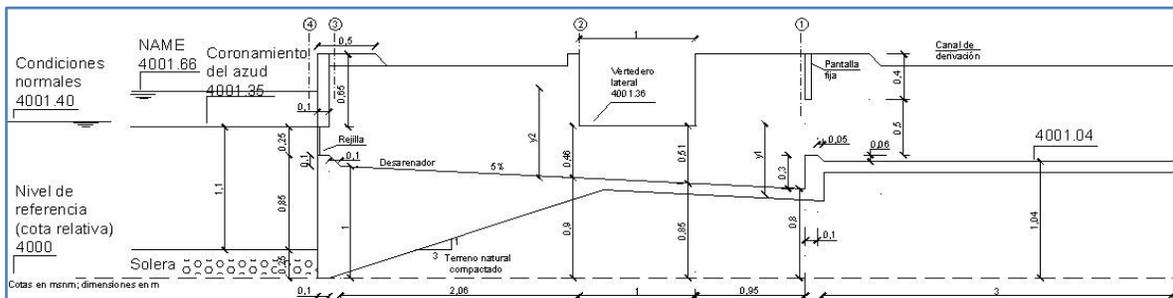


Figura 12. Predimensionamiento de la obra de toma: Cálculo final. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm. Los planos se entregan en formato CAD, con toda la información detallada.

3 OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 2.

La presente sección del Informe Final de Consultoría muestra la alternativa número 2 para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de la Comunidad Manasaya. La diferencia entre la presente alternativa y la originalmente propuesta en la sección anterior es que el caudal de captación se incrementa a 51 L/s, el cual corresponde al caudal total que fluye por el curso natural. El diseño de la presente alternativa se realiza a petición de la Comunidad Manasaya, a través de los técnicos de Agua Sustentable.

Datos de entrada

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011, época de estiaje).
- La sección típica de los aforos corresponde a la campaña del 5 de agosto de 2011.
- Caudal máximo: El caudal medido al final del canal Manasaya es de $2m^3/s$. Se asume un caudal máximo esperado de $Q_{max} = 750$ L/s.

Selección del tipo de obra de toma

Se selecciona una toma de derivación directa, con toma lateral convencional, y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la erosión lateral. Las ecuaciones y las variables a las que a continuación se hace mención hacen referencia a las citadas en la sección precedente.

Consideraciones generales de diseño.

Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del canal Manasaya, donde comienza la parte convexa. A diferencia de la alternativa 1, en la presente se considera un canal de purga en un extremo del azud, al lado de la reja de entrada, la cual se abrirá en las crecientes. El canal de purga fue omitido en la alternativa 1 para disminuir el costo de las obras. Se consideran los siguientes caudales:

- El caudal de diseño es $Q_{min} = 50$ L/s.
- Caudal de crecida de diseño $Q_{max} = 750$ L/s.

Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.

- Por razones de estabilidad, se opta por un azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua. Consiguientemente, para reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento), se busca adoptar un perfil Creager que esté sometido a una presión casi nula en todos sus puntos. Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo ($H^{\circ}C^{\circ}$), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, el flujo a través de la ecuación general para un vertedero tiene caudal de la crecida de diseño de $Q_{max} = 750$ L/s, $\mu = 0.50$, L es 2.30 m, C es 1.5. Se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. Conociendo μ , C , y L ($L = 230$ cm) se determina $H = 28$ cm. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), considerando que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 25$ cm, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 * hr = 120$ cm.

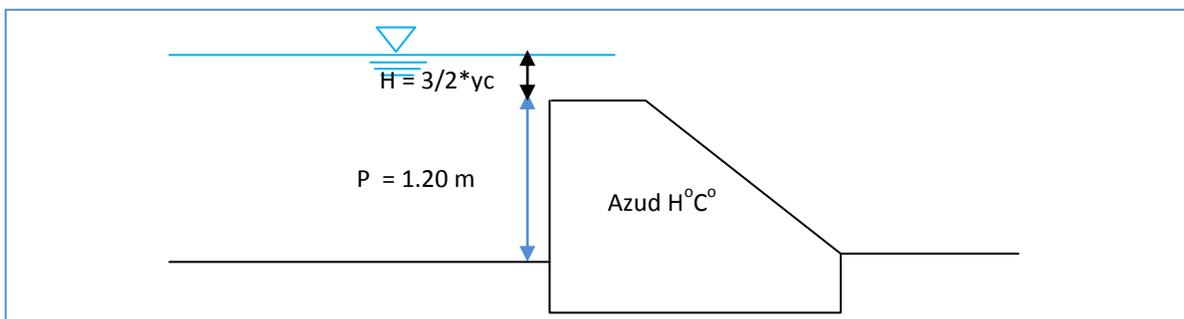


Figura 13. Esquema de la vista lateral del azud.

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco. Se asume:

peso unitario del $H^{\circ}C^{\circ} = 2200 \text{ kg/m}^3$,
 peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m^3 ,
 esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm^2 ,
 ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30° ,
 rugosidad lecho del río = 0.030,
 pendiente longitudinal = 0.015,
 tirante crítico $yc = 19 \text{ cm}$.

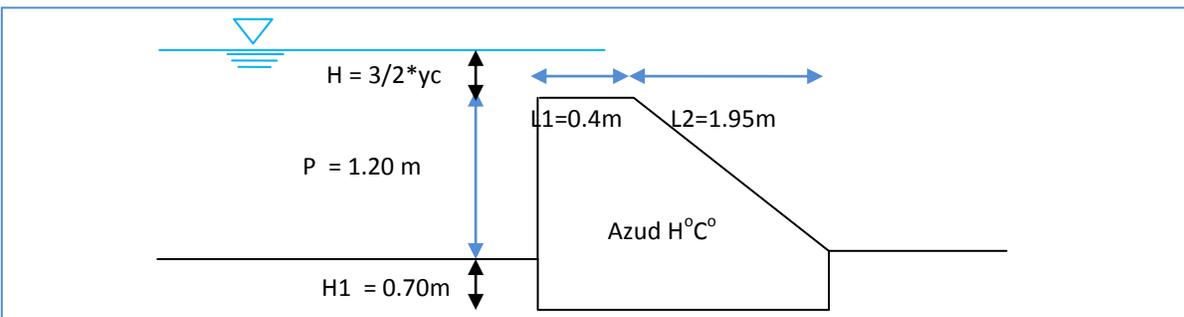


Figura 14. Esquema del azud y sus dimensiones.

$$Mv = \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H) + \gamma_{H2O} * H] * (P + H1) * CG1 + \frac{1}{2} \gamma_{sat} * (P + H1)^2 * CG2$$

$$+ \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H)] * (L1 + L2) * CG3$$

$$Mr = \gamma_{HoCo} * Area_{azud} * CG6$$

..donde CG es el brazo del momento. Luego:

$$Kv = Mr / Mv = 1.34 > 1.3$$

- Estabilidad al deslizamiento.

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce una pantalla-dentellón de 1.0m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^\circ$ ($Kd = 1.21 > 1.2$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Las dimensiones señaladas, hacen que se cumpla que la resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión. Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es Y (m) = 0.70, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:

- i) El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.
- ii) Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} es:

$$y_{cont} \text{ (m)} = 0.05$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: y_{normal} (m) = 0.06

Luego el tirante conjugado $y3'$ (m) = 0.7

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada z (m) = 0.55.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 3.1 m.

Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor a $2*hr = 0.85$ m.
- Altura total umbral+ $hr = 1.10$ m.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

Datos predimensionamiento:

- Ancho desarenador y bocatoma : b_{desar} (m) = 0.80 m.
- Ancho pantalla: $b_{pantalla}$ (m) = 0.65 m.
- Caudal de captación que entra al canal de derivación: $Q_c = 50$ L/s

Tomando la sección de control, aquella que se encuentra a la entrada del canal de captación, el cálculo se inicia mediante la inferencia de la carga necesaria para que el orificio capte Q_c en base a la fórmula de orificios, donde $Cd = 0.6$.

Entre los tramos 1-2 y 2-3 se asumen únicamente pérdidas por fricción. En el tramo 3-4 se consideran las pérdidas por rejilla, por entrada, y por expansión. Luego, para el cálculo de tirantes de agua "y", se aplica el teorema de Bernoulli. De esta manera, el prediseño final se presenta en la Figura siguiente.

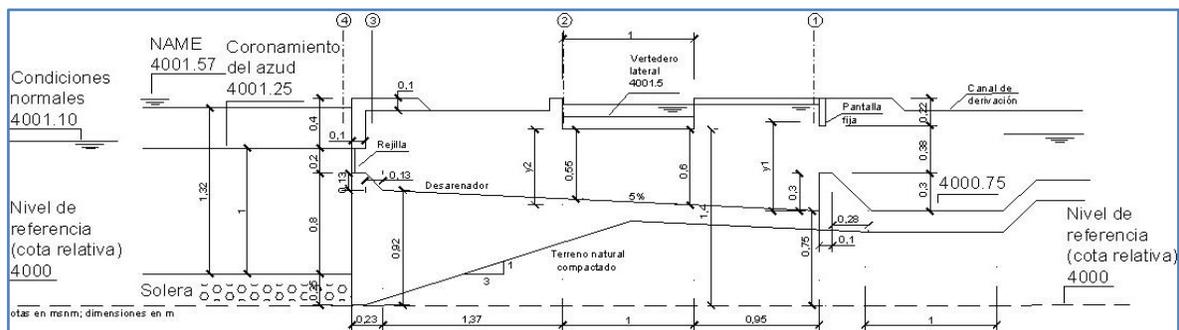


Figura 15. Predimensionamiento de la obra de toma, condiciones normales. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm.

c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.

El caudal de ingreso por el canal de derivación se calcula asumiendo flujo por un orificio no sumergido, donde Cd es 0.6. Luego, asumiendo que la entrada por el canal de derivación es un 20% más del caudal esperado de captación Q_c igual a 180 L/s. El resto es evacuado por el vertedero lateral de excedencias, cuya inclinación respecto al flujo es asumido igual a 20° , a objeto de mejorar la eficiencia del mismo.

Para un caudal de captación de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ (asumiendo un 20% adicional como un valor aceptable de captación), se confirma que el flujo es subcrítico, (Froude, $F = 0.215$). De la misma forma considerada para el diseño en condiciones normales, haciendo el balance de energía entre las secciones 1 y 2, se calcula el tirante de la sección 2, y se confirma la condición de flujo subcrítico (Froude, $F = 0.346$).

Con los tirantes de las secciones 1 y 2 calculados, habiendo confirmado la condición de flujo subcrítico para ambas secciones, se asume una longitud de vertedero de 1 m. Con esta longitud de vertedero, se calcula que el caudal por el vertedero es $Q_{\text{exceso}} = 0.016 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal de captación es $0.197 \text{ m}^3/\text{s}$, con C_w igual a 0.6.

d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.

Para el análisis de resalto hidráulico, la longitud del tramo 2-3 debe ser mayor a la producida por el resalto (2 m).

e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.

Se calcula que el estanque amortiguador tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). Finalmente, de la misma forma que se realizó el cálculo del resalto hidráulico en el inciso anterior, se calcula que la longitud del estanque amortiguador es de 3.1 m.

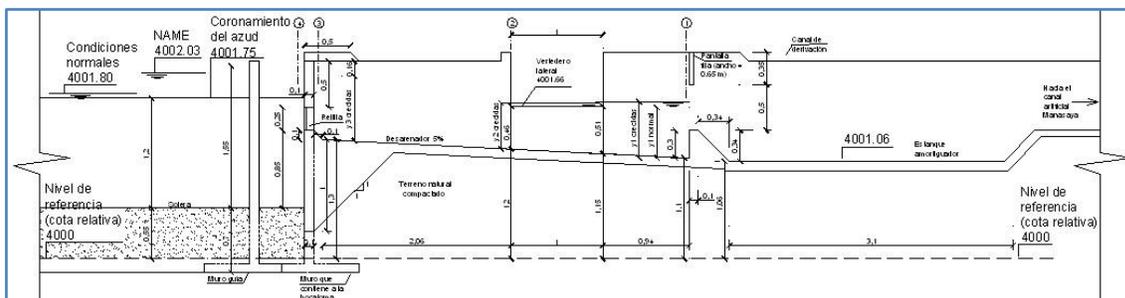


Figura 16. Predimensionamiento de la obra de toma: Cálculo final. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm. El archivo correspondiente se entrega en formato CAD para su mejor apreciación.

4 OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 3.

La presente sección muestra la Alternativa 4, para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de la Comunidad Manasaya. El diseño se realiza en base a las direcciones sugeridas en VSB (2005). La diferencia con las alternativas 1 y 2 es que se omite un canal desarenador debido a las dificultades en la ejecución del hormigonado explícitamente indicadas por el personal técnico de Agua Sustentable encargado de la construcción. La captación se realiza mediante cámara de captación hormigonada en sitio. La selección de la Alternativa 3 tiene la ventaja económica de que se reducen los volúmenes de hormigón ciclópeo y se reduce el tiempo de contrato de los eventuales maestros albañiles; existe una ventaja adicional que es discutible desde el punto de vista económico, pero al parecer se justifica desde el punto de vista constructivo: el uso de tubos flexibles para el transporte del agua desde la obra de toma hacia el canal de riego. Por otro lado, la principal desventaja es que debido a la alta carga de material sólido de arrastre en el río, se requiere mantenimiento semanal para la limpieza de la obra de toma (nuestras observaciones en sitio realizadas en el periodo marzo-abril de 2012, sugieren que los sedimentos son capaces de llenar una columna de 50 cm de alto en 30 días). Al respecto, las siguientes

observaciones (explicadas también en el Primer Informe de Avance; Soria, 2012a), son aplicables al ente responsable de la administración y mantenimiento de la obra:

Observación 1: La comunidad responsable de la administración de la obra deberá realizar la limpieza y apertura de la tubería de desfogue con frecuencia semanal, debido a la gran cantidad de material en suspensión.

Observación 2: La consideración de la presente Alternativa 3 implica que los caudales en época de crecidas deben ser cercanamente monitoreados. En la práctica esto implica que una vez que los comunarios observen una crecida extraordinaria en el curso natural aguas arriba de la obra, ellos deberán abrir la compuerta del canal de desfogue del azud y cerrar simultáneamente la compuerta de la boca de toma, para evitar la colmatación de la cámara de captación y otros problemas colaterales. La apertura de la compuerta de la obra de toma podrá realizarse una vez los comunarios observen que los niveles de las aguas retomen niveles seguros.

Observación 3: Aunque la presente Alternativa 3 se diseña considerando direcciones hidráulicas básicas presentadas en el Primer Informe de Avance, se debe tener en cuenta que los caudales captados por la obra no tienen los niveles de precisión otorgados por las Alternativas 1 y 2 presentadas en el Primer Informe de Avance.

Observación 4: La consideración de la presente Alternativa conlleva un menor costo. Sin embargo, la razón por la cual se presenta esta alternativa es a sugerencia de los técnicos de Agua Sustentable encargados de la construcción de la obra, quienes demandaron por un proyecto que constructivamente sea fácil de implementar (en comparación a las Alternativas 1 y 2).

Observación 5: Debido a la gran carga de material sólida arrastrado por el río, se sugiere la implementación de un espigón aguas arriba del sitio de emplazamiento de la obra. El dentellón puede ser construido utilizando gaviones.

Datos de entrada.

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s.
- Caudal máximo de captación $Q_{max}=20\% 175$ L/s = 150 L/s.

Tipo de obra de toma.

- Obra de captación lateral, con azud de elevación, obras de encauce y protección lateral mínimas debido a las restricciones económicas
- Cámara de recolección para su posterior conducción a través de tubería.
- El esquema general de la obra se obtiene a partir de las recomendaciones sugeridas en la Figura 4.2 de VSB (2005).
- Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del canal Manasaya, donde comienza la parte convexa.
- Por razones de estabilidad, se opta por un azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua. Consiguientemente, para reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento), se busca adoptar un perfil Creager que esté sometido a una presión casi nula en todos sus puntos.
- Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo (H^0C^0), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas.

- El caudal máximo es 750 L/s, la longitud de la cresta es 2.20 m; se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. La altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 40$ cm, el umbral de la rejilla = 60 cm, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 * hr = 120$ cm.
- El azud es estable al vuelco y también al deslizamiento luego de introducir una pantalla-dentellón de 1.0 m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^\circ$ ($K_d = 1.21 > 1.2$).
- La resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión. Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es $Y (m) = 0.50$, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.
- Disipación de energía: La longitud del colchón hidráulico es 3.2 m; la altura de la grada es 0.55 m.
- El umbral de la bocatoma es 0.80 m; la altura del muro que contiene la bocatoma es 1.75 m (respecto al nivel del lecho); el ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma es 30° .
- Las dimensiones de la cámara de captación
- Cámara de captación: 1.40x1.60x1.75 m. El caudal de diseño es 150 L/s (20% del caudal máximo que fluye por el canal Manasaya). Se calcula que será necesaria una tubería de 10" (PVC). De allí, en teoría, el caudal que este tipo de tubería podría conducir es 188 L/s; el caudal mínimo de captación es 105 L/s. Para el caudal máximo se necesita una tubería de PVC 6".
- Para una bocatoma rectangular, con barrotes lisos de 1/2", espacio entre barrotes de 3 cm, son necesarias 24 barrotes. De allí, el ancho de la bocatoma calculado es 1.0 m.
- El diseño detallado de la obra se entrega en formato CAD.

5 OBRA DE TOMA MANASAYA: ALTERNATIVA 4.

La Alternativa 4 se realiza en base a las direcciones sugeridas en VSB (2005). La diferencia con las alternativas 1 y 2 es que se omite un canal desarenador debido a las dificultades en la ejecución del hormigonado explícitamente indicadas por el personal técnico de Agua Sustentable encargado de la construcción. La diferencia con la Alternativa 3 es que la captación se realiza mediante cámara de captación hormigonada en sitio. La selección de la Alternativa 4 tiene la ventaja económica de que se reducen los volúmenes de hormigón ciclópeo y se reduce el tiempo de contrato de los eventuales maestros albañiles; existe una ventaja adicional que es discutible desde el punto de vista económico, pero al parecer se justifica desde el punto de vista constructivo: el uso de tubos flexibles para el transporte del agua desde la obra de toma hacia el canal de riego. Por otro lado, la principal desventaja es que debido a la alta carga de material sólido de arrastre en el río, se requiere mantenimiento semanal para la limpieza de la obra de toma (nuestras observaciones en sitio realizadas en el periodo marzo-abril de 2012, sugieren que los sedimentos son capaces de llenar una columna de 50 cm de alto en 30 días). Al respecto, las siguientes observaciones (explicadas también en el Primer Informa de Avance; Soria, 2012), son aplicables al ente responsable de la administración y mantenimiento de la obra:

Observación 1: La comunidad responsable de la administración de la obra deberá realizar la limpieza y apertura de la tubería de desfogue con frecuencia semanal, debido a la gran cantidad de material en suspensión.

Observación 2: La consideración de la presente Alternativa 4 implica que los caudales en época de crecidas deben ser cercanamente monitoreados. En la práctica esto implica que una vez que los comunarios observen una crecida extraordinaria en el curso natural aguas arriba de la obra, ellos deberán abrir la compuerta del canal de desfogue del azud y cerrar simultáneamente la compuerta de la boca de toma, para evitar la colmatación de la cámara de captación y otros problemas colaterales. La apertura de la compuerta de la obra de toma podrá realizarse una vez los comunarios observen que los niveles de las aguas retomen niveles seguros.

Observación 3: Aunque la presente Alternativa 4 se diseña considerando direcciones hidráulicas básicas presentadas en el Primer Informe de Avance, se debe tener en cuenta que los caudales captados por la obra no tienen los niveles de precisión otorgados por las Alternativas 1 y 2 presentadas en el Primer Informe de Avance.

Observación 4: La consideración de la presente Alternativa conlleva un menor costo. Sin embargo, la razón por la cual se presenta esta alternativa es a sugerencia de los técnicos de Agua Sustentable encargados de la construcción de la obra, quienes demandaron por un proyecto que constructivamente sea fácil de implementar (en comparación a las Alternativas 1 y 2).

Observación 5: Debido a la gran carga de material sólida arrastrado por el río, se sugiere la implementación de un espigón aguas arriba del sitio de emplazamiento de la obra. El dentellón puede ser construido utilizando gaviones.

Obra de toma

La memoria del diseño se presenta en el Primer Informe de Avance; Soria, 2012a.

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s. Caudal máximo de captación $Q_{max}=20\%$ de 175 L/s = 150 L/s.
- Obra de captación lateral, con azud de elevación, obras de encauce y protección lateral mínimas debido a las restricciones económicas
- Cámara de recolección para su posterior conducción a través de tubería.
- El esquema general de la obra se obtiene a partir de las recomendaciones sugeridas en la Figura 4.2 de VSB (2005).
- Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del canal Manasaya, donde comienza la parte convexa.
- Por razones de estabilidad, se opta por un azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua. Consiguientemente, para reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento), se busca adoptar un perfil Creager que esté sometido a una presión casi nula en todos sus puntos.
- Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo ($H^{\circ}C^{\circ}$), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas.
- El caudal máximo es 750 L/s, la longitud de la cresta es 2.20 m; se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. La altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 40$ cm, el umbral de la rejilla = 60 cm, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0*hr = 120$ cm.
- El azud es estable al vuelco y también al deslizamiento luego de introducir una pantalla-dentellón de 1.0 m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^{\circ}$ ($K_d = 1.21 > 1.2$).

- La resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión. Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es $Y \text{ (m)} = 0.50$, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.
- Disipación de energía: La longitud del colchón hidráulico es 3.2 m; la altura de la grada es 0.55 m.
- El umbral de la bocatoma es 0.80 m; la altura del muro que contiene la bocatoma es 1.75 m (respecto al nivel del lecho); el ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma es 30° .
- Las dimensiones de la cámara de captación
- Cámara de captación: 1.40x1.60x1.75 m. El caudal de diseño es 150 L/s (20% del caudal máximo que fluye por el canal Manasaya). Se calcula que será necesaria una tubería de 10" (PVC). De allí, en teoría, el caudal que este tipo de tubería podría conducir es 188 L/s; el caudal mínimo de captación es 105 L/s. Para el caudal máximo se necesita una tubería de PVC 6".
- Para una bocatoma rectangular, con barrotes lisos de 1/2", espacio entre barrotes de 3 cm, son necesarias 24 barrotes. De allí, el ancho de la bocatoma calculado es 1.0 m.
- El diseño detallado de la obra se entrega en formato CAD.

6 OBRA DE TOMA MANASAYA-AGUAS ABAJO: ALTERNATIVA 1.

La presente sección muestra la Alternativa número 1 para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de Manasaya-Aguas Abajo. El diseño de la presente alternativa sigue los parámetros considerados en el diseño de la Alternativa 1 de la obra de toma del canal Manasaya.

Datos de entrada

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{\min}=51 \text{ L/s}$ (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011, época de estiaje).
- La sección típica de los aforos del 5 de agosto de 2011 se presenta en la Figura 17.
- Caudal máximo: $Q_{\max} = 750 \text{ L/s}$ (esperado).

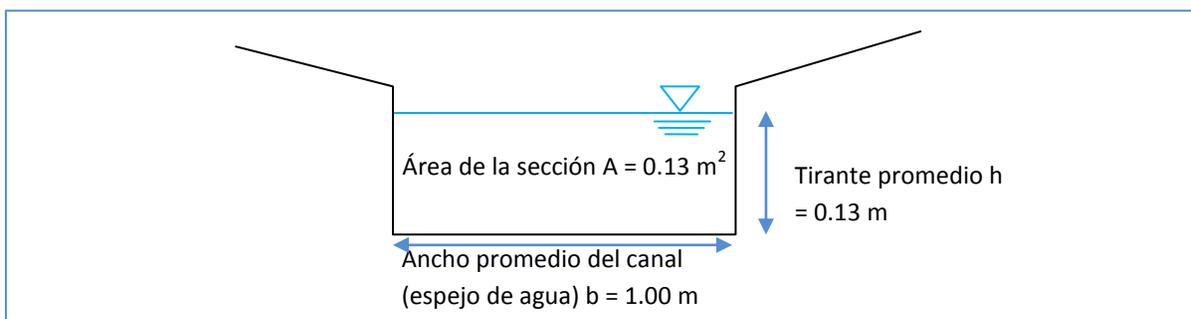


Figura 17. Sección típica para la época de estiaje.

Selección del tipo de obra de toma

Se selecciona una toma de derivación directa, con toma lateral convencional, y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la

erosión lateral, la erosión de fondo y la colmatación del azud. Las ecuaciones y las variables que a continuación se hace mención hacen referencia a las descritas en las secciones precedentes.

Consideraciones generales de diseño.

Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del río, donde comienza la parte convexa. Se considera un canal de purga en un extremo del azud, al lado de la reja de entrada, la cual se abrirá en las crecientes.

Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.

- Azud con perfil trapezoidal ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua y reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento). Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo ($H^{\circ}C^{\circ}$), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, se describe el flujo a través de la ecuación general para un vertedero, para la cual el caudal de la crecida de diseño es $Q_{max} = 750$ L/s, $\mu = 0.50$, L es 1.10 m, C es 1.5, y se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. Conociendo μ , C , y L ($L = 220$ cm), se determina $H = 45$ cm. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), asumiendo que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 25$ cm, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 * hr = 90$ cm (Figura 18).

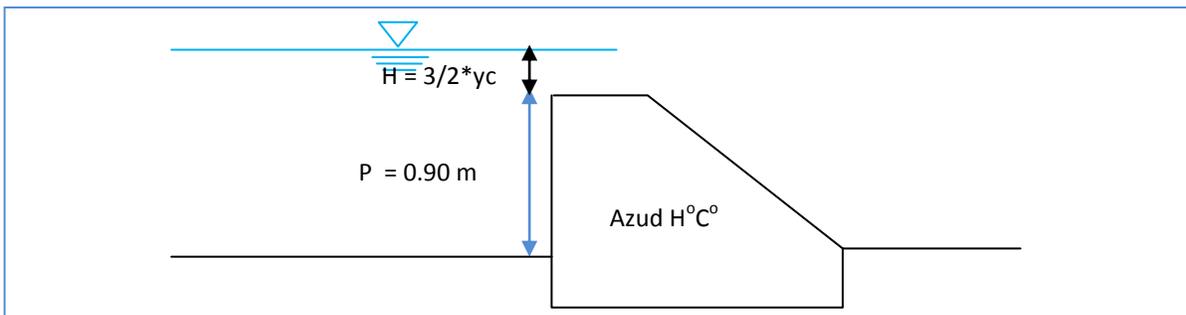


Figura 18. Esquema de la vista lateral del azud

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco. Se asume:

peso unitario del $H^{\circ}C^{\circ} = 2200$ kg/m³,
 peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m³,
 esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm²,
 ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30°,
 rugosidad lecho del río = 0.030,
 pendiente longitudinal = 0.015,
 tirante crítico $yc = 31$ cm.

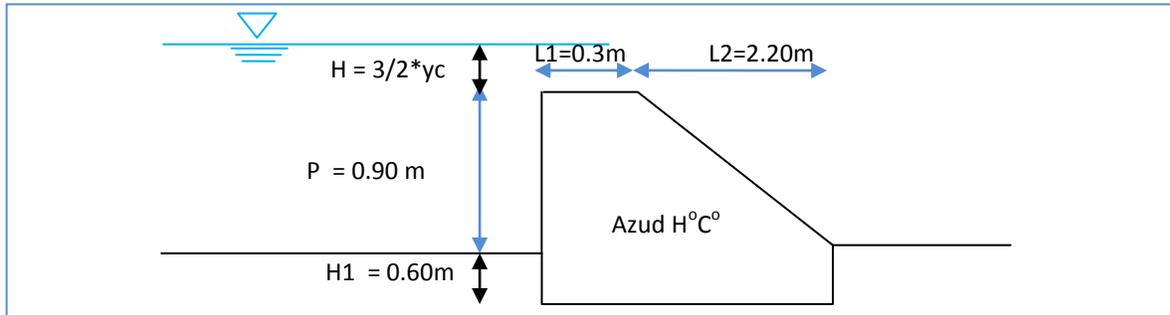


Figura 19. Esquema del azud y sus dimensiones.

$$Mv = \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H) + \gamma_{H2O} * H] * (P + H1) * CG1 + \frac{1}{2} \gamma_{sat} * (P + H1)^2 * CG2$$

$$+ \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H)] * (L1 + L2) * CG3$$

$$Mr = \gamma_{HoCo} * Area_{azud} * CG6$$

..donde CG es el brazo del momento. Luego:

$$Kv = Mr / Mv = 1.4 > 1.3$$

- Estabilidad al deslizamiento.

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce una pantalla-dentellón de 1.0m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^\circ$ ($Kd = 1.21 > 1.2$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Las dimensiones señaladas, hacen que se cumpla que la resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La magnitud de la erosión es $Y (m) = 1.30$, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:

- i) El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.

- ii) Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} es:

$$y_{cont} (m) = 0.10$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: $y_{normal} (m) = 0.40$

Luego el tirante conjugado $y_3' (m) = 0.93$

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada $z (m) = 0.65$.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 4.2 m.

Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor a $2*hr = 0.85$ m.
- Altura total umbral+ $hr = 1.10$ m.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

Datos predimensionamiento:

- Ancho desarenador y bocatoma : $b_{desar} (m) = 0.80$ m.
- Ancho pantalla: $b_{pantalla} (m) = 0.65$ m.
- Caudal de captación que entra al canal de derivación: $Q_c = 50$ L/s

Tomando la sección de control, aquella que se encuentra a la entrada del canal de captación, el cálculo se inicia mediante la inferencia de la carga necesaria para que el orificio capte Q_c en base a la fórmula de orificios, donde $C_d = 0.6$. Dicha carga es 0.03 m.

Entre los tramos 1-2 y 2-3 se asumen únicamente pérdidas por fricción. En el tramo 3-4 se consideran las pérdidas por rejilla, por entrada, y por expansión. Luego, para el cálculo de tirantes de agua "y", se aplica el teorema de Bernoulli. Luego, el prediseño se somete al diseño para condiciones de crecida.

c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.

Datos predimensionamiento:

- Alto pantalla: $a_{pantalla} (m) = 0.48$ m.
- Ancho pantalla: $b_{pantalla} (m) = 0.65$ m.

El caudal de ingreso por el canal de derivación se calcula asumiendo flujo por un orificio no sumergido, donde Cd es 0.6. Luego, asumiendo que la entrada por el canal de derivación es un 20% más del caudal esperado de captación Q_c igual a 180 L/s. El resto es evacuado por el vertedero lateral de excedencias, cuya inclinación respecto al flujo es asumido igual a 20° , a objeto de mejorar la eficiencia del mismo.

Para un caudal de captación de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ (asumiendo un 20% adicional como un valor aceptable de captación), se confirma que el flujo es subcrítico, (Froude, $F = 0.230$). De la misma forma considerada para el diseño en condiciones normales, haciendo el balance de energía entre las secciones 1 y 2, se calcula el tirante de la sección 2, y se confirma la condición de flujo subcrítico (Froude, $F = 0.392$).

Con los tirantes de las secciones 1 y 2 calculados, habiendo confirmado la condición de flujo subcrítico para ambas secciones, se asume una longitud de vertedero de 1 m. Con esta longitud de vertedero, se calcula que el caudal por el vertedero es $Q_{\text{exceso}} = 0.024 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal de captación es $0.220 \text{ m}^3/\text{s}$, y Cw es 0.6.

d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.

Para el análisis de resalto hidráulico, la longitud del tramo 2-3 debe ser mayor a la producida por el resalto (1.90 m).

e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.

Se calcula que el estanque amortiguador tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). Finalmente, de la misma forma que se realizó el cálculo del resalto hidráulico en el inciso anterior, se calcula que la longitud del estanque amortiguador es de 3.0 m.

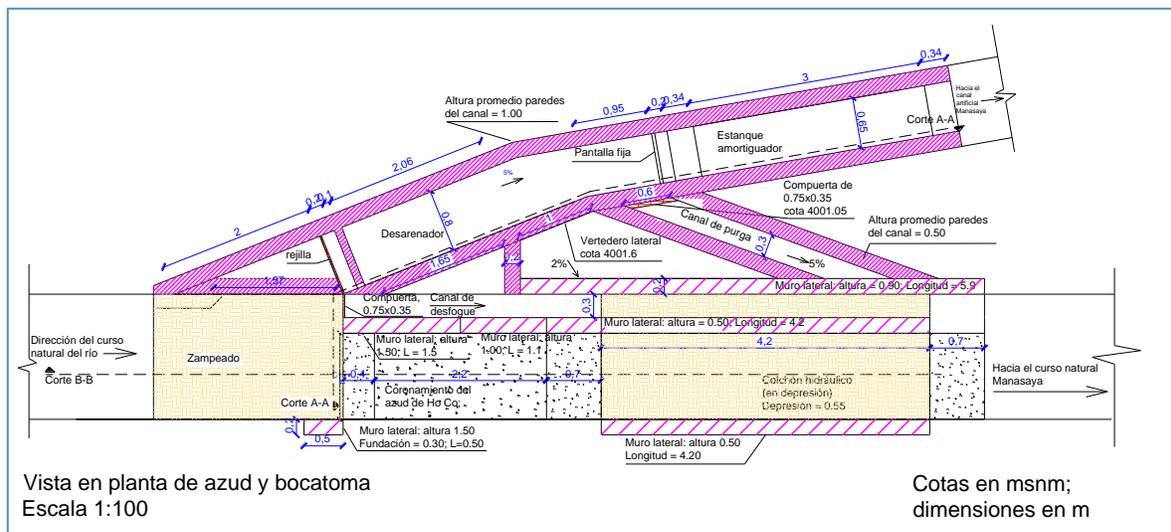


Figura 20. Obra de toma: Cálculo final. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm. El archivo correspondiente se entrega en formato CAD para su mejor apreciación.

7 OBRA DE TOMA MANASAYA-AGUAS ABAJO: ALTERNATIVA 2.

A diferencia de la Alternativa 1, la presente Alternativa no tuvo mayores objeciones de parte del personal de Agua Sustentable encargado de su construcción. Por esta razón se presenta un resumen de los principales aspectos del diseño de la Alternativa 1.

- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011, época de estiaje). Caudal máximo $Q_{max} = 750$ L/s (esperado).
- Toma de derivación directa, con toma lateral convencional, y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la erosión lateral, la erosión de fondo y la colmatación del azud.
- Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del río, donde comienza la parte convexa. Se considera un canal de purga en un extremo del azud, al lado de la reja de entrada, la cual se abrirá en las crecientes.
- Debido al gran caudal sólido observado en el río, se sugiere que la limpieza de las obras se realice con frecuencia de dos veces al mes (nuestras observaciones en sitio realizadas en el periodo marzo-abril de 2012, sugieren que los sedimentos son capaces de llenar una columna de 50 cm de alto en 30 días).
- Azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua). Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo ($H^{\circ}C^{\circ}$), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. La longitud del vertedero es 1.10 m, asumiendo que la descarga es a superficie libre. La altura de la rejilla a la entrada del canal es 25 cm. La altura del azud es 90cm.
- El azud es estable al vuelco y al deslizamiento, luego de introducir una pantalla-dentellón de 1.0 m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^{\circ}$ ($K_d = 1.21 > 1.2$). Los esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión) con las dimensiones señaladas, hacen que se cumpla que la resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- La profundidad del dentellón es mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión, igual a 1.30 m.
- Para la disipación de energía, se sugiere un colchón en depresión con longitud de 4.2 m (depresión: 0.65 m).
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho); el ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma es 30° .
- Ancho desarenador y bocatoma es 0.80 m; el ancho de la pantalla de entrada al canal de captación es 0.65 m (el alto de pantalla es 0.48 m). En base a estas dimensiones, el caudal de captación que entra al canal de derivación es 50 L/s.
- Durante crecidas, la longitud del vertedero es 1 m. El caudal eliminado por el vertedero es $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal de captación es $0.220 \text{ m}^3/\text{s}$.
- El estanque amortiguador antes de la entrada al canal de captación tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). La longitud del estanque amortiguador es de 3.0 m.
- El diseño detallado de la obra se entrega en formato CAD.

8 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y MATERIAL.

Análisis de Precios Unitarios.

PROVISIÓN Y COLOCACIÓN DE COMPUERTA METALICA PARA CANAL 75 x 35 cm

Unidad: Pza

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ACERO LISO 20 mm (3/4")	m	0.6	18.42	11.1
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.36	11.83	4.3
ANGULAR 1" x 1/8"	m	2.96	9.5	28.1
ARENA CORRIENTE	m ³	0.02	122	2.4
CEMENTO IP - 30	kg	12	1.07	12.8
CLAVOS	kg	0.06	13	0.8
GRAVA COMUN	m ³	0.03	100	3.0
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	1.03	9.75	10.0
ELECTRODO 6010 2.5	kg	1.5	18.46	27.7
PINTURA ANTICORROSIVA	Gal	0.03	147.13	4.4
PLANCHA DE ACERO 1/8" e = 3 mm	m ²	0.12	213.22	25.6
			Total Material =	130.2

DINTELES DE MADERA

Unidad: ML

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.3	11.83	3.5
ALAMBRE TEJIDO	m2	0.6	4.29	2.6
CLAVOS	kg	0.2	13	2.6
ESTUCO PANDO	kg	13	0.35	4.6
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	1.3	9.75	12.7
			Total Material =	25.9

TAPA DE Hº Aº PARA CAMARA DE 1 x 0.5 x 0.1 m DOSIFICACION 1:2:4**Unidad: ML**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ACERO CORRUGADO	kg	4	8.48	33.9
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.1	11.83	1.2
ARENA CORRIENTE	m ³	0.02	122	2.4
CEMENTO IP - 30	kg	14	1.07	15.0
CLAVOS	kg	0.1	13	1.3
GRAVA COMUN	m ³	0.04	100	4.0
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	0.67	9.75	6.5
Total Material =				64.4

Hº Cº CON 50% DE PIEDRA DESPLAZADORA DOSIF:1:3:4 + ACELERADOR DE FRAGUADO EXENTO DE CLORUROS**Unidad: m³**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ADITIVO ACELERADOR DE FRAGUADO EXENTO DE CLORUROS	kg	2.25	34.5	77.6
ARENA CORRIENTE	m ³	0.27	122	32.9
CEMENTO IP - 30	kg	150	1.07	160.5
CLAVOS	kg	0.5	13	6.5
GRAVA COMUN	m ³	0.36	100	36.0
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	10	9.75	97.5
PIEDRA BRUTA	m ³	0.5	125	62.5
Total Material =				473.6

PISO DE CEMENTO CON CONTRAPISO CARPETA DE Hº 1:3:4 e = 5 cm**Unidad: m²**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ARENA CORRIENTE	m ³	0.03	122	3.7
CEMENTO IP - 30	kg	13	1.07	13.9
GRAVA COMUN	m ³	0.04	100	4.0
PIEDRA MANZANA	m ³	0.12	110	13.2
Total Material =				34.8

EMPIEDRE DE CALZADA**Unidad: m²**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
PIEDRA MANZANA	m ³	0.14	110	15.4
Total Material =				15.4

HORMIGON POBRE				
Unidad: m³				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ARENA CORRIENTE	m ³	0.43	122	52.5
CEMENTO IP - 30	kg	200	1.07	214.0
GRAVA COMUN	m ³	0.74	100	74.0
			Total Material =	340.5

CAMARA SEPTICA (2.0 x 1.20 x 1.5) LADRILLO GAMBOTE				
Unidad: Pza				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.3	11.83	3.5
ARENA FINA	m ³	0.71	136	96.6
CEMENTO IP - 30	kg	260	1.07	278.2
LADRILLO GAMBOTE 18H 25 x 12 x 6 cm	Pza	672	1.12	752.6
			Total Material =	1130.9

Cantidad de material a ser empleado.

MATERIALES		total	para comprar
ACERO LISO 20 mm (3/4")	m	3.6	1 barra
ACERO LISO (1/2")	m	18.0	3 barra
ALAMBRE DE AMARRE	kg	3.5	4 kg
ANGULAR 1" x 1/8"	m	17.8	18 m
ARENA CORRIENTE	m ³	0.7	1 m ³
CEMENTO IP - 30	kg	5362.5	107 bolsas
CLAVOS	kg	15.8	16 kg
GRAVA COMUN	m ³	13.0	13 m ³
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	305.1	300 P2
ELECTRODO 6010 2.5	kg	9.0	9 kg
PINTURA ANTICORROSIVA	Gal	0.2	1 Litros
PLANCHA DE ACERO 1/8" e = 3 mm	m ²	0.7	1 m ²
ALAMBRE TEJIDO	m ²	1.2	1.5 m ²
ESTUCO PANDO	kg	26.0	1.5 bolsas
ACERO CORRUGADO	kg	16.0	16 kg
ADITIVO ACELERADOR DE FRAGUADO EXENTO DE CLORUROS	kg	66.1	4 envases SIKA Rapid 1
PIEDRA BRUTA	m ³	14.7	15 m ³
PIEDRA MANZANA	m ³	4.2	5 m ³
ARENA FINA	m ³	0.7	1 m ³
LADRILLO GAMBOTE 18H 25 x 12 x 6 cm	Pza	672.0	672 piezas

Total costo de inversión (2 obras de toma): 17700 Bs

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- En base a la Alternativa 4 del diseño de la obra de toma del canal Manasaya y a la Alternativa 2 de la obra de toma Manasaya-Aguas Abajo, se presentó el análisis de precios unitarios y el cálculo del material a ser empleado. Para una óptima utilización de los materiales y recursos humanos, y en caso de que por disposiciones constructivas exista la necesidad de realizar modificaciones al diseño presentado, se recomienda la contratación de un supervisor con experiencia en la construcción de obras civiles (de preferencia ingeniero civil).

- En caso de utilizarse material del lugar (áridos), se recomienda seguir las especificaciones técnicas respectivas para garantizar la funcionalidad de las obras, principalmente en lo que concierne a las mezclas de hormigones.
- Se recomienda tomar en cuenta las observaciones señaladas en la introducción de las partes correspondientes del presente Informe, principalmente en caso de que existan dudas acerca de la funcionalidad y mantenimiento requerido en la operación del diseño presentado en la Alternativa 4 de la obra en el canal Manasaya.
- Se recomienda consultar los planos que acompañan el presente Informe a lo largo del proceso de construcción de las obras.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado a solicitud de la ONG Agua Sustentable. La logística y el apoyo en campo fueron provistos por Agua Sustentable a través de su personal técnico. La descripción detallada de las personas involucradas en el mismo es extensa, por lo cual los agradecimientos son generales. Los detalles acerca de las fuentes de financiamiento pueden consultarse en la Propuesta del Proyecto.

10 REFERENCIAS

Congreso Nacional de Bolivia, 1992. Ley del Medio Ambiente No. 1333. Gaceta Oficial de Bolivia, La Paz.

Krochin, S., 1982. Diseño hidráulico. Universidad Central de Ecuador.

Mattos, R., 1999. Pequeñas obras hidráulicas. PHI UNESCO, IHH UMSA. La Paz.

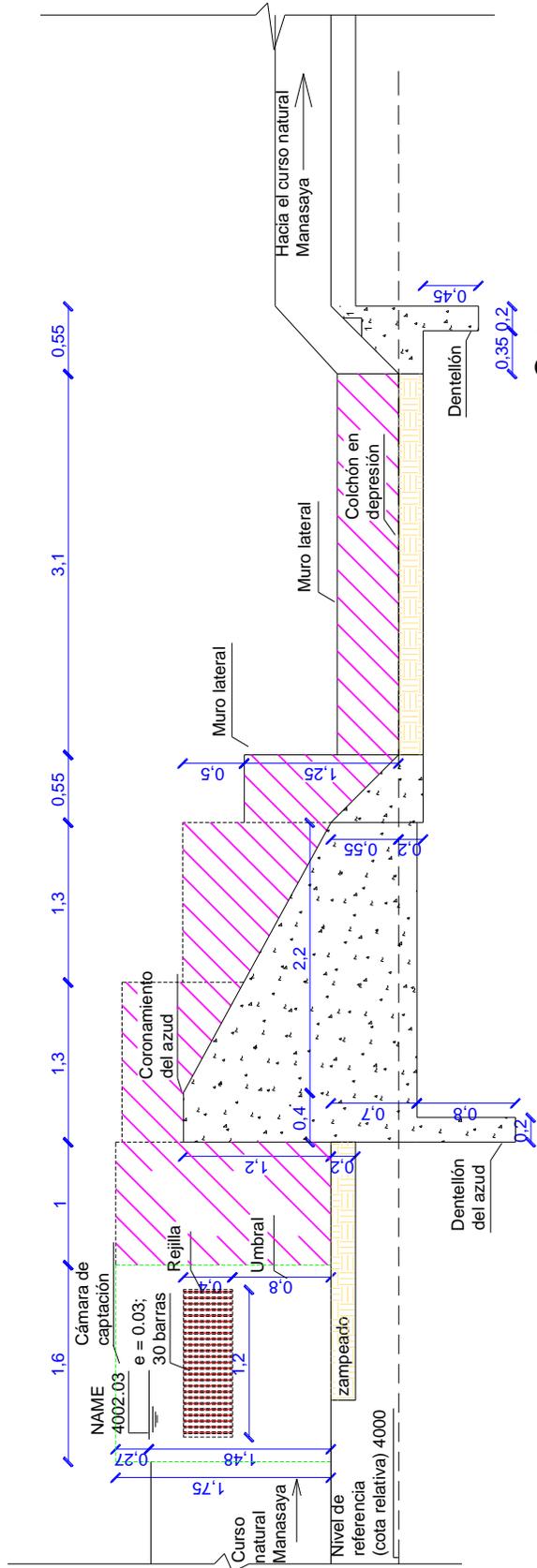
Molina, J., 2006. Temas especiales de hidráulica. IHH UMSA, La Paz.

Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., Narayanan L., 2004. Estructuras hidráulicas. Taylor & Francis, Londres.

Sánchez, L., Gutierrez, Z., Montaña, C., Brun, F., 2002. Tomas directas. PROAGRO. Cochabamba.

Viceministerio de Servicios Básicos VSB, 2004. Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, Reglamento Nacional NB 689. VSB, La Paz.

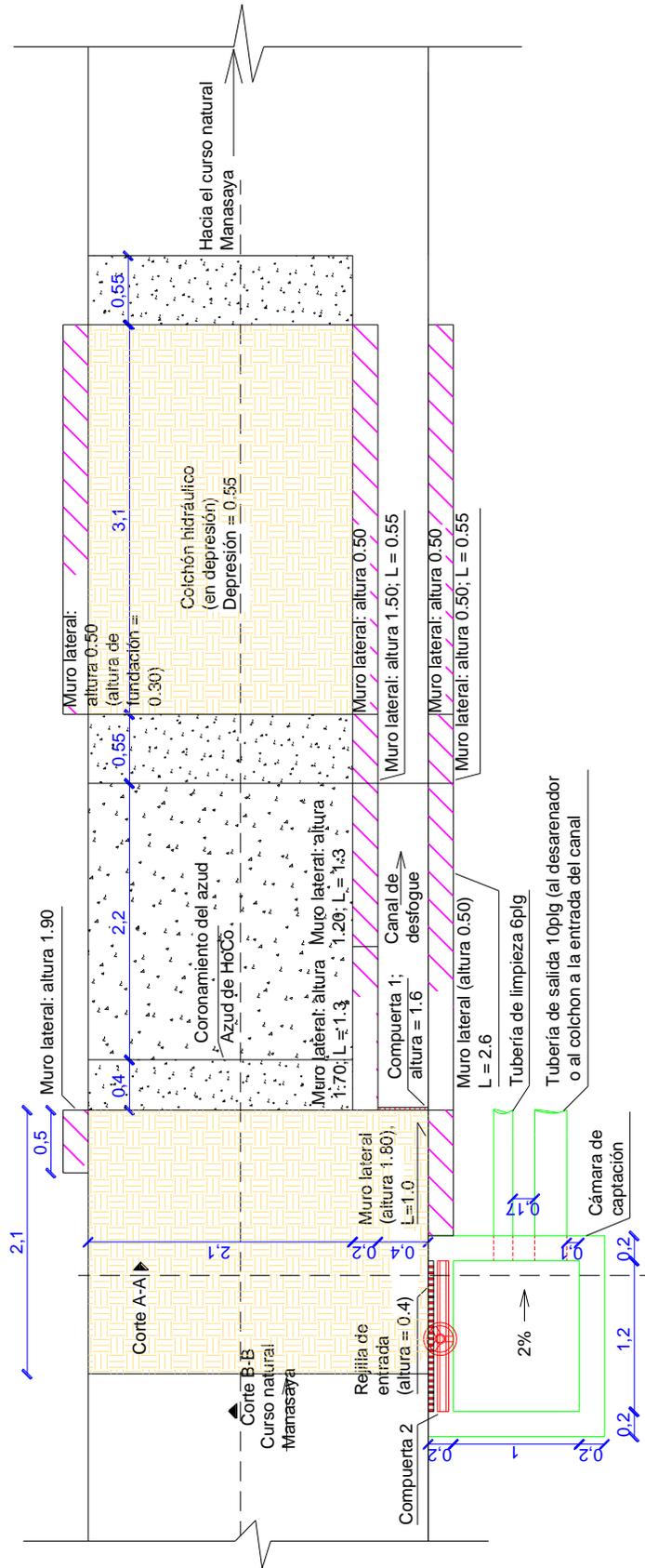
ANEXO 1. PLANO DE LA OBRAS DE TOMA CANAL MANASAYA (Aguas arriba).



Cotas en msnm;
dimensiones en m

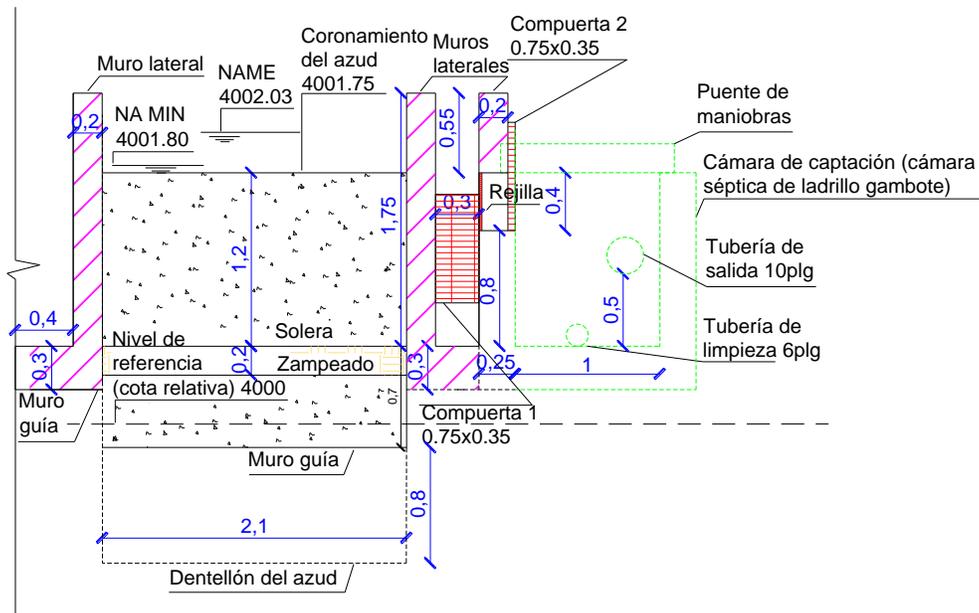
Vista lateral de azud y entrada a bocatoma - Corte B-B
Escala 1:100

(para facilitar la visualización, se eliminó la vista del canal de desfogue y la pantalla guía del canal de desfogue del azud)



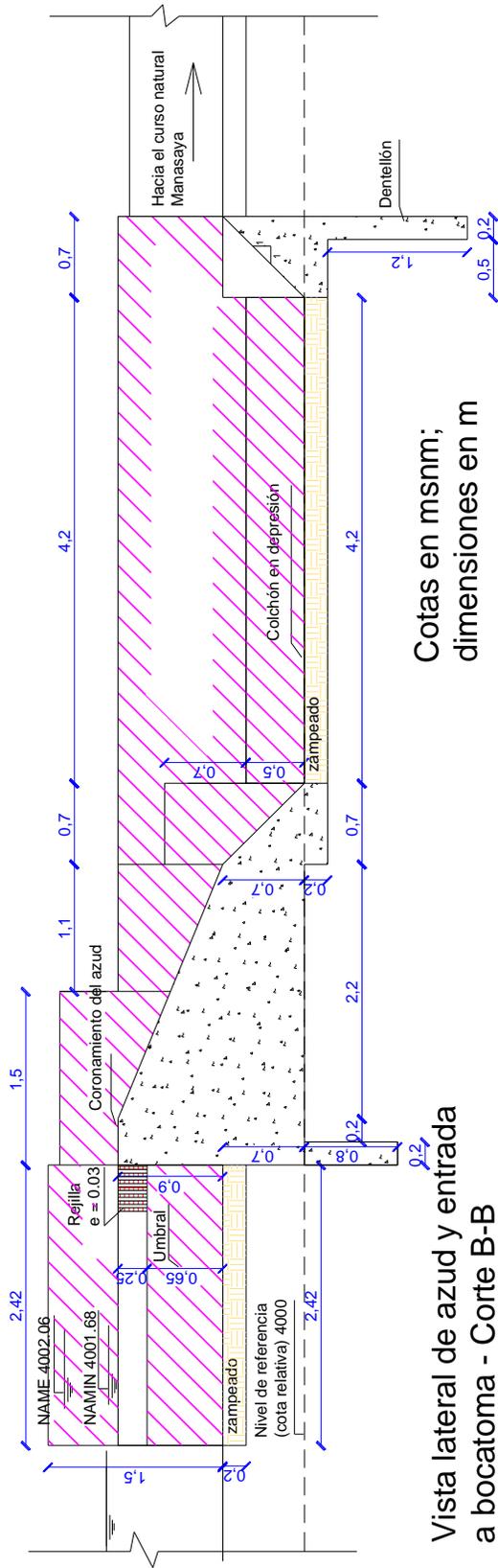
Vista en planta de azud y bocatoma

Cotas en msnm; dimensiones en m



Corte A-A: Vista de la bocatoma
Escala 1:100

Cotas en msnm;
dimensiones en m



Cotas en msnm;
dimensiones en m

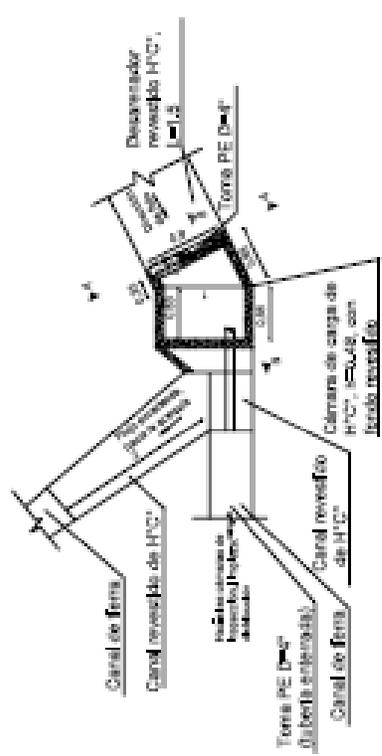
Vista lateral de azud y entrada
a bocatoma - Corte B-B
Escala 1:100

(para facilitar la visualización, se eliminó la
vista del canal de desfogue y la pantalla
guía del del canal de desfogue del azud)

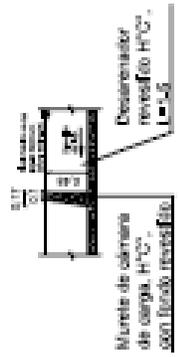
ANEXO 3. ESQUEMA DE OBRAS CONSTRUIDAS EN SAJAMA Y PAPELPAMPA.

<p>Esquemas gráficos de estructura para aerobomba, Comunidad Sajama, Vistas en planta y lateral</p> <p>Esquema de base de H²A⁺ para instalación de bomba Vista lateral Esc. 1:100</p> <p>Esquema de base de H²A⁺ para instalación de bomba Vista en planta Esc. 1:100</p>	<p>Notas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las columnas se encuentran enterradas a diferentes niveles. Las longitudes mostradas son solo referenciales. - La longitud de la tubería entre el sitio donde la misma se entierra y el sitio donde se conecta al tanque de almacenamiento es de 187 m. - El desnivel aproximado entre el sitio donde la tubería se entierra y el sitio donde se conecta al tanque de almacenamiento es de 30 m desde la cota 4261m hasta la 4231 m. - Para simplificar la lectura de la gráfica, se omitió la cámara de carga. <p>Notas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las dimensiones están en metros. - La escala asume impresión escala 1:1 - No se cuenta con información acerca del tipo de fierro utilizado para el armado de la estructura. Por información proporcionada por el personal técnico, se asume #3/8" o/20. - Las dimensiones y detalles constructivos de tanques prefabricados, tubería de succión y la bomba serán provistos por el fabricante.
<p>Esquema gráfico de aerobombas. Comunidad Sajama, Departamento de Oruro</p>	<p>Diseño Equipo técnico Agua Sustentable Dibujante: Ing. Freddy Soja Caspedes</p>
<p>Escalas: Indijada, Dimensiones en metros. Instalación Agua Sustentable Entregado en fecha: 5 de octubre de 2012</p>	

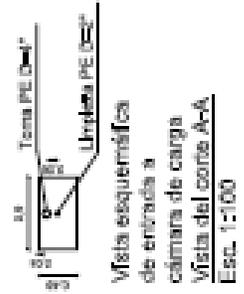
Esquema gráfico de estructura para desviación de curso y pequeño desarenador, Pampa. Vista en planta y cortes



Esquema de desviación mediante cámara de carga y pequeño desarenador (H²O)
Vista en planta
Escala: 1:100



Esquema de desviación mediante cámara de carga y pequeño desarenador (H²O)
Corte B-B
Escala: 1:100



- Notas:
- Las dimensiones están en metros.
 - La escala assume Impresión escala 1:1
 - Las especificaciones de las tuberías serán profestas por el fabricante.
 - La salida de la tubería de PE está a una altura aproximada de 4222 m (medida con GPS navegador).
 - La salida de la tubería se dirige a tres cámaras. La cámara de distribución está 3 m por debajo del nivel de la entrada de la tubería; la segunda cámara está a la misma altura; la tercera cámara está a 3 m por debajo del nivel de la entrada de la tubería.

Esquema gráfico de obra de toma Papel Pampa. Parque Nacional Sajama. Departamento de Oruro

Diseño: Equipo Técnico Agua Sustentable
Dibujante: Ing. Freddy Soñis Cespedes

Escala: Indicada. Dimensiones en metros.
Instalación: Agua Sustentable
Entregado en fecha: 6 de octubre de 2012