

I

# **MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO DE OBRAS DE CAPTACIÓN SUMERGIDAS EN CAUCES CON FLUJO SUPERCRÍTICO**

**EDUARDO ALMEIDA, ING. SANDOVAL, WASHINGTON E ING.  
CARVAJAL, EDGAR**

**SANGOLQUÍ, 2015**

## EXTRACTO

El presente proyecto abarca la evolución histórica de los diseños de captaciones en ríos de alta montaña, con cauces profundos , encañonados y regímenes de flujo supercrítico. El trabajo realiza un énfasis al comportamiento de la descarga y del régimen de un río donde se pretende diseñar las tomas de fondo de tipo tirolesa o caucasiana. Del análisis de varios casos, como son los ríos: Blanco Grande y Cristal y basándose principalmente en la descripción de literatura sobre este tema, como es el manual del USBR y el libro de Diseño Hidráulico de Krochin, donde mencionan de manera muy general las condiciones de diseño del cauce se trata de ampliar las características morfológicas donde se deben diseñar este tipo de toma. Se considera también a Lojtin, el cual caracteriza a los ríos por su número de Froude y pendiente.

### **Palabras Claves**

**MEJORAMIENTO**

**DISEÑO**

**RÍOS DE ALTA MONTAÑA**

**TIROLESA**

**AZUD**

## ABSTRACT

This project covers the historical evolution of the designs of deposits in high mountain rivers with deep channels , gunpoint and supercritical flow regimes. The paper makes an emphasis to the behavior of the discharge and the regime of a river where it is intended design background shots zip or Caucasian type . From the analysis of several cases , such as rivers and Glass White Large primarily based on the description of literature on this subject , as is the USBR manual and the Hydraulic Design Krochin where mentioned in very general terms the conditions design of the channel is about expanding the morphological characteristics which must be designed such decision . It is also considered to Lojtin , which characterizes the rivers Froude number and slope.

### **Keywords**

**IMPROVEMENT**

**HIGH MOUNTAIN RIVERS**

**DESIGN**

**ZIPLINE**

**WEIR**

## **INTRODUCCIÓN**

El diseño de captaciones para el aprovechamiento hídrico en el país, han adoptado en su mayoría los condicionamientos planteados por literatura técnica existente desde algunos años y, en particular por las directrices que se presentan en los libros “Diseño Hidráulico” de Sviatoslav Krochin y “Diseño de Presas Pequeñas y, Estructuras Hidráulicas” del USBR; si bien es cierto, los conceptos vertidos en la literatura mencionada, en parte son aplicables para ríos de alta montaña, en el país, el aprovechamiento de las aguas localizadas en la cordillera andina, se caracterizan por presentar geomorfologías de cauces profundos, encañonados y con gran transporte de material aluvial, lo que motiva el considerar variantes a los diseños de las estructuras hidráulicas de la manera que tradicionalmente se los ha venido realizando con el fin de que permitan un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, a lo largo de la vida útil para la cual son dimensionadas.

Hasta la fecha, los diseños en su mayoría, no han considerado las condiciones topográficas, geomorfológicas y geotécnicas aguas arriba de las captaciones limitándose sus estructuras a estar conformadas por un azud que permite el aumento de nivel de las aguas y de esta manera captar los caudales de diseño mediante tomas laterales o rejillas y, los excesos verterlos por el azud. Este tipo de tomas directas, no se pueden generalizar para todos nuestros ríos y particularmente para los ríos localizados en nuestras cordilleras que normalmente se localizan en áreas con pendientes abruptas a moderadas producto de la erosión fluvial y procesos de movimiento en masa por efectos de la gravedad y en muchos casos por deslizamientos fluviales transporte y depósito de rocas y sedimentos debido a la acción directa de corrientes de agua (conos de deyección); generalmente conformadas por bloques de rocas metamórficas en su gran mayoría seguido de cantos y gravas no consolidadas.

## **METODOLOGÍA**

### **MORFOLOGÍA DE RÍOS DE MONTAÑA**

La morfología de los ríos, estudia la estructura y forma de los mismo e incluyendo la configuración del cauce (planta y perfil), geometría de las secciones transversales, forma del fondo, características geomorfológicas de las cuencas y, que se encuentran sujetas a cambios por fenómenos naturales (volcánicos, flujo de lodos, actividad tectónicas y entre otras).

### **CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Para el presente artículo se consideró como representativos a los ríos de las cuencas pertenecientes Blanco Grande y Cristal; estas cuencas, son alimentadas por los deshielos del Volcán Antisana y su aprovechamiento tales con como abastecimiento de agua potables y mini centrales hidroeléctricas y riego, se los puede realizar por encima de los 3000 msnm. Las fuentes del Blanco Grande y Cristal, nacen en la vertiente oriental de la Cordillera Real, sobre los 3200 msnm y se encuentran dentro de la provincia de Napo.

Debido a la geomorfología y relieves, las posibilidades de aprovechamiento de la mismas mediante embalses es muy limitada, por lo que, se ha considerado realizarlas mediante toma directas como son las caucasianas y tirolesas.

El sistema de captaciones propuestos, se ubican en zonas con una geomorfología constituidas por fuertes pendientes, drenajes, estructuras (lineamientos y fallas), escarpes, propensas a procesos de movimientos en masa por efectos de la gravedad y en muchos casos por la saturación de agua en los materiales (deslizamiento, coluviales), transporte de rocas y sedimentos por la acción directa de la reacciones de agua (eyección).

Las captaciones, se implantará sobre materiales cuaternarios-recientes compuestos por estratos de suelo, depósitos coluviales, aluviales, materiales de deslizamiento por gravedad (escombros). Estos materiales descansan sobre rocas del basamento metamórfico (esquistos pelíticos, esquistos cuarzo sericíticos y gneis).

Las micro-cuencas en estudio se encuentran entre dos grandes unidades de relieve con topografías contrastantes como son:

- a) Un sector montañoso que abarca la mayor parte del área, con alturas superiores a 3 000msnm y pendientes superiores a 45% y;
- b) Una unidad de abanico coluvio-aluvial emplazada en la parte baja o terminal de las micro-cuencas.

En las fotografía 1 y 2, se muestran los sitios de los ríos con pendientes menores al 30% río Cristal y Blanco Grande, donde se aprecia el tipo y conservación de la vegetación circundante (bosque) y las características del lecho (material grueso, rocas y secciones estrechas).



**Fotografía 1: Río Cristal**

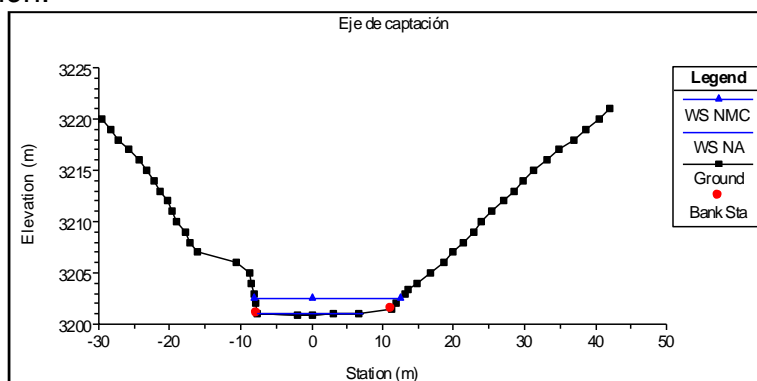


**Fotografía 2: Río Blanco Grande**

## CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

### CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BLANCO GRANDE

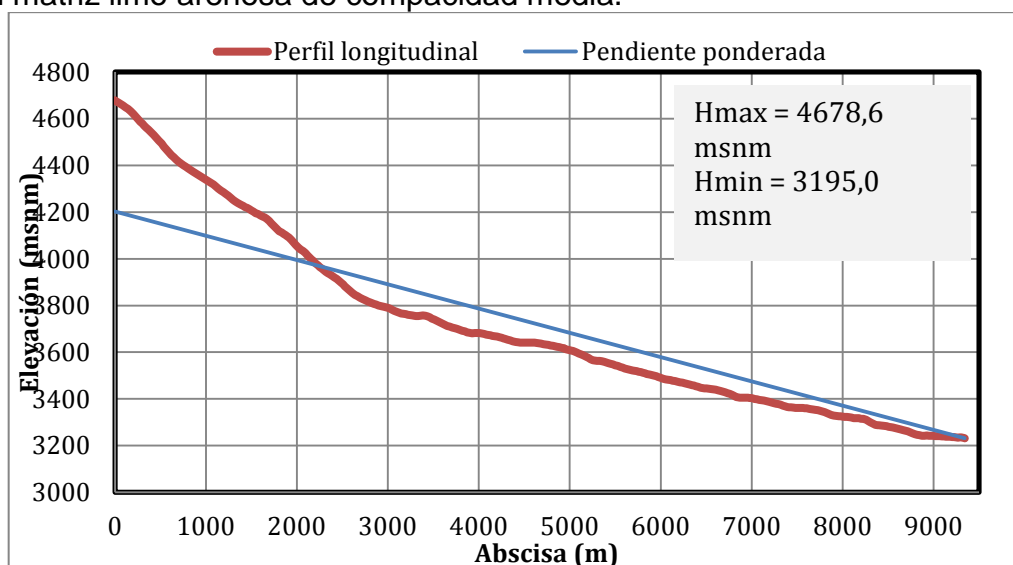
La captación del río Blanco Grande prevé ubicarse sobre los 3 195msnm, la figura 1, muestran la configuración o sección transversal de cauce en el sitio de captación.



**Figura 1. Sección transversal captación Río Blanco Grande**

La pendiente ponderada del cauce del Río Blanco Grande a lo largo de la cuenca tiene un valor de 10%, en el tramo de la captación la pendiente es más suave. Ver en la Figura 2.

Desde el punto de vista geológico se puede destacar que el tramo de la captación presenta pendientes suaves, correspondientes a depósitos aluviales con bloques métricos 30%, cantos rodados 40% y matriz de arena gruesa con grava 30%, no consolidada, terraza antigua de material fluvio glaciar compuesto por cantos y bloques de rocas volcánicas y metamórficas, en matriz limo arenosa de compacidad media.



**Figura 2. Perfil longitudinal y pendiente ponderada del cauce del Río Blanco Grande**

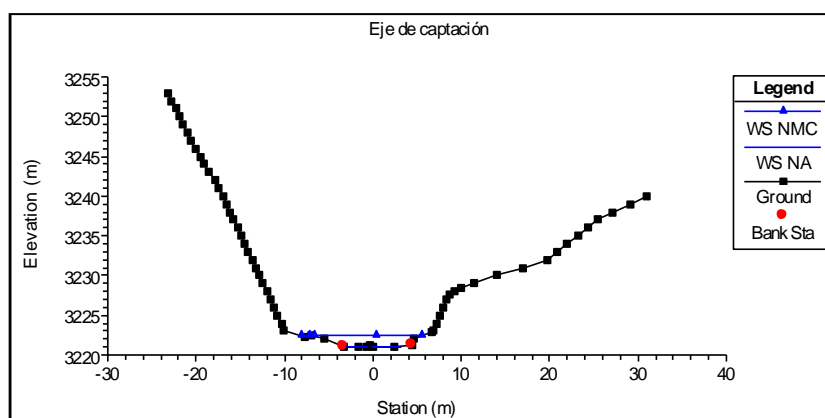
La cobertura nieve o aporte glaciar en la cuenca del río Blanco Grande es mínima 0,1%, mientras que el área de bosque se extiende en el 58% del

área de drenaje, y el páramo cubre alrededor del 37% de la cuenca en la zona media alta.

Los suelos de los páramos de origen volcánico junto con la vegetación propia de estas áreas, permiten una alta retención de agua, que da como resultado una regulación natural de los caudales que se originan en cuencas de páramo, permitiendo el aporte permanente de caudal base al cauce y una menor variabilidad en el recurso hídrico .

### CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO CRISTAL

La figura 3; muestran la forma del cauce en el sitio de captación del río Cristal.

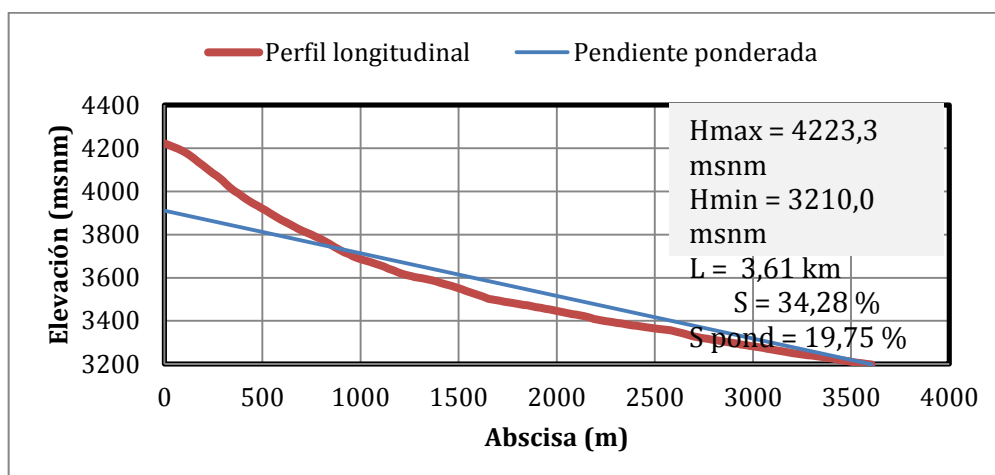


**Figura 3. Sección transversal captación Río Cristal**

La pendiente ponderada del cauce del Río Cristal determina un valor de 20%. La Figura 4, muestra el perfil longitudinal y la pendiente ponderada del cauce.

La cuenca del río Cristal presenta una cobertura glaciaria que comprende un 12% del área de drenaje, además en la parte alta de la cuenca se observan afloramientos rocosos o eriales que cubren aproximadamente un 16% de la superficie, el páramo alcanza una cobertura considerable del 39% dentro de la cuenca, la cobertura de bosque de la parte baja de la cuenca es igualmente importante con un 32% de área.

Los tipos de suelos identificados en la cuenca corresponden al CD5 y D3, se identifican adicionalmente afloramientos rocosos o eriales.



**Figura 4. Perfil longitudinal y pendiente ponderada del cauce Río Cristal**

En la zona de la captación del río Cristal se aprecia una morfología del terreno suave debido a que está ubicada en una terraza, compuesta de bloques métricos y cantos, en una matriz arenosa, se presenta muy consolidada, difícilmente erosionable. En el cauce se encuentran bloques métricos producto del arrastre de material por fuertes crecidas. En las márgenes se observan dos depósitos asociados con un sistema fluvio-glaciar en forma de terrazas, en los que se evidencia, hacia una de las márgenes, un subsistema fluvial y otro glaciar.

- Aluvial: depósito no consolidado clasto soportado, cuyo armazón lo componen gránulos y guijos de lavas negras y grises ligeramente porfíricos y esquistos micáceos sub-redondeados de esfericidad media moderadamente seleccionada; y,
- Fluvio – glaciar: depósito no consolidado con clastos entre 4cm y 1,5m de lavas grises y esquistos de cuarzo-moscovita.

### **CAUDALES DISPONIBLES**

La determinación de los caudales disponibles se basa en sustraer del caudal 95% el caudal ecológico que, para este caso particular, se determinó en el 10% del caudal medio calculado. Por lo tanto, se considera el caudal 95% disponible.

### **CAUDALES MEDIOS DIARIOS**

Para la determinación de los caudales medios se tomaron series de caudales para el período de 1966 hasta 1996 de tal manera de contar con 30 años de datos. Los caudales resultantes se presentan en el Cuadro 5, a continuación:

**Cuadro 5. Caudales mensuales y anuales de las estaciones.**

ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO (m3/s)												Q med (m3/s)
Quijos DJ Oyacachi	150.70	151.70	173.00	199.40	231.10	283.10	303.80	241.00	207.80	156.10	147.20	131.20	198.00
Quijos en Baeza	42.00	39.90	46.60	49.40	57.40	72.50	83.00	58.90	52.50	39.00	35.80	33.60	50.90
Quijos AJ Borja	67.80	68.00	84.40	102.80	109.70	141.80	147.50	115.10	93.60	75.40	74.30	54.90	94.50
Cosanga	32.90	31.00	40.20	82.80	60.40	86.10	83.10	722.00	52.60	42.00	34.30	31.00	53.80
Yanahurco DJ Valle	1.30	1.42	1.75	1.99	2.08	3.31	4.78	2.88	2.16	2.04	1.66	1.46	2.24
Papallacta HCJB	1.63	1.61	1.80	2.29	2.62	3.46	4.02	3.26	2.52	1.97	1.80	1.79	2.40

Fuente: INHAMI

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

En este estudio se determina dos niveles de cálculo del caudal sólido, tanto la carga en suspensión como el arrastre de fondo. Para determinar la carga en suspensión se determinó la relación de caudal líquido/caudal sólido. Para el cálculo del arrastre de fondo se puede utilizar la ecuación de Engelund Hansen, la granulometría del material de fondo y los caudales medios mensuales, cuadro 6.

**Cuadro 6. Caudales Sólidos en suspensión.**

Sitio	Área (Km2)	Cota (msnm)	Q med (m3/s)	Sed. susp (Ton/año)	Qs unitario (m3/Km2/año)	Lamina (mm)
Toma Río Cristal	5,8	3320	0,179	0,4	0,04	0,0000
Toma Río Blanco Grande	22	3195	0,862	17,6	0 44	0,0004

Fuente: Estudio PRO.

La determinación del transporte de fondo lleva una carga alta de incertidumbre en su determinación en función de la ecuación o aproximación utilizada. Es conocido que la mayoría de las ecuaciones utilizadas como la Engelund Hansen o Meyer Peter Muller fueron desarrolladas bajo condiciones de laboratorio, con pendientes bajas y material de fondo más bien fino.

En este sentido, la verificación del mejor comportamiento de cualquier aproximación es complicada, toda vez que es muy difícil estimar el peso del material arrastrado entre crecidas en un lugar determinado.

El estudio también calculó la erosión potencial utilizando la ecuación MUSLE, lo que determina un potencial de sedimentos que pueden llegar al cauce. Se hace conveniente en la zona del Antisana y en especial en las zonas altas definir una especie de inventario de acumulación de material que puede ser potencialmente arrastrado durante una crecida. Con esta información se puede determinar la lámina que podría ser arrastrada y que eventualmente puede generar un flujo de lodos.

**DESCRIPCIÓN POR TRAMOS SEGÚN LOJTIN Y KROCHIN:**

En el cuadro siguiente se presenta una representación de la caracterización que toma en cuenta los condicionamientos realizados por Krochin y Lojtin, en la cual describe por tipo de cauce para la determinación del tipo de flujo para en análisis del diseño de captación.



**Cuadro 7. Descripción por tramos de ríos de montaña.**

<i>Tipo de cauce (TIPOS TRAMOS)</i>	<i>D/ So (LOJTIN) D: Diámetro de partículas de fondo, en metros. So: Pendiente del tramo, en m/m</i>	<i>Fr (LOJTIN) Fr: Número de Froude</i>	<i>CARACTERIZACIÓN (KROCHIN)</i>	<i>CONSECUENCIAS (KROCHIN)</i>
<i>Alta Montaña (TRAMO ALTO)</i>	>10	>1	Tiene pequeños caudales, con crecidas altas, gradientes fuertes y altas velocidades	Erosión activa, el cauce se profundiza. El río corre por un valle estrecho y profundo. Transporta sedimentos.
<i>Montaña (TRAMO MEDIO)</i>	>7	0.7 a 1.0	Caudales mayores y gradientes menores.	Presenta equilibrio en el caudal sólido, los sedimentos de depositan en la orillas. Conviene ubicar mayoría de obras de toma.
<i>Falda de montaña (TRAMO BAJO)</i>	>6	0.45 a 0.7	Grandes Caudales .  Pequeñas velocidades y gradientes.	Se produce el depósito de sedimentos y a veces elevación de cauce.

**Fuente: Krochin, 1896 – Lojtin, 1998**

Según el cuadro 7, el tramo alto es el que contemplaría para este análisis del estudio.

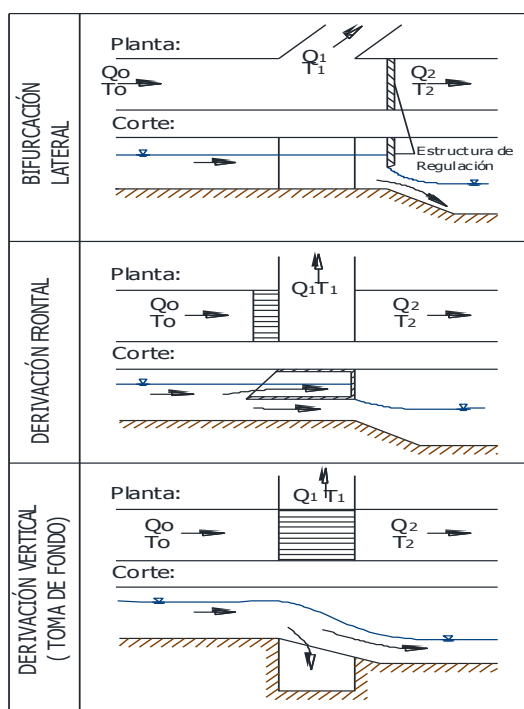
A continuación detallamos las captaciones de ríos de montaña para considerarse en mejoramiento propuesto.

### **TIPOS DE CAPTACIÓN EN RÍOS DE MONTAÑA:**

Las captaciones existentes para cumplir con este tipo de objetivos se esquematizan en el gráfico 1, y son:

Bocatomas laterales o convencionales, la captación tiene el cierre en el cauce del río con un dique vertedero (que puede ser fijo o móvil) y el ingreso del agua se lo realiza a través de un orificio o vertedero lateral;

Bocatomas frontales, la derivación tiene el orificio de captación de caudales perpendicular al sentido de la corriente principal, ubicada en la parte frontal de un muro o de una pila; y, Bocatomas verticales (toma de fondo), la captación posee el orificio de derivación en la parte alta de un dique o azud de cierre. Sin embargo, también puede estar ubicada en el fondo del río, es decir, sin obra de cierre como es el caso de la denominada de tirolés.



**Gráfico 1. Esquema sobre los tipos de captaciones de agua desde cursos naturales. Fuente: Castro, 1986**

El siguiente cuadro se presentan varios elementos de análisis fluviomorfológico a considerarse, para la ubicación de la estructura que componen una captación:

**Cuadro 8. Tipos de captación según el estado actual del tramo del río.**

Estado del tramo del río	Derivación lateral		Captación de fondo (rejilla)
	Con exclusión de sedimentos	Sin exclusión de sedimentos	
En equilibrio	Recomendable, sobre todo si no se requiere de cierre del cauce	Aplicable, se debe analizar el efecto del depósito del material aguas arriba de la estructura como resultado del embalsamiento	Favorable, se recomienda no colocar el cierre del cauce
En sedimentación	No es recomendable para estos dos tipos de captaciones, se provoca un azolve inmediato de la zona aguas arriba de la estructura		Aplicable pero no recomendable, la derivación puede funcionar con una cobertura parcial de la rejilla
En erosión	Recomendable para todos los tipos de captación, sobre todo cuando se requiere del cierre en el cauce. Se esperan zonas pequeñas de depósitos o de azolve. Se debe proteger la estructura frente al ataque de la erosión regresiva desde aguas abajo		
En erosión latente	Muy recomendable para todos los tipos de captación, sobre todo cuando se requiere del cierre en el cauce. Se esperan zonas muy pequeñas de depósito o de azolve		

**Fuente: Carvajal, 2012 - Castro, 1986**

Con base en el cuadro anterior, para los diferentes ríos, se tienen tramos en estado de equilibrio donde son bastante aplicables las captaciones laterales y las de rejilla de fondo, que son las que se consideran en el proyecto.

Por otra parte, se realiza un breve análisis de las ubicaciones de las estructuras de tomas, para lo cual, es necesario conocer el estado fluviomorfológico del río y con según el estudio, verificar la mejor alternativa de captación. Así, se evaluará el perfil longitudinal a través del Cuadro 8 y la forma en planta del río con el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Tipo de captación según la pendiente longitudinal del río.**

<i>Pendiente longitudinal del río</i>	<i>Derivación lateral</i>		<i>Captación frontal</i>	<i>Captación de fondo (rejilla)</i>
	<i>Con exclusión de sedimentos</i>	<i>Sin exclusión de sedimentos</i>		
$I_0 > 10\%$ Pendiente muy fuerte (Tramo torrencial)	Favorable. Siempre y cuando se garantice mantenimiento poco frecuente.	No recomendable. Se requiere mantenimiento permanente.	No recomendable. Flujo de aproximación con mucha turbulencia. Se requiere mantenimiento permanente.	Muy favorable. Típico caso de aplicación del tipo tirolés. No requiere mantenimiento.
$10\% > I_0 > 1\%$ Pendiente fuerte (Tramo de pie de montaña)	Recomendable para cualquier tipo de captación. Sin restricción sobre el tipo fijo o móvil de cierre del río.			No es recomendable. Existe el ingreso del 100% del material sólido de tamaño medio y fino. Se requiere mantenimiento permanente.
$1\% > I_0 > 0,01\%$ Pendiente baja (Tramo medio)	Recomendable para estos dos tipos de captación. Sin restricción sobre el tipo de cierre del río.			
$0,01\% > I_0 > 0,001$ Pendiente baja (Tramo inferior)	Favorable. Es practicable aún sin cierre del río o embalsamiento	No recomendable. No existe diferencia de nivel para la limpieza del material sólido. El cierre del río por medio de diques altos hace la solución muy costosa.		
$I_0 < 0,001\%$ Pendiente muy baja (Tramo de delta)	No recomendable cualquier tipo de captación. Se presentan como alternativas la captaciones por medio de estaciones de bombeo, tanto para la derivación del caudal líquido como para las operaciones de exclusión, expulsión y limpieza del sedimento.			

**Fuente: Carvajal, 2012-Castro, 1986.**

**Cuadro 10. Tipo de captación según la forma de la planta del tramo del río.**

<i>Forma del río en planta</i>	<i>Derivación lateral</i>		<i>Captación frontal</i>	<i>Captación de fondo (rejilla)</i>
	<i>Con exclusión de sedimentos</i>	<i>Sin exclusión de sedimentos</i>		
Tramo recto	Favorable, sobre todo con obras complementarias para producir flujo helicoidal en el río (espigones) y en sección de ingreso (estructura en cantiléver)		Muy favorable. Flujo de aproximación con distribución uniforme y de poca intensidad de turbulencia.	Muy favorable. Flujo de aproximación y de vertido con distribución uniforme.
Tramo curvo		Muy favorable, sobre todo en la parte cóncava de la curvatura del río	Posible. Se requieren obras complementarias para la distribución uniforme del flujo de aproximación	No es recomendable.
Tramo trezado (varios cauces)		No es recomendable. En el caso de que sea imprescindible, se debe generar un embalsamiento o control del cauce principal y regularlo hacia aguas arriba.		No es recomendable el tipo tirolés. Se puede implementar el tipo caucasiano.

**Fuente: Carvajal, 2012 - Castro, 1986.**

Una vez revisados los datos del cuadro anterior, se observa que para las pendientes de los tramos de los ríos, las derivaciones seleccionadas son favorables. Sin embargo, según la forma de la planta se podría decir que para algunos de ellos no es la más adecuada, pero se debe considerar también que las rejillas de fondo son prácticamente independientes de la forma del río y pueden ser ubicadas en un tramo curvo si se favorece, a través de estructuras, el direccionamiento del flujo principal.

Una vez definidos los sitios y los tipos de captaciones, se presenta a continuación un cuadro donde se pueden observar las ventajas y desventajas de los dos tipos de bocatomas del proyecto.

**Cuadro 11. Características de las captaciones toma (convencional) y toma con rejilla de fondo.**

<i>Tipo de captación</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Lateral (general)	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Aplicable en todos los sitios, muy flexible</li> <li>–Si se seleccionan bien la ubicación y la configuración geométrica, los problemas con los sedimentos son pequeños</li> <li>–Derivación libre de sedimentos hasta un 50% de derivación del caudal líquido</li> <li>–Es posible la corrección y la rehabilitación de la estructura sin mayor costo y dificultad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Se requiere de una excelente selección del sitio de implantación de las estructuras</li> <li>–Se requiere de obras complementarias para el manejo de los sedimentos</li> <li>–Se recomienda el uso de la modelación física para el diseño apropiado</li> </ul>
Lateral (con estructura de cierre)	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Se ejerce un excelente control sobre la dosificación o regulación del caudal de ingreso</li> <li>–Es posible mantener un caudal derivado constante</li> <li>–Es posible mantener un nivel constante en la superficie libre del agua del río</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La estructura de cierre elimina o disminuye los efectos del flujo secundario</li> <li>–Los costos de construcción son elevados</li> <li>–Se requiere de obras de desvío para la construcción</li> <li>–Existe tendencia al azolve en el embalse</li> <li>–Se requiere de la disipación de energía al pie de la estructura de cierre</li> <li>–Se requiere de un control y de un mantenimiento permanente</li> </ul>
Rejilla de fondo Tipo tirolés, o caucasiano	<ul style="list-style-type: none"> <li>–No es sensible al sitio de implantación</li> <li>–Construcción simple y barata</li> <li>–No requiere de mantenimiento permanente</li> <li>–Opera en forma automática por períodos largos de tiempo</li> <li>–No produce restricciones al flujo en crecidas</li> <li>–No está sujeta a daños durante las crecidas</li> <li>–No puede bloquearse totalmente (existe auto limpieza)</li> <li>–Capta los caudales pequeños o los mínimos</li> <li>–No requiere de obras o equipamiento complementario caro</li> <li>–Muy favorable cuando se tiene sedimento grueso</li> <li>–Muy favorable en cuencas jóvenes, con aporte abundante de material sólido</li> <li>–Muy favorable en crecidas rápidas y con valores muy importantes</li> <li>–Funciona aún con flujo supercrítico</li> <li>–No requiere de embalsamiento del agua</li> <li>–Típica en ríos torrenciales o de montaña</li> <li>–Existe una clasificación del material sólido, dependiendo de la apertura entre barrotes de la rejilla y del número de rejillas</li> <li>–Aplicable en ríos intermitentes o en ríos estacionales (tipo caucasiano)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>–No es posible la regulación en las variaciones del caudal natural</li> <li>–Existe una limitación en el caudal derivable</li> <li>–Se requiere de barrotes estables</li> <li>–Se requiere de un orificio relativamente grande por el riesgo de taponamientos</li> <li>–Difícil acceso para la limpieza de la rejilla y del canal de recolección</li> <li>–Difícil operación para el secado de la rejilla y del canal de recolección durante las operaciones emergentes</li> <li>–Taponamientos con material vegetal y con hielo</li> <li>–Todo el material sólido fino ingresa al canal de recolección</li> <li>–En el tipo caucasiano, puede fallar la operación del filtrado</li> <li>–No es recomendable cuando el río tiene mucho material fino</li> </ul>

**Fuente:Castro,1986.**

## CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios a ser adoptados para el dimensionamiento de los diversos componentes de una captación, consideran, entre otros, los siguientes:

- “Normas para Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable y Disposición de Aguas Residuales para Poblaciones mayores a 1 000 habitantes”, del Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias;
- Normas de la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC);
- Normas de la EPMAPS;
- Normas del Instituto Nacional de Riego (INAR);
- Normas, parámetros y criterios internacionales comúnmente aceptados por la buena práctica de la ingeniería, tales como normas AWWA, guías de la OMS, etc.; y,
- Experiencia del director y codirector de tesis en proyectos similares.

La definición de los parámetros hidrológicos consideran caudales medios, mínimos y máximos para los sitios de captaciones y, el aporte de sedimentos de la cuenca hacia estos además, contempla el aporte de sedimentos hacia las mismas; los parámetros hidrológicos consideran el análisis y extensión de la serie de caudales para las captaciones.

## CAUDALES DISPONIBLES

La determinación de los caudales disponibles se basa en sustraer de un caudal aprovechable el cual difiere a los usos consultivos que se le va a dar, en el caso específico se considera que el aprovechamiento del recurso agua es para abastecimientos de agua potable y, por tal motivo el caudal aprovechable se considera un caudal mínimo que es el que estadísticamente proporcionara a los sistemas una continuidad en el servicio por lo que, las normas de diseño toman el caudal 95% como el aprovechable; a este caudal disponible se le debe restar el caudal ecológico que en el presente caso se le considera el 10%; en el caso de aprovechamientos de centrales hidroeléctricas se considera hasta un caudal 40% y, como el caudal ecológico aplica el método de Tennant, es decir que el caudal ecológico será al menos el 10% del caudal medio anual.

El Registro Oficial No.41, del 14 de marzo de 2007, donde el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), mediante Acuerdo Ministerial N°155, emitió las “Normas para la determinación del caudal ecológico y el régimen de los caudales ecológicos en los sectores hidrográficos respectivos”. En su Libro VI, Anexo, Anexo 1B. El Cuadro 12 presenta los caudales disponibles de los ríos seleccionados.

**Cuadro 12. Caudales disponibles.**

Probabilidad %	Río Cristal	Río Blanco Grande
Cota (msnm)	3 320	3 195
Área Km <sup>2</sup>	5,47	23,22
Q. 95%	0,111	0,536
Q. medio	0,236	1,124
Q. eco	0,012	0,054
<b>Q. 95% disponible</b>	<b>0,103</b>	<b>0,482</b>

Fuente: Hidrología Ríos Orientales.

## CAUDALES MÁXIMOS

Estos caudales de crecida se determinan para las obras de exceso. En el cuadro 13, muestran los valores obtenidos para los caudales de crecida.

**Cuadro 13. Caudales Máximos.**

Sitio	Área (km <sup>2</sup> )	Cota (msnm)	QTr10 (m <sup>3</sup> /s)	Q Tr25 (m <sup>3</sup> /s)	QTr50 (m <sup>3</sup> /s)	QTr100 (m <sup>3</sup> /s)
Río Cristal	7,83	3320	3,78	6,76	9,33	12,24
Río Blanco Grande	25,16	3195	29,10	44,88	56,76	70,95

Fuente: INHAMI.

## CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE CAPTACIONES Y SU DISEÑO

Las consideraciones mínimas a ser tomadas en cuenta para los dimensionamientos de las obras de captación de aguas superficiales son de usos consultivos:

- Área de la cuenca hidrográfica;
- Calidad del Agua, Arrastre de sedimentos;
- Condiciones geomorfológicas del área de captación;
- El tipo de construcción debe ser económico, de fácil ejecución y operación;
- En construcción debe ser económico, de fácil ejecución y operación;
- Asegurar el tránsito del caudal ecológico; y de caudales de crecidas sin que estas afecten las estructuras;
- Las obras deberán estar diseñadas de tal modo que resistan el impacto de los flujos provenientes de aluviones o de lodos;
- Durante los fenómenos de crecidas, los excesos deberán ser evacuados por adecuadas estructuras de control (azudes, vertederos, etc.);
- Su emplazamiento debe asegurar un adecuado funcionamiento hidráulico, además de brindar facilidades para su construcción; y, las estructuras de captación.

Las estructuras de captación según las condiciones de flujo y transporte de sólidos, que se considerarán son las tomas, convencional, lateral y de fondo. Con base en los criterios mencionados y la condiciones físicas de la cuencas del estudio, que optan por captaciones directas convencionales cuyas características son:

- Zona de adecuaciones de sedimentos de agua cruda;
- Pantalla o azudes con colectores
- Obras de fondo (rejillas)
- Desarenadores
- Tanque de Carga

### Toma Fondo (tiroleza):

Se adoptará este tipo de toma, donde se espera tener un fuerte flujo de material grueso como arrastre de fondo, dicha toma consta de las siguientes partes:

- Cierre de poca altura;
- Una rejilla;

- La cavidad, denominada galería;
- Un zampeado; y,
- Una protección aguas abajo.

El cierre de la sección del río se complementa con la colocación de pilas y, de ser necesario, colocar stop lock entre ellas.

De igual manera, para la protección de la obra de toma se colocará, varios metros aguas arriba, una protección que está compuesta por una pantalla retenedora de sólidos gruesos, formada por tubos metálicos de 400mm rellenos de hormigón, colocados verticalmente y trabados de forma alternativa con una separación de 0,5m.

Las obras de disipación de energía y las dimensiones de los muros laterales se han diseñado para un caudal con período de retorno TR = 100 años.

### **Toma lateral (convencional)**

Se implanta para captar las aguas del río Blanco Grande, se ubicarán en sus márgenes, de forma tal, que el agua ingresará directamente a una reja que conducirá las aguas hacia el desarenador.

Las partes principales que componen las captaciones laterales son:

- Rejilla de captación
- Dique de cierre o Azud de derivación
- Zampeado
- Canal de limpieza del azud
- Enrocado
- Escalera de peces
- Vertedero de excesos de la captación
- Vertedero de derivación de la captación

Para controlar el material de transporte de crecidas, se coloca la protección descrita en la captación de rejilla de fondo.

### **CAUDALES DE DISEÑO**

Para el diseño se considera:

Q captación: Q<sub>95%</sub>: Para Agua Potable  
 Q<sub>50%</sub>: Para Riego  
 Q<sub>40%</sub> - Q<sub>60%</sub>: Para Generación Eléctrica  
 Q<sub>Derivación</sub> (azud, vertederos de excesos): Q<sub>50</sub> a Q<sub>100</sub> años

En el caso particular del propuesto en este diseño:

Q<sub>ECOLOGICO</sub>: 10% del Q<sub>95%</sub>.

Los cuadros 15 y 16, del presente documento muestran los caudales de diseño y los de crecidas, que fueron la base del dimensionamiento hidráulico.

### **Cuadro 15. Caudales Calculados.**

Sitio	Cota [msnm]	Área (km <sup>2</sup> )	Q <sub>95%</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>med</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>eco 95%</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>95% disponible</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>concesionado</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Blanco Grande	<b>3 200,74</b>	23,23	0,535	1,123	0,053	0,481	<b>1,190</b>
Cristal	<b>3 221,00</b>	7,83	0,165	0,346	0,016	0,148	<b>0,408</b>
<b>TOTALES</b>		<b>31,06</b>	<b>0,700</b>	<b>1,469</b>	<b>0,069</b>	<b>0,629</b>	<b>1.598</b>

Fuente: Hidrología Ríos Orientales.



**Cuadro 16. Caudales de Crecidas.**

Sitio	QTr5 (m <sup>3</sup> /s)	QTr10 (m <sup>3</sup> /s)	Q Tr25 (m <sup>3</sup> /s)	QTr50 (m <sup>3</sup> /s)	QTr100 (m <sup>3</sup> /s)
Blanco Grande	41,11	52,43	67,36	77,68	87,84
Cristal	15,55	20,01	25,91	29,98	34,02

Fuente: Hidrología Ríos Orientales.

### **CALIDAD DE LAS AGUAS**

La calidad de las aguas se determinó para determinar si son aptas para consumo humano y como para el diseño de las obras civiles.

Las características físicas, químicas y bacteriológicas, demuestran ser aguas agresivas y corrosivas por presentar índices de agresividad mayores a 9,51 e índices de Langelier con valores negativos; principalmente de los ríos Cristal y Blanco Grande.

Estos índices son determinados por Kevin Rafferty (Scaling in geothermal heat pump system, US Department of Energy, 1999), nos permiten corregir que son aguas altamente corrosivas.

<b>ISL</b>	<b>Indicación</b>
-2,0<ISL<-0,5	Corrosión severa
-0,5<ISL<0	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
ISL= 0,0	Equilibrada pero con posible corrosión leve
0,0<ISL<0,5	Formación leve de incrustaciones pero corrosiva 0,5<LSI<2

Particularmente, estos índices hacen que los diseños contemplen el uso de inhibidores para el diseño de hormigones .

En los cuadros 17, nos indica el reporte de análisis físico químico realizado entre los principales tenemos PH, Alcalinidad Total, Solidos Disueltos, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O) , Arsénico y Coliformes Totales . Que se muestran a continuación:

**Cuadro 17. Calidad de las agua.**

PARÁMETROS	UNIDADES	BLANCO GRANDE 22/11/2011	RÍO CRISTAL 30/11/2011
PH		6,	3,03
CONDUCTIVIDAD	Ns/cm	528,00	1372,00
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	16,50	0,5
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS	mg/L	343,20	891,80
SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	mg/L	16,00	1,00
DUREZA TOTAL	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	176,80	429,30
FOSFATOS	mg/L	0,029	4
SULFATOS	mg/L	218,00	577,00
DQO, DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	mg/L	3,	< 3,2
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O.)	mg/L	< 0.2	<0,2
HIERRO	mg/L	< 0,014	3,335
MAGNESIO	mg/L	23,30	41,70
ARSÉNICO TOTAL	mg/L	< 0,001	< 0.001
SODIO	mg/L	39,	19,16
POTASIO	mg/L	8,	8,38
ALUMINIO	mg/L	< 0,1	15,00
OXIGENO DISUELTO	mg/L	6,	7,14
COLIFORMES TOTALES	NMP/100ml	<2	< 2
ESCHERICHIA COLI	NMP/100ml	<2	< 2
Índice de Agresividad		8,73	4,74
pHs		9,1	10
Índice de Langelier		-3,1	-6,97

Fuente: EPMAP

**CONCLUSIONES**

- La información geológica y topográfica de la zona fue completa lo que permitió una mejor ubicación de las tomas, encontrando las mejores condiciones para el funcionamiento de las estructuras.
- La información hidrológica del proyecto a pesar de ser incompleta permitió establecer caudales con un nivel de confianza adecuado para los proyectos debido a la presencia de estaciones hidrométricas.
- Los análisis de aguas de los cauces dieron como resultado que son aptas para los fines del proyecto, principalmente para el consumo humano.
- Para la caracterización del cauce de río fue necesario determinar los coeficientes de rugosidades de los ríos aplicando el Método de Cowan, en cual considera estos factores: la rugosidad superficial, la vegetación, la irregularidad del canal, alineamiento del canal, el material en suspensión y la carga del lecho, entre otros.
- Los valores a considerarse para el Río Cristal son: en los márgenes desde 0.080 a 0.133 y en cauce 0.043. Para el Río Blanco Grande son: en los márgenes desde 0.103 a 0.074 y en cauce 0.048.

- El análisis realizado por medio del HEC-RAS para los diferentes caudales, nos señaló que son dos tipos de flujo según su número de Froude. En el Blanco Grande tenemos 0.78 y en el Cristal 1.01.
- La determinación del tipo de régimen, es de vital importancia para la determinación del tipo de captación que se puede emplear y que tenga el mayor rendimiento.
- Según el régimen de flujo se estableció que para el Río Blanco Grande se considere una obra captación tradicional (Caucasiana) y para el Río Cristal, en base a las condiciones presentadas (tipo de flujo y topográficas) las recayeron en un captación tipo tirolesa.
- Las obras de tipo tirolesa son las más prácticas y sencillas para captar con una topografía de alta pendiente y con régimen supercrítico .
- Como un aporte complementario presentado para este proyecto se consideró implementar desarenadores con el material rocoso de las zona.
- Para la determinación de los caudales ecológicos, no se dispone de una metodología “oficial” con enfoque holístico y ecosistémico que determine una cantidad de agua que debe dejarse en el cauce de los ríos involucrados en los proyectos y levantar la información tanto hidrológica como biológica de los cuerpos de agua.
- Los estudios a nivel de diseños de factibilidad y definitivos deben contemplar el estudio de flujo de lodos y arrastre de sedimentos.

## **RECOMENDACIONES**

- Una vez construidas las obras de toma, estas deben disponer de un presupuesto para la construcción de una estación hidrometeorológica, lo cual permitirá contar con datos reales de la cuenca para validar las condiciones de diseño de futuros proyectos. En el caso específico del proyecto, se recomienda colocar una estación por cuenca (Quijo Sur y Blanco Grande).
- Realizar aforos líquidos y sólidos siempre de manera simultánea en cada uno de los puntos de interés y ser distribuidos en todo el año, para ampliar el rango de utilización de la curva obtenida, en futuros proyectos.
- Debe verificarse los regímenes de flujo una vez construidas las obras hidráulicas en todo proyecto.
- Para el diseño hidráulico de las captaciones es necesario contar con el relieve del sitio que se van implementar, los cuales pueden estar en valles tipo V y tipo U; siendo los valles V muy difícil implementar tomas con cierres compuestos por azudes y obligan necesariamente las obras tirolesas al cauce del río.
- Las obras de toma tipo tirolesa deben contar con estructuras de retención de sólidos, aguas arriba debiéndose dimensionar sistemas de pilotes con espaciamientos entre 20 y 40cm, para impedir que el material grueso ingresa a punto de captación.

- Se requiere disponer de la información relacionada con la calidad de las aguas ya que estas son en gran parte responsables de la corrosión de los hormigones, generalmente, las aguas son medianamente corrosivas (Índices de Langelier negativos), lo que obliga a que las obras civiles y electromecánicas utilicen inhibidores y/o recubrimientos que protejan a las mismas.
- Cada captación debe contar con una estación hidrométrica que permita obtener datos estadísticos sobre la variación de caudales y, se puedan realizar de ser necesarios ajustes en la operación de las captaciones.
- Las captaciones, por normativa ambiental, deben considerar los caudales ecológicos, en el caso presente proyectos hidroeléctricos consideran el 10% del caudal de diseño sin embargo esta regla no puede ser aplicada para abastecimientos de agua potable ya que el caudal de diseño corresponde al caudal mínimo con una probabilidad del Q95%,
- Los caudales aprovechables se supeditan al caudal concesionado, por lo tanto, es norma usual que el caudal de diseño sea el caudal concesionado sin embargo, las estructuras deberán ser comprobadas para la ocurrencia de caudales determinados y justificados en los estudios hidrológicos.