



Producto No.5

METODOLOGÍA PARTICIPATIVA

Elaborado por:



Marzo 2012

CONTENIDO

CAPITULO 1	1
PROYECTO Inventario participativo de concesiones de agua	1
INTRODUCCION.....	1
OBJETIVOS.....	1
Objetivo General.....	1
Objetivos Específicos	2
LA GESTION DEL AGUA Y LAS CONCESIONES.....	2
LA EXPERIENCIA PARTICIPATIVA DEL INVENTARIO.....	4
Introducción a la metodología.....	4
Metodología.....	6
Localización o ubicación geográfica	6
Identificación de usuario (s).....	7
La necesidad de medición de caudales.....	9
LA CUANTIFICACION DEL RECURSO	11
CAPITULO 2	15
BASES HIDRAULICAS DE LA MEDICION DE CAUDALES.....	15
INTRODUCCIÓN.....	15
FLUJO PERMANENTE Y FLUJO VARIABLE	15
DEFINICIÓN DE CAUDAL.....	16
PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE MASA O DE CONTINUIDAD	17
ECUACIÓN DE BERNOULLI, DESDE EL PRINCIPIO DE ENERGÍA.....	18
Ecuación de Bernoulli para un Fluido Real.....	19
Aplicaciones de la Ecuación de Bernoulli para Medición de Caudales.....	20
RESISTENCIA DE SUPERFICIE EN CONDUCTOS ABIERTOS	22
MEDIDAS PUNTUALES DEL CAUDAL.....	23
Ecuaciones para el cálculo del caudal usando orificios, tubos y toberas ..	23
Medida de caudales usando compuertas de fondo	26

Vertederos de medida	26
Tipos de vertederos de medida	27
Vertederos de medida de caudales de pared delgada	27
Vertedero de medida rectangular	28
Vertedero de medida triangular	29
Vertederos de medida de caudales de pared gruesa	30
Cálculo de la Velocidad utilizando el tubo de Pitot-Prandlt.....	30
Medida de caudales utilizando el Canal Parshall	31
ANEXOS CAPITULO 2.....	34
Figura 1. Ecuación de Bernoulli	34
Figura 2. Orificio.....	34
Figura 3. Compuerta de fondo	34
Figura 4. Vista en planta de vertederos perpendiculares u oblicuos a la corriente, quebrados o curvilíneos.....	35
Figura 5. Vertedero de medida a superficie libre	35
Figura 6. Vertedero sumergido	35
Figura 7. Diferentes formas de vertederos de medida	36
Figura 8. Característica de un vertedero de medida	36
Figura 9. Sección longitudinal y transversal de un vertedero rectangular de medida	36
Figura 10. Diferentes formas de vertederos de medida	37
Figura 11. Tubo de Pitot – Prandlt	37
Figura 12. Vista en planta y perfil del Canal Parshall.....	38
CAPITULO 3	38
MÉTODOS DE CAMPO UTILIZADOS EN LA MEDICIÓN DE CAUDALES	38
ESTACIONES Y SITIOS DE AFORO	39
SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN	39
MEDICIÓN DEL CAUDAL UTILIZANDO EL MÉTODO ÁREA - VELOCIDAD	41
Velocidad media de flujo.....	42
Área de flujo de la sección transversal	42
Medidores de Caudales (Corriente).....	42
Ubicación del Molinete.....	43

Pasos para la Medición de la Velocidad del Flujo con Molinete	43
Estimación de la Velocidad de Flujo utilizando Flotadores	45
Estimación de la Velocidad de Flujo utilizando la fórmula de Manning	45
Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning (n)	47
Selección u obtención del coeficiente de rugosidad de Manning (n)	48
CAPITULO 4	51
MANUAL DE AFORO PARA LAS CONCESIONES PARTICIPATIVAS	51
Introducción	51
Trabajos previos a la salida de campo	51
Trabajos durante el trabajo de campo y realización del aforo	55
Trabajos de gabinete después del levantamiento de campo.....	62
CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXO 1.....	67
INFORME DE VISITA DE CAMPO – MÉTODOS DE AFOROS	67
INTRODUCCION.....	67
MÉTODO ÁREA – VELOCIDAD (MOLINETE).....	67
Herramientas	67
Aspectos importantes a considerar.....	68
Metodología utilizada.....	70
MÉTODO VOLUMÉTRICO.....	71
Herramientas	72
Aspectos importantes a considerar.....	72
Metodología utilizada.....	73
ANEXO 1.1	74
Foto 1. Toma de agua.....	74
Foto 2. Sitio de aforo con molinete	75
Foto 3. Limpieza de las márgenes de la sección de aforo	75
Foto 4. Sección de aforo limpia.....	76
Foto 5. Acoplamiento de la barra graduada	76
Foto 6. Colocación de hélice en barra graduada	77
Foto 7. Colocación de tope en la hélice	77

Foto 8. Conexión de contador a hélice	78
Foto 9. Sujeción de alambre eléctrico con cinta adhesiva	78
Foto 10. Limpieza del fondo del cauce	79
Foto 11. Abscisado en cuerda	79
Foto 12. Colocación y alineación de la sección de aforo	80
Foto 13. Ingreso de datos a la hoja de registro.....	80
Foto 14. Inicio de mediciones en verticales	81
Foto 15. Tornillo guía	81
Foto 16. Contador	82
Foto 17. Medición de velocidad inmediatamente bajo la superficie del agua.....	82
Foto 18. Pie y punta de la barra graduada.....	83
Foto 19. Cronómetro.....	83
Foto 20. Mediciones en las verticales intermedias.....	84
Foto 21. Acumulación de sedimentos en eje de hélice	84
Foto 22. Limpieza de hélice	85
Foto 23. Desmonte de sección de aforo	85
Foto 24. Cauce errante	86
Foto 25. Sitio de aforo volumétrico	86
Foto 26. Tallado de la sección con pala.....	87
Foto 27. Tallado de la sección con machete.....	87
Foto 28. Chorro	88
Foto 29. Colocación de tubería	88
Foto 30. Retiro de obstáculo para el balde	89
Foto 31. Formación de dique provisional con chambas y tierra	89
Foto 32. Toma de medidas con balde de 10 litros	90
Foto 33. Cronometraje del tiempo.....	90
Tabla 1. Registro de datos para el aforo con molinete.....	91

METODOLOGÍA PARTICIPATIVA PARA EL LEVANTAMIENTO DE DATOS EN CAMPO

Inventario participativo de Autorizaciones de Uso y Aprovechamiento de Agua

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La Hidrología es la Ciencia de la Tierra que provee de los fundamentos y bases para una adecuada administración y gestión del agua, y está cimentada en una regular entrega de información hidrometeorológica de buena calidad, particularmente de medidas de la cantidad de agua en ríos y corrientes, principalmente. Si bien es cierto que para una adecuada administración del agua es necesario contar con una evaluación de todas las variables hidrometeorológicas, para este proyecto en particular centraremos el esfuerzo en buscar mecanismos adecuados para la valoración exacta de los caudales que circulen en ríos, quebradas, obras de toma, y en general de cualquier fuente de agua, mediante procedimientos de campo comunes en la hidrología de campo.

La particularidad y novedad de este proyecto está en la inclusión, en las prácticas y adquisición de caudales, de los actores directos del uso del agua, a fin de crear la conciencia de que una adecuada valoración del agua, no solo es beneficiosa para ellos, como usuarios directos del agua, sino como actores fundamentales de una adecuada y justa administración del agua.

OBJETIVOS

Objetivo General

Plantear la metodología que se debe usar para el aforo de las diferentes fuentes de agua para asignar agua a los peticionarios en las concesiones de montaña, principalmente.

Objetivos Específicos

1. Exponer la importancia de un adecuado sistema de medición de caudales para una adecuada gestión del agua, y,
2. Caracterizar, en base a la experiencia del proyecto participativo, los diferentes tipos de concesiones, fuentes, regiones geográficas, y métodos de aforo corrientemente usados en el Ecuador.

LA GESTION DEL AGUA Y LAS CONCESIONES

En el Ecuador, la entidad que tiene a su cargo la limitación y regulación del uso de las aguas a los titulares de un derecho de aprovechamiento, corresponde a la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA – octubre 2008), previamente llamado Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), el cual a su vez reemplazó al Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI). La normativa que establece los lineamientos para la entrega y distribución equitativa del recurso hídrico está dada por la Ley de Aguas publicada en el Registro Oficial No. 69 del 30 de mayo de 1972 y codificada en el Registro Oficial No. 339 del 20 de mayo del 2004.

El Art. 5 de la Ley de Aguas vigente, define el derecho de aprovechamiento como: la autorización administrativa, intransferible, para el uso de las aguas con los requisitos prescritos en esta Ley; salvo el caso de transferencia de dominio, con la sola presentación del título de propiedad del predio por parte de su adquirente, la entidad competente traspasará automáticamente la concesión del derecho de uso del agua en forma total o proporcional a la superficie vendida al nuevo titular. De esa manera el presente proyecto definirá únicamente el mecanismo de asignación de un determinado caudal de concesión, sin considerar las acciones administrativas de la otorgación o no del recurso.

En la ley también se señala a la concesión como un derecho de aprovechamiento de aguas, el cual, estará condicionado a las disponibilidades del recurso y para satisfacer las necesidades para las cuales se solicita.

La normativa establece que solo mediante concesión de derecho de aprovechamiento pueden utilizarse las aguas, a excepción de las que se requieran para uso doméstico. El orden de prelación considerado para el otorgamiento es:

- a) abastecimiento de poblaciones,
- b) necesidades domésticas y abrevadero de animales,
- c) agricultura y ganadería,
- d) usos energéticos, industriales y mineros, y
- e) para otros usos.

La entidad competente en casos de emergencia social y mientras su duración puede variar el orden antes mencionado, con excepción del señalado en el literal a).

El Art. 34 de la Ley de Aguas identifica el uso de agua por varios concesionarios, por lo que este proyecto dará las pautas para la medición de los caudales concesionados a diferentes usuarios, respetando los valores asignados en las concesiones individuales.

De igual manera, la Constitución establece en sus diferentes artículos lineamientos en el uso del recurso hídrico:

- **III-SOBERANÍA ALIMENTARIA:**

Art.282. Se prohíbe el acaparamiento o privatización del agua y sus fuentes.

- **V-Sectores Estratégicos:**

- Art.313. El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental.
- Art.314. El Estado será el responsable de la provisión de servicio de agua potable y riego

- **II-Biodiversidad y Recursos Naturales.**

Art.411. El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos. Se regulará todo actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua

En lo que respecta a la jurisdicción y procedimiento, la ley en el artículo 86 establece que la petición debe constar de los siguientes elementos:

- a) Nombre del río, fuente, etc., de donde se tomarán las aguas, parroquia, cantón y provincia;
- b) El caudal que necesita y de donde va a captarlo o alumbrarlo;
- c) Los nombres y domicilios de los usuarios conocidos;
- d) El objeto al que va a destinarlo;
- e) Las obras e instalaciones que efectuará para utilizar las aguas;
- f) El tiempo en que ejecutará las obra
- g) Los estudios y planos técnicos que justifiquen y definan la solicitud, en la extensión y análisis que determinen los correspondientes reglamentos.

LA EXPERIENCIA PARTICIPATIVA DEL INVENTARIO

Introducción a la metodología

Desde el punto de vista hidráulico, una concesión de derecho de uso de agua (actualmente denominada **autorización**) es una cantidad determinada de agua que el Estado, a través de la Autoridad Competente (de la Demarcación Hidrográfica - DH – respectiva; antes conocidas como Agencia de Aguas), otorga a una persona natural o jurídica, a fin de que de un uso apropiado a dicha cantidad, en función de la actividad para la cual va a ser utilizada, y por un periodo determinado de tiempo, el cual es fijado por la máxima autoridad de la DH (o de la Agencia de Aguas en su tiempo) en la sentencia de adjudicación del uso.

La autorización del uso de agua está geográficamente ubicada dentro de la DH respectiva, la cual fue verificada por la autoridad competente en el análisis técnico del trámite de otorgamiento y con las herramientas topográficas y geodésicas que en su momento tenían a su disposición (mapas topográficos, nivelación, levantamientos topográficos, GPS, etc.). Esta ubicación (dadas por las coordenadas geográficas) podría tener, sin embargo, errores en su localización, especialmente de las concesiones anteriores al aparecimiento de instrumentos de alta precisión como los existentes hoy en día, especialmente los GPS manuales o los GPS diferenciales que toman como punto de partida los puntos referenciales fijos establecidos por el Instituto Geográfico Militar.

El sistema administrativo de la autorización del derecho de uso, de acuerdo a la Ley, aparentemente termina con la sentencia de otorgamiento del derecho de uso, donde se establecen las obligaciones de parte y parte, especialmente del solicitante el cual se obliga a la construcción de las estructuras hidráulicas de captación y posterior distribución de los caudales legalmente adjudicados en la sentencia. Además, el usuario se compromete a dar un adecuado mantenimiento a las obras de captación y obras conexas a fin de aprovechar el agua legalmente otorgada de forma idónea, sin desperdicio y apegada a la cantidad otorgada.

La crisis del agua en cuanto a su disponibilidad para entregas actuales y futuras a nuevos peticionarios y a fin de garantizar el acceso al agua de todos los ciudadanos del país, ha movido a que el Gobierno Nacional realice un catastro nacional o inventario nacional de los usos y concesiones otorgadas por el Estado hasta diciembre del año 2010.

El proceso de catastro o el Inventario Participativo de los Recursos Hídricos de cada autorización de uso del agua en cada DH tiene por objetivo el revisar, describir y analizar la situación actual de las concesiones de agua para todos los usos (abrevadero, uso industrial, agua potable, consumo humano, aguas termales, riego, caudal ecológico, actividades productivas, hidroelectricidad, piscícola). Además está orientado a la identificación y verificación de las fuentes que están siendo actualmente usadas, pero que por varios motivos no han sido registradas legalmente en la DH, las cuales constituyen desde el punto de vista legal, los denominados “*usos de hecho*”, a fin de someterlas a una legalización futura, y de esa forma contabilizar el volumen total concesionado a nivel de cada DH y del país en general.

La realización del catastro nacional o la realización del inventario nacional de los recursos hídricos concesionados, por lo tanto, identifica las condiciones reales de campo en cuanto a ubicación geográfica, identificación de los usos, fuente, usuario o usuarios, evaluación de la calidad del agua en su color y olor, y a la cuantificación de los caudales siendo aprovechados al momento de la elaboración de la visita de campo, con el objeto de compararlo con aquellos valores concedidos por la autoridad.

Los datos originales fueron entregados por la SENAGUA en una base de datos digital y física, lo cual sirve de punto de partida para quienes están realizando el inventario de la

referencia para el levantamiento de la ubicación de la concesión, el ordenamiento de las concesiones de acuerdo a su ubicación geográfica, la sistematización de las autorización para cuantificarlo de acuerdo a sus usos reales, y analizar las concesiones otorgadas con las concesiones siendo usadas. Toda esta información es almacenada en fichas técnicas físicas y digitales, las cuales fueron elaboradas en consenso con los varios actores locales y seccionales.

Metodología

El proceso de inventario se realiza en el campo donde se busca, tomando como referencia la base de datos de la SENAGUA, la ubicación geográfica de una concesión, por su número de caso. En el Anexo 1 se muestra un levantamiento de ficha. Los aspectos importantes que se realizan en cada levantamiento de información es la siguiente:

Localización o ubicación geográfica

Las visitas a las concesiones se las realiza principalmente llevando como material de apoyo un mapa con la ubicación de las concesiones, el padrón en el que constan todas las concesiones registradas en cada parroquia y un GPS. El mapa sirve como punto de partida para ubicar las concesiones, las cuales se dividen en sectores y cada uno de los grupos de trabajo de campo está encargado de encontrar a los concesionarios del sector asignado. La concesión se determina mediante un GPS de precisión, así como otros datos de la concesión y se registra en la ficha técnica. Dependiendo de la época de la concesión se pueden observar diferencias, que en algunos casos pueden ser significativos en cuanto a su posicionamiento real.

Ejemplo: el siguiente es un extracto del padrón proporcionado por la SENAGUA, correspondiente a la concesión (autorización) otorgada el Señor Carlos Serrano Pallares, de una vertiente sin nombre en los predios del mismo concesionario, la cual no es de mucha ayuda para localizar al concesionario.

15	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI	SANGOLQUI	RÍO ESMERALDAS	VERTIENTES	2.680,00	5,56
	00911	2839	SERRANO PALLARES CARLOS	6,00	-	9.964.700,00	26.665,00
QUITO		03/Oct/1978	VERT. SIN NOMBRE	0		Río Guayllabamba 3,00 783.850,00	SI
INERHI	CZ QUITO	0	RUMIÑAHUI/PQ. SANGOLQUI/EN SUS PREDIOS	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayllabamba)			

En casos como éste, se ingresan las coordenadas del padrón en el GPS y se trata de ubicar al concesionario, aunque dependiendo del tipo de DATUM y la antigüedad de las coordenadas, no siempre es posible encontrar al concesionario.

Identificación de usuario (s)

Las visitas de campo sirven para hacer contacto personal con las personas encargadas del manejo del agua y que deberían ser los usuarios o interpuestas personas (vecinos, empleados) a quienes se les otorgó la concesión del uso del agua, a fin de que se sirvan guiar a los sitios en los cuales realizan la captación y derivación de los caudales concesionados. En muchas ocasiones no es posible identificar a los concesionarios, por lo que se recurre a su identificación mediante referencias de vecinos del sitio conocido de concesión o de lugares aledaños.

Existen casos en los cuales los usuarios no son personas conocidas del lugar, pero los vecinos de las concesiones los ubican como usuarios en lugares diferentes. Lo que significa que, o las coordenadas del sitio tienen valores erróneos; o que esa concesión ha sido asignada, pero en un lugar diferente.

Las concesiones de caudales en varias ocasiones también son asignadas a usuarios con un “*nombre propio* (nombre del primer concesionario) y *otros usuarios*”, significando que en la solicitud uno de los concesionarios hace de cabeza de la misma en su nombre y en nombre y representación de varios usuarios. La sentencia cuenta con la información de los otros usuarios, no así la base de datos, lo cual dificulta la identificación de la cantidad otorgada a cada uno de los “otros usuarios”, por lo que al momento de realizar el inventario, se encuentra con que el sitio de captación está constituido de varias obras de toma presumiblemente pertenecientes a los “otros usuarios”, sitios en los cuales se realiza el aforo individual de las captaciones, a fin de contabilizar el caudal total y compararlo con el proporcionado por la SENAGUA para esa concesión en particular.

A fin de documentar adecuadamente estas situaciones, la ficha técnica identifica todas y cada una de las captaciones y obras de derivación y se realiza el aforo respectivo en función de tipo de captación existente y se registra en la ficha.

Este caso se evidencia en el siguiente ejemplo de campo:

Es el caso de los concesionarios de la Acequia Velasco que se origina en la Laguna de Santa Rosa de propiedad de la Empresa Eléctrica Quito, cuyas aguas provienen de uno de los ramales del río Pita.

En el padrón proporcionado por SENAGUA existen varios concesionarios de esta acequia y la captación está registrada en el mismo lugar para todos los concesionarios, aunque el caudal otorgado es diferente, por ejemplo:

80	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	GUAMAN DANIEL		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	2,08	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
81	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	HERDOIZA CATTANI JORGE		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	2,16	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
82	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	URBANIZACION PIRINEOS		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	4,00	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
83	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	JIJON JOSE IGNACIO		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	26,99	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
84	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	GUARDERAS CHIRIBOGA RODRIGO		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	27,29	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
85	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	PAREDES PEÑA FRANCISCO Y DURAN BALLEN SUSANA		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	3,33	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
86	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	GAIBOR MORA IGNACIO		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	50,15	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	
87	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.720,00
	2919	ZABALA FABIAN		9.960.480,00
	14/Mar/1996	RIO PITA / ACQ VELASCO	2,25	788.400,00
	CZ QUITO	0	Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)	

Como se puede observar el sitio de captación, en el padrón, es el mismo para todos los concesionarios, pero el caudal es distinto. La forma en la que se levanta la información es tratando de localizar los repartidores de caudal para cada uno de los usuarios y medir el caudal en estos sitios, lo que causa que las coordenadas levantadas comiencen a variar de usuario en usuario.

Otro caso interesante es el siguiente:

Una concesión presenta varias fuentes pero solo un sitio registrado, por ejemplo:

125	ESMERALDAS	RUMIÑAHUI		2.940,00
	3089	HERRERA CALVOPÍÑA JOSE RODRIGO		9.953.237,00
	16/Abr/2007	VERT. SIN NOMBRE Y OTRAS PARAMO PICHINCHA / ACQ. GARZON	0,05	786.863,00
CZ QUITO	0			Río San Pedro (Subcuenca Río Guayl)

En el padrón se indica que el Sr José Herrera presenta un registro en el que constan una vertiente sin nombre y otras, además de la acequia Garzón. La palabra “*otras*” lleva a pensar en la existencia de más de una vertiente en el lugar, aquí se pueden presentar dos opciones:

1. Que las otras vertientes se encuentren cerca de la principal, es decir que estén todas a la vista y su caudal se junte, lo que nos lleva a levantar información de un solo sitio que se puede considerar como la fuente principal, o,
2. Que las otras vertientes se encuentren lejos de la principal, y en las que se necesite movilizarse para llegar a ellas, entonces en ese caso se registran cada una de las fuentes y se mide su caudal si estos no confluyen a un mismo sitio.

La presencia de concesiones sobre obras hidráulicas de derivación comunes se identifica fácilmente y facilitan la evaluación de los caudales concesionados. Los “óvalos” especialmente permiten una distribución de caudales de acuerdo a lo asignado, sin embargo se observa circunstancias en las cuales éstos parecen haber sido modificados o cuentan con pantallas que eventualmente podrían modificar el caudal concesionado, si bien no en desmedro del caudal adjudicado al otro usuario, pero si con valores superiores a los concesionados a ese usuario.

La necesidad de medición de caudales

La necesidad de utilizar toda el agua disponible y el aumento en costos para desarrollar nuevos recursos hídricos hacen imperativo que el agua sea aprovechada económicamente y sin desperdicio, lo cual no puede alcanzarse si no se emplea sistemas de medición.

Para determinar las magnitudes hidráulicas necesarias para evaluar el empleo provechoso del recurso agua, es necesario contar con elementos o dispositivos precisos para el aforo. Consecuentemente, la cantidad de agua utilizada debe estar sujeta a medición para que su distribución sea justa y equitativa, considerando el orden de prelación según la Ley de Aguas vigente.

Debido a la necesidad de obtener resultados prácticos, existen diversas alternativas para medir la cantidad de flujo. El método más eficaz es particular en cada caso, no es único, depende de varios factores como: el volumen de agua, condiciones de trabajo bajo las cuales se efectúa la medición, condiciones topográficas del sitio de aforo, accesibilidad al sitio particular de aforo y de concesión, y la habilidad del operador.

En general, los métodos existentes para el cálculo de los caudales se dividen en 3 grupos dependiendo del principio en el que se fundamentan (Cuadro 1):

Cuadro 1. Métodos de medición de caudales

Métodos de medición de caudales	
AFORO DIRECTO	Volumétrico
	Químico
	Medidores de Hélice
	Diferencia de Carga
ÁREA - VELOCIDAD	Flotador
	Molinete
	Trayectoria
	Tubo Pitot
MÉTODOS QUE UTILIZAN CONTRACCIONES	Venturi
	Vertederos
	Parshall
	Sifones

Los métodos usados en los aforos participativos como el volumétrico, flotador y molinete, se enmarcan en el grupo de los métodos más prácticos, comúnmente usados para un aforo no permanente, económico, y con resultados de caudal relativamente confiables si son

realizados tomando en cuenta ciertas consideraciones y con el cuidado debido en las mediciones.

Los aforos realizados en las zonas de Machachi, Aloasi, Chaupi y Aloag, utilizan el principio de continuidad, que establece que la masa que atraviesa una sección en el tiempo, es constante. Los métodos, materiales e instrumentación empleados para el cálculo del caudal se resumen en el Cuadro 2.

LA CUANTIFICACION DEL RECURSO

La importancia principal para una adecuada medición de caudales se fundamenta en la necesidad de controlar y verificar que cantidad del recurso procedente de las diferentes fuentes se encuentra asignada a los usuarios mediante las concesiones. Esta cuantificación permite conocer:

- La disponibilidad de agua con la que se cuenta.
- La suficiencia en la cantidad de agua destinada a los usuarios y,
- La eficiencia de uso y manejo de agua.

La precisión en las mediciones garantiza una mejor eficiencia en la distribución del recurso y por ende en la recaudación de las tarifas. En el proceso de medición se puede incurrir en 3 tipos errores: Sistemáticos, Aleatorios y Accidentales.

- Sistemáticos: Se presenta por una deficiente calibración de los aparatos, por ejemplo, cuando se establece un valor equivocado de elevación de la cresta de un vertedero.

El error sistemático se puede evitar revisando los equipos periódicamente, más aun cuando se han utilizado o instalado hace mucho tiempo.

Cuadro 2. Métodos de aforo usados

	Sitios	Machachi	Aloasi	Chaupi	Aloag	Observación
Métodos	Volumétrico	Baldes y tuberías PVC, cronómetros	Baldes y tuberías PVC, cronómetros	Baldes y tuberías PVC, cronómetros	Baldes y tuberías PVC, cronómetros	<ul style="list-style-type: none"> • Caudales pequeños, • Mínimo 3 repeticiones, • Estandarizar el recipiente, • En la adaptación a sección para aforo volumétrico evitar posibles fugas de agua.
	Molinete	Molinetes marca OTT tipo Arkansas y tipo NEISSE y SEBA UNIVERSAL	Molinetes marca OTT tipo Arkansas y tipo NEISSE	Molinetes marca OTT tipo Arkansas y tipo NEISSE y SEBA UNIVERSAL	Molinetes marca OTT tipo Arkansas y tipo NEISSE y SEBA UNIVERSAL	<ul style="list-style-type: none"> • En profundidades de agua mayores a 30 cm. • Calibración y mantenimiento periódico de molinetes. • Molinete perpendicular al flujo. • Sección de aforo sin vegetación en el lecho. • Sin obstrucciones que perturben el flujo, tanto aguas arriba, como aguas abajo.
	Flotadores	Si	--	--	Si	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiendo de la existencia de tramos rectos, de ser posible 20 seg entre cada sección. • Aplicable cuando existen elementos flotantes en el cauce. • El método permite obtener un resultado aproximado.
de caudal o	Manguera en el lecho de quebradas	Si	Si	Si	Si	

Reloj	Si	--	--	--	
Derivación Lateral	Si	--	--	--	
Tanque Repartidor con tubos PVC	Si	--	--	--	
Vertedero Lateral	Si	--	--	--	
Caucasiana	--	--	Si	--	
Óvalos	--	Si	Si	--	
Puntas de diamante	--	Si	Si	--	
Tanques de almacenamiento	Si	Si	Si	Si	

- Aleatorios: Esta relacionado directamente con el fenómeno físico y sucede cuando al tomar una medición ésta se ve afectada por un evento extraordinario, por ejemplo, la inestabilidad del flujo justo en el momento de medición.

El error aleatorio su puede reducir realizando varias mediciones (mínimo 3) bajo las mismas condiciones del sitio y consecuentemente obtener un valor representativo promedio.

- Accidentales: Ocurre principalmente por fallas humanas, por falta de atención o incapacidad física al realizar las mediciones. Las causas de este error pueden ser: sentido de la vista deficiente, valores de referencia equivocados, aparatos mal ubicados.

Se entiende como precisión a la capacidad de producir un mismo valor dentro de un límite dado, es inherente a los equipos y constituye el grado de repetitividad de las mediciones, es importante su cuantificación para aceptar un conjunto de mediciones o recomendar a los instaladores u operadores que inspeccionen y verifiquen sus aparatos y detecten los

defectos correspondientes. La precisión matemáticamente se calcula utilizando la desviación estándar:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

S = desviación estándar,

x_i = representa a cada medición,

\bar{x} = promedio de las mediciones,

n = número de mediciones.

El error admisible para un nivel de confianza del 95% en este tipo de mediciones es alrededor de un 5%.

CAPITULO 2

BASES HIDRAULICAS DE LA MEDICION DE CAUDALES

INTRODUCCIÓN

El movimiento del agua en estructuras hidráulicas está relacionado con la forma de la estructura misma y por donde fluye el agua, definiéndose por el tipo de contorno que define el borde de la misma, clasificándose en dos grandes grupos: cerrados (tuberías), y abiertos (canales, vertederos). El movimiento de cada partícula en cualquiera de estos dos últimos casos está gobernada por la ley fundamental de la dinámica, dada por: *fuerza = masa x aceleración.*

Dadas las condiciones naturales (y en el caso de aforos sobre estructuras hidráulicas) de flujo se pueden distinguir, en forma general, los siguientes tipos de flujo:

FLUJO PERMANENTE Y FLUJO VARIABLE

El flujo permanente se da cuando en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido sus características de movimiento no varían con el tiempo, principalmente su velocidad y presión; como el caso del flujo en un canal de sección transversal uniforme con pendiente uniforme.

El flujo variable se da cuando en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido sus características de movimiento (velocidad y presión) varían con el tiempo, como en el caso de un recipiente o de un embalse que es vaciado mediante un orificio, o un desagüe de fondo (respectivamente). En estos casos la velocidad de flujo depende de la carga hidráulica sobre el orificio o compuerta del desagüe.

Existen otras definiciones de regímenes de flujo (flujo uniforme y no uniforme, flujo laminar y turbulento), las cuales no son aplicables a las condiciones de aforo puntual que se da en la práctica de aforos, en virtud de que éstos, se realizan en secciones transversales localizadas en estructuras hidráulicas, generalmente, fijas. Incluso las definiciones de flujo

permanente y variable pierden su significado, dado que la duración de los aforos son relativamente instantáneos.

DEFINICIÓN DE CAUDAL

El caudal, Q , es una medida de la cantidad de fluido que cruza una determinada sección transversal sobre una sección fija de control, definida por la estructura hidráulica a través de la que atraviesa. Se define como el volumen de agua por unidad de tiempo que atraviesa una determinada sección transversal. Por lo tanto, dimensionalmente, el caudal se mide en unidades de volumen sobre unidad de tiempo, y en el sistema internacional de medidas, éste se mide en metros cúbicos por segundo, o en litros por segundo.

Desde el punto de vista tridimensional, y notando que tanto la velocidad de flujo, como el área de la sección transversal, definen también el caudal, se puede decir que el caudal de flujo en una sección transversal es cero cuando dos de las componentes de la velocidad de flujo son paralelas a dicha sección. Por lo tanto, la componente normal de flujo que puede variar en dicha sección, es la que en definitiva define el caudal, al integrar su distribución espacial en la sección transversal de flujo. Por lo tanto,

$$dQ = v_n dA$$

e, integrando sobre la sección transversal da que el caudal se puede expresar como,

$$Q = \int v_n dA$$

lo cual se transforma en

$$Q = AV$$

para el caso de flujo uniforme. V también se puede determinar en base al valor medio de la velocidad en la sección transversal, por lo que, desde el punto de vista de la hidrología de campo, es menester realizar el trabajo de campo, con el objetivo último de medir la velocidad media de una sección transversal de flujo.

PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE MASA O DE CONTINUIDAD

El principio fundamental del movimiento de un fluido está gobernado por el hecho de que para dos secciones transversales de una región de flujo, o de un volumen de control, la cantidad de masa que cruza una sección aguas arriba es igual a la cantidad de masa que sale por aguas abajo, por lo que,

$$\rho_1 V_1 dA_1 = \rho_2 V_2 dA_2 = \rho_3 V_3 dA_3 = C$$

donde, V_1 , V_2 , y V_3 , son las componentes normales de la velocidad en las direcciones coordenadas 1, 2, y 3, por lo que el flujo que circula por una sección de control en masa es constante.

De la definición del peso específico, dado por

$$\gamma = \rho g$$

donde γ es el peso específico del agua, ρ es la densidad del agua, y g la constante de gravedad, se tiene que

$$\gamma_1 V_1 dA_1 = \gamma_2 V_2 dA_2 = \gamma_3 V_3 dA_3 = C$$

es decir el flujo en peso también es constante. Además tomando en cuenta que el volumen específico se define como

$$v = \frac{1}{\gamma}$$

donde v es el volumen específico, y γ es el peso específico del agua, se tiene la ecuación de continuidad para el caso de un fluido en régimen permanente compresible, a lo largo de un hilo de corriente, como

$$\frac{V_1 dA_1}{v_1} + \frac{V_2 dA_2}{v_2} + \frac{V_3 dA_3}{v_3} = C$$

En la práctica hidráulica ingenieril, bajo condiciones normales de flujo, estamos tratando de un fluido incompresible, por lo que la gravedad, el volumen específico y el peso específico los consideraremos constantes en el campo, por lo que la ecuación de continuidad para un fluido incompresible en régimen permanente está dado, para el caso general tridimensional como

$$V_1 dA_1 = V_2 dA_2 = V_3 dA_3 = C$$

que es la ecuación general de continuidad para el caso tridimensional.

ECUACIÓN DE BERNOULLI, DESDE EL PRINCIPIO DE ENERGÍA

Las condiciones de desarrollo de las ecuaciones de un fluido se basan en su consideración de flujo ideal, es decir que no tiene viscosidad, ni rozamiento, ni por lo tanto la transformación de la energía hidráulica en energía térmica, y como se vio anteriormente, para el caso de flujo permanente la trayectoria de flujo coincide con la de la línea de corriente. En el caso ideal no se presenta ni pérdida ni ganancia de energía por la inclusión de bombas o turbinas, por lo que el movimiento de una partícula de agua entre dos puntos estará gobernado por la energía total entre ellos, y ésta permanecerá constante.

Considerando la energía total entre los puntos 1 y 2 de una línea de corriente, la carga hidráulica de posición más la carga hidráulica de presión y más la carga hidráulica debida a la velocidad es constante, y se encuentra dada por la conocida ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

donde los sub índices 1 y 2 corresponden a dos puntos ubicados sobre una misma línea de corriente. Para el caso de un flujo ideal sin pérdidas y sin la inclusión o exclusión de energía se puede dar el caso de que la cantidad de energía transportada en dos líneas de flujo diferentes puedan ser diferentes, como sucede en el caso de flujo rotacional entre dos placas paralelas, por lo que no se cumple la ecuación anteriormente indicada.

Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli para el caso irrotacional a lo largo de un tubo de corriente se puede escribir de la siguiente forma

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

En la práctica diaria de ingeniería y en los trabajos de aforos se aplica la ecuación de Bernoulli al flujo de agua que circula por estructuras hidráulicas, como una canal, un vertedero, una tubería, sintetizando de alguna manera el valor puntual de los elementos de su ecuación sobre toda la sección transversal, asignando los valores medios en toda la sección, y definiendo la velocidad como

$$V = \frac{Q}{A}$$

donde A es el área de la sección transversal, Q es el caudal circulante a través de esta sección transversal, y V es la velocidad media en dicha sección, lo que equivale a aplicar la ecuación de Bernoulli entre dos secciones transversales normales de un tubo de corriente, o en la práctica común ingenieril, entre dos secciones de canales, o de una tubería, conocido comúnmente como la teoría uni dimensional de flujo.

Ecuación de Bernoulli para un Fluido Real

La presencia de la viscosidad en un fluido real origina un rozamiento del flujo con las fronteras donde se realiza el movimiento del mismo, así como la resistencia interna en el fluido por el rozamiento propio de las partículas en su movimiento, por lo que la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales no es aplicable al caso real ingenieril, en el cual se mantiene el principio de conservación de energía, pero en este caso incluido el término de la perdida de energía debido a la fricción con las fronteras del flujo y la fricción interna del fluido, por lo que la ecuación ideal se transforma en

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{r,1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

donde el término $H_{r,I-2}$, representa la pérdida de energía global entre las dos secciones aguas arriba y aguas abajo.

Esta última ecuación es generalmente aplicable para casos de determinación de la energía total entre dos secciones comúnmente usadas en hidráulica general, sin embargo, en los casos en los cuales entre las dos secciones existan más pérdidas provocadas por elementos hidráulicos adicionales a los mencionados anteriormente (rozamiento con las fronteras y fricción interna), tales como pérdidas localizadas debido a curvaturas, ensanchamientos, contracciones del flujo, existencia de bombas o turbinas, etc., el término de la pérdida de energía debe ser cuidadosamente analizado. Por lo tanto, en las aplicaciones reales del flujo de agua circulando a través de estructuras hidráulicas, la energía hidráulica del movimiento disminuye en la dirección aguas abajo.

Aplicaciones de la Ecuación de Bernoulli para Medición de Caudales

Si bien las aplicaciones ingenieriles de la Ecuación de Bernoulli son innumerables, para el presente caso que nos ocupa, se definirán las aplicaciones más comunes, pero que sin embargo en la práctica de campo no son aplicables debido sobre todo a que se debe extremar medidas que no son fáciles de lograrlas en el campo. Muchos de estos métodos son aplicaciones especialmente para ser instalados en laboratorios.

Del análisis de los trabajos de campo realizados hasta el momento (ver la sección correspondiente a los informes de campo) se desprende que los métodos más comúnmente usados son el volumétrico, el del reloj, y el de (micro) molinete, dadas las características de las obras que han sido diseñadas con fines de distribución de los caudales concesionados.

En la literatura se puede ver que matemáticamente se pueden definir varios métodos de aforo en el cual la parte central del análisis es la Ecuación de Bernoulli, entre los cuales se puede tener: flujo a través de un orificio desde un tanque con carga constante (salida de agua a través de un orificio, o Ecuación de Torricelli), el medidor de presión y velocidad del Tubo de Prandtl, la medida de caudales mediante el Tubo de Venturi, la medida de caudales mediante el uso de Toberas de Medida, la medida de caudales usando diafragmas, la medida de caudales usando el Sifón, y finalmente el método del Eyector. De estos siete métodos, en la práctica se usa únicamente se ha visto en el campo el método del tanque de

carga constante, el cual en la realidad se reduce al método volumétrico. Dado que los otros seis métodos básicamente se usan para el aforo en tuberías, y los casos vistos en los informes son inexistentes, se presentará a definir el caso del tanque con carga constante.

Tanque con carga constante y flujo a través de un orificio:

En general se ha visto que en varios casos de captaciones de agua para distribución a los usuarios se ha construido un tanque cuadrado del cual salen uno o varios tubos con igual diámetro para abastecer de agua a uno o varios usuarios. Estos tanques generalmente son construidos en hormigón armado, mampostería de ladrillo, excavados, y los tubos generalmente son de PVC de varios diámetros. El ingreso de agua a estos tanques generalmente proviene de la parte central inferior del tanque o su ingreso se da en la parte posterior a aquella por la cual sale el agua a los tubos y mantiene un nivel de agua relativamente estable, aunque con alguna turbulencia.

Al aplicar la Ecuación de Bernoulli para el caso real a un hilo de corriente que saliendo de la superficie libre del tanque llegue a la salida del tubo (tomado como el nivel de referencia), con una altura neta de caída llamada H (entre el nivel del tanque y la salida en el tubo), se tiene que la ecuación,

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{r,1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

con $p_1 = 0$ (actúa la presión atmosférica), $p_2 = 0$ (actúa la presión atmosférica), $v_1 = 0$ (la sección transversal en el tanque se considera suficientemente grande), $z_1 = H$, y $z_2 = 0$ (el nivel de referencia coincide con esta elevación, por lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$0 + H + 0 - H_{r,1-2} = 0 + 0 + \frac{v_2^2}{2g}$$

por lo que la velocidad a la salida del orificio es la raíz cuadrada del doble del producto de la gravedad por la carga neta sobre el orificio disminuido de las pérdidas producidas entre el nivel libre y la salida del orificio. En la práctica, el término de las pérdidas se asume como despreciable, por lo que la velocidad media en el orificio se calcula como:

$$v_2 = \sqrt{2gH}$$

la cual es independiente del peso específico del fluido de circulación.

RESISTENCIA DE SUPERFICIE EN CONDUCTOS ABIERTOS

Los conductos abiertos son estructuras hidráulicas en los cuales el flujo no está completamente rodeado por la frontera, sino que tiene una superficie libre expuesta a la atmósfera y sus formas transversales son mucho más variadas que los conductos cerrados.

En la práctica ingenieril estas secciones son generalmente rectangulares, cuadradas, trapezoidales; aunque en la naturaleza son generalmente secciones en U, en V, o compuestas, en función de las regiones por las cuales cruza dicha corriente. En este tipo de obras también se consideran a aquellas secciones transversales cerradas que por naturaleza de su funcionamiento, requieren la superficie libre, como en algunos túneles para obras de riego, o en los sistemas de alcantarillado. En las aplicaciones de este proyecto se considera que la pendiente es constante y suficientemente larga, como para que el flujo sea uniforme.

En la figura 1 se puede aplicar la Ecuación de Bernoulli entre dos puntos a lo largo del canal trapezoidal de sección constante, de la siguiente forma

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{r,1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

donde $H_{r,1-2}$ es la pérdida de energía en el canal entre las secciones transversales 1 y 2 de la figura. Al ser las secciones transversales de área constante, las velocidades v_1 y v_2 son iguales. Además, puesto que en las dos secciones la superficie libre está sujeta a la atmósfera, las cargas de presión son iguales, por lo que la ecuación anterior se reduce a

$$H_{r,1-2} = z_1 - z_2$$

por lo que el flujo entre dos puntos de un canal trapezoidal abierto tiene como pérdidas la diferencia de cargas hidráulicas de posición entre esos dos puntos.

En la práctica hidrológica para determinar los caudales bien sea de concesión o de comprobación de una concesión no se usa la aproximación de la Ecuación de Bernoulli para su estimación, debido a los problemas operacionales de ubicación de las secciones aguas arriba y aguas abajo en un canal, por lo que se recurre a mediciones localizadas en función de la topografía, la forma de la sección transversal, el grado de turbulencia, las obras hidráulicas construidas de fácil operación, entre las cuales se tiene los orificios y los vertederos. Estos como elementos puntuales para medir el caudal.

MEDIDAS PUNTUALES DEL CAUDAL

Como se mencionó anteriormente, existen varios métodos de medir el caudal en una localización determinada en el campo. Estos métodos requieren de condiciones de operación ideales en el sentido de que no puede existir ningún tipo de obstáculos y perturbaciones en el proceso de medición. Los sistemas usados son: orificios, tubos, toberas y vertederos.

Un orificio es una apertura realizada en la pared lateral de un recipiente o depósito, o en el fondo del mismo, generalmente de sección transversal circular, y su tamaño varía en función del caudal siendo extraído del recipiente. El recipiente del cual drena el caudal a ser medido puede funcionar a superficie libre o a presión, y el chorro puede estar también fluyendo libremente a la atmósfera o completamente sumergido, por lo cual la medición del caudal tiene que hacerse en función de la aplicación de la Ecuación de Bernoulli.

Ecuaciones para el cálculo del caudal usando orificios, tubos y toberas

La figura 2 muestra la forma de drenaje de agua desde un recipiente a través de un orificio construido en su pared lateral, del cual se desea determinar dicho caudal de drenaje. El chorro, debido a la acción de la presión atmosférica y al efecto del cambio brusco de trayectoria desde el recipiente hacia la atmósfera, se contrae a una distancia equivalente a la mitad del diámetro, lo que se conoce como la *vena contracta*, la cual causa un incremento de la velocidad en esta sección con relación a aquella de la sección transversal de salida.

Aplicando la Ecuación ideal de Bernoulli a un hilo de corriente que naciendo en la superficie del recipiente, termina en la sección de la *vena contracta*, se puede determinar que

$$h_1 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

donde $V_2 = V'$, que correspondería a la velocidad teórica en la sección de la *vena contracta*, por lo que la velocidad en la zona reducida se calcula como

$$V' = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \sqrt{2g\Delta h}$$

La velocidad real en la *vena contracta* se calcula como

$$V = c_v V'$$

donde c_v es el coeficiente de velocidad, por lo que la velocidad de cálculo del caudal a la salida del orificio tiene la forma

$$V = C_v \sqrt{2g\Delta h}$$

El caudal de drenado desde el recipiente se calcula entonces usando el principio de cantidad de movimiento descrito anteriormente, en el cual el caudal es igual al área de flujo por la velocidad real. El área en la *vena contracta* se calcula como

$$A_c = C_c A$$

en la cual C_c es el coeficiente de contracción, y A es el área del orificio. Por lo tanto, el caudal a través del orificio se calcula como

$$Q = A_c V = C_c C_v A \sqrt{2g\Delta h}$$

en la cual al reemplazar el producto de los coeficientes de velocidad (C_v) y el de contracción (C_c) por el coeficiente de descarga ($C_q = (C_v)(C_c)$), se tiene la ecuación para calcular el caudal a través del orificio como

$$Q = C_q A \sqrt{2g\Delta h}$$

donde el valor de Δh es la diferencia de las cargas hidráulicas antes y después del orificio.

La deducción realizada para el orificio es válida para varios casos similares, como el caso del orificio en el fondo del recipiente o tanque. Para el caso del flujo del recipiente del orificio sumergido, (figura x.2), la carga hidráulica aguas abajo del recipiente corresponde a la carga hidráulica de posición en el centro de la *vena contracta* mas la carga hidráulica de la sección sumergida, es decir

$$h_2 = z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$$

En el caso del recipiente sometido a presión aguas arriba del orificio (figura x.3), la carga hidráulica en esa posición se calcula como la carga hidráulica de posición de la superficie libre mas la carga de presión existente en ese punto, de forma que la carga hidráulica total aguas arriba se calcula como

$$h_1 = z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$$

Si bien las toberas son instrumentos para medición de caudales que podrían ser usados en distribución o entrega de caudales en obras civiles en el campo, no se los usan debido a la complejidad de su construcción y a lo impráctico de su aplicación en sectores donde no se puede entender su funcionamiento, por lo que no se discutirá su uso y ecuaciones de cálculo en el presente estudio.

Medida de caudales usando compuertas de fondo

En la práctica de distribución de agua a nivel nacional es muy común encontrar canales que conducen el agua, en los cuales, a fin de controlar adecuadamente el volumen entregado, se construyen compuertas (figura 3) rectangulares, las cuales, en su ancho, coinciden con el ancho del canal (b), y el usuario es capaz de controlar la apertura (a) para obtener el caudal adecuado. La aplicación de la Ecuación ideal de Bernoulli a un hilo de corriente desde el nivel agua arriba y la sección de la *vena contracta* da como resultado

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Pero por la ecuación de continuidad se sabe que

$$V_1 = \frac{V_2 h_2}{h_1} = \frac{V_2 C_v a}{h_1}$$

que conduce a la ecuación del cálculo del caudal con

$$Q = C_q ab \sqrt{2g \Delta h}$$

Vertederos de medida

Uno de los métodos para controlar niveles de operación de canales y/o medir caudales más exactos, comunes y fáciles de usar, bien sea en laboratorio o en el campo, es el de los vertederos de medida, los cuales son estructuras simples tipo pared o diques lisos colocados transversalmente a una corriente de flujo, los cuales producen una sobre elevación del calado aguas arriba y en función del espesor de la pared éstos pueden ser vertederos de pared delgada o pared gruesa, los cuales pueden ser construidos de láminas delgadas de acero, láminas de madera, paredes de mampostería de ladrillo o piedra, y en el caso de vertederos permanentes, pueden ser construidos en hormigón. En general los vertederos de medida deben tener crestas vivas, a fin de minimizar el contacto de la lámina vertiente con el vertedero.

En función del ancho del canal o corriente, los vertederos de medida pueden ser con o sin contracción lateral, pueden ser perpendiculares a la corriente, pueden estar diagonales a la corriente, o quebrados, y pueden ser rectos o curvos (figura 4). El canal de aproximación de la corriente debe ser de sección transversal constante para evitar pérdidas por contracciones o expansiones y que el flujo de aproximación al vertedero sea uniforme. Para el caso de vertederos de cresta ancha sin contracción lateral, se debe incluir un sistema de ventilación a fin de evitar la separación de la lámina inferior del vertedero. La altura de la lámina vertiente sobre el vertedero se debe medir mediante el uso de una regla graduada con nonius terminado en gancho a por lo menos tres veces la altura del calado crítico, sobre la cresta del vertedero.

Tipos de vertederos de medida

La clasificación de los vertederos de medida descritos anteriormente, también pueden ser de varios tipos en función del nivel de agua a la salida del vertedero. Pueden ser de tipo lámina libre, si el nivel del agua aguas abajo del vertedero es menor a la diferencia de nivel entre el calado aguas arriba y el nivel aguas abajo (figura 5), y vertedero sumergido si el nivel del agua aguas abajo del vertedero es mayor a la diferencia de nivel entre el calado aguas arriba y el nivel aguas abajo (figura 6).

Vertederos de medida de caudales de pared delgada

La parte superior de estos vertederos que están en contacto con la lámina inferior del chorro tienen una lámina de latón o acero inoxidable de unos 5 mm de espesor con un chaflán, en el cual se construyen las diferentes formas de vertederos los cuales pueden ser rectangulares (con o sin contracción), triangulares, trapezoidales, semicirculares, o parabólicos (figura 7). En los vertederos de medida con contracción se deben ventilar la lámina inferior del chorro que pasa por el vertedero, caso contrario, el chorro es capaz de ejercer una succión que provoca que la lámina se pegue contra la pared aguas abajo del vertedero, dando lugar a que, o el caudal aumente y la lámina baje, o a que el caudal disminuya y el nivel aguas arriba se mantenga.

Vertedero de medida rectangular

Para determinar el caudal de circulación a través de un vertedero rectangular sin contracción de ancho b y calado h ,(figura 8) se calcula primero la expresión de la velocidad mediante el uso de la Ecuación de Bernoulli entre un punto aguas arriba del vertedero (asumiendo que la velocidad superficial en ese punto es despreciable), ubicado al menos a tres veces el calado crítico sobre el vertedero, y un punto sobre el chorro del vertedero al mismo nivel del paramento vertical del vertedero, que tiene la forma de

$$h + 0 + 0 = \frac{v^2}{2g} + h - y + 0$$

con lo que la velocidad sobre la sección transversal del vertedero se calcula como

$$v = \sqrt{2gy}$$

El caudal diferencial ideal en la sección transversal de la lámina del vertedero se puede calcular como el producto de esta velocidad por el área diferencial donde ocurre esta velocidad, dando por lo tanto la siguiente expresión diferencial

$$dQ' = bdy\sqrt{2gy}$$

El caudal total de circulación por el vertedero se calcula al integrar esta última expresión diferencial entre la cresta del vertedero (definiéndola como cero, 0) y el nivel de la superficie libre, definida como h , obteniéndose la expresión

$$Q' = \frac{2}{3}bh\sqrt{2gh}$$

El caudal real se calcula al multiplicar esta última expresión por el coeficiente adimensional de caudal (C_q) que fluctúa entre 0.64 y 0.79, por lo que la ecuación del caudal que circula por un vertedero de pared delgada es

$$Q' = C_q \frac{2}{3} b h \sqrt{2gh}$$

La Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos propone las siguientes ecuaciones para determinar el valor del coeficiente adimensional de caudal sobre un vertedero de medida sin contracciones, para fluctuaciones de h entre 25 mm y 800 mm, basado en la figuras 9 y 10.

$$C_q = 0.615 \left(1 + \frac{1}{h + 1.6} \right) \left[1 + 0.5 \left(\frac{1}{h + z_c} \right)^2 \right]$$

Para el caso de vertederos de medida con contracciones, el coeficiente se calcula como

$$C_q = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{b + 1.6} \right] \left[1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h + z_c} \right)^2 \right]$$

donde B es el ancho del canal y b es el ancho del vertedero de medida, z_c es la altura desde el fondo del canal y la cresta del vertedero. Muchos manuales de hidráulica proporcionan ecuaciones para este coeficiente y se recomienda que sea de sección transversal constante, con las paredes del canal de aproximación lisas, en una longitud no inferior a $20h$. Estos medidores de caudal previo a su uso deben ser adecuadamente calibrados, en el campo, sin embargo, las condiciones de trabajo no suelen ser las óptimas, por lo que se recomienda calibrarlos en un laboratorio, previo a la salida de campo.

Vertedero de medida triangular

Siguiendo un procedimiento matemático similar seguido al del vertedero rectangular se puede obtener la ecuación para el cálculo del caudal a través de un vertedero triangular, en el cual el ángulo central puede ser de cualquier valor, pero es recomendable que éste sea de 90° , por lo que la ecuación para el cálculo es

$$Q = C_q \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h^{3/2} = C_q \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h^2 \sqrt{2gh}$$

donde el coeficiente de caudal toma un valor de 0.593 ($\alpha=90^\circ$, y $\operatorname{tg}(\alpha/2)=1$), ecuación que es aplicable para valores de la carga sobre el vertedero de entre 5 y 25 cm. y para caudales no superiores a 6 l/s, lo cual no le hace muy práctico para trabajos de campo, pero son bastante usados en laboratorios.

Para el caso en el cual el coeficiente de caudal C_q sea igual a C (constante para cada vertedero), la expresión del caudal sobre el vertedero rectangular con o sin restricciones será

$$Q = Ch^{3/2}$$

Y para el caso de un vertedero triangular será

$$Q = Ch^{5/2}.$$

Vertederos de medida de caudales de pared gruesa

Este tipo de vertederos de medida se construyen generalmente en presas y en canales de transporte de agua, como un mecanismo de control de caudales y de obtención de su valor. La lámina inferior circula completamente sobre la cresta ancha del vertedero, y por lo tanto la precisión de sus medidas es menor, por lo que es recomendable utilizar los vertederos de pared delgada.

Cálculo de la Velocidad utilizando el tubo de Pitot-Prandlt

Primero el francés Henri Pitot (1732), y luego el alemán Ludwig Prandlt, propusieron y modificaron, respectivamente, un elemento (tubo de Pitot) mediante el cual se mida la velocidad de flujo. Este aparato se fundamenta y constituye una aplicación de la ecuación de Bernoulli.

El tubo de Pitot posibilita la medición de la carga hidráulica total. En cambio, el tubo de Pitot-Prandlt o Pitot modificado (figura 11), combina en un solo instrumento un tubo Pitot y un tubo piezométrico, permitiendo obtener la presión dinámica, midiendo la diferencia

entre la carga hidráulica total (H_1) y la carga piezométrica (H_2), para luego deducir la velocidad del fluido mediante la ecuación:

$$V = \sqrt{2g(H_1 - H_2)}$$

donde, V es la velocidad en m/s, g es la constante de aceleración de la gravedad, y equivalente aproximadamente en Ecuador en 9.8 m/s^2 , H_1 es la carga hidráulica total en m, y H_2 es la carga piezométrica en m.

Este método es muy usado en laboratorios, pero presenta limitaciones en cauces con flujos que contengan sedimentos o impurezas, es decir, se aplica y se obtiene buenos resultados en cursos de agua relativamente limpios.

Medida de caudales utilizando el Canal Parshall

Ralph Parshall (1920) desarrolló una de las canaletas de flujo crítico más utilizadas para medir el caudal que circula por un cauce. Este canal se encuentra formado de las siguientes partes: Entrada con transición, sección convergente, garganta, y sección divergente (figura 12). Donde, W es el ancho de la garganta, A es la longitud de las paredes de la sección convergente, a es la ubicación del punto de medición Ha , B es la longitud de la sección convergente, C es el ancho de la salida, D es el ancho de la entrada de la sección convergente, E es la profundidad total del canal, T es la longitud de la garganta, G es la longitud de la sección divergente, H es la longitud de las paredes de la sección divergente, K es la diferencia de elevación entre la salida y la cresta, M es la longitud de la transición de entrada, N es la profundidad de la cubeta, P es el ancho de entrada de la transición, R es el radio de curvatura.

Las dimensiones de los elementos que conforman la estructura del canal Parshall se encuentran estandarizadas para varios anchos de garganta (Página 74, Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994).

La garganta es un estrechamiento del canal que induce la formación del calado crítico, tal como sucede en un vertedero, con la diferencia de que el canal Parshall no presenta

dificultades en la medición respecto a la presencia moderada de material de fondo o en suspensión, como si sucede en los vertederos, donde aguas arriba de la estructura se puede sedimentar material y variar el coeficiente de descarga.

Se obtiene una buena precisión en las mediciones, funcionando a descarga libre o moderadamente sumergida, los errores en el peor de los casos se encuentran alrededor de 65%.

Para el cálculo del caudal utilizando el aforador Parshall (método experimental) se estable una relación entre la elevación del agua y el gasto. Después de varios experimentos con diferentes dimensiones de los elementos de la estructura, se determinó que la ecuación para el cálculo del caudal es:

$$Q = CHa^n$$

donde, Q es el caudal en condiciones de descarga libre en l/s o m^3/s , Ha es el calado aguas arriba de la cresta en mm o m, C y n son valores específicos para cada tamaño del elemento aforador (Cuadro 3).

Para la construcción de un aforador Parshall se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- La velocidad de llegada a la entrada del canal debe ser mayor que 0.3 m/s, para que exista arrastre de sólidos y evitar crecimiento de vegetación en la estructura que pueda inducir mediciones erróneas.
- La estructura debe estar ubicada en un tramo recto, sin azolve en el fondo, sobre todo hacia aguas arriba, para que el flujo sea lo más uniforme posible.

Cuadro 3. Valores de C y n para varios anchos de garganta, y unidades de W , Ha y Q

ANCHO DE GARGANTA	VALORES DE C y n		Observación
W	C	n	
25.40	0.001352	1.55	W (mm), Ha (mm), Q en l/s,
50.80	0.002702		
76.20	0.003965		
152.40	0.006937	1.58	

228.60	0.013762	1.53		
0.3048	0.69	1.52		
0.4572	1.06	1.54		
0.6096	1.43	1.55		
0.9144	2.18	1.57		
1.2192	2.95	1.58		
1.5240	3.73	1.59		
1.8268	4.52	1.60	W (m), Ha (m), Q en m^3/s ,	
2.1396	5.31			
2.4384	6.11	1.61		
3.0480	7.48	1.60		
3.6560	8.86			
4.5720	10.96			
6.0960	14.45			
7.6200	17.94			
9.1440	21.44			
12.1920	28.43			
15.2400	35.41			

ANEXOS CAPITULO 2

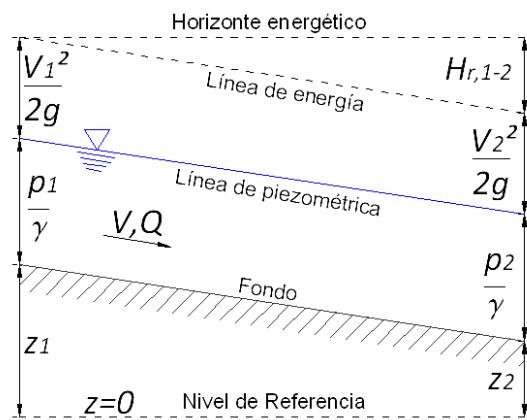


Figura 1. Ecuación de Bernoulli

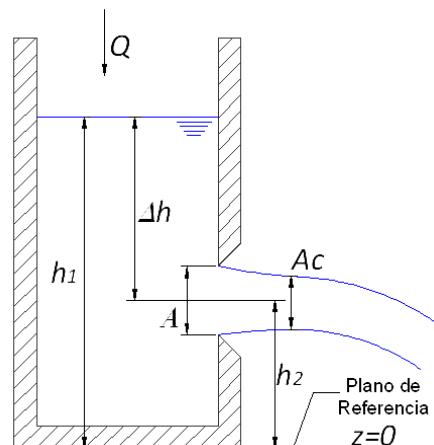


Figura 2. Orificio

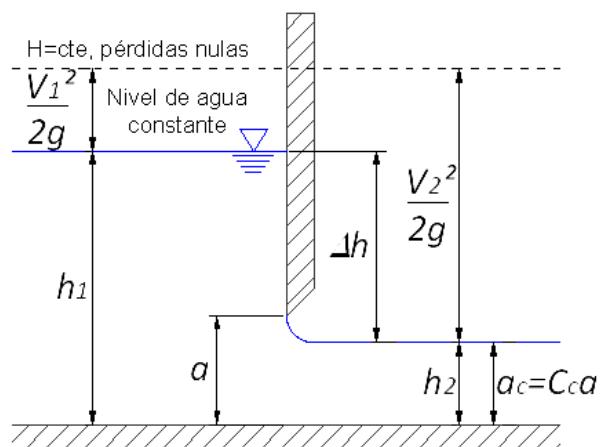


Figura 3. Compuerta de fondo

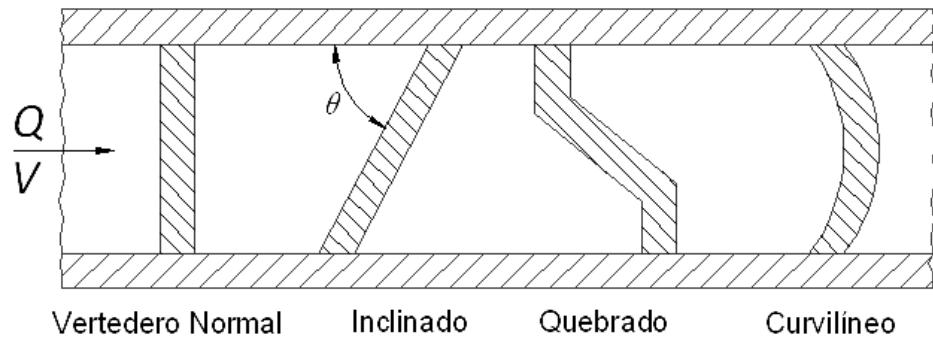


Figura 4. Vista en planta de vertederos perpendiculares u oblicuos a la corriente, quebrados o curvilíneos.

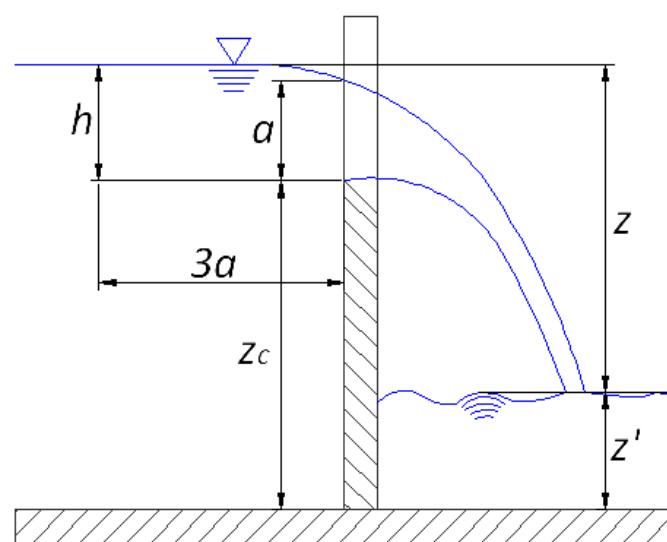


Figura 5. Vertedero de medida a superficie libre

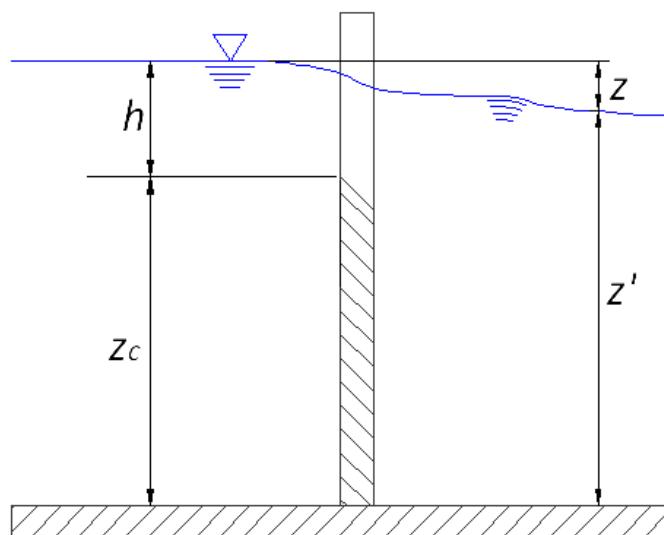


Figura 6. Vertedero sumergido

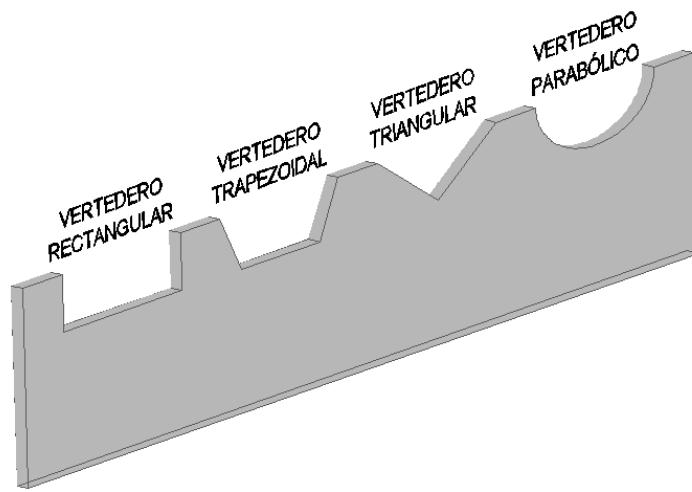


Figura 7. Diferentes formas de vertederos de medida

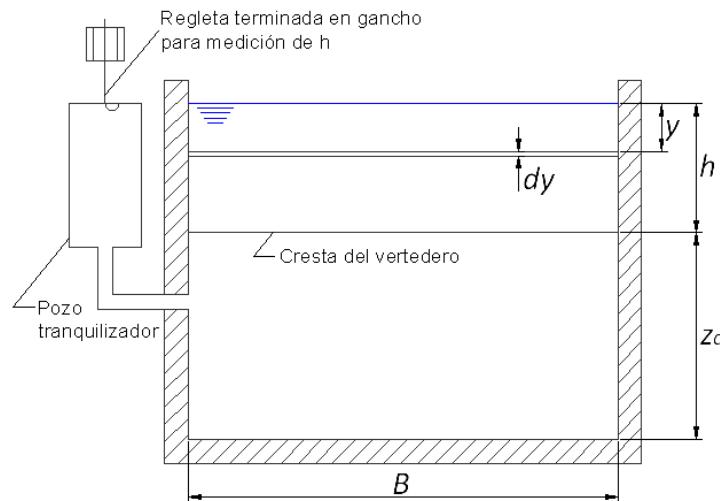


Figura 8. Característica de un vertedero de medida

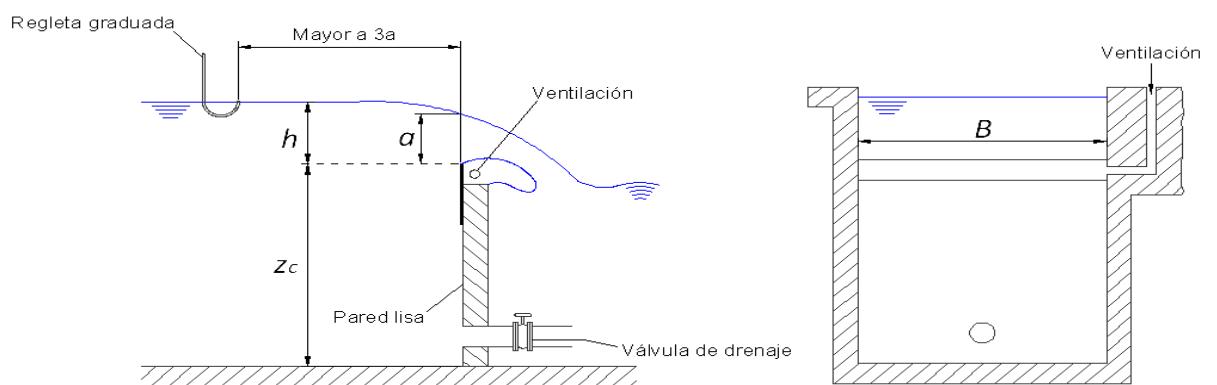


Figura 9. Sección longitudinal y transversal de un vertedero rectangular de medida

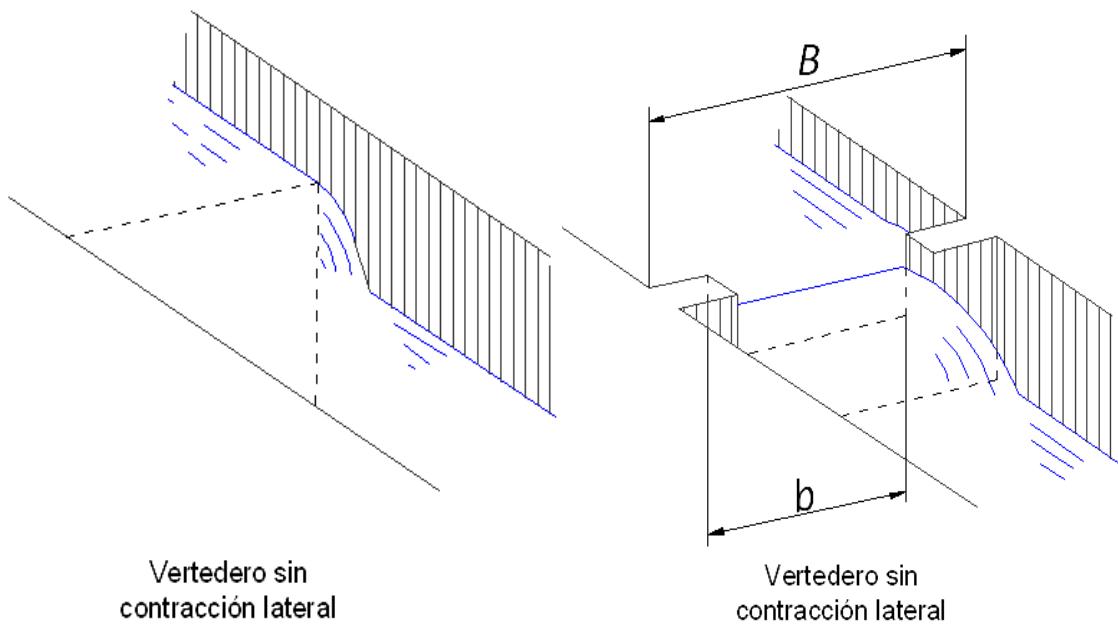


Figura 10. Diferentes formas de vertederos de medida

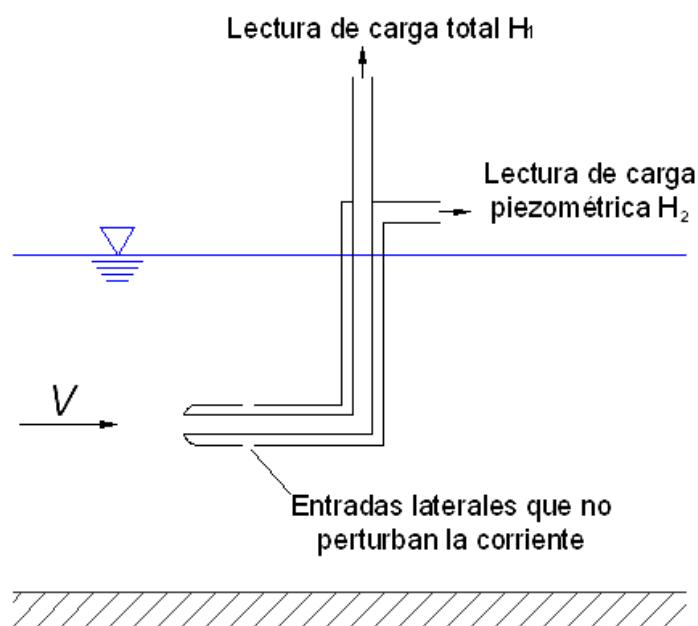


Figura 11. Tubo de Pitot – Prandlt

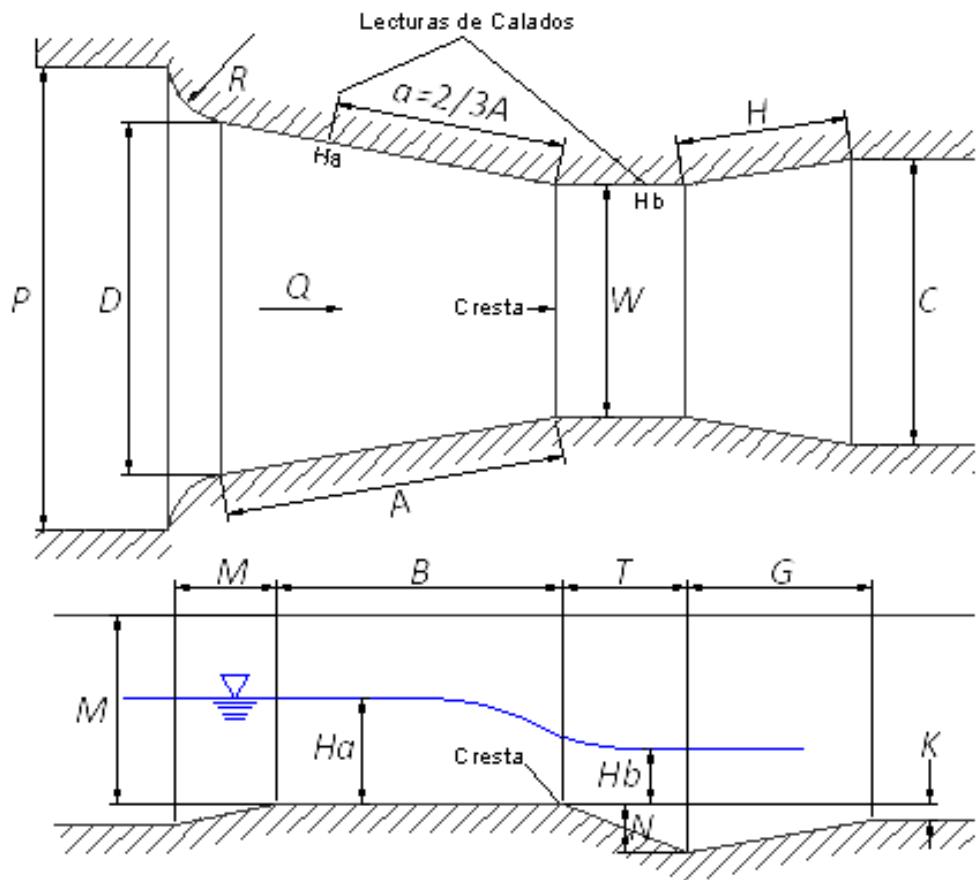


Figura 12. Vista en planta y perfil del Canal Parshall

CAPITULO 3

MÉTODOS DE CAMPO UTILIZADOS EN LA MEDICIÓN DE CAUDALES

En el desafío que involucra medir el caudal en cauces naturales es necesario considerar los siguientes aspectos:

- La forma de la sección transversal del canal natural a través del cual circula el agua, puesto que éstas son diferentes en cada sitio de medición,
- Si el material del cauce es inestable, por ejemplo de arena, la forma de la sección transversal al cauce varía a lo largo del tiempo,
- La velocidad puntual medida varía en distintos puntos de una misma sección transversal.

- La medición del caudal en ríos profundos requiere métodos diferentes a los utilizados en ríos de poca profundidad.

ESTACIONES Y SITIOS DE AFORO

Cuando se mide la precipitación o se estima la evapotranspiración, los instrumentos son normalmente instalados en un lugar específico por un largo tiempo, tomando el nombre de estación. Sin embargo en las mediciones de caudal los sitios de medición tienden a dividirse en 3 tipos, donde los dos primeros pueden denominarse como estaciones de aforo:

- Sitios donde se instalan los instrumentos de medida permanentemente,
- Sitios donde regularmente se efectúa la medición y se utiliza equipos portátiles, y no se instala ningún equipo en forma permanente, como en el caso de aforos realizados desde puentes,
- Sitios donde la medición se lleva a cabo utilizando equipos portátiles por alguna necesidad en especial, quizás solo en raras ocasiones.

SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN

Para escoger el método adecuado de medición de caudal para un sitio en particular, se requiere considerar los siguientes factores:

- Si el flujo es continuo o estacional / irregular,
- La profundidad y ancho del cauce en el sitio de medición propuesto,
- La forma y alineación del cauce inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del sitio de medición propuesto,
- La estabilidad del cauce, es decir, la capacidad de conservar la misma forma de la sección transversal a lo largo del tiempo,
- La caudal y velocidad promedio del flujo,
- La variación de niveles y caudales entre flujos de inundación y flujos pequeños,
- La probabilidad que durante una inundación el nivel de agua sobrepase los bordes del cauce y los daños que con ello puede causar a las estructuras de medición,

- La probabilidad de un amplio crecimiento de vegetación en los cauces, y
- La precisión y frecuencia que se requiere en las mediciones.

Los métodos de medición de niveles y caudales varían en complejidad. Los métodos simples incluyen la medición de nivel de agua utilizando escalas graduadas verticales, y la estimación de las velocidades del flujo utilizando flotadores.

Sin embargo, en las principales estaciones de aforo del cauce, existen instalaciones de aforo permanentes y debidamente equipadas. Los principales métodos para medir el caudal se describen brevemente a continuación:

- Método Área – Velocidad: En este método, las medidas de velocidad realizadas con un medidor de corriente son combinadas con los datos de la sección transversal del cauce. Cuando el flujo es demasiado rápido o demasiado lento, para usar un medidor de corriente, la velocidad puede ser medida registrando el tiempo que le toma a un cuerpo flotante viajar una distancia conocida a lo largo del cauce.
- Método Área – Pendiente: El caudal se deriva de las mediciones de la pendiente de la superficie libre del agua y de la sección transversal del cauce en un tramo suficientemente recto. Se utilizan coeficientes numéricos para cuantificar la rugosidad de la superficie del cauce. Este método es usado comúnmente para estimar los caudales de inundación, utilizando las marcas de los niveles de inundación anteriores, los cuales son indicadores de los niveles máximos de la superficie del agua en época de crecidas.
- Vertederos y Canales: Para conseguir una mayor exactitud en las mediciones, con respecto a las conseguidas en cauces naturales, se puede instalar estructuras exclusivamente diseñadas para la medida de caudal. Sin embargo, la necesidad de una mayor precisión, crea la necesidad de considerar los costos construcción, y la resistencia de la estructura durante las crecidas.

- Método ultrasónico, de dilución y electromagnético: Estos métodos son mucho más modernos, pero no comúnmente usados en nuestro medio. A continuación una breve descripción:
 - Ultrasónico: Mide la velocidad del flujo de agua por medio de la transmisión de pulsos ultrasónicos diagonalmente a lo largo del cauce en dos direcciones simultáneas. Las instalaciones permanentes involucran un mayor costo, y el método no resulta apropiado en sitios donde el agua contiene una alta cantidad de sedimentos.
 - Método de Dilución: Involucra la inyección de un volumen conocido de un líquido trazador en un punto del curso de aguas, y tomando una muestra en un punto aguas abajo se puede determinar la medida en que el líquido trazador ha sido diluido por el agua, y consecuentemente calcular el caudal.
 - Electromagnético: Este método mide el caudal en forma directa utilizando instalaciones eléctricas bajo el cauce para generar un campo magnético, luego utilizando el agua en movimiento para generar una fuerza electromotriz. Este método requiere una estructura fija muy cara, y es el más adecuado para cauces con régimen relativamente estable en los países con clima templado.

MEDICIÓN DEL CAUDAL UTILIZANDO EL MÉTODO ÁREA - VELOCIDAD

De los métodos mencionados anteriormente, éste es uno de los comúnmente utilizados. En términos generales, la cantidad de agua que fluye en un cauce durante un periodo de tiempo determinado puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de Agua} = \text{Velocidad de flujo} \times \text{Área de la sección transversal}$$

Sin embargo, en la práctica, los valores de velocidad y de la sección transversal del cauce para esta simple ecuación no siempre son fáciles de cuantificar.

Velocidad media de flujo

La ecuación de cálculo del caudal requiere la velocidad promedio de flujo. Sin embargo, el agua no fluye en los lados y fondo del cauce tan rápido como en la zona cercana al centro del flujo. La fricción entre el movimiento del agua y el lecho, producido por el crecimiento de la vegetación y la presencia de rocas en los lechos naturales, causa que el flujo cercano al contorno del cauce sea más lento, y teóricamente, la velocidad en el contorno es cero. Los medidores de caudales (molinetes) son los instrumentos más utilizados para cuantificar la distribución de la velocidad en la sección transversal y estimar la velocidad media. Un método alternativo pero a su vez menos preciso, está basado en la rapidez del movimiento de flotadores entre dos puntos fijos a lo largo del cauce.

Área de flujo de la sección transversal

Esta área se la calcula por mediciones directas (al mismo tiempo de la medición de la velocidad) del ancho de la superficie libre del agua, y la profundidad del lecho en distancias fijadas a lo ancho del cauce. Es posible establecer una relación entre el nivel de la superficie libre y el área de la sección transversal cuando la forma del canal en una estación de aforo se mantiene estable para un rango de caudales y durante un largo período de tiempo, relación que se conoce como curva de descarga.

En cambio, en cauces donde el fondo del lecho está compuesto por material inestable o sujeto a variaciones importantes debido al flujo mismo del agua, cada vez que se realice la medición de la velocidad, la forma del lecho será diferente y por ende su área.

Medidores de Caudales (Corriente)

Los instrumentos comúnmente usados para determinar la velocidad de la corriente son los medidores de hélice (molinetes), los cuales están formados por una pequeña hélice, la misma que es sumergida en el agua con una orientación hacia aguas arriba. El número de revoluciones de la hélice es transmitido eléctricamente por un cable a una unidad de registro ubicada fuera del agua.

También existen medidores de corriente electromagnéticos, cuyos diseños se basan en la generación de un campo electromagnético dentro del cuerpo del medidor, y usan el movimiento del agua para generar una fuerza electromotriz, la misma que está relacionada a la velocidad de flujo en el punto donde se encuentra ubicado el medidor. Aunque esta metodología para medir la velocidad resulta cara, tiene dos ventajas sobre el molinete:

- Pueden medir velocidades muy bajas, donde el molinete podría pararse debido a la fricción y no giraría,
- No tienen partes móviles, por lo que tienen menos riesgo de daño que los medidores hélice.

Ubicación del Molinete

En los sitios de aforo donde el río es poco profundo y la velocidad es pequeña, un miembro del equipo de campo se encuentra en el lecho del cauce en la posición del medidor de corriente. El medidor se encuentra colocado en una barra que permite su movimiento hacia arriba, hacia abajo y también se asegura en la barra adoptando una posición fija. Esta barra se encuentra marcada en unidades de longitud (similar a una regla), y dispone además de un pie de soporte en su base el cual se asienta sobre el lecho del canal. La profundidad del agua es medida en base a las marcas de calibración de la barra.

Donde el agua es poco profunda, es decir, donde una persona pueda estar parada de pie sobre el lecho, la velocidad del flujo puede estimarse a partir de una sola lectura, colocando la hélice a 0.6 del calado, medido desde la superficie del agua.

Para secciones más profundas, por ejemplo en la sección de un puente, se deben tomar lecturas a 0.2 y 0.8 del calado, medidos desde la superficie del agua.

Pasos para la Medición de la Velocidad del Flujo con Molinete

Cuando se toma una sola medida sobre la vertical, con la hélice ubicada a 0.6 del calado medido desde la superficie libre de agua, se realizan los siguientes pasos:

- a) Se fija firmemente en ambos extremos del cauce una cinta métrica que permitirá ubicar el molinete en las diferentes verticales donde se procederá a realizar las mediciones,
- b) La persona encargada de registrar los datos, debe preparar una hoja de registro y verificar el funcionamiento adecuado de la unidad donde se observará el número de revoluciones de la hélice,
- c) La persona que se encuentra en el cauce dictará a la persona que registra los datos, la abscisa en la cual se efectúa la medición,
- d) En base a la experiencia de los operadores se decide respecto al número de verticales en las que se efectuaran las mediciones,
- e) Las abscisas son anotadas en el formulario de registro de datos,
- f) La persona en el cauce, a continuación:
 - 1) Ubica el molinete en la posición de la primera vertical,
 - 2) Mide la profundidad del flujo (usando la barra de medición) y dicta a la persona encargada de registrar los datos,
 - 3) Coloca y sujetta el medidor en la posición correcta en la barra de medición, para determinar la velocidad a 0.6 de profundidad desde la superficie,
 - 4) Ajusta el pie de la barra con cuidado en el lecho del cauce para que la barra este vertical y la "nariz" de la hélice apunte directamente hacia aguas arriba,
 - 5) Ocupa una posición detrás del molinete con los pies y las piernas obstruyendo lo menos posible el paso del agua, y
 - 6) Le comunica a la persona que registra los datos que el medidor se encuentra colocado correctamente.
- g) Si la medición de la corriente se lleva a cabo en una estación de aforo, el nivel de la superficie debe ser leído y registrado en este momento.
- h) La persona que registra, a continuación:
 - 1) Comprueba que exista una señal constante de las revoluciones de la hélice en la unidad de registro,
 - 2) Establece el período de tiempo durante el cual la rotación de la hélice se contará (por ejemplo, un minuto),
 - 3) Inicia la unidad de registro para el conteo de las revoluciones,
 - 4) Espera hasta que culmine el período de tiempo pre-establecido y registra el total de revoluciones de la hélice.

La medición se efectúa de vertical en vertical hasta cubrir el ancho del cauce.

Estimación de la Velocidad de Flujo utilizando Flotadores

En sitios donde no puede llevarse a cabo la medición de la velocidad utilizando medidores de corriente (molinetas), se puede utilizar un método simple, basado en la estimación de la velocidad del flujo en el cauce del río por medio de flotadores. Se elige 2 puntos fijos a lo largo del cauce, en un tramo que describa una trayectoria en planta lo más recta posible, y se mide las secciones transversales en estos 2 puntos.

La distancia entre secciones debe permitir que el cuerpo flotante registre un tiempo de viaje de por lo menos unos 20 segundos, y que la distancia entre estas sea alrededor de 4 o 5 veces el ancho promedio del cauce. Sin embargo, esta distancia podría ser acortada en cauces pequeños, rápidos, y si el cauce no es lo suficientemente recto.

Es útil incluir un tercer punto de medición entre las otras dos secciones. Esto permitirá disponer de una comparación de la velocidad del flotador.

El valor de la velocidad promedio en la vertical se obtiene multiplicando la velocidad del flotador en la superficie del agua por un coeficiente (generalmente 0.85).

Se usan flotadores simples (botellas de plástico selladas o parcialmente llenas de agua, pedazos de madera) que son adecuados para una rápida medición, pero también pueden ser usados diseños de flotadores más elaborados, en los cuales una parte del flotador viaja bajo la superficie del agua, y con banderas coloridas en la parte superior para una mejor visibilidad.

Estimación de la Velocidad de Flujo utilizando la fórmula de Manning

Muchos sitios de aforo en los casos de asignación de agua para una concesión están ubicados en corrientes naturales, quebradas, ríos, sitios en los cuales es necesario obtener el caudal que circula. Como se indicó previamente, la aplicación del principio de conservación de masa permite determinar el caudal de circulación a través de una sección transversal dada, con la simple fórmula de caudal igual al área de la sección transversal

multiplicada por su velocidad media. Por lo tanto, un mecanismo para determinar la velocidad media de circulación a través de la sección transversal en corrientes naturales es la ampliamente conocida ecuación de Manning, basada en la determinación de su valor en función de la resistencia al flujo, y su variabilidad, que imprime las fronteras físicas al movimiento del agua.

Para flujo uniforme en canales abiertos, la ecuación de Manning, por sus resultados satisfactorios, es una de las más utilizadas. Esta ecuación para el cálculo de la velocidad ha sido ampliamente estudiada y verificada. Para unidades del Sistema Internacional (SI), la velocidad se expresa como:

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

donde, V es la velocidad media en m/s, R es el radio hidráulico en m, S es la pendiente del canal en m/m, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning en s/m^{1/3}.

En unidades inglesas, se expresa como:

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

donde, V es la velocidad media en pies/s, R es el radio hidráulico en pies, S es la pendiente del canal en pies/pies, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning en s/m^{1/3}.

Para las dos últimas ecuaciones el radio hidráulico (R) se calcula como la relación entre el área hidráulica de la sección transversal de flujo y su perímetro mojado (P) (contorno mojado del canal):

$$R = \frac{A}{P}$$

Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning (n)

El valor del coeficiente de rugosidad de Manning depende de varios factores pero principalmente de: la rugosidad del contorno del canal; la cantidad de vegetación; la irregularidad del cauce; en menor medida, la socavación o sedimentación; y la alineación del cauce.

- a) **Rugosidad:** Muchas veces se considera a la rugosidad de la superficie del cauce como el único factor para la elección del coeficiente de rugosidad n de Manning, sin embargo, éste solo es uno de los varios factores primordiales. La rugosidad se encuentra representada por el tamaño de los granos del material que conforma el lecho y las paredes del canal. En general, el coeficiente de Manning varía de la siguiente manera (Cuadro 4):

Cuadro 4. Variación del Coeficiente de Manning respecto a los granos y al calado

GRANOS	TIPO	n	DESCENSO O AUMENTO DEL CALADO
Finos	Arena, Arcilla o Limos	Bajo	No varía el n
Gruesos	Gravas o cantos rodados	Alto	Incremento del n

- b) **Vegetación:** La presencia de vegetación puede reducir notablemente el área de la sección transversal (y por lo tanto su capacidad de transporte), además que retrasa el flujo. La medida en que afecta al “ n ”, depende de la densidad, la distribución y el tipo de vegetación. En los años de 1925 y 1926, la Universidad de Illinois realizó varias investigaciones respecto a la influencia de la vegetación en el coeficiente de rugosidad n , de lo cual, se concluyó (Cuadro 5):

Cuadro 5. Influencia de la vegetación en el Coeficiente de Manning

VALOR n DE MANNING	CONDICIÓN
0.040 (Mínimo)	Limpieza anual de la vegetación
0.050	Limpieza del canal cada 2 años
> 0.100	Sin limpieza

De acuerdo a estudios realizados por el U.S Soil Conservation Service (1949), en canales de poca profundidad y con presencia de vegetación, se determinó que:

- A menor calado de agua en el cauce el “*n*” es mayor.
 - Un canal de sección triangular tiene un “*n*” mayor que un canal trapezoidal.
 - Un canal ancho tiene un “*n*” menor que un canal estrecho.
 - En canales con pendiente alta los valores de *n* son bajos.
- c) Irregularidad: Se refiere a las variaciones abruptas en tamaño y forma de la sección transversal a lo largo del cauce, esto es, cambios de sección transversal, ensanchamientos o contracciones, fosas o montículos en el lecho, cambio de las líneas de corriente de una margen a otra. Estos cambios incrementan el “*n*” en aproximadamente 0.005.
- d) Alineamiento: Se refiere a la alineación en planta del cauce, un cauce relativamente recto tiene “*n*” bajos, un cauce natural con presencia de meandros (sinuosidad) involucra incremento en el valor de “*n*” hasta en un 30%.
- e) Sedimentación y socavación: En general, la sedimentación puede disminuir el valor de “*n*” y la socavación, aumentarlo. El efecto de la socavación es intrascendente, cuando el lecho se erosiona uniformemente (gravas o arena).
- f) Existen otros factores con menor relevancia como: obstrucciones, tamaño del canal, caudal, cambio estacional, sedimentos en suspensión.

Selección u obtención del coeficiente de rugosidad de Manning (*n*)

La mayor dificultad que se presenta al aplicar la ecuación de Manning, radica en la definición de su coeficiente de rugosidad (*n*), es decir, valorar la resistencia al flujo en un cauce, pero no existe una metodología única ni exacta y depende mucho del criterio personal para su obtención.

Para determinar un coeficiente de Manning lo más aproximado posible, se debe evaluar cómo influye cada uno de los factores descritos anteriormente. Woody Cowan (1956), en conocimiento de estos factores, desarrolló un procedimiento para estimar su valor, utilizando la siguiente fórmula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

donde, n_0 es un valor básico para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados, n_1 corrige el efecto de la rugosidad superficial, n_2 considera las variaciones de forma y tamaño de la sección transversal del cauce, n_3 considera posibles obstrucciones, n_4 considera la vegetación y condiciones de flujo, y m_5 corrección por presencia de meandros.

Los valores para cada uno de los coeficientes se pueden determinarse por medio del Cuadro 6.

El método se aplica a cauces de pequeños a medianos, debido a que los estudios en los que se fundamenta el método, no se realizaron mediciones en cauces grandes (Radio hidráulico > 4.5 m).

Cuadro 6. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning

CONDICIONES DE CAUCE		CARACTERISTICAS	VALORES	
Material	Tierra	---	n_0	0.020
	Corte en roca	---		0.025
	Grava fina	---		0.024
	Grava gruesa	---		0.028
Irregularidad	Suave	---	n_1	0.000
	Menor	Canal artificial bien dragado, canal de drenaje con taludes ligeramente erosionados		0.005
	Moderado	Canal mal dragado, canal de drenaje con taludes medianamente erosionados		0.010
	Severo	Cauxes con derrumbes y taludes muy erosionados		0.020
Variaciones de sección transversal	Gradual	---	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante	---		0.005

	Frecuentemente alternante	---		0.010-0.015
Efecto de obstrucciones	Insignificante	Se considera la obstrucción del área mojada por: depósitos de basura, palos, raíces, cantos rodados, troncos caídos u atascados.	n ₃	0.000
	Menor			0.010-0.015
	Apreciable			0.020-0.030
	Severo			0.040-0.060
Vegetación	Baja	Pastos o malezas flexibles, matas de algodón, donde el calado es de 2 a 4 la altura de la vegetación	n ₄	0.005-0.010
	Media	Césped, pastos con tallo, matorrales moderadamente densos, donde el calado es de 2 a 3 la altura de la vegetación		0.010-0.025
	Alta	Prados de Césped, sauces o plantas de algodón de 8 a 10 años de edad, matorrales de 1 año de edad, donde el calado promedio es la igual a la altura de la vegetación		0.025-0.050
	Muy alta	Pastos, donde el calado promedio es menor a la mitad de altura de la vegetación		0.050-0.100
Efecto de Meandros	Menor	Relación entre la longitud con meandros y la longitud recta del tramo: 1 a 1.2	m ₅	1.000
	Apreciable	Relación entre la longitud con meandros y la longitud recta del tramo: 1.2 a 1.5		1.150
	Severo	Relación entre la longitud con meandros y la longitud recta del tramo: > 1.5		1.300

CAPITULO 4

MANUAL DE AFORO PARA LAS CONCESIONES PARTICIPATIVAS

Introducción

La importancia de la toma de información de caudales de las concesiones otorgadas a los usuarios del agua, hace que previo al trabajo de campo se realicen actividades que tienen que ver con la determinación de la ubicación geográfica de las mismas, la cual se toma de la base de datos que proporcionó la SENAGUA; así como la preparación de los mecanismos e instrumentos más idóneos para determinar con una precisión adecuada los caudales, en vista que previa a la visita no se conocen las condiciones de los sitios de aforo, por lo que previamente no se puede escoger el método a ser usado.

Las condiciones de campo del sitio particular de aforo, determinará el mejor método de aforo, puesto que es solo en ese momento que el encargado del aforo decidirá el método más apropiado, en función del tipo de obra, de su estado de mantenimiento, y de su accesibilidad. De la experiencia de campo hasta el momento, se ha visto que los métodos más usados son el aforo con micro molinete, el aforo volumétrico, y el aforo mediante el uso de flotadores, elementos que han sido discutidos y presentados en este estudio.

Vale la pena indicar que si bien la ingeniería hidráulica es muy prolífica en presentar muchos métodos de aforo, tanto para canales abiertos, como para sistemas cerrados, tipo tubería, no todos son apropiados para el trabajo de campo, por las complejidades y delicadeza de la instrumentación, así como la dificultad de su manipuleo para llevarlo al campo, por lo que los métodos indicados en el párrafo anterior, son los más adecuados.

Trabajos previos a la salida de campo

1. Ubicación de la concesión: previo a la salida de campo, y a fin de optimizar las mismas, se identifica la zona de trabajo, tomando el padrón actual de concesiones que se visitarán, e identificando las coordenadas que corresponden al sistema PSAD56 del sitio de concesión, las cuales en el sistema diseñado por NEWVI

transforman al sistema WGS84 que corresponden a los obtenidos del GPS y las normas de trabajo bajo este DATUM y los datos son las coordenadas geográficas en coordenadas UTM, tomando como datos referenciales los puntos cartográficos que hayan sido levantados por las instituciones que en el pasado estaban encargadas del otorgamiento de usos y concesiones a nivel nacional, a saber, el INERHI, el CNRH, y al momento la SENAGUA.

Se parte de la cartografía impresa, con el objeto de ordenar y distribuir el trabajo de los equipos de campo, a fin de cubrir la zona de interés. Esta cartografía debe contener los puntos de las concesiones del padrón actual, ya que estos son las referencias de lo que se identificará en el campo. Será particularmente útil que cada punto sobre la carta topográfica tenga una leyenda impresa identificando el nombre del concesionario, puesto que es relativamente más fácil localizar una concesión ubicando primero al concesionario, puesto que en general las personas son más conocidas en el sector.

Para facilitar la ubicación de las concesiones es aconsejable que la cartografía de campo tenga datos adicionales que pueden servir para identificar una concesión, como es el caso del tipo de cobertura vegetal, canales de riego, quebradas, carreteras, vías de acceso, etc.

Si bien una computadora personal es recomendable para un trabajo de campo más ágil, no es un instrumento indispensable para el trabajo de campo, en especial por lo delicado del transporte, y por las condiciones climáticas desventajosas que normalmente existe en el campo. Es un valioso instrumento, sin embargo, puesto que permite tener fácil acceso a la información digital, sea de la base de datos de usos y concesiones, como los mapas y cartografía digitales, y es un elemento de gran ayuda para el registro de reuniones de trabajo que eventualmente pueden darse en el campo, sin previa notificación a las partes interesadas en el aforo (personal de la SENAGUA, personal de la comunidad, usuarios del agua, etc.).

2. Preparación del método de aforo: tradicionalmente el método más usado por los operadores de la SENAGUA ha sido el del flotador, por cuanto es un método muy simple que requiere únicamente de un cronómetro que es fácil de transportarlo, y

más modernamente, cuando en los teléfonos celulares actuales es muy común que un cronómetro de alta precisión esté disponible e incorporado en él. A pesar que es un método muy práctico, no existen estudios que determinen la precisión y exactitud del mismo, sino que está basado en la aproximación de un flujo unidimensional, y en la medición del valor de la velocidad superficial. La máxima velocidad en general ocurre en el plano medio del canal a un 20% por debajo de la superficie libre. La velocidad media se estima como 0.85 de la velocidad superficial medida, valor que es multiplicado por el área de la sección transversal para obtener el caudal de circulación.

Sin embargo, los operadores deben estar preparados para usar el método del micro molinete, el cual se efectúa a profundidades de agua que tratan de simular la distribución real de la velocidad, asumiendo que el flujo es uno unidimensional. Dadas las circunstancias del aforo, puede ser necesario tomar una sola medida del micro molinete a 0.6 de la profundidad, que da el valor de la velocidad media en el canal.

3. Previa a la salida, los participantes deben recoger todos los instrumentos y materiales necesarios:
 - a) COMPUTADOR PORTATIL (útil pero no indispensable),
 - b) PADRON DE CONCESIONES DE LA SENAGUA, con datos referenciales del INERHI, CNRH o SENAGUA.
 - c) GPS: configurados para el sistema de referencia de la SENAGUA (WS84), los cuales puede tener cámara fotográfica integrada, para documentar la ubicación del sitio. Debe probarse previo a la salida, las condiciones de carga eléctrica existen en el instrumento, así como estar seguros de las recomendaciones de los fabricantes, para cuestiones particulares



GPS

- d) CARTAS TOPOGRAFICAS DE LA ZONA DE TRABAJO
- e) CRONOMETRO, o teléfono celular
- f) FLOTADORES
- g) CINTA METRICA
- h) FLEXOMETRO
- i) MICRO MOLINETE CON JUEGO DE BARRAS



Micro molinete con juego de barras y GPS

- j) HERRAMIENTAS PARA OPERAR EL MICRO MOLINETE
- k) BALDES DE DIFERENTES VOLUMENES (6, 10, y 20 litros).
- l) PEDAZOS DE TUBERIA DE POLIVINILCLORURO (4 y 6 pulgadas).
- m) MACHETE
- n) CABOS para fijar las secciones transversales,

- o) CINTA TIPO TAIPE: para identificar las secciones de aforo.
- p) PALA
- q) Ropa apropiada para condiciones duras de trabajo, como guantes, poncho de agua, botas pantaneras, pantalones con botas.

Para ciertas circunstancias especiales de trabajo, donde debe primar la seguridad del personal que realiza el trabajo de campo, se debe llevar cabos y arneses de seguridad, para facilitar el ascenso y descenso de sitios de difícil acceso, donde es muchas veces necesario realizar los aforos, o reconocimiento de sitios de concesión.

Trabajos durante el trabajo de campo y realización del aforo

En la práctica, la forma más exacta de medir el caudal, siempre y cuando se tomen los cuidados respectivos, constituye la utilización del molinete o micro-molinete, el mismo que se encuentra dentro de los métodos área – velocidad. Sin embargo, no se puede señalar para todos los casos de aforo a un método en particular como el más adecuado, ya que la aplicabilidad de una u otra metodología dependen principalmente de las características morfológicas del cauce, las mismas que varían de un lugar a otro.

Los métodos más factibles de realizar en campo desde el punto de vista técnico y económico, y que de hecho se utilizan en la práctica son: el método área – velocidad (molinete, micro molinete, o flotador), y el método volumétrico. Considerando la parte técnica, es decir, con los cuales se obtienen resultados aceptables y cuya metodología no es compleja, siempre y cuando el personal tenga una debida formación y/o capacitación.

Considerando el aspecto económico, es decir, no involucran una inversión considerable, como si ocurriría si se realiza los aforos disponiendo estructuras hidráulicas fijas o métodos ultrasónicos, con los cuales tal vez se obtengan resultados más aproximados, pero que no justifican si su exactitud tiene una variación de 65% respecto a los valores de caudal con métodos prácticos de aforo (Ochoa, Leonel, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Métodos y Sistemas de Medición de Gasto).

A continuación se presenta una guía, en pasos secuenciales, que permitirán adoptar en cada caso el método más adecuado para obtener una correcta medición del caudal:

1. Se realiza un inspección visual del posible sitio de aforo para decidir que método es el más adecuado:

a. Si el curso de agua presenta un calado muy bajo, donde no existe una corriente de agua definida (cauce errante) y el caudal es relativamente pequeño, esto es, alrededor de 20 lt/s, se aplica el método volumétrico, ya que resulta muy peligroso introducir el micro-molinete, o el flotador muy difícilmente tiene un recorrido rectilíneo con relación a la dirección de flujo.



Cauce errante

b. Si el curso de agua tiene un calado que permite introducir el micro-molinete o molinete, el cauce presenta algún tramo recto con una dirección definida de la corriente de agua, y se pueda ingresar con equipos al sitio de aforo, es decir, donde la accesibilidad no es dificultosa y se pueda garantizar la seguridad del personal, se aplica el método área - velocidad, específicamente mediante la utilización de molinete o micro-molinete como instrumentos de medición de velocidad.



Cauce recto

- c. Si el curso de agua tiene un calado que permite introducir el micro-molinete o molinete, el cauce presenta algún tramo recto con una dirección definida de la corriente de agua, pero no se puede ingresar con equipos al sitio de aforo, ya sea porque la accesibilidad es difícil o donde no se pueda garantizar la seguridad del personal porque la corriente de agua es muy fuerte, se aplica el método área - velocidad, específicamente mediante la utilización de flotadores como elementos de medición de velocidad.



Sitio de aforo de difícil acceso

- 2. Se realizan las mediciones necesarias, donde, el procedimiento varía dependiendo del método de aforo escogido:

2.1 MÉTODO VOLUMÉTRICO:

Este método se basa en la siguiente ecuación para el caudal:

$$Q = \text{Volumen} / \text{Tiempo}$$

Herramientas:

- Baldes de diferente volumen (máximo 20 litros).
- Tramo de tubería de polivinilcloruro (PVC).
- Cronómetro.
- Machete.
- Pala.

Como ya se mencionó anteriormente, en general, este método es conveniente en cauces pequeños, de poca profundidad de agua, cauces errantes, donde el calado de agua no permite introducir el molinete o micro-molinete. Se considera 5 mediciones, como el número mínimo de mediciones para éste aforo.

Metodología:

- a. Con la pala y el machete, se procede a tallar la sección de aforo, hasta dirigir las aguas hacia un solo cauce principal, colocar el tramo de tubería PVC, y provocar un solo chorro.



Adecuación del sitio para aforo volumétrico

- b. Se quita con la pala cualquier obstáculo que impida ubicar el balde debajo del chorro o que evite receptar la totalidad del agua en el recipiente.

- c. Se extrae material de las márgenes del cauce, como tierra y chambas, para formar un dique provisional que impida el paso del agua alrededor de la tubería. Luego, se compacta el material que conforma el dique, teniendo cuidado de no destruir la tubería.
- d. Se procede a la toma de medidas, donde una persona utilizando un balde de 20 litros, recepta el agua que sale de la tubería, y otra persona por medio de un cronómetro, toma el tiempo de llenado del recipiente. Este paso se realiza 5 veces.
- e. Para validar el aforo, se verifica la tendencia del tiempo que demora en llenarse el recipiente, y si las variaciones entre tiempos no es significativa, se toma como tiempo de llenado al promedio de los tiempos medidos.
- f. Finalmente, se retira la tubería, se destruye el pequeño dique y se recogen los materiales e instrumentos utilizados para el aforo.

2.2 MÉTODO ÁREA – VELOCIDAD CON MICRO - MOLINETE O MOLINETE:

Este método se basa en la ecuación de continuidad: $Q = V \times A$.

Herramientas:

- Micro – Molinete o Molinete.
- Machete.
- Pala.
- Flexómetro.
- Cronómetro.

Como ya se mencionó anteriormente, en general, este método es conveniente en cauces donde el calado de agua permite introducir el molinete o micro-molinete. Dependiendo de la magnitud del calado se realizan 6, 5, 4, 3, 2 o 1 mediciones en cada vertical.

Metodología:

- a. Se realiza la limpieza de la vegetación de las márgenes con la utilización de pala y machete, hasta que se observe que las líneas de corriente se encuentren lo más rectas posibles.
- b. Armado del molinete:
 - Se acopla la barra graduada,
 - Se coloca la hélice en la barra graduada,
 - Se fija la dirección de la hélice colocando un tope que la sujetá con su eje.
 - Utilizando un cable eléctrico se conecta el contador a la hélice, y para evitar que la corriente del flujo cause una eventual desconexión, se fija con cinta adhesiva al molinete y a la barra graduada.
- c. Utilizando el pie del molinete, se limpia la vegetación del fondo del lecho, para evitar posibles obstrucciones con el giro de la hélice y consecuentes errores en el número de revoluciones.
- d. Recurriendo al machete como poste, se tensa una cuerda cuya longitud debe ser mayor al ancho del cauce de la sección de aforo, y utilizando el flexómetro se abscisa con cinta adhesiva las verticales donde se va a realizar las mediciones.



Abscisado

- e. Se sujet la cuerda a una vara plantada al otro lado del cauce, teniendo cuidado que la alineación de la cuerda quede lo mas perpendicular posible a la corriente.



Alineación de la sección de aforo

- f. Se empieza con el llenado de datos en la hoja de registro ingresando las características del molinete que se va a utilizar, fecha y hora de inicio del aforo.
- g. Se inicia las mediciones en las verticales, empezando desde la margen izquierda hacia la margen derecha, procurando que la hélice se encuentre en la misma dirección del flujo, para ello, se utiliza como referencia un tornillo ubicado por arriba del agua, que apunta en la misma dirección de la hélice.
- h. Generalmente, de las verticales establecidas para las mediciones, en la primera y la última, se mide en un solo punto, debido a su proximidad a las márgenes, el contador no registra giro de la hélice, pero superficialmente se puede observar que existe circulación del agua, por esta razón en la hoja de registro se anota CV (con velocidad - 2 Rev. en 30 s).
- i. Si es posible, en las verticales intermedias se considera seis puntos, esto es, medición del número de revoluciones a: 0.10h (fondo), 0.2h, 0.4h, 0.6h, 0.8h, y 0,9 h (superficie).
- j. Ya propiamente en la medición de la velocidad, primero, se verifica si sobre el lecho se encuentra asentada la punta de la barra graduada (presencia de roca), o

el pie de la misma (lecho de arena). Si en una vertical, la barra se asienta sobre roca, se suma 4 cm a todas las distancias medidas con la barra graduada. En cambio, si se asienta sobre arena o material blando, las profundidades reales son las indicadas por la barra graduada.

- k. Se mide la profundidad del agua en la vertical (h). Luego utilizando el cronómetro (cada 30 segundos) y el molinete, para las secciones intermedias, se ajusta la altura de la hélice y se mide el número de revoluciones en los 6 puntos de la vertical.
- l. Si se presenta dificultades en el giro de la hélice debido a la acumulación de sedimentos (hierro) entre la hélice y su eje horizontal, e incluso en la barra graduada, se procede a desarmar y limpiar los instrumentos, para conseguir que el molinete funcione normalmente y se completa el registro de mediciones.
- m. Finalmente, se procede a desarmar el molinete, se desmonta la sección, se seca los instrumentos y se guardar el equipo.

Trabajos de gabinete después del levantamiento de campo

Una vez levantada toda la información de campo, es necesario documentar adecuadamente el sistema de información y la base de datos que ha sido diseñada y preparada por NewVi, tanto en el registro real de las concesiones levantadas en ese día, como en los datos de control de las coordenadas, concesionario, ubicación de la concesión, método de aforo utilizado en función de las condiciones de acceso al sitio, y del sitio mismo en el cual se justifique mediante un registro fotográfico, las condiciones imperantes al momento de la visita.

Se debe, por lo tanto, una vez terminado el trabajo de campo, validar y revisar los datos obtenidos, para lo cual se debe realizar reuniones de trabajo con los miembros de los grupos de inventarios. En la reunión de debe:

- a) Verificar que los datos de las coordenadas levantadas en campo se encuentren dentro de la circunscripción geográfica visitada, es decir en cuanto al sector y a la parroquia identificadas en el padrón de la SENAGUA,

- b) Verificar que los datos sobre los concesionarios sean los que constan en el padrón, caso contrario hay que contactar, personalmente o vía teléfono, a los usuarios para recabar dicha información, o averiguar a los vecinos del lugar,
- c) Verificar que los caudales obtenidos se encuentren correctamente calculados, en función del método empleado.

CONCLUSIONES

- 1) Una adecuada y justa administración y gestión del agua se inicia por una valoración de las fuentes de agua, tanto para otorgar una concesión de uso de agua, como para controlar que los caudales concesionados sean los que realmente deben ser usados.
- 2) El proyecto busca sentar las bases de métodos hidráulicos que permitan valorar adecuadamente los caudales que circulan en ríos, quebradas, obras de toma, y en general de cualquier tipo de obra o fuente de agua.
- 3) El proyecto busca involucrar en la adquisición de los caudales a ser usados por los concesionarios, a los usuarios mismos, a fin de crear una conciencia social sobre el valor del agua, no solo para sus usos, sino para los consagrados en la Constitución.
- 4) Los métodos de cálculo de los caudales se dividen en tres grupos, tomando como base el principio en el cual se fundamentan, y son, aforos directos, métodos área velocidad, métodos que usan contracciones.
- 5) Los métodos usados en los aforos participativos como el volumétrico, flotador y molinete, se enmarcan en el grupo de los métodos más prácticos, y más usados en los trabajos de campo.
- 6) Los errores que se cometen durante los aforos se pueden catalogar como sistemáticos, aleatorios, y accidentales.
- 7) Existe una variedad muy grande de técnicas hidráulicas para medir un caudal, y todos se basan en el principio de conservación de masa o de continuidad, el cual al ser descrito a lo largo de una línea de corriente, se transforma en la Ecuación de Bernoulli, tanto para flujos ideales, como para flujos reales.

- 8) Los mecanismos más usados en la práctica ingenieril y de laboratorio son las medidas de caudales a través de orificios (Torricelli); medidores de presión y velocidad (Tubo de Prandtl), la medida de caudales mediante Tubo de Venturi, medida de caudales usando toberas, diafragmas, el sifón, métodos de Eyector, vertederos de cresta delgada y ancha, compuertas, flotadores, uso de (micro) molinetes, tanques para medidas volumétricas.
- 9) No todos estos métodos son factibles de ser usados en trabajos de campo, por los inconvenientes de instalación, movilidad de los equipos, costos excesivos de los equipos, falta de formación de los operadores, etc.
- 10) Indudablemente los métodos de aforo y obtención de caudales más usados en la práctica de campo del inventario de concesiones son los del micro molinete y el de flotadores.

BIBLIOGRAFÍA

- Black, Peter E. 1991. Watershed Hydrology. Prentice Hall.
- Chanson, Hubert, 2002. Hidráulica del flujo en canales abiertos. McGraw-Hill.
- Chaudhry, M. Hanif, 1993. Open-Channel Flow. Prentice Hall, Inc.
- Chow, Ven Te, 1994. Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill.
- Clemens Albert, Bos Marius, Replogle John, 1986. Aforadores de caudal para Canales Abiertos.
- Gunston, Henry, 1998. Field Hydrology in Tropical Countries. A practical introduction. IT Publications.
- Lamb, Horace Sir, 1945. Hydrodynamics. Dover Publications.
- Liggett, James A.,1976. Fluid Mechanics. MacGraw-Hill, Inc.
- Linsley, Jr., Ray K., Kholer, Max A. , y Paulhus, Joseph L. H., 1977. Hidrología para Ingenieros. MacGraw-Hill Inc.
- Maidment, David R., 1993.Handbook of Hydrology. MacGraw-Hill, Inc.
- Manning, John C., 1997. Applied Principles of Hydrology. Prentice Hall Inc.
- Mataix, Claudio, 1970. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas.
- Ochoa, Leonel, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Métodos y Sistemas de Medición de Gasto.
- Organización Meteorológica Mundial, 1994, Quinta Edición. Guía de Prácticas Hidrológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones.
- Pedroza, Edmundo, 2001. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Serie Autodidáctica de Medición – Canal Parshall.
- Servicio de Conservación de Suelos, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, 1972. Medición del Agua de Riego. Editorial Diana, México.
- Singh, Vijay P., 1992. Elementary Hydrology. Prentice Hall, Inc.
- White, Frank M., 1979. Fluid Mechanics. MacGraw-Hill Book Company.

ANEXO 1

INFORME DE VISITA DE CAMPO – MÉTODOS DE AFOROS

Realizado por: Ing. Jorge Toapaxi Álvarez

Revisado por: Ing. Remigio Galárraga, M.Sc., Ph.D.

Fecha de la visita: 17 de febrero del 2012

Lugar: Amaguaña

INTRODUCCION

El día viernes 17 de febrero del año 2012 a las 8 am, se inició el viaje en compañía del Ing. Ramiro Monge, al sector de Amaguaña para la demostración de los principales métodos de aforo utilizados en el inventario participativo de concesiones de agua.

Los métodos más utilizados para los aforos son:

- Método Área – Velocidad: Obtención de la velocidad por medio de molinete.
- Volumétrico.
- Método Área – Velocidad: Obtención de la velocidad por medio de flotadores.

En la visita se realizó los 2 primeros métodos de aforo. A continuación, su descripción, consideraciones para su elección, aspectos relevantes observados y metodología utilizada.

MÉTODO ÁREA – VELOCIDAD (MOLINETE)

Este método se basa en la ecuación de continuidad: $Q = V \times A$.

Herramientas

- Molinete marca SEBA, con 2 hélices.
- Machete.
- Pala.
- Flexómetro.

- Cronómetro.

Este método es conveniente en cauces donde el calado de agua permite introducir el molinete o micro-molinete y dependiendo de la magnitud del calado se realizan 6, 5, 4, 3, 2 o 1 mediciones en cada vertical. En el presente aforo se realizó 6 mediciones por vertical.

Aspectos importantes a considerar

- La sección de aforo debe ubicarse en un tramo relativamente recto, tanto aguas arriba, como aguas abajo. En el aforo realizado, se tomó los datos en una sección donde aproximadamente se encontraba a 10 m aguas arriba la toma (Foto 1), y a 20 metros aguas abajo una curva. Además, se aprovechó un pequeño puente para facilitar la toma de mediciones.
- La alineación de la sección de aforo debe estar lo más perpendicular posible a la corriente. En la ubicación del abscisado para la medición realizada, se consideró este particular.
- La vegetación o basura debe ser limpiada tanto en las márgenes como en el fondo del cauce, tanto en la sección de aforo, como en sus proximidades, para que éstas obstrucciones no perturben el giro de la hélice del molinete y consecuentemente la medición. Previo al aforo, se realizó la limpieza completa del cauce, utilizando distintas herramientas como: machete, pala (en las márgenes) e incluso el pie de la base de la barra eje donde se mueve verticalmente el molinete (en el lecho).
- El número de abscisas que determinan las verticales en las que se realizará la medición, dependen del ancho del cauce. Para el aforo, para el cauce con un ancho de aproximadamente 2.50 m, el abscisado transversal se lo señaló cada 30 cm, obteniéndose 8 secciones verticales.
- La elección de la hélice depende de las condiciones del flujo, que tienen que ver con la velocidad de la corriente y la pendiente del cauce.
- Si la velocidad del flujo es rápida, con pendiente importante del cauce, es recomendable utilizar una hélice con diámetro grande y corta, para obtener un número razonable de revoluciones en 30 segundos.

- En cambio, si la velocidad del flujo es lenta, con poca pendiente del cauce, es recomendable utilizar una hélice con diámetro pequeño y largo. En el aforo ejecutado, se utilizó una hélice con estas características, con 6 cm de diámetro.
- Es importante considerar el material donde se asienta la barra eje (2 metros), arena o roca. Si es arena, es decir, si el pie de la barra se asienta en el lecho, las mediciones de los calados corresponden a las indicadas por la barra graduada. En cambio, sin ser roca, es decir, la punta de la barra topa con el lecho (roca), en las mediciones de los calados se debe sumar 4 cm a los valores indicados por la barra graduada.
- Se debe tener principal atención con la calibración del molinete, es recomendable realizar un chequeo periódico, debido a que el desgaste principalmente de la hélice modifica la ecuación original para el cálculo de la velocidad en función del número de revoluciones. El Ing. Monge indicó que los instrumentos han sido calibrados previamente en el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Escuela Politécnica Nacional y que aproximadamente cada año se realiza la calibración, además, indicó que para caudales pequeños alquilan el micro-molinete del Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN.
- Se debe tener en cuenta la forma en que el sedimento que transporta el agua afecta a la medición. El sedimento se acumula entre el cuerpo de la hélice y su eje horizontal, provocando su atasco. También, se pueden acumular metales como el hierro, debido al magnetismo que genera el molinete durante su funcionamiento.
- Es preciso tener presente que el contador de revoluciones se puede parar no solo porque la hélice dejó de girar por atasco por presencia de sedimentos, sino por otros motivos tales como:
 - La hélice dejó de girar por interferencia con la vegetación, u alguna otra obstrucción inmediatamente aguas arriba de la medición.
 - Cuando el contador se queda sin batería.
 - Cuando falla la conexión entre el contador y la hélice.
 - Por corrientes que pueden interferir en el giro de la hélice.

Metodología utilizada

El proceso inicio a las 09:45 am y finalizó a las 11:45 am, duró aproximadamente 2 horas, e incluyó los siguientes pasos:

1. Elección de la sección de aforo en un tramo relativamente recto, tanto hacia aguas arriba, como hacia aguas abajo, e inmediatamente aguas abajo de un puente, el mismo que se utiliza como plataforma para la toma de datos (Foto 2).
2. Limpieza de la vegetación de las márgenes con la utilización de pala y machete (Foto 3), hasta que se observe que las líneas de corriente se encuentren lo menos erráticas posibles (Foto 4).
3. Armado del molinete:
 - Se acopla la barra graduada de 2 metros de longitud (Foto 5).
 - Se coloca la hélice en la barra graduada (Foto 6),
 - Se fija la dirección de la hélice colocando un tope que la sujetá con su eje (Foto 7).
 - Utilizando un cable eléctrico se conecta el contador a la hélice (Foto 8), y para evitar que la corriente del flujo cause una eventual desconexión, se fija con cinta adhesiva al molinete y a la barra graduada (Foto 9).
4. Utilizando el pie del molinete, se limpia la vegetación del fondo del lecho, para evitar posibles obstrucciones con el giro de la hélice y consecuentes errores en el número de revoluciones (Foto 10).
5. Recurriendo al machete como poste, se tensa una cuerda cuya longitud debe ser mayor al ancho del cauce de la sección de aforo, y utilizando el flexómetro se abscisa (señala) cada 30 cm con cinta adhesiva las verticales donde se va a realizar las mediciones (Foto 11).
6. Se sujetá la cuerda a una vara plantada al otro lado del cauce, teniendo cuidado que la alineación de la cuerda quede lo mas perpendicular posible a la corriente (Foto 12).

7. Se empieza con el llenado de datos en la hoja de registro ingresando las características del molinete que se lleva a utilizar, fecha y hora de inicio del aforo (Foto 13).
8. Se inicia las mediciones en las verticales, empezando desde la margen izquierda hacia la margen derecha, procurando que la hélice se encuentre en la misma dirección del flujo (Foto 14), para ello, se utiliza como referencia un tornillo ubicado por arriba del agua, que apunta en la misma dirección de la hélice (Foto 15).
9. De las 8 verticales establecidas para las mediciones, en la primera y la última, se mide en un solo punto, debido a su proximidad a las márgenes, el contador no registra giro de la hélice (Foto 16), pero superficialmente se puede observar que existe circulación del agua, por esta razón en la hoja de registro se anota CV (con velocidad - 2 Rev. en 30 s).
10. En las 6 verticales intermedias se considera seis puntos, esto es, medición del número de revoluciones a: 0.10h (fondo), 0.2h, 0.4h, 0.6h, 0.8h, y 0,9 h (superficie) (Foto 17).
11. Primero, se verifica si sobre el lecho se encuentra asentada la punta de la barra graduada (presencia de roca), o el pie de la misma (lecho de arena). Si en una vertical, la barra se asienta sobre roca, se suma 4 cm a todas las distancias medidas con la barra graduada. En cambio, si se asienta sobre arena o material blando, las profundidades reales son las indicadas por la barra graduada (Foto 18).
12. Se mide la profundidad del agua en la vertical (h). Luego utilizando el cronómetro (cada 30 segundos) (Foto 19) y el molinete, para las 6 secciones intermedias, se ajusta la altura de la hélice y se mide el número de revoluciones en los 6 puntos de la vertical (Foto 20).
13. En la abscisa 1.20 m (vertical 5), se presentó dificultades en el giro de la hélice debido a la acumulación de sedimentos (hierro) entre la hélice y su eje horizontal (Foto 21), e incluso en la barra graduada, por este motivo se procedió a desarmar y limpiar los instrumentos (Foto 22), luego de este proceso el molinete funcionó normalmente y se completó el registro de mediciones (Tabla 1).
14. Finalmente, se procedió a desarmar el molinete, desmontar la sección (Foto 23), secar los instrumentos y guardar el equipo.

MÉTODO VOLUMÉTRICO

Este método se basa en la siguiente ecuación:

$$Q = \text{Volumen} / \text{Tiempo}.$$

Herramientas

- Baldes de diferente volumen (10 litros).
- Tramo de tubería de polivinilcloruro (PVC).
- Cronómetro.
- Machete.
- Pala.

Este método es conveniente en cauces pequeños, de poca profundidad de agua, cauces errantes, donde el calado de agua no permite introducir el molinete o micro-molinete. Se considera 3 mediciones, como el número mínimo de mediciones para un aforo, recomendable 5. En el aforo se realizó 5 mediciones.

Aspectos importantes a considerar

- La sección de aforo debe ubicarse preferentemente en un salto, donde se pueda provocar o generar un chorro.
- En este método, el aspecto primordial es la conformación o preparación de la sección de aforo. Se debe conformar una sección que permita encauzar las aguas al tubo PVC, tapar la parte superior y lateral de la tubería con material del sitio, como chambas y tierra compactada, que permita impermeabilizar momentáneamente la sección y evitar infiltraciones hacia aguas abajo.
- Verificar en el transcurso de las mediciones, si existe una tendencia en el tiempo que se demora en llenar el balde. Si no existiere una tendencia en las mediciones, podría deberse a posibles infiltraciones o fugas de agua.
- Un adecuado tamaño del envase con el cual se debe realizar el aforo depende del caudal que fluye por la tubería PVC, para que el tiempo de llenado se encuentre entre los 5 a 10 segundos. Es conveniente verificar el volumen del envase o balde con el cual se realiza la medición. En el aforo realizado se utilizó un balde de 10 litros de capacidad.

- En conjunto, todas las mediciones se deben realizar lo más rápido posible, antes de que se derrumbe el dique provisional creado en la sección de aforo.

Metodología utilizada

El proceso dio inicio a las 12:00 am y finalizó a las 12:25 am, duró aproximadamente 25 minutos, e incluyó los siguientes pasos:

1. Verificar que el aforo volumétrico es el más adecuado, comprobando que el calado es muy pequeño o que el cauce es errante (diferentes trayectorias de la corriente) (Foto 24).
2. Selección del sitio adecuado para conformar la sección de aforo, preferentemente en un desnivel natural del cauce, donde ocurra un salto del agua (Foto 25).
3. Con la pala y el machete, se procede a tallar la sección de aforo (Foto 26 y 27), hasta dirigir las aguas hacia un solo cauce principal (Foto 28), colocar el tramo de tubería PVC (Foto 29), y provocar un solo chorro.
4. Se quita con la pala cualquier obstáculo que impida ubicar el balde debajo del chorro o que evite receptar la totalidad del agua en el recipiente (Foto 30).
5. Se extrae material de las márgenes del cauce, como tierra y chambas, para formar un dique provisional que impida el paso del agua alrededor de la tubería (Foto 31). Luego, se compacta el material que conforma el dique, teniendo cuidado de no destruir la tubería.
6. Se procede a la toma de medidas, donde una persona utilizando un balde de 10 litros, recepta el agua que sale de la tubería (Foto 32), y otra persona por medio de un cronómetro, toma el tiempo de llenado del recipiente (Foto 33). Este paso se realizó 5 veces, y se verificó una tendencia de alrededor de 6 segundos de tiempo que el recipiente de 10 litros demora en llenarse.
7. Finalmente, se retira la tubería, se destruye el pequeño dique y se recogen los materiales e instrumentos utilizados para el aforo.

ANEXO 1.1



Foto 1. Toma de agua



Foto 2. Sitio de aforo con molinete



Foto 3. Limpieza de las márgenes de la sección de aforo



Foto 4. Sección de aforo limpia



Foto 5. Acoplamiento de la barra graduada



Foto 6. Colocación de hélice en barra graduada



Foto 7. Colocación de tope en la hélice



Foto 8. Conexión de contador a hélice



Foto 9. Sujeción de alambre eléctrico con cinta adhesiva



Foto 10. Limpieza del fondo del cauce



Foto 11. Abscisado en cuerda



Foto 12. Colocación y alineación de la sección de aforo

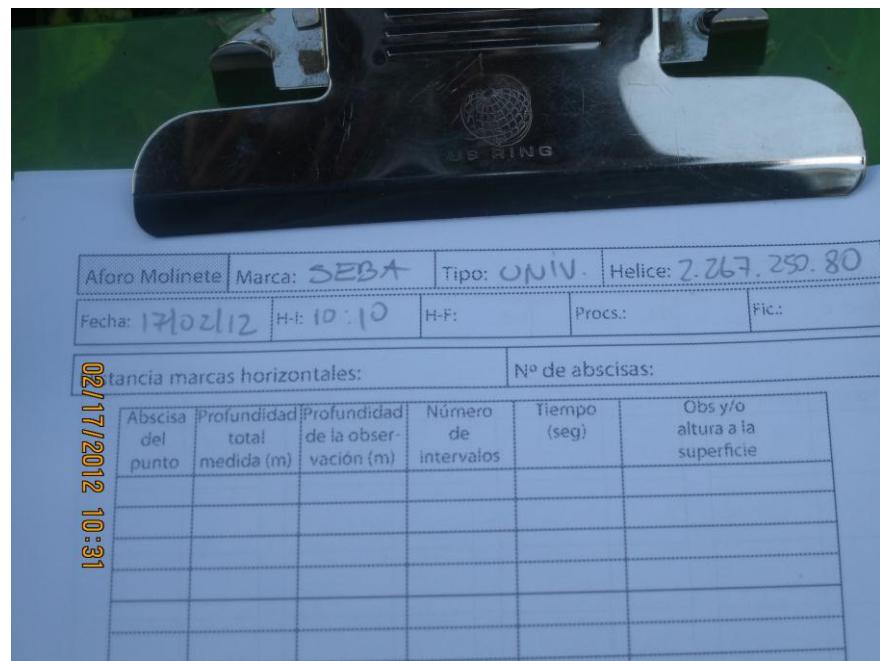


Foto 13. Ingreso de datos a la hoja de registro



Foto 14. Inicio de mediciones en verticales



Foto 15. Tornillo guía



Foto 16. Contador



Foto 17. Medición de velocidad inmediatamente bajo la superficie del agua

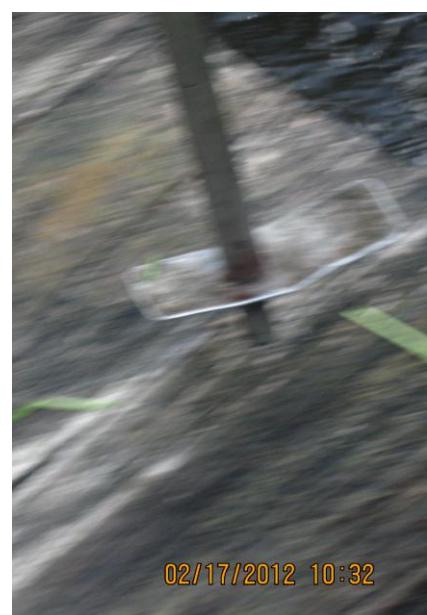


Foto 18. Pie y punta de la barra graduada



02/17/2012 11:16

Foto 19. Cronómetro



02/17/2012 11:09

Foto 20. Mediciones en las verticales intermedias



Foto 21. Acumulación de sedimentos en eje de hélice



Foto 22. Limpieza de hélice



Foto 23. Desmonte de sección de aforo



Foto 24. Cauce errante



Foto 25. Sitio de aforo volumétrico



Foto 26. Tallado de la sección con pala



Foto 27. Tallado de la sección con machete



Foto 28. Chorro



02/17/2012 12:15

Foto 29. Colocación de tubería



02/17/2012 12:12

Foto 30. Retiro de obstáculo para el balde



Foto 31. Formación de dique provisional con chambas y tierra



Foto 32. Toma de medidas con balde de 10 litros



Foto 33. Cronometraje del tiempo

Aforo Molinete	Marca: SEBA	Tipo: UNIV.	Helice: 2.267.250.80
Fecha: 12/02/12	H-H: 10:10	H-F: 11:30	Procs.: Fic.:

Distancia marcas horizontales:			Nº de abscisas:
(1)			

Abscisa del punto	Profundidad total medida (m)	Profundidad de la obser- vación (m)	Número de intervalos	Tiempo (seg)	Obs y/o altura a la superficie
0.00	0.60		CV		O. I.
0.30	0.70	0.06	CV	30	
		0.28	CV	"	
		0.42	ZR	"	
		0.56	53	"	
		0.64	61	"	
0.60	0.84	0.14	Z4	30	
		0.38	64	"	
		0.56	65	"	
		0.76	78	"	
		0.81	85	"	
0.90	0.92	0.12	49	30	
		0.22	60	"	
		0.41	66	35	R = 54
		0.59	64	"	
		0.73	77	"	
		0.86	85	"	
1.20	0.86	0.10	33	30	
		0.18	38	"	
		0.34	65	"	
		0.51	66	"	
		0.69	100	"	
		0.80	104		
1.80	0.82	0.10	31	30	
		0.21	45	"	
		0.43	96	"	
		0.53	94	"	
		0.66	101	"	
		0.76	91	"	
					R = 87

HOJA DESPRENDIBLE

Diseñado por: José A. Pérez

Aforo Molinete	Marca: SEBA	Tipo: UNIV	Helice: 2.267.250.80
Fecha: 12/02/12	H-H: 10:10	H-F: 11:30	Procs.: Fic.:
Distancia marcas horizontales:			Nº de abscisas:
(2)			

Abscisa del punto	Profundidad total medida (m)	Profundidad de la obser- vación (m)	Número de intervalos	Tiempo (seg)	Obs y/o altura a la superficie
1.80	0.78	0.10	5	30	
		0.18	4	"	
		0.31	71	"	
		0.47	88	"	
		0.62	98	"	R = 77
		0.72	79	"	
2.22	0.78		CV		O. D

Tabla 1. Registro de datos para el aforo con molinete

