

MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO EM RIOS E SUA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE ALERTA

David W. Velasco¹ & Michael J. Cook²

RESUMO – Sistemas de alerta operam para nos informar de eventos críticos, fazendo-os em tempo hábil e provendo-nos de dados de alta qualidade. Para que isso seja possível, é necessário uma infraestrutura capaz de coletar os parâmetros adequados, na frequência adequada, e com exatidão e precisão suficientes para que os dados possam ser transformados em informações úteis aos interessados. Este trabalho descreve como os dados de velocidade da água em uma seção de monitoramento hidrométrico contínuo podem ser utilizados como um previsor de condições futuras críticas de enchentes eminentes. O trabalho também discute o conceito de velocidade indexada como uma ferramenta importante em um sistema de alerta hidrológico, capaz de descrever melhor que somente a medição do nível d'água (cota) a complexidade das condições hidráulicas de uma seção em um rio, especialmente durante enchentes.

ABSTRACT – Warning systems operate to inform us of critical events, doing so in a timely manner and providing high quality data. For this to be possible it requires that an infrastructure capable collecting the appropriate parameters, in the right frequency, with sufficient accuracy and precision so the data can be transformed into useful information for the stakeholders. This work describes how water velocity data in hydrometric stations with continuous data collection can be used as a predictor of critical future conditions during eminent flood events. This work also discusses the concept of velocity index as an important tool in hydrological warning systems, capable of describing better than water level (stage) measurements alone, the complexity of the hydraulic conditions in a gauging station, especially during floods.

Palavras Chave: Sistemas de alerta, medição de velocidade, medidor acústico Doppler.

1) Gerente Regional (Brasil) da SonTek/YSI, 9940 Summers Ridge Road, San Diego, CA, EUA, 92121; E-mail: dvelasco@sontek.com
1) Engenheiro de Aplicações da SonTek/YSI, 9940 Summers Ridge Road, San Diego, CA, EUA, 92121; E-mail: mcook@sontek.com

1. Introdução

O objetivo principal de um sistema de alerta é disponibilizar informações em tempo hábil e de alta qualidade para a proteção de vidas, propriedades e do meio ambiente. De acordo com a ONG National Hydrologic Warning Council (<http://www.hydrologicwarning.org>), no conceito de um sistema de alerta hidrológico, estas prioridades se expandem em: identificar, discutir e promover práticas de alertas apropriadas para cada região; entender as capacidades e limitações das tecnologias disponíveis; identificar os avanços necessários e atender às necessidades dos usuários.

Como ilustra a figura 1 abaixo, os dados hidrométricos de campo são a base de um sistema de alerta hidrológico. Eles alimentam o sistema de previsão, que utiliza os valores para gerar estimativas futuras para um certo valor. Por exemplo, o nível d'água crescente relatado de um linígrafo é usado para prever o quão alto as águas de uma enchente chegarão após um determinado tempo (algumas horas até alguns dias no futuro). A partir de previsões subsequentemente confirmadas e/ou ajustadas por séries históricas de dados de campo é possível a criação de modelos nos quais se permitem previsões mais abrangentes na gama temporal e geográfica, permitindo a geração de alertas com qualidade e grande abrangência.



Figura 1. Esquemático dos componentes de um sistema de alerta.

Vários fatores são necessários para a geração de um alerta significativo em um sistema de alerta. Como mostra a figura 1, o nível mais básico é o dado de campo, seguido de previsão e modelos. Sendo assim, erros ou imprecisões existentes nos dados coletados em campo, ou a ausência de dados de parâmetros adequados, se propagam através de todo o sistema. Isso pode facilmente criar imprecisões potencialmente graves nas informações utilizadas para um alerta. Considerando-se isso, é importante obter dados de campo com o maior nível de exatidão e precisão

possível, e também certificar-se que os parâmetros medidos são os corretos/adequados para o tipo de alerta desejado.

2. Medição de Vazão e a Curva-Chave Cota-Vazão

Para que um sistema de alerta seja eficaz, é necessário ir além de medições instantâneas de um certo parâmetro (*e.g.* vazão, cota, etc.), mas sim obter uma série histórica de longo prazo para a construção de sistemas de previsão e modelagem que gerarão alertas eficazes.

Dados de vazão são imprescindíveis para alertas significativos em um sistema de alerta hidrológico. Sem o conhecimento do volume de água em uma seção fluvial é difícil obter um alerta hidrológico oportuno e significativo para as áreas de risco uma vez que o nível d'água (cota) não é necessariamente a causa principal de falhas em aterros marginais (naturais ou antropogênicos), mas sim a vazão e a velocidade. Entretanto, medição de vazão é um processo que demanda um investimento significativo de tempo e recursos financeiros. Por isso, é comum que a vazão seja determinada através de dados substitutos que sejam mais fáceis de obter e que sirvam como representantes da vazão.

O dado substituto mais comum para vazão é a cota de uma seção. Porém, a medição de cota não está livre de muitos dos quesitos também necessários para uma medição de vazão, como a necessidade em muitos casos de controles físicos (*e.g.* calhas, vertedouros, etc.), manutenção e limpeza da seção, instalação de equipamentos para a medição da cota, seção de réguas, manutenção freqüente do sensor de nível (especialmente sendo ele por pressão, pois freqüentemente fica obstruído por sedimentos), etc. Em alguns casos simplesmente não é possível ser feita a medição da cota, por exemplo, onde a margem é instável e/ou de difícil acesso, ou a estação é muito remota. Em resumo, o trabalho de obter dados de vazão e cota contínua com exatidão e precisão é significativo.

Em praticamente todos os países que ativamente operam estações fluviométricas com série histórica de vazão, o método mais comum para obter dados de vazão a fim de construir a série é a curva baseada na cota e vazão (comumente chamada de curva-chave). Tal curva descreve uma relação única entre a cota e a vazão, sendo a cota a variável dependente e a vazão a independente. Ela é desenvolvida através de várias medições diretas da cota e ao mesmo tempo da vazão instantânea. A figura 2 a seguir ilustra um exemplo de uma curva-chave cota-vazão para o rio Xingu em Altamira, Pará, publicado no Estudo de Impacto Ambiental do Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte (Leme Engenharia, 2009).

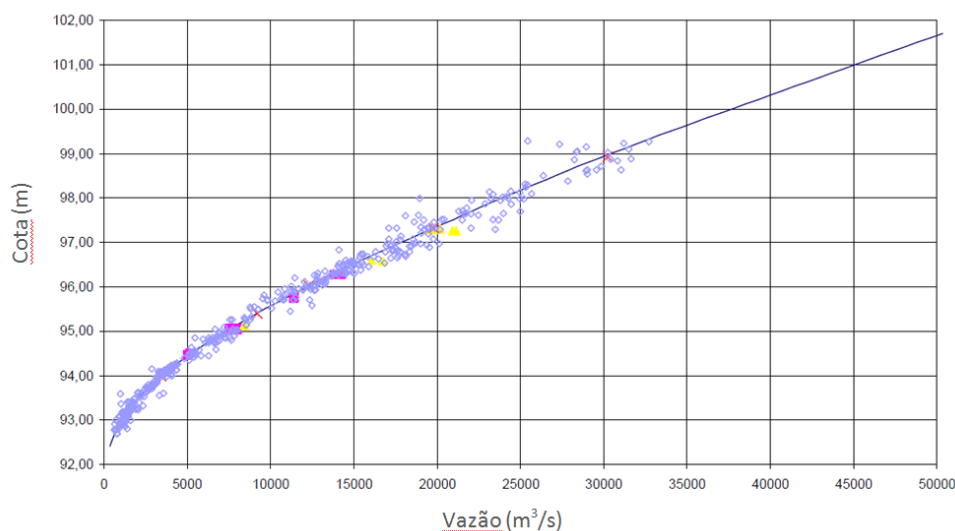


Figura 2. Exemplo de uma curva-chave cota-vazão. A linha indica a curva em si, a qual é traçada/calculada a partir das medições individuais de cota feitas simultaneamente com a vazão.

Este exemplo inclui medições feitas entre 1971 e 2002.

A curva-chave oferece resultados aceitáveis em condições normais de fluxo e é muito usada mundialmente. Entretanto, mesmo após uma extensa pesquisa acadêmica de mais 110 trabalhos individuais publicados entre 1853 e 2001, Schmidt (2002) concluiu que os fundamentos físicos do desenvolvimento da curva-chave ainda não foram completamente considerados. Outros concordam com esta conclusão (Muste *et al.* 2011). A causa maior do entendimento limitado nesta área é o fato de que a grande maioria das pesquisas tem como objetivo a aplicação do método e não o conhecimento básico da física governante. Como indica Schmidt (2002), as pesquisas tendem a explicar a relação empírica dentre os valores medidos ao invés da teoria que explica a relação entre os valores.

3. Problemas específicos com a curva-chave cota-vazão em sistemas de alertas

Além da falta de conhecimento pleno da teoria e da física governante da relação descrita por uma curva-chave, limitações práticas para seu uso também existem. Por exemplo, Morlock *et al.* (2002), Schmidt (2002) e Muste *et al.* (2011) mencionam várias presunções fundamentais em uma curva-chave que limitam a sua aplicabilidade:

1. A força principal que impulsiona o sistema é a gravidade
2. Fluxo bi-direcional e/ou remanso é inexistente ou desprezível
3. O perfil da seção, juntamente com seu coeficiente de fricção, é constante
4. A curva em si contém uma vasta gama de condições de cotas e vazões, distribuídas uniformemente de secas a enchentes

5. O efeito da propagação da onda da enchente é inexistente ou desprezível (a vazão é uma função unívoca da cota, sem efeito de histerese)

Da lista acima, os dois últimos itens são particularmente críticos para sistemas de alertas, uma vez que o entendimento precário da curva-chave com relação a estes diminui significativamente a qualidade dos dados usados para casos de enchentes.

Teoricamente, as medições de cota e vazão para o desenvolvimento da curva-chave devem ser realizadas em condições hidráulicas variáveis, variando de secas a enchentes. Entretanto, devido a fatores logísticos, financeiros, e de segurança, a maioria das curvas-chave em uso mundialmente são traçadas a partir de medições obtidas em sua grande maioria durante condições normais de cota e vazão. Conseqüentemente, uma relação de um-para-um entre a cota e a vazão é freqüentemente assumida como válida para toda a gama de vazão na seção. Muste *et al.* (2011) apresenta um exemplo típico de uma curva cota-vazão para o posto 05454500 na Cidade de Iowa, EUA, operada pelo United States Geological Survey (Serviço Geológico Americano, o qual opera mais de 8.000 estações fluviométricas nos EUA). Neste exemplo, 334 medições diretas de vazão instantâneas foram feitas neste posto entre setembro de 1984 e maio de 2011. Destas 334, 80% foram feitas durante vazões inferiores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, mesmo apesar de vazões de até $800 \text{ m}^3/\text{s}$ serem freqüentes no local, e a histórica (em 2008) superou $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$. Exemplos com tal porcentagem de dados são comuns em redes hidrometeorológicas mundiais. Como descreve Fenton e Keller (2001), esta situação é agravada, pois os dados coletados durante enchentes, os quais são necessários para desenvolvimento de curvas-chave precisas, são justamente aqueles com menor índice de precisão e confiabilidade. Brusa e Clarke (1999) também descrevem erros significativos nas estimativas de vazão máxima obtidas por uma curva-chave.

Em casos de enchentes, vários autores (e.g. Chow, 1959; Henderson, 1966; Fread, 1975; Fenton e Keller, 2001) já descreveram o fenômeno de histerese e a teoria governante. Em resumo, a passagem de uma enchente por uma seção altera a velocidade de certa forma que a frente crescente da enchente acelera o fluxo e a parte traseira decrescente desacelera o fluxo. O efeito da propagação da onda da enchente cria uma curva-chave “em laço” onde a vazão máxima e a cota máxima não seguem o mesmo ritmo (a inclinação da curva é diferente), sendo assim possível observar vazões significativamente diferentes na mesma cota em uma única enchente simplesmente dependendo de quando as medições são feitas (veja figura 3, a seguir).

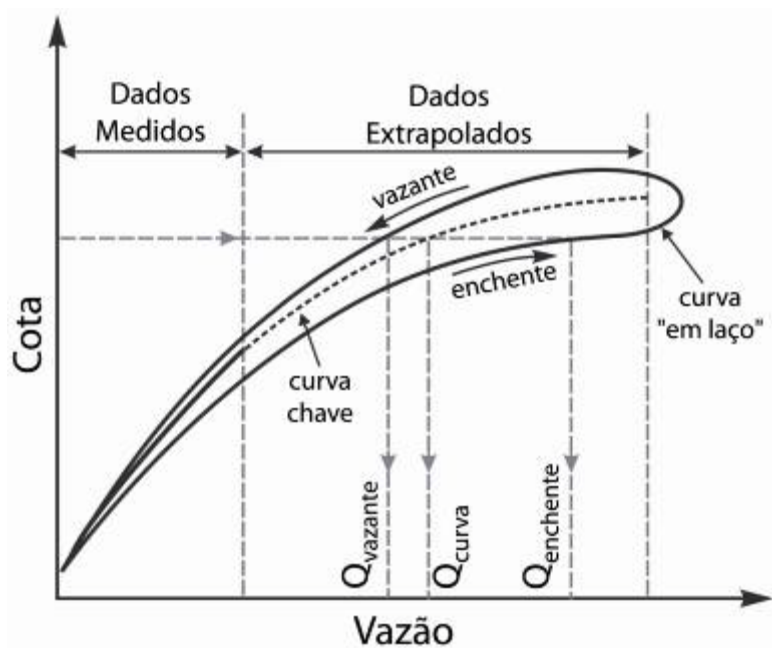


Figura 3. Exemplo conceitual de curva-chave cota-vazão “em laço”. Duas vazões distintas ($Q_{enchente}$ e $Q_{vazante}$) para a mesma cota podem existir dependendo de quando, durante o mesmo evento, as medições são feitas. Modificado de Muste *et al.* (2011).

4. Medição de Velocidade e Velocidade Indexada

Devido às limitantes mencionadas da curva-chave, e sendo a vazão determinada por este tipo de curva uma função unicamente da cota, é desejável em muitos casos expandir a relação para duas (ou mais) dimensões podendo assim criar um sistema mais capaz de prever condições futuras de vazão, incluindo condições complexas como enchentes. Um dos fatores usados neste processo é a velocidade da água (Chow, 1959; Rantz *et al.*, 1982a; Fujita *et al.*, 1998; Chen e Chiu, 2002; Cheng *et al.*, 2004).

Várias tecnologias são capazes de medir velocidade em fluidos: mecânica (molinete), ótica (laser, videometria), radiofrequência (radar) e acústica (sonar Doppler). Para canais abertos, a tecnologia mais eficaz e eficiente tende ser a acústica por efeito Doppler, devido à facilidade de uso e distância de propagação do som em fluidos (especialmente água) o que permite medir perfis de velocidade em grandes volumes, ao invés de só em alguns pontos. Adicionalmente, equipamentos acústicos podem ter sua montagem e configuração física manipulada e assim serem enquadrados em várias aplicações e dimensões fluviais. Vai além do escopo deste trabalho explicar os princípios de operação de um medidor acústico por efeito Doppler, sendo a literatura científica plena nesta área (e.g. Smith, 1969; Laenen e Smith, 1983; Laenen, 1985; Morlock, 1996; Mueller e Wagner (2009); SonTek, 2000; Simpson, 2002). É suficiente descrever aqui que a maioria opera transmitindo um

pulso acústico e medindo a alteração de frequência (efeito Doppler) do eco recebido em função da velocidade de fluido.

Atualmente, nas aplicações de vazão fluvial as duas configurações mais comuns de medidores de velocidade por método acústico Doppler são os perfiladores laterais e os perfiladores fundeados (figura 4). Os perfiladores laterais medem a velocidade da água em uma camada horizontal que se estende desde próximo à face do equipamento até a distância máxima de perfilagem do equipamento (ou até a obstrução mais próxima, como por exemplo, a margem oposta em aplicações fluviais). Já os perfiladores fundeados medem em uma faixa vertical que estende desde próximo do leito até a superfície. As ilustrações abaixo mostram um exemplo de cada uma destas configurações. Ambas as configurações também medem continuamente o nível d'água acima do aparelho.

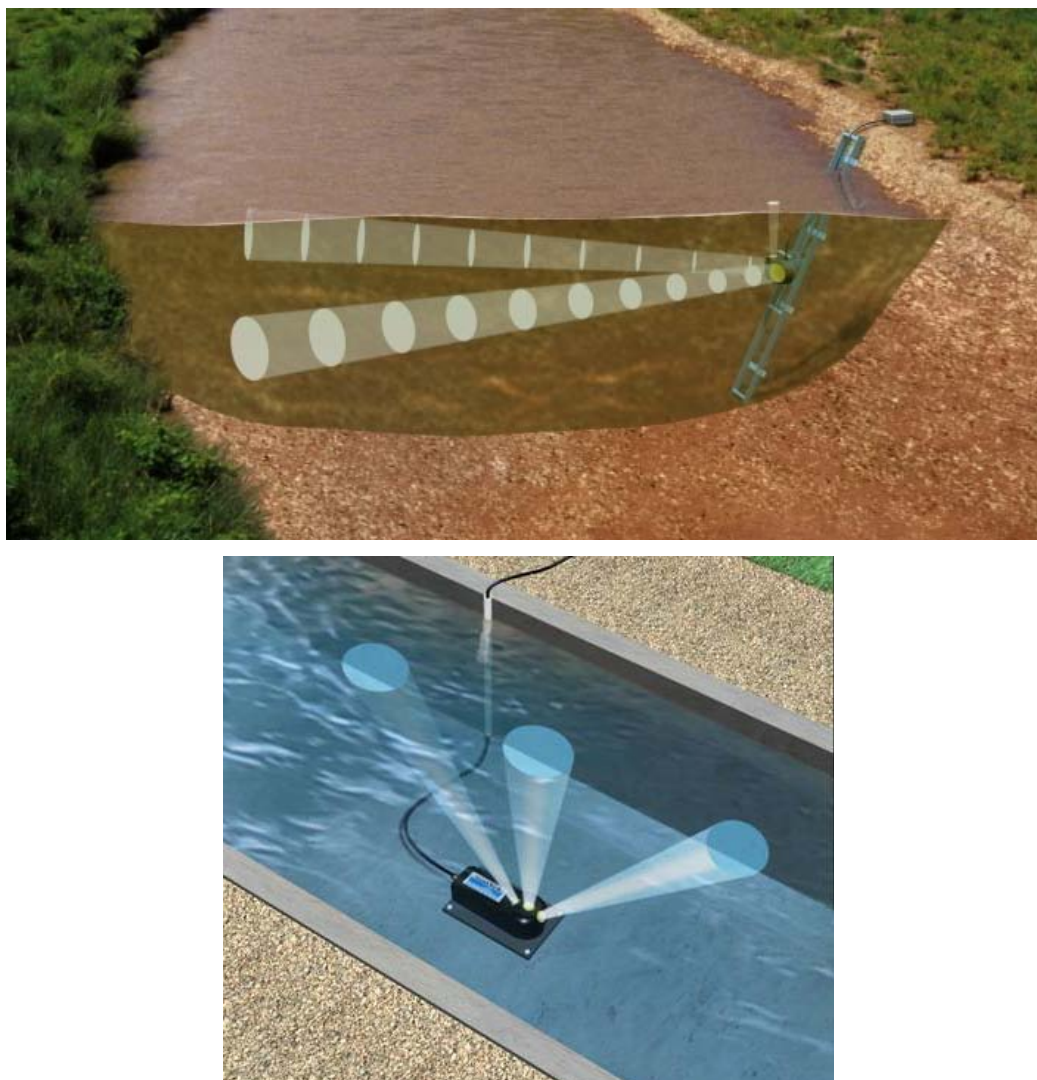


Figura 4. Ilustrações demonstrativas das duas configurações mais típicas de medidores acústicos de velocidade de escoamento para canais abertos (lateral, superior; fundeado, inferior). Os feixes inclinados (responsáveis pela medição da velocidade) e o vertical (responsável pela medição do nível) são inclusos nos desenhos.

A importância da velocidade em seções de monitoramento contínuo de vazão já era considerada desde a década de 1950 (Chow, 1959). Igualmente, desde a década de 1980 o conceito de “velocidade indexada” já era aplicado e dados de velocidade frequentemente considerados como melhores previsores de vazão futura (Rantz *et al.*, 1982a; Fujita *et al.*, 1998; Chen e Chiu, 2002; Cheng *et al.*, 2004). A noção de “velocidade indexada” refere-se àquela velocidade medida em um local fixo de uma seção, a qual é relacionada à velocidade média da seção, que por sua vez é obtida por medições instantâneas de vazão. Com a relação definida, é então possível obter-se a velocidade média da seção sem a necessidade de medições instantâneas da vazão, mas sim, somente com a velocidade indexada, a qual é medida continuamente na seção. Adicional à velocidade média, a área da seção é relacionada à cota (como tradicionalmente feito nas relações cota-vazão) e as duas variáveis—velocidade média e área—são combinadas para determinação da vazão final. De certa maneira então, o método de velocidade indexada é efetivamente uma combinação de duas curvas-chave: uma cota-área e outra velocidade-vazão.

Este método já foi descrito por vários pesquisadores, com alguns trabalhos descrevendo detalhadamente o processo de desenvolvimento das relações entre velocidade média e velocidade indexada (Rantz *et al.*, 1982b; Laenen, 1985; Laene and Curtis, 1989; Chiu e Said 1995; Sloat and Gain, 1995; Schmidt, 2002; Morlock, 2002; Hittle *et al.*, 2001; Simpson e Bland, 1999). Recentemente, o método vem aumentando em popularidade e uso (Church *et al.*, 1999; Haeni, 2000; Simpson e Bland, 2000; Muste *et al.*, 2007) devido a maior disponibilidade de equipamentos capazes de medir velocidade continuamente e que também sejam financeiramente acessíveis e robustos para uso em campo. Adicionalmente, já existem softwares comercialmente disponíveis que automatizam todo o trabalho de desenvolvimento das relações a partir de medições de cota, velocidade e vazão instantânea (SonTek, 2009). Armado com este maior conhecimento é possível então adicionar esta ferramenta a sistemas de alerta, usando dados de velocidade como previsores de condições futuras.

5. Estudos de Caso

Como mencionado, o objetivo principal de um sistema de alerta é disponibilizar informações para a proteção de vidas, propriedades e do meio ambiente, sendo que estas informações atendem a dois quesitos importantes: “em tempo hábil” e “de alta qualidade”. Dependendo da situação demográfica e geográfica da região afetada por uma enchente, bem como a condição hidrológica e atmosférica do evento, pode ser argumentado que um destes dois quesitos seja mais importante que o outro e vice-versa. Para o monitoramento contínuo e desenvolvimento de previsões e modelos

adequados, a alta qualidade dos dados é, em geral, de maior importância. Porém, em quase todas as situações de enchentes, e especialmente naquelas onde a rede hidrometeorológica tem abrangência geográfica limitada, a importância de disponibilizar alertas em tempo hábil normalmente supera a necessidade dos dados serem de alta qualidade.

Um exemplo recente disso foram as enchentes de 2010 nos estados brasileiros de Pernambuco e Alagoas provocadas pela forte chuva em junho daquele ano, e que deixaram 47 mortos e mais de 80 mil desabrigados. Vários relatos (e.g. Baptista, 2011) indicaram como a ação rápida de uma “rede de contatos” de padres da região alertou a população sobre a enchente, evitando assim um desastre ainda maior. Casos semelhantes são comuns durante desastres naturais, como enchentes, e mostram claramente como cada minuto em uma situação de emergência é importante – quanto mais cedo a população é avisada, melhor será a taxa de sobrevivência. Sendo assim, é importante o conhecimento dos parâmetros capazes de prever com a maior antecedência possível as condições futuras em casos extremos.

Como já descrito, a velocidade da água em uma seção fluvial é um parâmetro frequentemente considerado como o melhor previsor de condições futuras. Aqui apresentamos dados de enchentes em quatro rios nos Estados Unidos que ilustram isso. Os quatro postos estão localizados nos estados de Georgia (GA), Tennessee (TN), Texas (TX) e Indiana (IN), e abrangem condições variadas, desde um rio afetado por maré (Rio Neches, no Texas) até um rio de maior porte como o Cumberland no Tennessee. Os dados podem ser acessados na página do USGS (<http://water.usgs.gov>) através do código USGS identificado na Tabela 1 abaixo. Todos os quatro postos de monitoramento nestes rios fazem parte da rede hidrometeorológica do USGS e contém uma extensa série histórica (várias décadas) de vazão e cota medida a cada 15 minutos. Além disso, todos eles também fazem medição da velocidade de escoamento através de sensores acústicos Doppler na mesma frequência que a cota é medida. Um mapa localizador encontra-se na figura 5.

Tabela 1 – Postos fluviométricos apresentados

Código USGS	Identificador	Rio	Cidade	Estado
02338500	GA	Chattahoochee	Franklin	Georgia
034315005	TN	Cumberland	Nashville	Tennessee
08041780	TX	Neches	Beaumont	Texas
05524500	IN	Iroquois	Foresman	Indiana

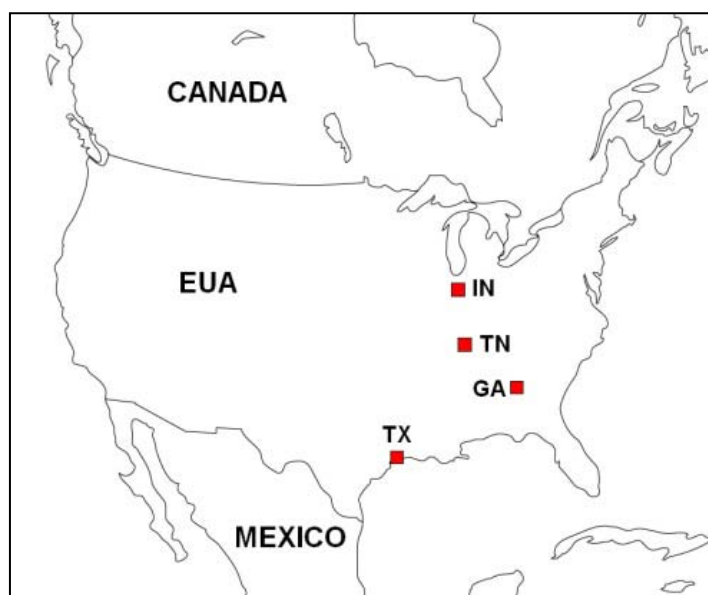


Figura 5. Mapa indicando localização dos quatro postos apresentados neste trabalho.

5.1. Posto GA (02338500)

O Posto GA (código USGS 02338500) está localizado em uma seção cuja vazão é controlada pela Represa Jim Woodruff desde janeiro de 1956 quando a mesma entrou em operação. O posto está localizado aproximadamente 47 km a montante da represa, e durante períodos de alta vazão é possível observar remanso no posto em função da represa. Um medidor contínuo de vazão e velocidade por efeito Doppler, modelo SL1500, está instalado em um dos suportes da ponte, como pode ser visto na figura 7. Esta seção do rio tem uma aproximação retilínea de mais de 1 km, seguido de uma curva à direita logo a jusante. A medição de nível é feita por um conjunto bóia-codificador instalado dentro da tubulação vertical visível na figura 7. A tabela 2 abaixo mostra os dados principais deste posto.

Tabela 2 – Resumo do Posto GA (02338500)

Identificador	Bacia (km ²)	Largura Média (m)	Cota Média (m)	Cota Máxima Histórica (m)	Vazão Máxima Histórica (m ³ /s)
GA	6.941	102	2,2	9,28 em 24/set/2009	2.172 em 24/set/2009



Figura 6. Mapa localizador do posto GA. Posto é indicado por triângulo vermelho. Seta indica direção do fluxo.



Figura 7. Foto do posto GA.

(fonte: Brian McCallum, USGS Georgia Water Science Center)

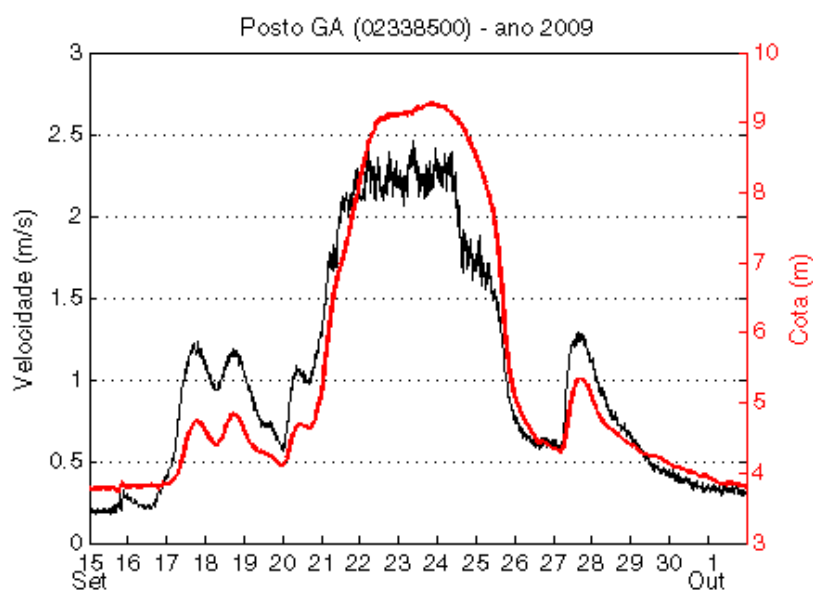


Figura 8. Dados de velocidade e cota, medidos a cada 15 minutos, no posto GA, em 2009.

Como ilustra a figura 8 para a enchente de 2009 no posto GA, os picos de cota e velocidade estão relativamente alinhados, porém os dados de velocidade claramente mostram a pulsação do rio durante a enchente de 2009, provavelmente devido ao efeito do remanso. Durante este período de aproximadamente quatro dias (quando foi observada a maior cota e vazão histórica desde posto) os dados da cota sugerem um fluxo estável, o que o sensor de velocidade revela não ser real. Ou seja, tendo somente os dados de cota, não seria possível entender a totalidade da condição hidráulica na seção.

5.2. Posto TN (034315005)

Os primeiros dados hidrométricos neste posto foram coletados em 1857. Atualmente é operado pelo USGS, em parceria com o município de Nashville, e contém uma série histórica publicada oficialmente desde 1992. A seção tem sua vazão controlada por uma série de sete reservatórios a montante do posto. Um medidor contínuo de vazão e velocidade por efeito Doppler, modelo SL1500, está instalado no suporte da primeira ponte visível na figura 10, próximo à margem esquerda do rio. O sensor de nível está instalado no mesmo lado, porém na segunda ponte. A tabela 3 abaixo mostra os dados principais deste posto.

Tabela 3 – Resumo do Posto TN (034315005)

Identificador	Bacia (km ²)	Largura Média (m)	Cota Média (m)	Cota Máxima Histórica (m)	Vazão Máxima Histórica (m ³ /s)
TN	33.307	140	6,4	17,13 em 01/jan/1927	5.748 em 01/jan/1927

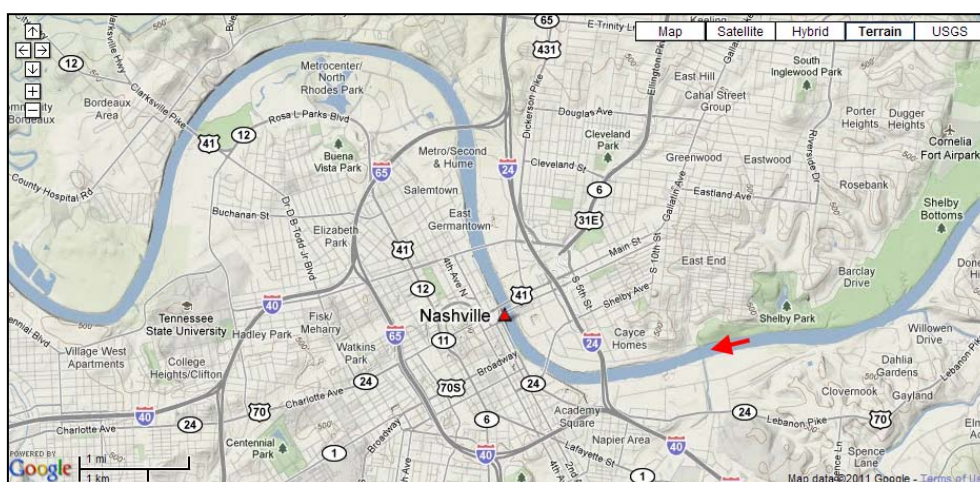


Figura 9. Mapa localizador do posto TN. Posto é indicado por triângulo vermelho. Seta indica direção do fluxo.



Figura 10. Foto do posto TN.

(fonte: Shannon Williams, USGS Tennessee Water Science Center)

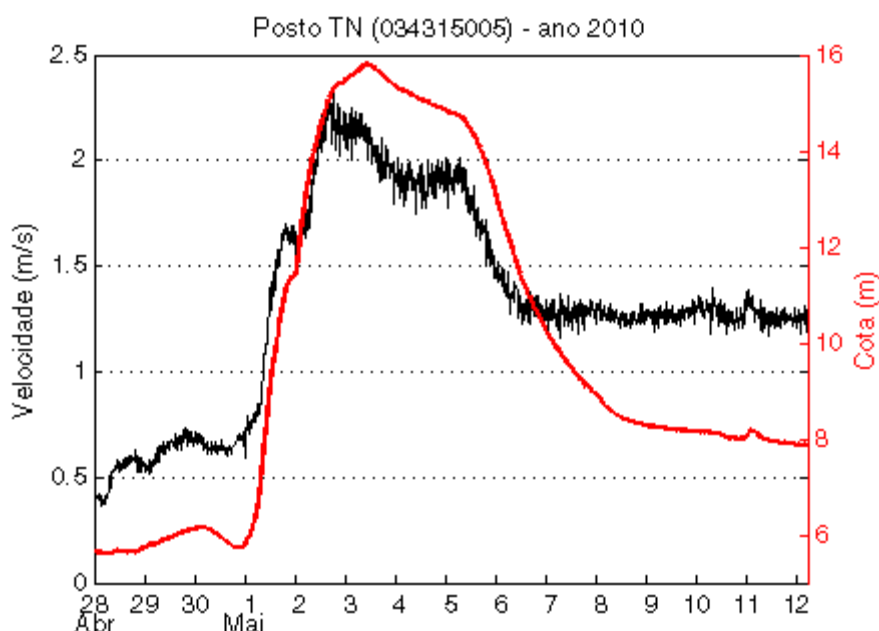


Figura 11. Dados de velocidade e cota, medidos a cada 15 minutos, no posto TN, em 2010.

Esta seção do rio passa por uma região urbanizada da cidade de Nashville, com uma população atual de 550.000 habitantes, a qual é fortemente afetada em casos extremos de enchentes como a do ano 2010, ilustrada da figura 11 acima. Como demonstra o gráfico, o pico da enchente ocorreu no dia 03/Maio com a cota máxima às 12:30h. Porém, a velocidade máxima do rio foi observada às 01:45h do mesmo dia, quase 12 horas mais cedo, o que poderia gerar uma considerável antecedência no aviso para a população, comparado somente com os dados de cota.

5.3. Posto TX (034315005)

Localizado a aproximadamente 600 m da confluência de dois rios, este local apresenta uma seção rasa com um canal de navegação definido. O posto está equipado com linígrafo, sistema de telemetria e um sensor de velocidade por efeito Doppler, modelo SL500, o qual obtém uma distância lateral de perfilagem nesta seção de 70 m (figura 12, dir.). A tabela 4 abaixo mostra os dados principais deste posto.

Tabela 4 – Resumo do Posto TX (034315005)

Identificador	Bacia (km ²)	Largura Média (m)	Cota Média (m)	Cota Máxima Histórica (m)	Vazão Máxima Histórica (m ³ /s)
TX	25.353	128	0,9	3,58 em 22/out/2006	2.713 em 21/out/2006

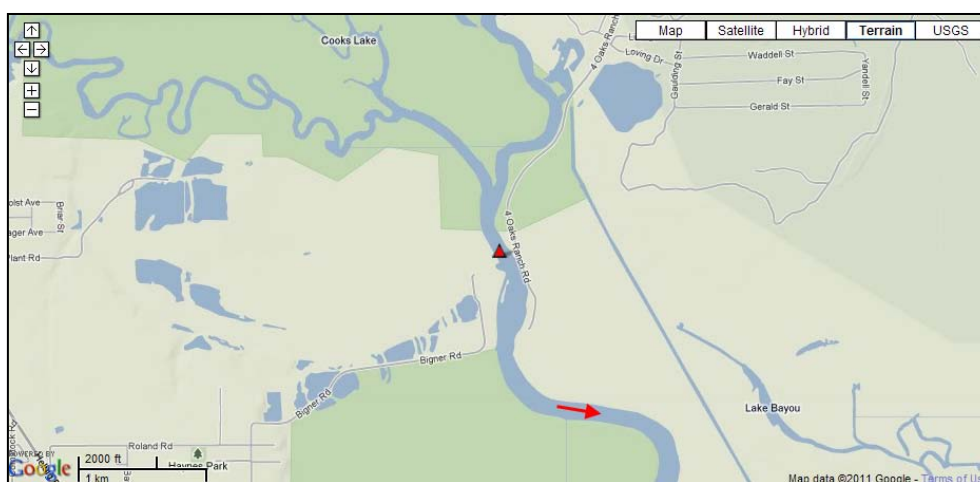


Figura 12. Mapa localizador do posto TX. Posto é indicado por triângulo vermelho. Seta indica direção do fluxo.



Figura 13. Foto do posto TX (esq.) mostrando o sensor de velocidade (dir.), aqui fora d'água para manutenção.

(fonte: Jeffery East, USGS Texas Water Science Center)

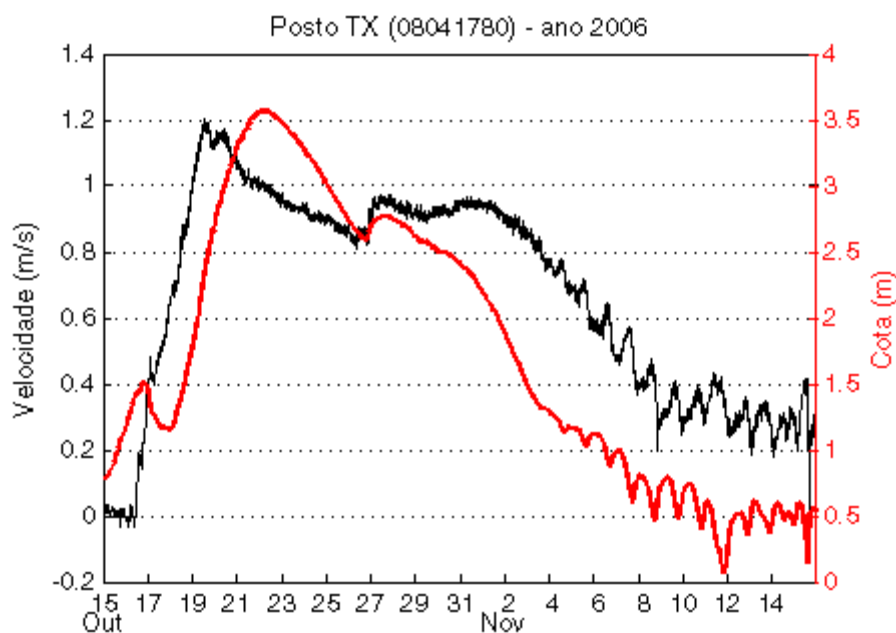


Figura 14. Dados de velocidade e cota, medidos a cada 15 minutos, no posto TX, em 2006.

Apesar de ser localizada a mais de 80 km do litoral (Golfo do México), esta região encontra-se em uma área de relevo muito baixo, em média somente 2-3 m acima do nível do mar. Este fato, aliado à vazão baixa do rio e a crescente elevação do nível do mar, permite a penetração da cunha salina até grandes distâncias a montante da foz. Por este motivo, uma barreira foi construída no local para prevenir a penetração ainda maior da cunha salina (a qual afeta a agricultura e qualidade da flora local).

A presença da barreira, localizada aproximadamente 330 m a jusante do posto, limita a cunha salina, porém não a variação do nível e fluxo causado pela maré. Após a enchente histórica de 2006, registrada na figura 14, é possível observar o efeito da maré na cota e velocidade a partir do dia 4/nov. Dependendo da condição da maré e vazão, este posto pode observar fluxo revertido (vazão negativa).

Em termos de alerta sobre enchentes, durante este evento histórico a velocidade máxima foi observada às 06:15h no dia 19/Out, porém a cota máxima foi observada mais de 60 horas depois (2,5 dias) às 11:30 do dia 22/Out. Neste caso, os dados de velocidade poderiam ter sido usados para alertar a cidade de Beaumont, localizada 12 km a jusante deste posto (população de 120.000 habitantes), com mais de dois dias de antecedência sobre a cota crescente do Rio Neches, quando o rio estava ainda a 1,5 m abaixo da cota máxima.

5.4. Posto IN (05524500)

O posto IN (código USGS 05524500) está localizado em uma área rural do estado de Indiana, em uma seção do Rio Iroquois com quase 1 km de aproximação retilínea. O rio observa velocidades médias abaixo de 0,3 m/s e é um tributário de terceira ordem do Rio Mississippi. Ele está sujeito a enchentes freqüentes causadas não só por chuvas sazonais, mas também pelo derretimento de neve/gelo dentro de sua bacia durante a primavera. A medição de nível neste posto é feita por um radar instalado sob a ponte ilustrada na figura 16 (esq.) e a medição de velocidade e cálculo de vazão feito por um medidor acústico Doppler, modelo SonTek SL1500. A tabela 5 abaixo mostra os dados principais deste posto.

Tabela 5 – Resumo do Posto IN (05524500)

Identificador	Bacia (km ²)	Largura Média (m)	Cota Média (m)	Cota Máxima Histórica (m)	Vazão Máxima Histórica (m ³ /s)
IN	1.163	24	1,4	7,44 em 14/jun/1958	184 em 07/fev/2008



Figura 15. Mapa localizador do posto IN. Posto é indicado por triângulo vermelho. Seta indica direção do fluxo.



Figura 16. Foto do posto IN (esq.) mostrando alojamento do sistema de telemetria (dir.) durante uma enchente.

(fonte: Ron Knapp, USGS Indiana Water Science Center)

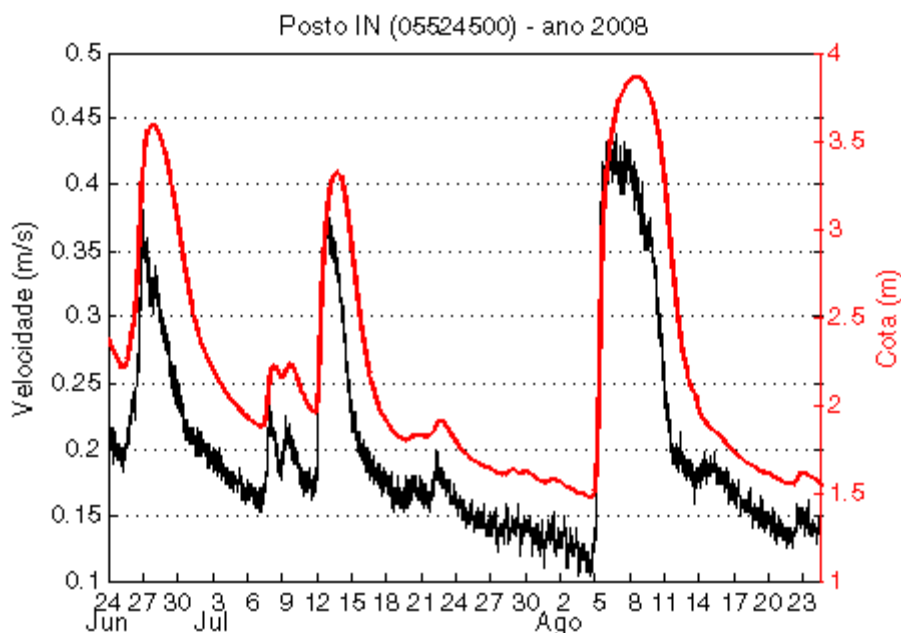


Figura 17. Dados de velocidade e cota, medidos a cada 15 minutos, no posto IN, em 2008.

A figura 17 acima mostra três enchentes seguidas durante os meses de junho, julho e agosto registradas no posto. Em cada uma das enchentes, a velocidade máxima foi observada com mais de 12 horas de antecedência, respectivamente 17, 19 e 15 horas antes da cota máxima. É interessante notar que neste posto, quanto mais elevada a cota máxima, menos tempo existe entre o pico de velocidade e o pico da cota, ilustrando a importância de um sistema de alerta que possa atuar em tempo hábil.

6. Conclusão

O objetivo principal de um sistema de alerta é disponibilizar informações em tempo hábil e de alta qualidade. Vários fatores são necessários para que alertas de inundações possam ter o impacto desejável de avisar a população de um risco eminente. Este trabalho apresentou a importância de um destes parâmetros—a velocidade da água em uma seção de medição contínua—e ilustrou a sua aplicação em quatro rios americanos.

Como foi apresentado, dados de velocidade são melhores previsores de condições de risco do que somente dados de cota. Apesar de obterem estimativas aceitáveis de condições futuras durante períodos de fluxo normal, a tradicional curva-chave cota-vazão é limitada em casos de enchentes, podendo gerar erros significativos em casos extremos.

A adição de dados de velocidade à curva-chave, através da técnica de velocidade indexada para a parte da vazão, permite um melhoramento na previsão de condições futuras.

Adicionalmente, em casos específicos de enchentes, o conhecimento da velocidade em uma seção permite a geração de alertas sobre cotas máximas com várias horas (ou até dias) de antecedência, reduzindo a população que é colocada em risco.

BIBLIOGRAFIA

- BAPTISTA, R. (2011). “*Sino de igreja alerta morador sobre enchentes em Pernambuco*”. Página web iG Último Segundo, <http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/pe/sino+de+igreja+alerta+morador+sobre+enchentes+em+pernambuco/n1300150652907.html>. iG Pernambuco, última atualização 04/maio/2011 20:03.
- BRUSA, L.C.; CLARKE, R.T. (1999). “*Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Estudo de caso: bacia do rio Ibicuí, RS.*” Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 4, n. 3 (Jul/Set 1999), pp. 91-95.
- CHEN, Y.-C.; CHIU, C.-L. (2002). An efficient method of discharge measurement in tidal streams. *J. Hydrology*, 265 (1), 212-224.
- CHENG, R.T.; GARTNER, J.W.; MASON, R.R.; COSTA, J.E.; PLANT, W.J.; SPICER, K.R.; HAENI, F.P.; MELCHER, N.B.; KELLER, W.C.; HAYES, K. (2004). “*Evaluating a radarbased, non contact streamflow measurement system in the San Joaquin River at Vernalis, California*”. U.S. Geological Survey Open File Report OF 2004-1015, Menlo Park, California.
- CHIU, C.-L., SAID, C.A.A. (1995). “*Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow*”. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, 121(1), pp. 26-35.
- CHOW, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co., New York, EUA, 680 p.
- CHURCH, P.E.; GRANATO, G.E.; OWENS, D.W. (1999). “*Basic requirements for collecting, documenting, and reporting precipitation and stormwater-flow measurements*”. U.S. Geological Surveyor Report 99-255.
- FENTON, J.D.; KELLER, R.J. (2001). “*The calculation of streamflow from measurements of stage*”. Technical Report 01/6, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne, Australia.
- FREAD, D.L. (1975). “*Computation of stage-discharge relationships affected by unsteady flow*”. Water Resources Bulletin, 11 (2), pp. 213-228.
- FUJITA, I.; MUSTE, M.; KRUGER, A. (1998). “*Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications*”. Journal of Hydraulic Research 36 (3), pp. 397-414.
- HAENI, F.P.; BUURSINK, M.L.; COSTA, J.L.; MELCHER, N.B.; CHENG, R.T.; PLANT, W.J. (2000). “*Ground-Penetrating RADAR Methods Used in Surface-Water Discharge Measurements*” in Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, University of Queensland, Queensland, Australia, p. 494-500.
- HENDERSON, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan Publishing Co., Inc., New York, NY, 522 p.

HITTLE, C.; PATINO, E.; ZUCKER, M. (2001). “*Freshwater flow from estuarine creeks into northeastern Florida bay*”. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4164, 32 p.

LAENEN, A. (1985). “*Acoustic velocity meter systems*”, in *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 3, Chap. 17.

LAENEN, A.; CURTIS, R.E.Jr. (1989). “*Accuracy of acoustic velocity metering systems for measurement of low velocity in open channels*”. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4090, 15p.

LAENEN, A.; SMITH, W. (1983). “*Acoustic systems for the measurement of streamflow*”. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2213.

LEME ENGENHARIA (2009). *Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte*. Leme Engenharia Ltda., Belo Horizonte, MG, Brasil, Vol. 5, Anexo 6.5.1.

MORLOCK, S.E. (1996). “*Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurements of river discharge*”. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 95-4218.

MORLOCK, S.E.; NGUYEN, H.T.; ANDROSS, J.H.; (2002). “*Feasibility of acoustic Doppler velocity meters for the production of discharge records from U.S. geological survey streamflow-gaging stations*”. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4157.

MUELLER, D.S.; WAGNER, C.R. (2009). “*Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat*”. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3A-22.

MUSTE, M.; HO, H.-C.; KIM, D. (2011). “*Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs*”. *Journal of Hydro-environment research*, in press.

MUSTE, M.; VERMEYEN, T.; HOTCHKISS, R.; OBERG, K. (2007). “*Acoustic velocimetry for riverine environments*”. Special issue: *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (12), pp. 1297-1299.

RANTZ, S.E. (1982a). “*Measurement and computation of streamflow, Vol 1: Measurement of Stage and Discharge*”. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2175, 313 p.

RANTZ, S.E. (1982b). “*Measurement and computation of streamflow, Vol. 2: Computation of Discharge*”. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2175, 118 p.

SCHMIDT, A.R. (2002). *Analysis of stage-discharge relations for open-channel flows and their associated uncertainties*, Tese de doutorado, Universidade de Illinois em Urbana-Champaign.

SIMPSON, M.R. (2002). “*Discharge Measurements using a Broad-band Acoustic Doppler Current Profiler*”. U.S. Geological Survey Open-File Report OF 01-01, 2002.

SIMPSON, M.; BLAND, R. (1999). “*Techniques for accurate estimation of net discharge in a tidal channel*” in *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Sixth Working Conference on Current Measurement*, Airlie, VA., pp. 125-130.

SIMPSON, M.R.; BLAND, R. (2000). “*Methods for accurate estimation of net discharge in a tidal channel*”. *Journal of Oceanic Engineering*, 25 (4), pp. 437-445.

SMITH, W. (1969). “*Feasibility study of the use of the acoustic velocity meter for measurement of net outflow from the Sacramento-San Joaquin Delta in California*”. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1977.

SLOAT, J.V., GAIN, W.S. (1995). “*Application of acoustic velocity meters for gaging discharge of three low-velocity tidal streams in the St. Johns river basin, northeast Florida*”. U.S. Geological Surveyor Water-Resources Investigations Report 95-4230, 26 p.

SONTEK (2000). “*Acoustic Doppler Profilers Principles of Operation*”. San Diego, California, SonTek/YSI, 26 p.

SONTEK (2009). *FlowPack*. Software para calibração com velocidade indexada. San Diego, California, SonTek/YSI, <http://www.sontek.com>