

CAPÍTULO 26

26 PEQUENAS BARRAGENS NA AGRICULTURA IRRIGADA

Lineu Neiva Rodrigues e Daniel Althoff

Resumo

A baixa disponibilidade hídrica observada em várias bacias hidrográficas do Brasil, aliada ao aumento da demanda tem dificultado e, em alguns casos, comprometido a expansão de áreas irrigadas, podendo comprometer a sustentabilidade na produção de alimento e a qualidade de vida de comunidades rurais. Pequenas barragens desempenham papel estratégico, servindo como reservatórios que fornecem água para os diversos usos, aumentando a disponibilidade hídrica durante o período de estiagem. As barragens são estruturas de fundamental importância no manejo de recursos hídricos, pois servem, entre outras coisas, para regularizar as vazões e reduzir as incertezas hídricas. Para otimizar o seu uso, entretanto, devem, de preferência, ser planejadas pensando-se nos usos múltiplos de suas águas. É importante, dessa forma, ter estratégias adequadas para o seu gerenciamento. As barragens, quando bem planejadas, construídas e gerenciadas são estruturas fundamentais para reduzir as incertezas relacionadas com as baixas disponibilidades hídricas. São indispensáveis sempre que a vazão disponível em um curso de água for, em algum momento, menor que a quantidade demandada. A não observância da legislação vigente, antes e durante a construção de uma barragem, pode trazer implicações legais diversas ao proprietário, como, por exemplo, a interdição da obra e multas que variam de acordo com o tamanho do empreendimento. Um aspecto importante que deve também ser observado é a outorga de direito de uso da água, que tem o objetivo de assegurar o direito de acesso à água. Estabelecida pela Lei 9.433, de 1997, a outorga é o ato legal que define os volumes de água que podem ser captados por cada um dos usuários existentes na bacia. Os usos das águas das barragens devem ser organizados. Por causa do aumento da complexidade do processo de tomada de decisão em situações de usos múltiplos e de diversos usuários, aliado ao crescente aumento da demanda, faz-se necessário cada vez mais utilizar ferramentas e estratégias robustas de gerenciamento. Para se alocar e construir novos reservatórios, entretanto, é fundamental se ter maior conhecimento dos diferentes processos que interferem na dinâmica de água em pequenos reservatórios, em especial a evaporação e a infiltração.

26.1 Introdução

A disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica está diretamente associada à pluviometria da região. Durante os períodos de seca, ocorre redução da vazão dos rios, o que pode favorecer, caso não haja um planejamento adequado, o surgimento de conflitos pelo uso da água.

A retenção e o armazenamento de água constituem na maneira mais realista de garantir um fornecimento seguro e contínuo do recurso de forma a atender às diversas demandas hídricas ao longo do tempo. Entre as formas de armazenamento existentes, a barragem é uma das mais utilizadas. Uma barragem, também denominada de represa ou reservatório de água, é uma barreira construída transversalmente à direção do escoamento de um curso de água, com a finalidade de acumular ou elevar seu nível (Figura 1).

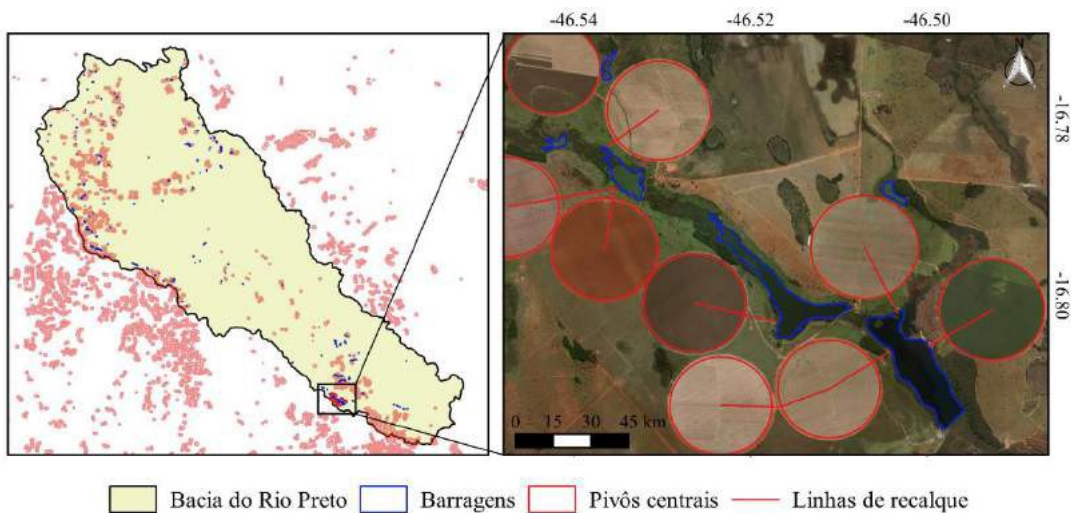


Figura 1. Aproveitamento de água reservada em pequenas barragens por pivôs centrais localizados na bacia do Rio Preto. Sistema de referência de coordenada: SIRGAS 2000.

As pequenas barragens são infraestruturas que se destinam a regularizar a oferta hídrica para atender a uma ou várias atividades. Elas armazenam o excesso de água durante a estação chuvosa para suprir o *deficit* hídrico durante a seca, quando a demanda é geralmente maior que a oferta. Em regiões onde a disponibilidade hídrica é muito variável durante o ano, as pequenas barragens são estruturas essenciais para viabilizar a prática da irrigação e, conseqüentemente, manter a qualidade de vida das pessoas no meio rural.

Calcula-se que existam cerca de 800.000 barragens, de todos os tamanhos e tipos, construídas em todo o mundo (WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000). Destas, estima-se que 300.000 estejam no Brasil (MENESCAL; MIRANDA; PITOMBEIRA, 2004). Estes mesmos autores comentam que somente em 2004 mais de 300 barragens, de diversos tamanhos, tenham se rompido, e ressaltam que as barragens envelhecem e, como todas as outras obras, têm prazo de vida útil que somente pode ser prolongado com esforços especiais de manutenção e de recuperação de seus mecanismos e estruturas.

A definição de pequena barragem, com base na altura e no volume de água armazenado, é variável. Por exemplo, para a Comissão Mundial de Represas as barragens com altura, contada a partir da sua base, igual ou maior a 15 metros, assim como aquelas com altura entre 5 e 15 metros e um volume de reservatório superior a três milhões de metros cúbicos, são consideradas grandes. Já no estado de Nevada, Estados Unidos, uma barragem é considerada pequena quando sua altura é menor que seis metros e a capacidade do reservatório menor ou igual a 1.233,5 m³.

Nos últimos anos, no Cerrado brasileiro, por exemplo, região que representa 24% do território brasileiro, sendo o segundo maior bioma do Brasil e uma região de alta relevância para a agricultura e pecuária do país (KLINK, 2014), diversas bacias hidrográficas têm sofrido com a expansão de áreas irrigadas, o que tem contribuído para aumentar os conflitos pelo uso de água (MANETA *et al.*, 2009). Neste contexto, as pequenas barragens desempenham papel estratégico, aumentando a disponibilidade hídrica durante o período de estiagem. A construção de pequenos reservatórios nessas regiões tem contribuído significativamente para viabilizar a irrigação, o desenvolvimento econômico e o bem-estar social da população (RODRIGUES *et al.*, 2012). Todavia, o impacto causado por essas estruturas no sistema hídrico precisa ser mais bem quantificado e considerado nos planos de recursos hídricos (ROSENBERRY *et al.*, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2012).

Apesar da sua relevância estratégica, os impactos ambientais causados principalmente por reservatórios mal dimensionados têm dificultado a construção de novas barragens em

várias regiões do Brasil. Os problemas de dimensionamento são, na sua maior parte, devido à falta de informação. Assim, é cada vez mais importante gerar informações que subsidiem a alocação e construção de novos reservatórios na região, sendo para isso crucial compreender melhor o comportamento das diferentes variáveis que interferem na dinâmica de água de um pequeno reservatório. Os volumes de água armazenados por pequenas barragens dependem das relações, ao longo do tempo, entre as ofertas hídricas, as perdas e as demandas. A evaporação e a infiltração são as principais formas de perdas, sendo crucial que sejam adequadamente estimadas.

O impacto no comportamento hidrológico de uma bacia advindo da implantação de uma única pequena barragem pode não ser significativo, mas a influência na hidrologia da bacia devido a construção de centenas dessas pequenas barragens é algo que merece ser considerado e estudado.

O Governo do Distrito Federal, por exemplo, planejava aumentar a área irrigada na região por meio da construção novos pequenos barramentos na bacia do Rio Preto. Segundo Maldaner (2003), os programas e projetos governamentais que estão sendo implantados nessa bacia visam principalmente a redução dos conflitos estabelecidos devidos a expansão da irrigação. Dentre esses projetos destaca-se o Projeto de Aproveitamento Hidroagrícola da bacia do Rio Preto, publicado em 2001 pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Governo do Distrito Federal. O projeto prevê a construção de 26 pequenos barramentos, com capacidade total de regularização de $18,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sendo prevista a utilização de cerca de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para irrigação, o que possibilitaria a expansão da área irrigada em 7.630 hectares (GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL, 2001).

O problema é a falta de informações técnicas sobre as barragens já existentes e o impacto que elas causam na bacia como um todo, o que dificulta o processo de tomada de decisão no que diz respeito ao planejamento e gestão dos recursos hídricos nesta bacia hidrográfica e da escolha do melhor local onde as novas barragens deveriam ser construídas.

Antes de se construir novas barragens em uma bacia, deve-se, primeiramente, levantar as características físicas daquelas já existentes. O estudo da geometria das pequenas barragens e o estabelecimento de relações área-volume e cota-volume das barragens já construídas são fundamentais para o adequado entendimento da influência destas infraestruturas no comportamento hidrológicos da bacia e na identificação dos melhores locais para se construir novas barragens.

Grande parte dessas barragens não apresenta qualquer informação técnica e existe uma carência de monitoramento, que, em geral, tem custo financeiro elevado. Este fato aliado ao aumento da demanda hídrica para fins agrícolas e a necessidade de melhorar a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas indicam a necessidade de desenvolvimento de métodos que contribuam para se ter um manejo da água de pequenas barragens mais efetivo, colaborando para que as comunidades rurais possam enfrentar de maneira mais racional os períodos críticos, como os de redução da disponibilidade hídrica, garantindo a produção e a qualidade de vida das comunidades rurais.

Rodrigues *et al.* (2007) avaliaram a distribuição espacial de pequenas barragens na bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. As barragens foram identificadas utilizando-se cenas do satélite Landsat ETM+. Considerou-se pequena barragem toda barragem com área do espelho d'água variando entre 1 e 40 ha.

Esses mesmos autores comentam que nos últimos anos centenas de pequenas barragens foram construídas na bacia do Rio Preto e ressaltam que: (i) tanto as de domínio público quanto as particulares foram construídas de forma independente e em épocas diferentes, com nenhuma ou muita pouca integração entre as agências responsáveis pela sua construção, (ii) a maioria delas foi construída avaliando-se apenas as condições locais, isso é,

não considerando que uma barragem está hidrológicamente interligada com a outra por meio do curso de água que foi represado, (iii) vários desses pequenos reservatórios estão operando em condições inadequadas, estando sub ou superdimensionados, (iv) a manutenção dessas barragens é precária, com risco de ruptura e prejuízos aos usuários, e (v) na maioria dos casos observados, não há vegetação às margens das barragens, o que favorece a ocorrência de erosão e o assoreamento, com redução da capacidade de armazenamento de água.

Essas estruturas, quando planejadas para atender a múltiplos usos e usuários, estão sujeitas a conflitos pelo uso do recurso água, sendo necessário realizar um gerenciamento mais robusto. Para que isto seja feito de forma segura é importante que haja um melhor conhecimento das variáveis associadas à dinâmica de variação da água na barragem. Historicamente, a ação do poder público brasileiro, na gestão dos recursos hídricos, optou por mecanismos de alocação de água com base em parâmetros técnicos, em conceitos econômicos ou em dinâmicas sociais. Essa atuação pode ser caracterizada pela abrangência regional ou setorial, pela desarticulação com outras políticas públicas e pela reduzida participação social nas decisões. Com a implementação das novas políticas de recursos hídricos estaduais e nacional, na década de 1990, o equacionamento de conflitos pelo uso da água no Brasil passou a ser objeto de modelos alternativos de gestão e de alocação de água, de caráter participativo (LOPES; FREITAS, 2007).

Para que a gestão de água nas pequenas barragens e na bacia possa ser feita de forma confiável é fundamental que se tenha informações técnicas sobre as características desses reservatórios. Essas informações, em geral, apresentam custo elevado e são trabalhosas de se obter. Na sequência, apresentam-se algumas informações básicas que podem servir de referência para outros estudos.

26.2 Identificação e estabelecimento de relações entre cota e área-volume de pequenas barragens

O primeiro passo nos estudos de gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas com a presença de pequenos reservatórios consiste em se fazer um amplo levantamento dessas barragens. O sensoriamento remoto orbital apresenta-se como uma técnica de grande potencial de uso no planejamento e gestão dos recursos hídricos, podendo ser utilizado para identificação de pequenas barragens (RODRIGUES *et al.*, 2012).

Para identificação das barragens existentes na bacia, pode-se utilizar, por exemplo, cenas do satélite Landsat ETM+. A escolha das cenas deve-se basear em critérios, tais como: (i) data de passagem do satélite mais próxima do final da estação chuvosa, quando o nível de água das barragens está próximo do seu máximo; e (ii) ausência de nuvens. De posse das imagens, realiza-se as etapas de registro, mosaicagem e recorte da área de estudo.

Pode-se aproveitar as imagens para se estimar a área do espelho de água do reservatório. Um dos problemas que podem surgir quando da confecção do contorno do espelho d'água da barragem com base na imagem de satélite é a dificuldade em associar os pixels que compõem o contorno da barragem a uma categoria específica, ou seja, associar um determinado pixel como água ou como solo e vice-versa. Essa dificuldade está associada com a resolução espacial do satélite. No caso específico do Landsat ETM+, a resolução espacial é de 30 metros. Quanto menor a área da barragem, maior será o erro cometido por associar um determinado pixel da imagem a uma categoria a que ele não pertence. A dificuldade em associar os pixels da imagem a uma determinada categoria é ainda maior quando existe vegetação exuberante ao redor e/ou no interior da barragem.

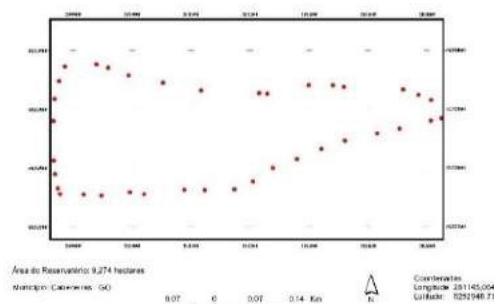
Apesar dos vários estudos (LIEBE; VAN DE GIESEN; ANDREINI, 2005; RODRIGUES *et al.*, 2007; HUI *et al.*, 2008; CARVALHO *et al.*, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2012) mostrando adequação desse método para estimativa da área do espelho d'água, em alguns casos, pode

ser necessário uma validação de campo. No campo, o contorno do espelho d'água das barragens, ou seja, a definição do seu perímetro e da sua forma, pode ser feito caminhando-se de posse de um GPS de mão, ao redor do contorno do espelho de água de cada barragem. Cuidado especial deve-se tomar na medida da forma do reservatório (Figura 2a). Muitas vezes a presença de vegetação nas margens da barragem pode impossibilitar o deslocamento e coleta dos pontos, nesses casos o contorno deve ser feito utilizando-se barco.

Em muitos casos, principalmente durante a estação chuvosa, é difícil definir com precisão onde é o início da barragem. Geralmente isto ocorre por dois motivos: (i) o início da barragem se confunde com o próprio curso d'água; e (ii) a nascente está encoberta pelo espelho d'água de barragens muito próximas a ela. Em alguns casos, a presença de vegetação no interior da barragem pode dificultar ainda mais a definição de onde era o início da barragem (Figura 2b).



(A)



(B)

Figura 2. (A) Registro de pontos ao redor do perímetro do espelho d'água de uma barragem, utilizando receptor GPS portátil, e (B) representação dos pontos coletados, indicando o local do registro e a forma do contorno do espelho d'água.

Rodrigues *et al.* (2007) observaram um bom ajuste ($R^2 = 0,92$), da área do espelho d'água calculada utilizando-se imagem de satélite com a calculada com base em dados coletados em campo.

Embora existam algumas técnicas que possibilitam estimar a relação cota-volume sem a necessidade de ir a campo, como, por exemplo, aquelas que utilizam modelos de elevação digital do terreno, para estimativa da relação, fundamental no gerenciamento de água de reservatórios, via-de-regra, faz-se necessário realizar trabalho de campo para levantar, por meio de batimetria, valores de profundidade da água (Figura 3a).

De posse dos dados de batimetria, gera-se o modelo em três dimensões da barragem (Figura 3b). A confecção do modelo 3D é interessante, uma vez que ele possibilitava verificar de imediato a ocorrência de algum problema na batimetria e/ou necessidade de coleta de pontos adicionais para cálculo do volume.

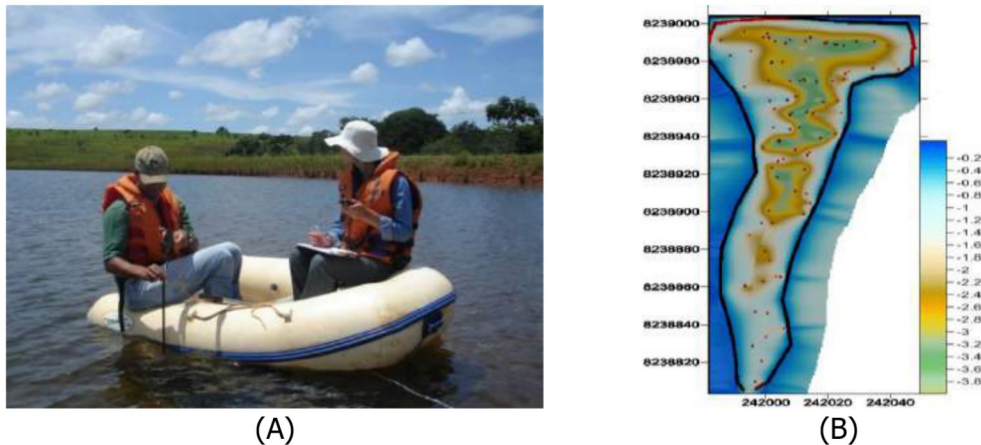


Figura 3. (A) Batimetria utilizando batímetro de mão e registro da posição com receptor GPS portátil; e (B) modelo em três dimensões de uma das barragens avaliadas.

De posse do modelo 3D, procede-se a parametrização de um modelo potencial, Equação 1, relacionando cota e volume.

$$V = kH^\alpha \quad (1)$$

em que V se refere ao volume armazenado (m^3), H à profundidade d'água (m), k e α aos coeficientes referentes a geometria da barragem

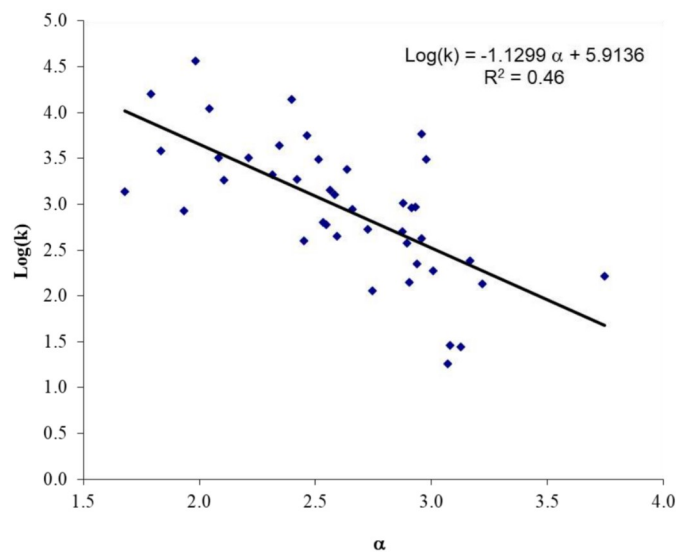


Figura 4. Relação entre os coeficientes referentes a geometria, $\log(k)$ e α , de uma pequena barragem na bacia hidrográfica do rio Preto.

Rodrigues e Liebe (2013) avaliaram 103 pequenos reservatórios no Brasil e em Gana. Na Figura 4 apresenta-se a relação entre os coeficientes referentes a geometria, $\log(k)$ e α , de uma pequena barragem na bacia hidrográfica do rio Preto. Observa-se a baixa correlação existente entre esses dois coeficientes. Com base nos estudos realizados no Brasil e Gana, o coeficiente α apresentou menor variabilidade.

No Brasil, foram avaliadas 42 pequenas barragens. Os valores de k , com média igual a 31.4677, variaram de 18,12 a 36.855,30 e os valores de α , com média igual a 2,61, variaram de 1,58 a 3,75. Em Gana, foram avaliadas 61 pequenas barragens. Os valores de k , com média

igual a 5.547,11, variaram de 377,88 a 26.413,31 e os valores de α , com média igual a 2,59, variaram de 1,83 a 4,08.

26.3 Balanço de água no reservatório

Na Figura 5 apresenta-se esquema de uma pequena barragem com os principais componentes representativos da dinâmica de água. Para fins de gestão, é importante que a vazão afluyente seja medida ou estimada diariamente. Essa informação é base para subsidiar as estratégias de uso da água da barragem. A precipitação que incide sobre o espelho d'água da barragem e a ascensão capilar, via de regra, são desprezados. O vertedor é uma estrutura de segurança que descarrega para jusante o excesso de água. A tomada de fundo é necessária para manter a vazão de jusante estabelecida pelo instrumento de outorga. As perdas por evaporação e infiltração podem ser significativas, especialmente em reservatórios localizados em regiões planas, com grande área de espelho d'água.

26.4 Infiltração

A infiltração é, sem dúvida, a variável com maior variabilidade espacial e mais difícil de ser quantificada ao se fazer o balanço e planejar o uso da água de um reservatório. Na gestão da água do reservatório, é importante que a infiltração seja avaliada sob a ótica do irrigante, onde ela se constitui em uma perda de água do sistema. Na ótica da bacia hidrográfica, a água infiltrada contribui com a recarga e volta a fazer parte do sistema hídrico podendo ser reutilizada, não podendo ser caracterizada como uma perda.

Segundo Dekker (2007), as perdas por infiltração em pequenas barragens são frequentemente desprezadas, por não haver um método simples para medi-las. Rodrigues e Dekker (2008) adaptaram o sistema apresentado por Sanders (1998) para medir a infiltração em reservatórios (Figura 5). O infiltrômetro, foi construído com tubos de PVC de 25 cm de diâmetro e comprimentos variados, em função da profundidade do local da medida.

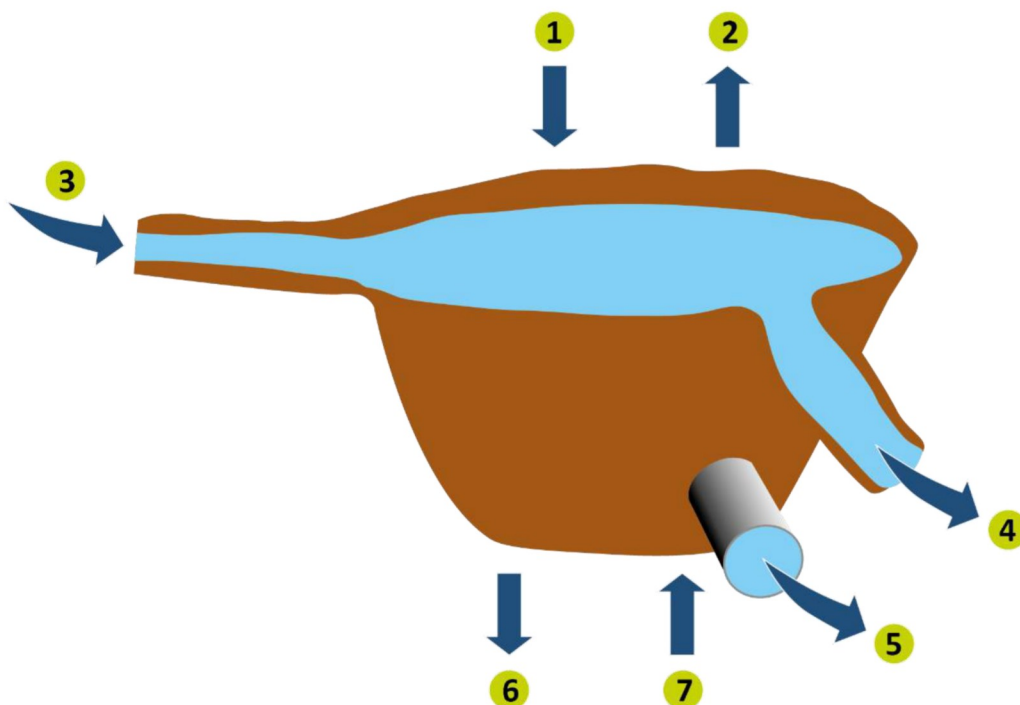


Figura 5. Representação esquemática dos componentes de uma pequena barragem, destacando as principais variáveis hidrológicas relacionadas à dinâmica de água: (1) precipitação, (2) evaporação, (3) vazão afluyente, (4) vertedor, (5) tomada de fundo, (6) infiltração, e (7) ascensão capilar.

Ao avaliarem a infiltração em uma pequena barragem, os autores observaram uma grande variabilidade espacial da infiltração (*seepage*). A duração das avaliações variou de 29 minutos a 1.440 minutos; e os valores da infiltração variaram de $0,0382 \text{ mm h}^{-1}$ a $3,8892 \text{ mm h}^{-1}$. O valor médio da taxa de infiltração para esta barragem foi igual a $1,3157 \text{ mm h}^{-1}$. A magnitude desse valor mostra a importância de se considerar a infiltração na gestão da água de pequenas barragens. Em apenas um mês, 4.032 m^3 de água são retirados da barragem por infiltração. Este valor é 1,26 vez maior que a capacidade de armazenamento da barragem. Isso é, se não houvesse entrada de água no sistema em menos de um mês, essa barragem teria secado.

Visando contribuir para uma melhor medição e uma representatividade da variação da infiltração, os autores fizeram as seguintes recomendações: (i) as medidas de infiltração devem ser realizadas em vários locais dentro da barragem, (ii) as avaliações devem ser repetidas em cada local pelo menos cinco vezes, (iii) a definição do tempo de duração de cada teste deve ser feita no local, levando-se em consideração as características de cada barragem. Recomenda-se, entretanto, como regra prática, que a avaliação não seja finalizada antes que se tenha uma redução no peso inicial do frasco de soro de pelo menos 15%, (iv) verificar se não há vazamentos de água na parte inferior do infiltrômetro (barril), (v) verificar se a água do frasco de soro não está fazendo pressão sobre a água do tubo de PVC, e (vi) medidas de infiltração deveria ser um procedimento rotineiro em pequenas barragens.

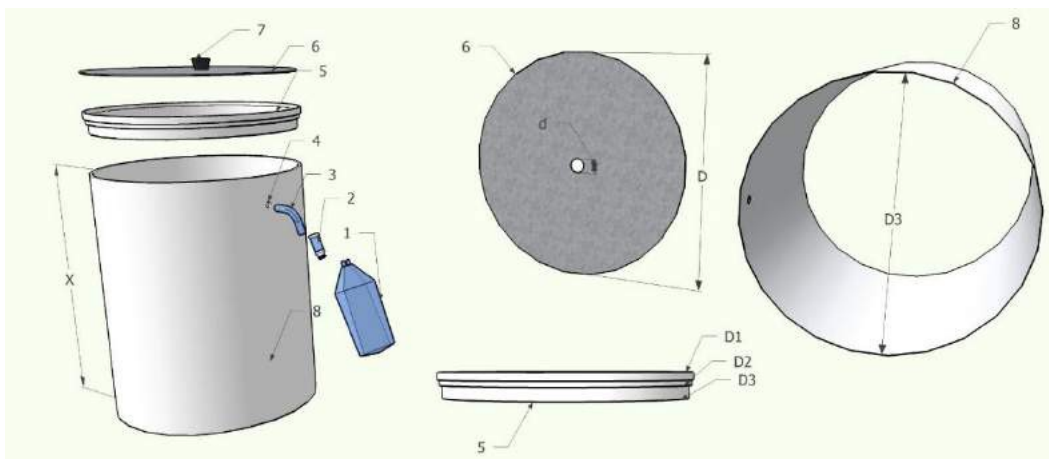


Figura 6. Esquema ilustrativo das partes componentes do infiltrômetro: (1, 2, 3) Frasco de soro, válvula de controle de fluxo e mangueira, (4) Orifício, com 0,5 cm de diâmetro, feito a 10 cm abaixo da parte de cima do barril (tubo de PVC), (5) Conexão barril-tampa ($D1 = 26,0 \text{ cm}$; $D2 = 25,4 \text{ cm}$; e $D3 = 24,7 \text{ cm}$), (6) Tampa de metal ($D = 26 \text{ cm}$; $d = 1,5 \text{ cm}$), (7) Rolha de borracha (formato cônico com o diâmetro menor igual a 1,3 cm e o maior igual a 2,3 cm) e (8) Barril (feito de PVC, com diâmetro igual a 25,4 cm. O comprimento x varia com a profundidade).

26.5 Evaporação

O levantamento de estimativas de perdas por evaporação é primordial para o desenvolvimento de estratégias e políticas eficientes de gestão de recursos hídricos. Além disso, essas estimativas para áreas rurais remotas, ainda predominantes na região do Cerrado e que contam com poucas informações, são de especial interesse para hidrólogos e meteorologistas.

A evaporação representa uma perda efetiva de água do sistema hidrológico que não deve ser negligenciada, já que é um dos principais constituintes do balanço hídrico de reservatórios sob diferentes regimes climáticos. As perdas afetam diretamente a eficiência de armazenamento do reservatório, o uso produtivo de água, a economia e a qualidade de vida

das pessoas. O processo de evaporação se torna ainda mais importante quando se consideram os efeitos de mudanças climáticas, com o aumento da temperatura ameaçando reduzir a disponibilidade hídrica, levando-se em conta especialmente o armazenamento superficial de reservatórios.

Obter estimativas de perdas por evaporação mais precisas é, portanto, essencial. Contudo, a quantificação mais representativa dessa variável para pequenos reservatórios é um grande desafio, uma vez que a variabilidade da temperatura e da pressão de vapor do ar próximo às margens pode diferir consideravelmente das condições internas do reservatório e influenciar a magnitude da evaporação real.

Tradicionalmente, a evaporação de água em um pequeno reservatório pode ser aproximada por meio da medida da evaporação de água em um tanque evaporimétrico (tanque classe A) instalado em seu interior (MASONER; STANNARD, 2010). O tanque parcialmente submerso em água é preenchido com a mesma água do reservatório. Dessa forma, o tanque apresentará condições físicas similares ao reservatório, porém em um volume controlado onde as perdas só se dão por evaporação. Apesar de simples aplicação, a operacionalização deste equipamento é trabalhosa. É necessário ir de barco realizar a leitura da evaporação diariamente, ou no máximo semanalmente. Mesmo que utilizando um linímetro/linígrafo, a ida do técnico ao tanque é importante para realizar o seu preenchimento, evitando com que o nível do tanque baixe demasiadamente e influencie os dados de evaporação coletados. Além disso, a aproximação de barco deve ser cuidadosa para que marolas não transbordem para dentro do tanque e atrapalhe as leituras.

Neste sentido, Althoff *et al.* (2019) desenvolveram equações para estimar as perdas por evaporações em pequenas barragens no Cerrado. As equações se baseiam em dados mais fáceis de serem coletados e operacionalizados, como, por exemplo, tanque evaporimétrico (tanque classe A) e estação meteorológica instalados próximos ao reservatório. Neste caso, a evaporação medida no tanque evaporimétrico instalado fora do reservatório é maior que a evaporação de água medida em um tanque instalado dentro do reservatório, sendo necessário que se faça correções. Os autores ajustaram coeficientes para se estimar a evaporação real do reservatório (tanque interno) (Equação 2). Já por meio das variáveis meteorológicas, os autores ajustaram regressões lineares para o cálculo de evaporação de água (Equação 3).

$$E_{in} = K_p E_{ex} \quad (2)$$

$$E_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (3)$$

em que E_{in} é a evaporação medida pelo tanque classe A instalado dentro do reservatório (mm dia^{-1}), E_{ex} é a evaporação medida pelo tanque classe A instalado próximo ao reservatório (mm dia^{-1}), K_p o coeficiente do tanque (adimensional), $\beta_0 \dots \beta_n$ são o intercepto e coeficientes angulares ajustados à regressão linear (adimensionais), e $X_1 \dots X_n$ são as variáveis explicativas do modelo, isso é, variáveis meteorológicas (W m^{-2} para radiação solar, $^{\circ}\text{C}$ para temperatura, % para umidade relativa e m s^{-1} para velocidade do vento).

Os coeficientes de tanque ajustados por Althoff *et al.* (2019) variaram de 0,92 em julho a 0,72 em dezembro. De forma geral, pode-se assumir K_p igual a 0,88 na estação seca e igual a 0,78 na estação chuvosa. Apesar do Cerrado apresentar clima predominantemente caracterizado como tropical de savana com inverno seco, esses coeficientes podem variar de acordo com especificidades do clima local. Por exemplo, temperaturas mais elevadas aquecem mais rapidamente o reservatório posicionado externamente ao reservatório do que internamente. Logo, as equações desenvolvidas são mais genéricas para se estimar a evaporação de água (Equação 4):

$$E_{in} = 0,924 + 0,057T_x - 0,029UR + 0,475u_2 + 0,012Rs \quad (4)$$

em que T_x é a temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), UR a umidade relativa (%), u_2 a velocidade do vento a 2 m do solo (m s^{-1}) e R_s a radiação solar (W m^{-2}).

Althoff, Rodrigues e Silva (2019) avaliaram o impacto desses pequenos reservatórios na gestão de recursos hídricos por meio de curvas de permanência. Essas curvas apresentam a frequência que dada evaporação é igualada ou superada em um intervalo de tempo. Isso facilita com que gestores de água assumam riscos baseados na probabilidade para estimar a disponibilidade hídrica nesses reservatórios. Para isso, os autores (i) simularam séries de evaporação por meio da série histórica de uma estação meteorológica, (ii) ordenaram os valores de evaporação para períodos quinzenais ao longo do ano e (iii) atribuíram frequências de ocorrências a esses valores de acordo com a equação de Kimball (1960) (Equação 5).

$$F = \frac{m}{n + 1} \quad (5)$$

em que F é a frequência de ocorrência (%), m é a ordem do evento de evaporação e n é o número de observações.

Os autores observaram, para a estação seca, baixa variabilidade da evaporação em relação a probabilidade, o que resulta baixo risco/incertezas na estimativa de evaporação mesmo se baseando em diferentes probabilidades de ocorrência. Contudo, a evaporação apresenta alta variabilidade na estação quente e chuvosa, sendo necessário maior cuidado ao se assumir diferentes níveis de probabilidade.

A partir da série histórica de evaporação simulada por Althoff, Rodrigues e Silva (2019), também foi possível observar, entre 1974 e 2017, uma tendência no aumento de evaporação de água para uma sub-bacia da bacia do Rio Preto. Essa tendência foi mais significativa para os meses de agosto, setembro e outubro, ao fim da estação seca, o que configura um risco à principal safra do ano. As chuvas são incertas no período de transição entre estação seca e chuvosa, e a maior evaporação coloca em xeque a disponibilidade hídrica nesses reservatórios para o início do plantio.

A fim de melhor caracterizar os riscos provenientes de mudanças climáticas para a bacia do Rio Preto, Althoff, Rodrigues e Silva (2020) avaliaram diferentes projeções climáticas até o fim do século. Essas projeções se baseiam em um cenário intermediário e um cenário pessimista. O cenário intermediário (RCP4.5) estima um aumento no saldo de radiação de 4.5 W m^{-2} até 2100, enquanto o cenário pessimista (RCP8.5) estima um aumento de 8.5 W m^{-2} . Os autores estimaram uma redução da disponibilidade hídrica dos pequenos reservatórios ao fim da estação seca em aproximadamente 35%. A partir das projeções, se estimou um aumento na evaporação de pequenos reservatórios de 7.3% para RCP4.5 e 18.4% para RCP8.5. Isso representaria, para o cenário pessimista, em uma redução na disponibilidade hídrica dos reservatórios de até 10% ao fim da estação seca, isso é, uma redução total na disponibilidade hídrica em 41.6% ao longo da estação seca. Os autores também salientam que reservatórios rasos serão mais impactados pelas mudanças climáticas e terão maior risco em não atingirem o propósito para qual foram construídos.

Os impactos projetados para a disponibilidade hídrica em pequenos reservatórios são importantes para que se leve em consideração a evaporação como uma perda efetiva no design e gestão desses reservatórios. Apesar disto, o aumento em disponibilidade hídrica oferecida pelos pequenos reservatórios é considerável, especialmente para as bacias de elevada sazonalidade climática como as do Cerrado.

26.6 Avaliação do impacto de pequenas barragens na disponibilidade hídrica durante a estação seca

Pinhati, Rodrigues e Aires de Souza (2020) realizaram estudo para avaliar o impacto de 458 pequenas barragens na disponibilidade hídrica da bacia do rio São Marcos durante a estação seca, de maio a setembro, totalizando 153 dias. Os autores identificaram que esses 458 reservatórios armazenam 193 hm³.

Para isto, os autores dividiram a bacia em 4.161 sub-bacias. Analisando o impacto de cada pequenos reservatórios, considerando apenas a água armazenada no reservatório, sem contabilizar novas entradas, os autores observaram que as pequenas barragens com área do espelho d'água < 0,32 ha não contribuem com nenhum aumento significativo na disponibilidade de água da bacia no final da estação seca.

Para avaliar o efeito dos pequenos reservatórios (PR) nas sub-bacias, os autores relacionaram espacialmente os 458 reservatórios às 4.161 microbacias, resultando em 319 sub-bacias contendo entre um e oito PR por microbacia. Os resultados mostraram que os valores médios da Q₉₅ e da vazão média para os meses de maio e setembro aumentaram nas 319 sub-bacias com PR quando comparados com as vazões dos rios sem o efeito PR. Contabilizando o efeito PR, a Q₉₅ teve um aumento relativo de 72,4% e 44,4% em maio e setembro, respectivamente, enquanto a vazão média aumentou de 43,4% e 20,0%.

26.7 Aspectos legais a serem considerados na construção de pequenas barragens

Uma barragem mal dimensionada pode ter perdas significativas de água por evaporação, reduzindo a disponibilidade de água para outras finalidades na mesma bacia hidrográfica. Além disso, problemas no projeto e construção da barragem podem resultar na ocorrência de grandes perdas de água por infiltração e, até mesmo, no rompimento da barragem. Existem relatórios, por exemplo, indicando que só no ano de 2004, mais de 300 barragens, de diversos tamanhos, tenham se rompido em todo o Brasil.

Antes de se construir uma barragem é importante observar se a legislação vigente permite a construção da barragem naquela área. Por exemplo, próximo a nascente de rio deve-se ter uma área preservada, ao redor da nascente, de 50 metros. Isto é, deve-se observar se área onde a barragem será construída é área de interesse ambiental, seja Unidade de Conservação ou Área de Preservação Permanente. As Unidades de Conservação, instituídas pela Lei 9.985/2000, que permitem a instalação de barragens são as de Uso Sustentável (APA, ARIE, FLONA, RESEX, RDS e RPPN). Nas Áreas de Preservação Permanente (APP), instituídas pelo Código Florestal (Lei 4.771/1965 e pelas Resoluções CONAMA 302 e 303/2002), o uso é ainda mais restrito, devendo a barragem ocupar e impactar o mínimo possível dessas áreas.

Antes de iniciar a construção da barragem é importante elaborar uma estratégia para recomposição da mata ao redor da barragem. A construção de barragens implica na remoção da vegetação marginal do curso d'água a qual só poderá ser feita com autorização do órgão ambiental, por se tratar de área de APP. Após a construção de barragens, é necessário repor a faixa de vegetação marginal, reconstituindo a APP, empregando espécies ocorrentes na vegetação original. No caso de barragens em zona rural com espelhos d'água com área inferior a 20 ha, não utilizadas em abastecimento público ou geração de energia elétrica, a faixa de APP a ser vegetada é de 15 m e as mudas a serem empregadas deverão ser de espécies ocorrentes na vegetação original.

Mais recentemente, a Lei 12.787/13, que estabelece a Política Nacional de Irrigação, em seu Artigo 22, Parágrafo 2º, determina que as obras de infraestrutura de irrigação, inclusive os barramentos de cursos d'água que provoquem intervenção ou supressão de vegetação em área de preservação permanente, poderão ser consideradas de utilidade

pública, para efeito de licenciamento ambiental, quando declaradas pelo Poder Público Federal como essenciais para o desenvolvimento social e econômico.

As barragens são infraestruturas essenciais para o desenvolvimento da agricultura irrigada em diversas regiões do Brasil. Todavia, antes da sua construção, o irrigante deve estar atento aos aspectos legais, buscando minimizar os impactos ambientais. Após a sua construção, deve-se estabelecer procedimento de manutenção continuada.

26.8 Considerações finais

Na área rural, os sistemas de produção são dependentes dos recursos hídricos. A variabilidade temporal desse recurso e o acesso limitado a água e as tecnologias para enfrentar essa variabilidade na oferta hídrica, constituem em fatores de redução da renda e da qualidade de vida das comunidades rurais. Pequenas barragens são estruturas que reduzem os efeitos da sazonalidade do clima sobre a produção de alimentos, contribuindo para melhorar a vida socioeconômica de comunidades rurais.

Os impactos ambientais provocados por essas barragens e os conflitos advindos do uso inadequado de suas águas podem ser minimizados consideravelmente se elas forem adequadamente construídas e manejadas.

Estudos relacionados a pequenos reservatórios são escassos e praticamente inexistentes na literatura hidrológica para o Brasil, sendo que a maioria das pesquisas se concentraram nos impactos potenciais do clima e sua relação com grandes barragens. As pequenas barragens são infraestruturas essenciais para o desenvolvimento da agricultura irrigada em diversas regiões do Brasil. Estudos apontam que a disponibilidade hídrica durante a estação seca pode aumentar em até 500% com a construção de pequenas barragens em cascata. Todavia, antes da sua construção, o irrigante deve estar atento aos aspectos legais, buscando minimizar os impactos ambientais. Após a sua construção, deve-se estabelecer procedimento de manutenção continuada. Adicionalmente, deve ser considerado que, nas definições dos planos de irrigação e para balizar políticas de governo, é importante ter informações precisas sobre a área irrigada e a área potencial para irrigação.

Pinhati, Rodrigues e Aires de Souza (2020) observaram que o impacto de uma única pequena barragem na disponibilidade hídrica é proporcional ao seu tamanho, mas também está relacionado à sua localização na bacia, dada a tendência de que quanto maior a área de drenagem a montante, maior será a sua capacidade de armazenamento. De fato, pequenas barragens individuais com áreas de drenagem a montante <3 km² mostraram exercer pouco impacto sobre a disponibilidade local de água, no caso da bacia hidrográfica do rio São Marcos.

Quanto maior o volume de água que se deseja acumular, maior a barragem e mais complexa é a sua construção. Muito pouco se conhece a respeito do impacto provocado pelos pequenos reservatórios de água na hidrologia da bacia hidrográfica. Esses reservatórios são de construção simples, sendo muitas vezes construídos pelo próprio fazendeiro ou grupo de pequenos proprietários de terra.

Quando não adequadamente planejadas, as barragens tendem a ser superdimensionadas, pois o usuário parte da ideia que quanto mais água ele tem a sua disposição, mesmo que não seja necessária, maior a sua segurança hídrica. Barragens superdimensionadas imobilizam uma quantidade de água desnecessária, água que poderia ser utilizada a jusante para outras finalidades. Barragens subdimensionadas ocorrem, geralmente, devido à falta de conhecimento das demandas atuais e (ou) futuras e (ou) por não se levar em consideração, durante o dimensionamento, as perdas por evaporação e infiltração.

As duas situações, super ou subdimensionamento, não são adequadas, podendo levar a conflitos pelo uso do recurso. No primeiro caso, o conflito se verifica entre o proprietário da

barragem e os usuários dos recursos hídricos localizados a jusante da barragem; já no segundo caso, entre os usuários da água da própria barragem.

A escolha do local mais adequado para locação e construção de novos reservatórios é fundamental para sua gestão, principalmente pelo fato do local influenciar diretamente na relação entre o tamanho do espelho de água e a capacidade total de armazenamento do reservatório. Essa relação tem influência direta na quantidade de água evaporada e infiltrada.

Desta forma, o uso de modelos matemáticos com o propósito de simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas com presença de pequenas barragens, isoladas ou em conjunto, considerando diferentes cenários de mudanças nas variáveis hidrológicas, constituem uma ferramenta fundamental para a gestão. Os resultados advindos desses modelos são importantes para as agências de águas, pois podem subsidiar o planejamento de recursos hídricos, principalmente quando se realizam previsões a longo prazo, podendo, desta forma, auxiliar no desenvolvimento de estratégias para melhorar a eficiência e a tomada de decisões afim de garantir o uso sustentável de recursos hídricos.

Não se pode condenar a construção de pequenas barragens, construídas para fins de armazenamento de água para produção de alimento, em virtude de fatos ocorridos com barragens de grande porte construídas para outros usos. Na maior parte do Brasil, a água para irrigação é proveniente de fontes superficiais, principalmente de rios, cuja vazão está diretamente associada à pluviometria da região. Durante a estação seca, a vazão dos rios é reduzida, o que compromete a prática da irrigação e pode favorecer o surgimento de conflitos entre os usuários de recursos hídricos. A importância das pequenas barragens tem aumentado com a intensificação da variabilidade climática. As pequenas barragens são estruturas essenciais para viabilizar a irrigação na maior parte do Brasil. Elas se destinam a regularizar a oferta hídrica para atender a uma ou várias atividades. Armazenam o excesso de água durante a estação chuvosa para suprir o *deficit* hídrico durante a seca, quando a demanda é geralmente maior que a oferta. Não se pode estabelecer as mesmas regras, requerimentos e exigências de grandes barragens, para as pequenas barragens, normalmente feitas de terra e cujo impacto ambiental é consideravelmente menor.

Referências

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. da; BAZAME, H.C. Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. **Agricultural Water Management**, v.216, p.105-112, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.028>. Acesso em: 18 mar. 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. Evaluating evaporation methods for estimating small reservoir water surface evaporation in the Brazilian savannah. **Water**, v.11, n.9, p.1942, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11091942>. Acesso em: 18 mar. 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. da. Impacts of climate change on the evaporation and availability of water in small reservoirs in the Brazilian savannah. **Climatic Change**, v.159, n.2, p.215-232, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02656-y>. Acesso em: 18 mar. 2021.

BRASIL. Lei 4.771 de 15 de Setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p.9529, 16 set. 1965.

BRASIL. Lei 9.433 de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p.470, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei 12.787 de 11 de Janeiro de 2013. Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação; altera o art. 25 da Lei 10.438, de 26 de abril de 2002; revoga as Leis 6.662, de 25 de junho de 1979, 8.657,

de 21 de maio de 1993, e os Decretos-Lei 2.032, de 9 de junho de 1983, e 2.369, de 11 de novembro de 1987; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p.4, 14 jan. 2013.

BRASIL. Resolução CONAMA 302 de 20 de Março de 2002. Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, seção 1, p.67-68, 13 mai. 2002.

BRASIL. Resolução CONAMA 303 de 20 de Março de 2002. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, seção 1, p.68, 13 mai. 2002.

CARVALHO, M.S.B.S.; MARTINS, S.P.R.M.; SOARES, A.M.L.; CHAVES, L.C.G.; OLIVEIRA, F.A.J.; PERINI, D.S.; MENESCAL, R.A.; SCHERER-WARREN, M. Levantamento dos espelhos d'água acima de 20 ha em todo o território brasileiro através de sensoriamento remoto. In: Proceedings of the remote sensing symposium held in Natal, Brazil. [S. l.: s. n.] p.1967-1974, 2009.

DEKKER, T. **Modeling the buriti vermelho catchment** - In search of the best model with low data availability. 2007. Thesis (Master) - TU Delft, Delft, 2007.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **Projeto de aproveitamento hidroagrícola da bacia do rio Preto no Distrito Federal**. Brasília: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 2001.

HUI, F.; XU, B.; HUANG, H.; YU, Q.; GONG, P. Modelling spatial-temporal change of Poyang Lake using multitemporal Landsat imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.20, p.5767-5784, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160802060912>. Acesso em: 18 mar. 2021.

KIMBALL, B.F. On the choice of plotting positions on probability paper. **Journal of the American Statistical Association**, v.55, n.291, p.546-560, 1960.

KLINK, C.A. Policy intervention in the savannas of Brazil: Changes in the land use and effects on conservation. In: CONSORTE-MCCREA, A.; FERRAZ SANTOS, E. **Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives**, p.293-308, 2014.

LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment: A case study in the Upper East Region of Ghana. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, v.30, n.6, **Integrated Water Resource Assessment**, p.448-454, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.06.011>. Acesso em: 18 mar. 2021.

LOPES, A.V.; FREITAS, M.A.S. A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.4, n.1, p.6-28, 2007.

MALDANER, V.I. **Análise dos conflitos do uso da água na bacia hidrográfica do rio Preto no DF**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF, 2003.

MANETA, M.P.; TORRES, M.; WALLENDER, W.W.; VOSTI, S.; KIRBY, M.; BASSOI, L.H.; RODRIGUES, L.N. Water demand and flows in the São Francisco River basin (Brazil) with increased irrigation. **Agricultural Water Management**, v.96, n.8, p.1191-1200, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.008>. Acesso em: 18 mar. 2021.

MASONER, J.R.; STANNARD, D.I. A comparison of methods for estimating open-water evaporation in small wetlands. **Wetlands**, v.30, n.3, p.513-524, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13157-010-0041-y>. Acesso em: 18 mar. 2021.

MENESCAL, R.A.; MIRANDA, A.N.; PITOMBEIRA, E.S. As barragens e as enchentes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: GEDN UFSC, p.932-942, 2004.

PINHATI, F.S.C.; RODRIGUES, L.N.; AIRES DE SOUZA, S. Modelling the impact of on-farm reservoirs on dry season water availability in an agricultural catchment area of the Brazilian savannah. **Agricultural Water Management**, v.241, p.106-296, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106296>. Acesso em: 18 mar. 2021.

RODRIGUES, L.N.; DEKKER, T. Avaliação da taxa de infiltração em pequenas barragens. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.80, p.57-61, 2008.

RODRIGUES, L.N., LIEBE, J. Small reservoirs depth-area-volume relationships in savannah regions of Brazil and Ghana. **Water Resources and Irrigation Management**, v.2, n.1, p.1-10, 2013. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2013307656>. Acesso em: 30 abr. 2021.

RODRIGUES, L.N.; SANO, E.E.; AZEVEDO, J.A.; SILVA, E.M. Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na bacia do Rio Preto. **Revista Espaço e Geografia**, v.10, n.2, p.379-400, 2007.

RODRIGUES, L.N.; SANO, E.E.; STEENHUIS, T.S.; PASSO, D.P. Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian savannah region. **Water Resources Management**, v.26, n.4, p.873-882, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9941-8>. Acesso em: 18 mar. 2021.

ROSENBERRY, D.O.; WINTER, T.C.; BUSO, D.C.; LIKENS, G.E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v.340, n.3-4, p.149-166, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.018>. Acesso em: 18 mar. 2021

SANDERS, L.L. **A manual of field hydrogeology principle**. Hall, USA, v.381, 1998.

WORLD COMMISSION ON DAMS. Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams. [S. l.]: Earthscan, 2000.