

PROPENSÃO AO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

Fernanda Gomes Alves¹ & Rogério Campos²

RESUMO - A perda de potencial de volume acumulável nos reservatórios se dá por meio do assoreamento causado pela sedimentação dos materiais transportados pelas águas que acarretam o processo de erosão do solo da bacia hidrográfica daquele reservatório. No semi-árido brasileiro são intensos os problemas causados pelas deficiências climáticas da região. Na tentativa de minimizar os prejuízos econômicos e sociais desenvolveu-se desde muito tempo políticas governamentais que investem em medidas que promovam o desenvolvimento sócio-econômico da região afetada pelas secas e longos períodos de estiagem, como a construção de reservatórios. Desta forma, o estudo das perdas do volume acumulável destes reservatórios para sedimentos é uma necessidade e dentre os diversos estudos possíveis, uma classificação dos reservatórios como a proposta por Di Silvio, pode proporcionar resultados sobre a propensão dessas estruturas ao processo de assoreamento e à expulsão dos sedimentos. Isto possibilita uma avaliação da necessidade de se adotar medidas corretivas a depender da viabilidade.

ABSTRACT – The losses in the potential volume of reservoirs are done through the silting caused by sedimentation of the material transported by water, which involves the process of soil erosion from the watershed. In the Brazilian semi-arid region the problems caused by the deficiencies in the regional climate are intense. In an attempt to minimize the economic and social damages, the governmental policy is to invest in measures to promote the socioeconomic development of this region affected by droughts as a reservoir-building program. Therefore, the study of volume losses of those reservoirs through sedimentation is a necessity and among the many methodologies available, that by Di Silvio can supply information on the trend of those structures to silting and to sediment sluicing. This makes possible an assessment of the necessity to take reservoir management corrective steps depending on the feasibility.

Palavras-Chave: Erosão, Transporte de Sedimentos, Assoreamento de reservatórios.

¹ Engenheira Civil pela UNIFOR.

² Professor-Titular de Hidráulica do Curso de Engenharia Civil da UNIFOR. Av. Washington Soares, 1321 – Sala J-25, Fortaleza-CE, 60.811-905. Telefone: (85) 3477-3141. Fax: (85) 3477-3061. E-mail: Rogério.Campos@unifor.br

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens gera o processo de assoreamento dos reservatórios formados, por modificar as características hidráulicas do escoamento. A sedimentação das partículas transportadas pelas águas do sistema hídrico que compõe a bacia hidrográfica pode acarretar a redução do volume morto do reservatório e conseqüentemente a sua vida útil, caso esse sedimento alcance o volume útil do reservatório poderá comprometer a vazão regularizada deste e também os demais usos da água reservada.

Considerando que as características da região onde se localizam os reservatórios e suas bacias hidrográficas são dados importantes para o estudo do assoreamento dos mesmos temos o semi-árido brasileiro como uma região de características físicas e sociais próprias como o clima local, vegetação, solo, e índices pluviométricos baixos.

O clima semi-árido conta com altas taxas de insolação que aumenta consideravelmente a evapotranspiração na região, as águas, acumuladas no período de chuva, passam por intensa evaporação no restante do ano. A intensidade de chuva que ocorre num pequeno intervalo de tempo promove uma maior erosão dos solos rasos das bacias hidrográficas, e a vegetação, geralmente de pequeno porte, não contribui muito para evitar o processo de erosão, logo podemos perceber que os depósitos de sedimentos são muito prováveis na região.

A região semi-árida brasileira desde as últimas décadas do império tem sido alvo da política de açudagem pública. Ou seja, a construção de reservatórios de acumulação de água nas principais bacias hidrográficas a fim de mitigar os efeitos das secas. O volume armazenável de água dos reservatórios no estado do Ceará, por exemplo, é em torno de 17 bilhões de m^3 .

No entanto, aquele volume de cerca de 17 bilhões de m^3 foi obtido através da soma dos volumes máximos de projeto dos reservatórios construídos. Ao longo do tempo, este volume vai diminuindo pelo acúmulo de material sedimentar trazido pelos afluentes cuja perda anual não é conhecida, *a priori*. Na prática, o volume real dos reservatórios do estado do Ceará não é conhecido. Para que seja possível saber o volume armazenável atual do sistema de açudagem do estado.

Tendo-se em vista que o conhecimento do volume de sedimentos que se deposita nos reservatórios é um fator determinante para a vida útil do mesmo torna-se fundamental a utilização de estudos, ainda em fase de projeto, que determinem valores previstos para serem utilizados como ferramenta de análise da vida útil e viabilidade do empreendimento. No entanto, para os

reservatórios existentes são necessários estudos que calculem os volumes afluentes de sedimentos, podendo a partir dos resultados obtidos avaliar a necessidade e viabilidade de utilização de medidas corretivas.

Este trabalho aplica o método de classificação de reservatórios proposto por Di Silvio (2001) a alguns açudes do semi-árido a fim de verificar a propensão destas estruturas ao assoreamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de erosão do sedimento

Erosão é o processo de desgaste através do desprendimento e deslocamento de rochas e solos superficiais. As rochas sofrem erosões lentas principalmente devido à rigidez de sua estrutura, quanto aos solos o processo é mais variável e dependem da textura, estrutura e permeabilidade de cada um dos tipos de solo existentes. Os materiais mais soltos podem ser transportados pela água, vento ou atividades humanas sendo, portanto o processo de erosão pode ser causado pela ação de fenômenos naturais ou do ser humano.

Os tipos de erosão são variados de acordo com o seu agente causador entre outros temos erosão por gravidade provocada pelas movimentações de terras devido à ação da gravidade; erosão pluvial provocada por deslizamentos de terras motivadas pelas águas provenientes das chuvas que desagregam as camadas de solos superficiais e as transporta pelo escoamento superficial; erosão eólica provocada pela ação dos ventos que transportam as partículas superficiais mais finas; erosão marinha provocada pela ação das ondas quando se chocam com a costa; erosão química provocada pela temperatura, água, umidade e outras ações que reagem quimicamente com as rochas; erosão hídrica provocada pelo escoamento das águas que carregam partículas do leito e margens dos rios; e erosão por remoção de massa provocada pela ação do homem na retirada de material de determinadas áreas para o desenvolvimento de atividades diversas (Carvalho, 1994).

Para o estudo do assoreamento de reservatórios teremos as chuvas como principal causa natural do processo de erosão. Ocorrendo em grandes quantidades, as chuvas aumentam a infiltração de água no solo mudando a consistência do terreno e provocando o desprendimento de camadas de terras superiores ocasionando deslizamentos e deslocamento de terra.

A intensidade de erosão causada pela chuva está relacionada diretamente com o índice de erodibilidade e representa a energia potencial contida na chuva que se transforma em energia cinética no impacto das gotas de águas com o solo e também no escoamento superficial, provocando a erosão, ou seja, é a capacidade que a chuva tem de causar a erosão do solo.

Os fatores humanos estão mais relacionados à retirada da cobertura vegetal. O tipo de vegetação da região tem grande influência sobre o escoamento superficial e a produção de sedimentos, portanto esses são os principais fatores a serem alterados com a retirada da cobertura vegetal.

2.1.1 Erosão e o semi-árido brasileiro

Estudos realizados na região do semi-árido têm mostrado que uma das características das chuvas é a alta intensidade, ou seja, uma alta taxa de descarga pluvial num pequeno intervalo de tempo. Esse tipo de precipitação influencia diretamente no relevo, sendo as perdas ocasionadas pela erosão, proporcionais ao grau de proteção propiciado pela vegetação local e seu adensamento (Rosa, 2005).

Cardoso *et al.* (1998) relacionando intensidade e duração de chuva, observaram que quanto maior for a intensidade de chuva menor será a sua duração, representando a relação por meio de uma curva hiperbólica. A relação estabelecida influi diretamente na taxa de infiltração e no resultado do impacto das gotas. Com a saturação acelerada do solo, diminui a infiltração de água que passa a acumular-se e escoar pela superfície formando assim a enxurrada que irá conseqüentemente diminuir a energia do impacto da gota na massa de água formada e não mais diretamente no solo. A enxurrada além de transportar o material solto continua agindo no processo de erosão por onde passa carregando o material de fácil desagregação.

Seja para o desenvolvimento de atividades agrárias ou para construções de grandes obras como barragens ou rodovias, o fato é que a retirada da cobertura vegetal aumenta a área superficial de solos frágeis e propensos ao processo de erosão acelerada. Os reservatórios de água secam facilmente devido os altos índices de evaporação, a evapotranspiração potencial aumenta e o balanço, entre a captação e a perda de água, fica cada vez mais negativo. Ou seja, se gasta mais água do que se consegue captar na natureza.

O semi-árido brasileiro é uma região natural de grandes dimensões espaciais que abrange uma grande parte dos estados da região Nordeste, com exceção do estado do Maranhão e parte de Minas Gerais. A região apresenta um clima tropical semi-árido e tem como principais características os baixos e mal distribuídos índices pluviométricos tanto no tempo como no espaço, passando por períodos de secas intensas.

Os solos semi-áridos são, na maioria, rasos e cristalinos o que impossibilita o armazenamento de quantidades mais significativas de água durante o período chuvoso com isso, ressecam rapidamente no período de seca. A cobertura vegetal característica da região são as caatingas. Vegetação adaptada à presença de pouca água e composta por uma vegetação arbóreo-arbustiva de plantas xerófilas e de pequeno porte, em sua grande maioria, com folhas miúdas que caem nos períodos de seca contendo os efeitos da evapotranspiração causado pela intensa insolação que eleva consideravelmente, se comparado a outras regiões brasileiras, os índices médios de evaporação e evapotranspiração, chegando a torno de 3m/ano (Campos, 2007).

Portanto, a região semi-árida é por suas próprias características uma região bastante propensa aos processos de erosão natural. Esse quadro se agrava consideravelmente quando se tem um processo de desmatamento, decorrente de vários séculos, para utilização da madeira e desenvolvimento de práticas agro-pecuárias como ocorre na região, que convive com sérios problemas de desenvolvimento social apresentando indicadores sociais bem inferiores a outras regiões, necessitando de políticas públicas que tratem dos problemas regionais com mais eficiência e proporcionem condições de sobrevivência mais dignas do que as encontradas atualmente.

Num solo de vegetação densa mesmo uma chuva mais forte pode provocar pouca erosão, já que a energia da água que escoar vai se dissipando devido aos obstáculos impostos por caules e raízes. Na região sem a cobertura vegetal, ou com pouca incidência, como ocorre na região semi-árida, esses resultados não são possíveis e a capacidade do escoamento causar a erosão do solo é, portanto bem mais acentuada.

2.2 Transporte de sedimentos

Os sedimentos são os materiais carreados dos solos e rochas das bacias hidrográficas e dos leitos dos rios durante o processo de erosão. São transportados pelas águas das chuvas que escoam para as calhas dos rios, riachos ou outras depressões.

Os rios são os maiores receptores e transportadores das partículas desagregadas e dissolvidas em suas águas, pois as calhas percorrem toda a área da bacia hidrográfica e mesmo pequenos córregos deságuam em rios maiores transportando os sedimentos.

O transporte de sedimentos é um fenômeno natural e principal modificador das paisagens originando as formas geomorfológicas que modelam as superfícies, influenciado, entre outros fatores, pelos processos de erosão, sedimentação e pelas práticas humanas que vem causando transformações mais aceleradas e por vezes prejudiciais.

A natureza está sempre em busca de equilíbrio, a capacidade de transporte de sedimentos de um leito está diretamente relacionado a esse equilíbrio, pois depende diretamente da quantidade de descarga sólida contida no escoamento, reagindo de acordo com as alterações ocorridas (Carvalho 1994).

O rio poderá promover a “agração” ou “degradação” do leito a depender diretamente da quantidade de descarga sólida transportada, quanto maior for essa quantidade maior será a tendência de formação dos depósitos e quanto menos descarga sólida maior a degradação, ou seja, maior é a capacidade de transporte do escoamento (Carvalho 1994).

Quando ocorre uma mudança de regime existirá uma resposta imediata do rio que reage de acordo com as alterações. Na construção de uma barragem ocorre a formação do reservatório e, portanto o barramento do leito que diminui a velocidade e acarreta na formação de grandes depósitos (Carvalho, 1994).

2.2.1 Granulometria do sedimento

A desagregação dos materiais gera partículas dos mais variados tamanhos e esse é um dos principais fatores de caracterização do sedimento transportado, influenciando no processo de deposição, no gasto energético para o transporte, na formação das calhas dos rios e no assoreamento causado nestes e em reservatórios naturais e construído.

As partículas em suspensão estão sujeitas a ação da velocidade da corrente na horizontal e do peso na vertical. No sentido longitudinal do curso d'água, observa-se geralmente uma maior produção e transporte de sedimentos na parte alta da bacia, sendo esses de granulometria maior e transportados pelo leito. À medida que o curso d'água se desenvolve para jusante observa-se que esses materiais vão se fracionando, tornando-se sedimentos de granulometria cada vez menor, sendo que a erosão vai diminuindo e a tendência de sedimentação vai aumentando principalmente nas proximidades das margens, em forma de lama (Carvalho, 1994).

2.3 Assoreamento de Reservatórios

O depósito dos sedimentos é a etapa final de um processo que se iniciou na erosão superficial da bacia hidrográfica, ocorrerá em locais diferenciados de acordo com a granulometria das partículas e empecilhos encontrados.

A sedimentação acarreta prejuízos ambientais e econômicos desde o processo de erosão até o assoreamento de rios e reservatórios. A problemática do assoreamento de reservatórios diz respeito

à redução de sua vida útil devido à deposição dos sedimentos que diminui a capacidade de armazenamento de água do reservatório.

O barramento dos rios para construção de reservatórios provoca alterações nas características hidráulicas do fluxo d'água, aumenta a área molhada e diminui a velocidade média da corrente d'água, fazendo dos reservatórios ambientes inadequados ao transporte de sedimentos e, portanto tornando-os locais muito susceptíveis ao processo de assoreamento, pois com a diminuição da velocidade as partículas em suspensão tendem a depositar-se no fundo dos reservatórios (Bicalho, 2006).

As partículas estão sujeitas à ação de diversas forças que resultarão em comportamentos diferenciados podendo estar em suspensão ou serem levadas ao fundo dos rios e reservatórios, deslizando ou rolando ao longo dos leitos isso ocorre devido a inúmeras variáveis como tamanho, peso, forma das partículas, forma do escoamento, velocidade da corrente, obstáculos existentes ao longo do leito, declividade, forma do canal e outras (Carvalho, 1994).

Assim, quanto mais turbulento estiver o curso do rio maior será as quantidades de sedimentos transportados e também quanto maior for a granulometria mais fácil será a deposição das partículas, em ambientes de águas mais calmas o depósito sedimentar também é favorecido, os materiais mais finos que possuem maior estabilidade vertical apresentam maior resistência ao processo de sedimentação.

2.3.1 Distribuição do sedimento no reservatório

A maneira como ocorre a distribuição do sedimento no reservatório é um fator importante a ser considerado no assoreamento do mesmo.

O nível de água de trabalho do reservatório interfere na compactação do depósito e também na localização da sedimentação. Em reservatórios cuja variação do nível d'água é intensa ocorre uma significativa movimentação do sedimento, quando o nível permanece sempre elevado o depósito tende a ser mais a montante, ocupando o espaço do volume útil, enquanto o baixo nível proporciona maior velocidade no escoamento, levando as partículas que irão depositar-se mais próximo da barragem, alcançando o espaço de volume morto do reservatório (Maia, 2006).

A localização dos sedimentos no reservatório pode originar três tipos de depósitos deferentes: depósito de remanso, deltas e depósito de fundo.

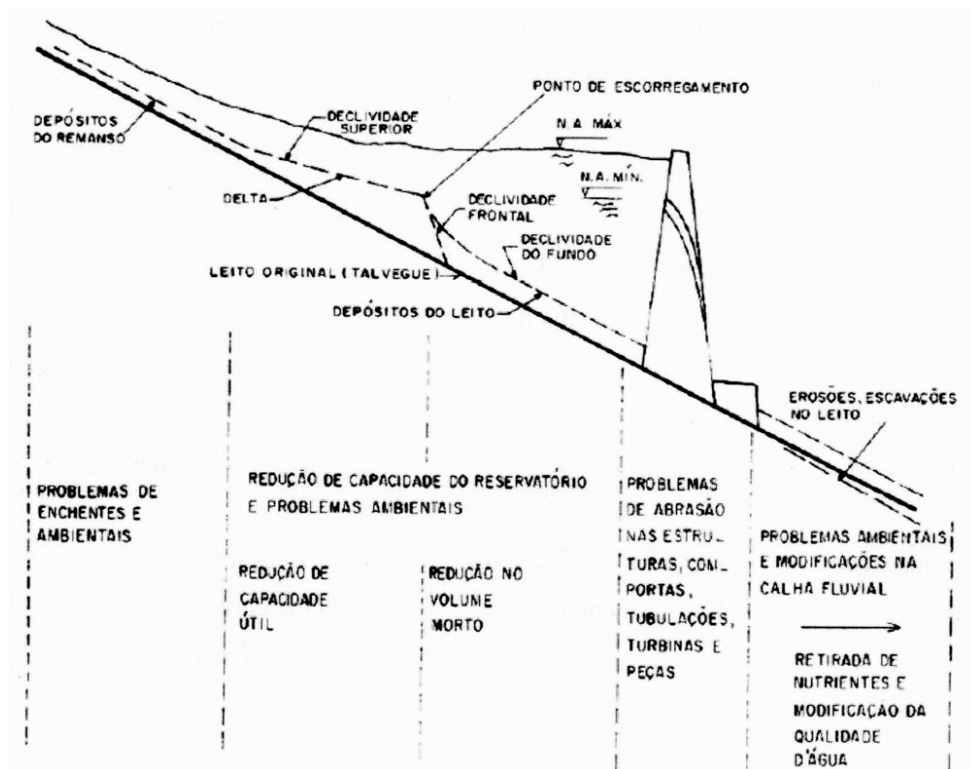


Figura 1 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos (Carvalho, 1994).

O maior volume de sedimentos depositados no reservatório está localizado na origem do mesmo formando os depósitos de remanso, pois o curso d'água ao entrar no reservatório, tem as áreas se seções transversais aumentadas, enquanto as velocidades da corrente diminuem e a capacidade de transporte do fluxo é reduzida rapidamente criando condições para deposição do sedimento, principalmente das partículas mais grossas enquanto o sedimento mais fino adentra ao reservatório. Esse tipo de formação do assoreamento não elimina a interferência no volume útil do reservatório e criam os problemas de enchentes a montante (Carvalho, 1994).

As formações de deltas ocorrem ao longo da entrada do reservatório, os sedimentos de maior granulometria que passam da origem do reservatório, acompanhados de partícula mais finas tendem a se depositar na entrada do reservatório formando os deltas.

As partículas menores que são transportadas em suspensão serão depositadas ao longo do reservatório a depender de sua velocidade de queda. Os sedimentos que alcançam o interior do lago provocam a redução da capacidade útil do reservatório e os que conseguem alcançar a barragem e passar pelo vertedouro e condutos provocam abrasões nas estruturas.

Com a sedimentação a montante a água que sai dos reservatórios possui características diferenciadas, não carregam grandes quantidades de partículas e como já foi citado apresentam uma maior capacidade de erodir as margens e leitos do canal de escoamento à jusante.

Os sedimentos que ficam retidos caracterizam a eficiência de retenção de um reservatório que pode ser obtida a partir de medições sedimentométricas e dependem da capacidade do reservatório, vazão líquida de entrada, idade, forma e operação do reservatório assim como de características do sedimento transportado.

2.3.2 Controle de sedimento

O controle de sedimento afluente ao reservatório pode ocorrer através de medidas preventivas ou corretivas. As medidas preventivas procuram controlar os sedimentos transportados evitando que cheguem ao sistema fluvial e caso alcancem o reservatório impossibilite a formação de depósitos de fundo, enquanto as medidas corretivas objetivam a correção dos efeitos já causados pela sedimentação.

As medidas preventivas são as mais variadas, eficientes, econômicas e possibilitam o aumento da vida útil do reservatório. Como principais medidas preventivas pode-se listar a seleção adequada para construção da barragem, na fase de projeto deve-se prever um volume morto adequado bem como a sua localização, controle de erosão da bacia, controle de afluência e deposição de sedimentos (Carvalho, 1994).

As medidas corretivas são adotadas quando o processo de assoreamento atinge um nível crítico comprometendo substancialmente a operação e utilização do reservatório por falta de previsão, descaso ou recursos para o controle preventivo. Essas medidas são muito dispendiosas e, portanto se justificam apenas quando os prejuízos são mais significativos. A correção dos efeitos do assoreamento serão por meio de remoção do sedimento, alteamento da barragem ou utilização de descarregador de fundo (Carvalho, 1994).

2.4 Classificação de reservatórios do semi-árido brasileiro de acordo com Di Silvio

2.4.1 Prática de açudagem no semi-árido

A região do semi-árido por suas características climáticas, irregularidades pluviométricas, evapotranspiração média de 3000mm/ano e déficit hídrico muito acentuado aliado a uma estrutura de solo caracterizada por um escudo cristalino, no qual a rocha se localiza próximo a superfície dificultando o armazenamento de água subterrânea propicia condições favoráveis à construção de açudes visando o armazenamento e posterior utilização no período de escassez.

No nordeste brasileiro existem grandes, médios e pequenos açudes. Os grandes açudes são construídos por incentivos de políticas públicas de açudagem, são neles que se desenvolvem as

principais atividades de irrigação, pisciculturas e abastecimento de populações da região, são construídos por instituições como o DNOCS, que também são responsáveis pelo manejo de suas águas.

Os pequenos e médios açudes compreendem volumes de 10.000 a 20.000 m³ e representam cerca de 80% dos aproximadamente 70.000 açudes do semi-árido. Esses açudes apresentam variadas formas geométricas devido à falta de planejamento gerando problemas de dimensionamento, não sendo raros açudes que nunca sangraram propiciando e salinização dos corpos d'água que ficam sujeitos a longos períodos de estiagem com elevados índices de evaporação diminuindo não somente a quantidade, mas também a qualidade da água disponível.

2.4.2 Classificação dos reservatórios

Di Silvio (2001) desenvolveu um método para classificação de reservatórios do ponto de vista da possibilidade de expelir os sedimentos afluentes. Apesar de polêmica, a expulsão dos sedimentos afluentes aos reservatórios ou pelo menos, parte deles, é uma possibilidade, especialmente naqueles de pequeno porte. Nestes reservatórios, o tempo de detenção é menor, ou a propagação das cheias que por eles passam é mais rápida, permitindo que a pluma de sedimentos seja expelida pelas estruturas vertentes.

Devido às características climáticas da região semi-árida, os reservatórios têm pouco tempo de vertimento, alguns chegando a passar anos sem verter. A maioria deles possui instalada uma descarga de fundo, as quais têm baixa capacidade de vazão em comparação aos vertedores. A demora para ocorrer um extravasamento em um reservatório leva a longos períodos de detenção das águas afluentes, proporcionando aos sedimentos, mesmo os mais finos, plenas condições de acomodação dentro do lago.

Assim, uma classificação para os reservatórios da região quanto à sua propensão a expelir sedimentos, deve levar em conta esta particularidade. O método proposto por Di Silvio pode servir como uma diretriz para a criação de um método mais adequado ao semi-árido.

3 METODOLOGIA

A Figura 2 é a classificação proposta por Di Silvio (2001) para reservatórios segundo seu porte, afluência de sedimentos e afluência de água. Este gráfico apresenta também uma espécie de diagnóstico para a possibilidade de exclusão dos sedimentos afluentes. O gráfico proposto

correlaciona o volume dos reservatórios dividido pelo volume afluente anual versus o volume dos reservatórios dividido pelo volume afluente anual de sedimentos.

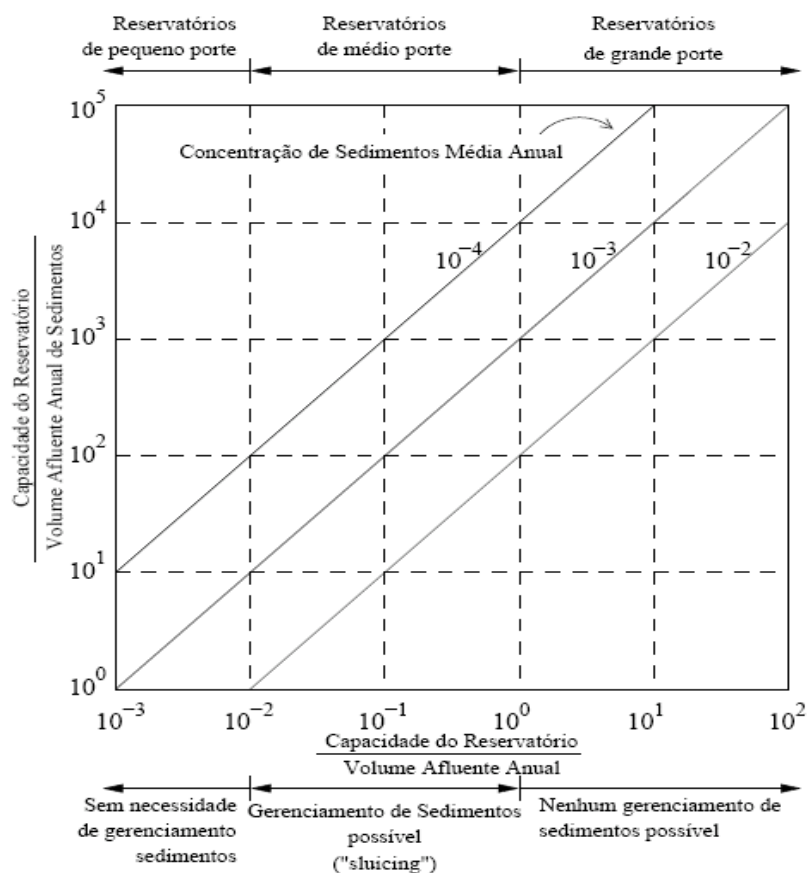


Figura 2 – Classificação de Reservatórios segundo Di Silvio (2001)

4 ESTUDO DE CASO

A região semi-árida, delimitada na figura 3, apresenta características próprias e relevantes para o estudo do potencial de perda de volume acumulável por assoreamentos dos reservatórios locais.

Nos aspectos climatológicos podemos perceber uma elevada média anual da insolação contribuindo para aumentar a evaporação elevando consideravelmente os índices médios de evapotranspiração na região, entretanto é a variação pluviométrica ao longo do tempo e espaço que caracteriza a zona semi-árida.

O semi-árido dispõe de rios irregulares e intermitentes, o volume de água reduz-se lentamente, em um ano hidrológico normal, até o escoamento anular-se. As cheias na grande maioria são rápidas, violentas e com pouco tempo de duração.

As chuvas na região concentram-se em apenas um semestre. Quando aumenta a irregularidade e escassez a população vive as conseqüências do fenômeno da seca que acarretam grandes prejuízos socioeconômicos, destroem plantações e até mesmo a vegetação nativa.

Tendo-se em vista a densidade populacional da região os problemas gerados pela seca ganham dimensões muito relevantes o que tem proporcionado a mobilização das autoridades governamentais no sentido de promover o desenvolvimento regional a partir do investimento nos recursos hídricos locais.

Dentre tantas medidas adotadas a que interessa ao estudo realizado é a intensa política de açudagem desenvolvida por intervenção de órgãos governamentais competentes, construindo-se de pequenas a grandes obras de infra-estrutura hídrica para reservação de água através do barramento dos rios conseguindo assim captar a água das chuvas para utilização durante os demais meses e períodos de estiagem, pretendendo com isso mitigar os danos causados pela seca.

O volume armazenável da região poderia ser obtido através do somatório dos volumes máximos dos reservatórios construídos, no entanto isso não é real, pois o barramento do rio ocasiona alterações no escoamento deste, possibilitando a sedimentação dos materiais transportados o que acarreta ao longo do tempo na diminuição, por vezes significativa, do volume armazenável do reservatório.

Para se ter o conhecimento do volume real dos reservatórios é necessário estudos que identifiquem o volume de sedimento armazenável podendo-se então obter o potencial de perda de volume armazenável dos reservatórios do semi-árido brasileiro.

Foram obtidos resultados do volume de sedimento armazenável de dez açudes da região semi-árida utilizando-se como diretriz o método proposto por Di Silvio (2001).

4.2 Caracterização dos açudes em estudo

Para aplicação da metodologia de classificação de reservatórios proposta por Di Silvio foram escolhidos alguns açudes representativos do semi-árido. Foram escolhidos dez reservatórios nos quatro estados que possuem a maior parte de seus territórios dentro do semi-árido brasileiro. Os dados apresentados sobre os açudes estão disponíveis em literatura na obra “Barragens no Nordeste do Brasil” do DNOCS.

Segue apresentação dos açudes escolhidos com suas características fundamentais.

- Açude Orós: localiza-se no município de Orós no estado do Ceará, barrando o rio Jaguaribe, uma das mais importantes bacias hidrográficas da região. As finalidades de sua construção foram: perenizar o rio Jaguaribe, possibilitar a irrigação no Médio e Baixo Jaguaribe, desenvolvimento de pisciculturas e culturas agrícolas de áreas de montante, turismo e em projeto haveria um aproveitamento do potencial hidrelétrico. O início da construção foi em 1958 e a finalização em 1961.
- Açude Lima Campos: localiza-se no município de Icó no estado do Ceará, barrando o rio São João pertencente ao sistema do rio Jaguaribe. A finalidade de sua construção foi o aproveitamento das várzeas do Iço. O início e finalização da construção foram em 1932.
- Açude Piranhas: localiza-se no município de Cajazeiras no estado da Paraíba, barrando o rio Piranhas que forma a mais importante bacia hidrográfica da região. As finalidades foram: a irrigação de terras a jusante, controle de cheias do rio Piranhas e a piscicultura. O início da obra foi em 1932 e a finalização somente em 1936.
- Açude Banabuiú: localiza-se no município de Banabuiú no estado do Ceará, barrando o rio Banabuiú, que faz parte do sistema hidrográfico do Rio Jaguaribe. As finalidades de sua construção foram: a irrigação do Baixo Jaguaribe, o controle de cheias do rio, piscicultura e o aproveitamento do potencial agrícola das áreas de montante. O início da construção foi em 1952 e a finalização somente em 1966.
- Açude General Sampaio: localiza-se no município de General Sampaio no estado do Ceará, barrando o rio Curu. As finalidades de sua construção foram: a irrigação do Vale do Curu, abastecimento de água da cidade de General Sampaio e o aproveitamento hidrelétrico. O início da construção foi em 1932 e a finalização em 1935.
- Açude Curema-Mãe D'água: é um sistema formado pela junção dos Açudes Curema e Mãe D'água, localiza-se no município de Piancó no estado da Paraíba, barrando os rios Piancó e Aguiar. A finalidade de sua construção foi a regularização do rio Açu. O início da construção foi em 1939 e a finalização em 1942.
- Açude Trairi: localiza-se no município de Tangará no estado do Rio Grande do Norte, barrando o rio Trairi. As finalidades de sua construção foram: o controle das cheias do rio, a piscicultura e o aproveitamento das áreas de montante. Teve início e finalização no ano de 1949.

- Açude Pentecoste: localiza-se no município de Pentecoste no estado do Ceará, barrando o rio Canindé. As finalidades de sua construção foram: o controle das cheias do rio, irrigação a jusante, geração de energia elétrica, pisciculturas e aproveitamento das áreas de montante. O início da obra foi em 1950 e a finalização em 1957.
- Açude Santa Cruz: localiza-se no município de Santa Cruz no estado do Rio Grande do Norte, barrando o rio Trairi. A finalidade de sua construção foi o abastecimento d'água da cidade proporcionando também a irrigação e piscicultura local. O início da obra foi em 1957 e a finalização em 1959.
- Açude Brumado: localiza-se no município de Rio de Contas no estado da Bahia, barrando o rio Brumado. A finalidade de sua construção foi o abastecimento d'água nos períodos de estiagem, ao Projeto de Irrigação do Brumado.

4.3 Cálculo dos parâmetros do método

4.3.1 Cálculo do volume médio afluyente anual, V_{af}

Utilizando a equação racional, equação (1), pela sua simplicidade de aplicação e pela disponibilidade de dados será realizado o cálculo do volume afluyente anual aos reservatórios ou do coeficiente de deflúvio dos reservatórios a depender dos dados obtidos, já que a obra “Barragens no Nordeste do Brasil” do DNOCS não segue o mesmo parâmetro de dados para todas as barragens, algumas descrições das características técnicas apresentam os coeficientes de deflúvio e outras já fornecem o volume afluyente anual da bacia, existem ainda os casos em que nenhum dos dois dados é apresentado ficando, portanto impossível se desenvolver o estudo proposto para os reservatórios.

A equação racional para o cálculo do volume afluyente anual é:

$$V_{af} = CPA \quad (1)$$

onde C é o coeficiente de deflúvio, P é a precipitação média anual sobre a bacia de contribuição em m e A é a área dessa bacia, em m^2 .

4.3.2 Cálculo do volume médio afluyente anual, V_{sa}

Para o cálculo do volume afluyente anual de sedimentos aos reservatórios, V_{sa} , foi utilizada a equação de Miraki (*apud* Garde e Raju, 1985). Esta equação é resultante de ajuste feito por aquele autor a dados de bacias indianas, sub-continente que em geral possui altas taxas de erosão. Desta forma, a Equação de Miraki produz resultados sempre favoráveis à segurança em relação a outras funções para estimativa da erosão. A equação (2) é aquela de Miraki:

$$V_{sa} = 4,169 \times 10^{-5} A^{0,841} P^{0,139} V_{af}^{0,312} \quad (2)$$

onde A é a área da bacia em Km^2 , P a precipitação em cm e V_{af} o volume afluente médio anual em Mm^3 .

4.3.3 Aplicação do método

Para aplicação da metodologia de classificação de reservatórios do ponto de vista da possibilidade de expelir sedimentos proposta por Di Silvio foram escolhidos 10 (dez) reservatórios, os quais constam da Tabela 1. Esta tabela mostra os dados necessários para realização dos cálculos dos parâmetros requisitados pelo método para classificação dos reservatórios em estudo e também os resultados dos cálculos do coeficiente de deflúvio para os reservatórios que não disponibilizam o valor, utilizando a equação do volume afluente anual, equação (1), sendo este um dado obtido na consulta literária. A dimensão dos reservatórios escolhidos variou de $5,16 Mm^3$ a $2.100 Mm^3$.

Tabela 1 - Dados dos Reservatórios

Açude	Estado	P (m)	C (%)	A (m^2)	Volume Afluente Anual (m^3)	Volume Acumulável (Mm^3)
Orós	CE	0,86	7,00	2500000000	1505000000,00	2100,00
Lima Campos	CE	0,80	14,71	340000000	40000000,00	66,382
Piranhas	PB	0,89	36,89	1124000000	369000000,00	255,00
Banabuiú	CE	0,7917	7,34	1350000000	784097100,00	1700,00
General Sampaio	CE	0,90	8,00	1720000000	123840000,00	322,20
Curema-Mãe D'água	PB	0,86	10,75	684000000	632100000,00	720,00
Trairi	RN	0,47	5,72	1580000000	42476720,00	35,23
Pentecostes	CE	0,6819	7,77	284000000	150520000,00	395,638
Santa Cruz	RN	0,47	5,73	300000000	8079300,00	5,15875
Brumado	BA	0,653	38,82	256000000	64900000,00	105,00

Fonte: Barragens do Nordeste do Brasil, DNOCS, 1990.

A Tabela 2 traz os resultados dos cálculos dos parâmetros: volumes afluentes anuais e volumes afluentes anuais de sedimentos aos reservatórios de acordo com a metodologia explicada anteriormente.

O volume afluente anual pode ser calculado com a equação (1) ou dado obtido na consulta literária como foi mencionado anteriormente, o volume afluente anual de sedimentos é obtido a partir da equação (2), segundo Miraki, utilizando os dados da Tabela 1.

Tabela 2 – Cálculos do V_{af} e do V_{sa} de acordo com as equações (1) e (2)

Açude	A (km ²)	P (cm)	Volume Afluente Anual (Mm ³)	Volume Afluente Anual de Sedimentos (Mm ³)
Orós	25000	86,00	1505,00	3,79303
Lima Campos	340	80,00	40,00	0,03261
Piranhas	1124	89,00	369,00	0,18097
Banabuiú	13500	79,17	784,10	1,82216
General Sampaio	1720	90,00	123,84	0,18438
Curema-Mãe D'água	6840	86,00	632,10	0,97287
Trairi	1580	47,00	42,48	0,11233
Pentecostes	2840	68,19	150,52	0,28745
Santa Cruz	300	47,00	8,08	0,01655
Brumado	256	65,30	64,90	0,02904

A Tabela 3 traz os resultados dos cálculos da relação entre capacidade dos reservatórios e volumes afluentes anuais das descargas líquidas e sólidas aos reservatórios. Esta relação é aplicada ao gráfico do método de Di Silvio para a obtenção da classificação dos reservatórios em estudo.

Tabela 3 – Relação C/V_{af} e C/V_{sa}

Açude	Capacidade (Mm ³)	Volume Afluente Anual (Mm ³)	Volume Afluente Anual de Sedimentos (Mm ³)	Capacidade/ Volume Afluente Anual	Capacidade/ Volume Afluente anual de Sedimentos
Orós	2100,00	1505,00	3,79303	1,3953	553,6471
Lima Campos	66,382	40,00	0,03261	1,6596	2035,6332
Piranhas	255,00	369,00	0,18097	0,6911	1409,0733
Banabuiú	1700,00	784,10	1,82216	2,1681	932,9587
General Sampaio	322,20	123,84	0,18438	2,6017	1747,4780
Curema-Mãe D'água	720,00	632,10	0,97287	1,1391	740,0783
Trairi	35,23	42,48	0,11233	0,8293	313,6295
Pentecostes	395,638	150,52	0,28745	2,6285	1376,3715
Santa Cruz	5,15875	8,08	0,01655	0,6385	311,7069
Brumado	105,00	64,90	0,02904	1,6179	3615,7025

5 RESULTADOS

A partir dos valores apresentados no estudo de caso, obtidos através dos cálculos dos parâmetros, foi possível o desenvolvimento de um gráfico de posições dos reservatórios estudados, este foi usado para comparação com o método proposto em estudo.

A Figura 4 mostra o gráfico da posição dos reservatórios estudados de acordo com o gráfico proposto pelo método de Di Silvio.

Os resultados obtidos a partir do método de Di Silvio para classificação dos reservatórios estão na Tabela 4. Dos dez reservatórios analisados, sete foram classificados como sendo de grande porte e três como de médio porte.

Ainda de acordo com o método, os reservatórios tiveram suas propensões à expulsão de sedimentos classificados como “nenhum gerenciamento possível” e “gerenciamento possível” respectivamente a sua classificação de porte.

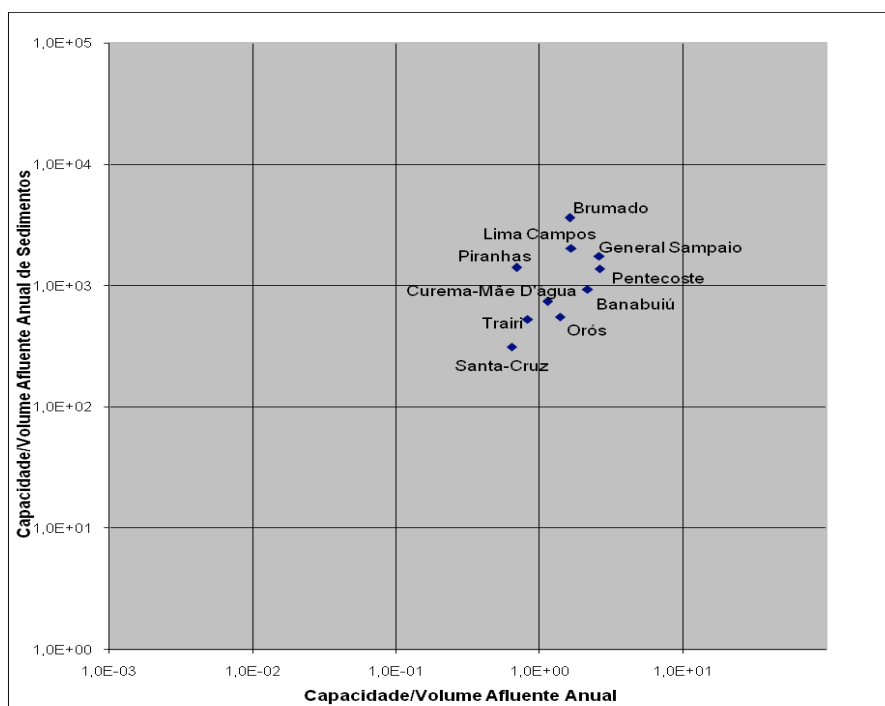


Figura 4 – Posição dos reservatórios avaliados no gráfico de Di Silvio (2001).

Tabela 4 – Classificação dos reservatórios de acordo com o método de Di Silvio.

<u>Acude</u>	<u>Classificação</u>	<u>Propensão a expulsão de sedimentos</u>
Orós	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível
Lima Campos	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível
Piranhas	Reservatório de Médio Porte	Gerenciamento de Sedimentos Possível
Banabuiú	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível
General Sampaio	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível
Curema-Mãe D'água	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível
Trairi	Reservatório de Médio Porte	Gerenciamento de Sedimentos Possível
Pentecostes	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível
Santa Cruz	Reservatório de Médio Porte	Gerenciamento de Sedimentos Possível
Brumado	Reservatório de Grande Porte	Nenhum Gerenciamento de Sedimentos Possível

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia adotada apresenta algumas distorções ao ser aplicada a alguns reservatórios do semi-árido brasileiro como, por exemplo, o reservatório de Santa Cruz, com pouco mais de 5 milhões de m³ de volume máximo acumulável foi classificado como um reservatório de médio porte e ainda o reservatório de Piranhas que tem um volume acumulável quase 4 vezes maior que o reservatório de Lima Campos tendo sido o primeiro classificado como médio porte e o segundo como grande porte.

Estas distorções se justificam principalmente devido aos baixos valores para os deflúvios anuais em algumas localidades e valores mais significativos em outras, isso ocorre devido a má distribuição das chuvas no semi-árido.

A tomar como diretriz no dimensionamento de reservatórios o método de Di Silvio, a região semi-árida brasileira teria apenas mini-açudes. No entanto, cabe ressaltar que o método apresenta um diagnóstico bastante verossímil quando se considera o aspecto do assoreamento de reservatórios e suas capacidades de expelirem sedimentos afluentes.

Recomenda-se, apesar de possuir uma eficácia possivelmente baixa, as seguintes regras de operação para os reservatórios do semi-árido tendo em vista possibilitar (gerenciar) a expulsão dos sedimentos afluentes:

1. Para os reservatórios que possuem estruturas de descarga de fundo ou válvula dispersora cônica (galeria), abrir ao máximo estas galerias quando houver “sangria”.
2. Ao cessar a “sangria”, retornar à galeria a vazão de regularização.

O objetivo do item 1 das recomendações acima é fazer com que a “sangria” dos reservatórios seja feita ao máximo pelas suas galerias a fim de proporcionar a expulsão (“sluicing”) dos sedimentos afluentes que porventura atinjam o pé da barragem. A expulsão dos sedimentos afluentes por galerias é mais eficiente que pelos vertedores devido à localização mais baixa daquelas estruturas em relação a estas.

A adoção da recomendação 1 não prejudica em absoluto a acumulação da água nos reservatórios uma vez que ela somente será posta em prática se estes estiverem em processo de vertimento. Além da vantagem de proporcionar a expulsão de sedimentos, esta medida vai permitir que haja uma renovação das águas mais profundas dos reservatórios as quais são em geral ricas em matéria orgânica. Isto ocorre devido aos longos períodos de armazenamento que estas águas estão submetidas na região semi-árida devido aos intermitentes deflúvios e períodos de “sangria”.

BIBLIOGRAFIA

- Araújo, J. A. A. (coord.), 1990, *Barragens no Nordeste do Brasil; experiência do DNOCS em barragens na região semi-árida.*, 2^a ed., DNOCS, Fortaleza – CE.
- Bicalho, C. C., 2006, *Estudo de transporte de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Descoberto*, Dissertação de mestrado, UnB, Brasília – DF.
- Campos, R., 2007, “*Considerações sobre Meia-vida de um Reservatório no Semi-árido Brasileiro*”, I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, ABRH, Cuiabá – MS.
- Cardoso, C. O., Ullmann, M. N., e Bertol, I., 1998, *Análise de chuvas intensas a partir da desagregação as chuvas diárias de Lages e Campos Novos (SC)*, R. Bras. de Ciências do Solo, (22): 131-140.
- Carvalho, N. O., 1994, *Hidrossedimentologia prática*, CPRM/Eletróbrás, Rio de Janeiro – RJ.

- Di Silvio, G., 2001, *Basic Classification of Reservoirs According to Relevant Sedimentation Processes*, XXIX IAHR Congress, Anais, Pequim (disponível em: http://www.iahr.org/e-library/beijing_proceedings/HTML/homepage.html (consulta em 09/06/2009)).
- Garde, R. J., Raju, K. G. R., 1985, *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, John Wiley and Sons, New York.
- Maia, A. G., 2006, *As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens*, Tese de doutorado, USP, São Carlos – SP.
- Rosa, P. R., 2005, *A relação erosão regressiva e assoreamento no fundo do vale: o caso do açude Namorado em São João do Cariri*, Dissertação de mestrado, UFPB, Areias – PB.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida durante a realização deste trabalho.