

EIXO 3: INTERVENÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA (URBANO-AMBIENTAL)

As intervenções sobre a bacia hidrográfica devem ser avaliadas a partir de critérios urbano ambiental, cuja perspectiva é de atuar na causa das inundações, de modo a reduzir as consequências sobre as linhas de água e nas zonas marginais.

Assim, recorre-se a avaliação de quatro dimensões que sejam associadas ao controle de sedimentos, da permeabilidade, de questões urbanísticas e ao risco hidráulico das inundações.

Alinhando as perspectivas de Lima et al., (2024); Enu et al., (2025), a partir da bacia hidrográfica, pode-se proporcionar melhorias no controle da produção de sedimentos, da qualidade da água e da biota aquática, bem como da gestão sustentável das inundações.

Para tanto, recorre-se a estimativa da produção de sedimentos pelo método (R)USLE (I_{PS}) (Lisboa et al., 2019), do índice de permeabilidade (I_{PM}) (Veról et al., 2019), do zoneamento urbano de uso e ocupação do solo (I_{ZU}), e da redução do risco hidráulico (I_{RH}) (Veról et al., 2019).

Estas condições foram associadas a critérios, que serão avaliados de forma pondera, de modo a constituir as prioridades de intervenção urbano e ambiental, sendo expresso pelo índice:

$$IPI_{(UA)} = I_{PS}w_{PS} + I_{PM}w_{PM} + I_{ZU}w_{ZU} + I_{RH}w_{RH} \quad (1)$$

Onde I_{PS} e w_{PS} são respectivamente o indicador e peso que refere sobre a produção de sedimentos. O termo I_{PM} e w_{PM} avalia e pondera permeabilidade na bacia hidrográfica. O componente avalia (I_{ZU}) e pondera (w_{ZU}) o zoneamento urbano de uso e ocupação do solo, bem como I_{RH} e w_{RH} avalia e pondera o risco hidráulico, todos como critério para priorizar intervenções na bacia hidrográfica.

Assim, do ponto de vista urbano e ambiental, assumiu-se que a intervenção na bacia hidrográfica deve considerar critérios que se possa priorizar ações para gerir e mitigar impactos das inundações urbanas em quatro classes: Imediata, corretiva, preditiva e preventiva, descritas pela **Tabela 1**.

As referidas ações consideram implementar, elaborar e/ou revisar planos de regularização fundiária, de uso e ocupação do solo e de controle de sedimentos, bem como propor ou revisar (caso já esteja regulamentado) taxas de drenagem para habitações e lotes que ocupem a zona marginal ou toda a bacia hidrográfica (e.g. Lisboa et al., 2012).

Tabela 1. Enquadramento e caracterização do grau de prioridade de intervenção urbana-ambiental.

Intervenção	Necessidade de ações correspondente a prioridade de intervenções urbanas e ambientais (na bacia hidrográfica)
Imediata $1 \leq IPI_{(T)} \leq 0,71$ 	Implementação ou revisão (caso existente) de plano de regularização fundiária (que inclua lotes irregulares) e de urbanização que considere a promoção de áreas verdes, lazer e completo mobiliário urbano. Implementação ou revisão (caso existente) de plano de uso e ocupação do solo, adequando parâmetros urbanísticos (coeficiente de aproveitamento-CA, e taxa de ocupação-TO) e aumentando o percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam lotes que ocupam zonas marginais à linha de água. Implementação ou revisão (caso existente) do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis e no processo de urbanização com proposição de intervenções estruturais (bacias de detenção). Proposição de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam a zona marginal à linha de água.
Corretiva $0,7 \leq IPI_{(T)} \leq 0,5$ 	Elaboração ou revisão (caso já existente) de plano de regularização fundiária (que inclua lotes irregulares) e de urbanização, que considere a promoção de áreas verdes, lazer e completo mobiliário urbano. Revisão no plano de uso e ocupação do solo revisando parâmetros urbanísticos (CA e TO), e fiscalização do cumprimento quanto do percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam toda a zona marginal. Elaboração ou revisão (caso já existente) do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis e no processo de urbanização, com proposição de intervenções estruturais (bacias de detenção) e não-estruturais (aumento da área verde em toda a bacia e proteção das margens das linhas de água com vegetação ripária). Proposição de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam toda a zona marginal à linha de água.
Preditiva $0,51 \leq IPI_{(T)} \leq 0,3$ 	Elaboração ou revisão (caso já existente) de plano de regularização fundiária (que inclua lotes irregulares) e de urbanização, que considere aumento de áreas verdes, lazer e completo mobiliário urbano. Revisão no plano de uso e ocupação do solo revisando parâmetros urbanísticos (CA e TO) e fiscalizar o cumprimento quanto do percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica. Revisão do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis, com proposição de intervenções não-estruturais (aumento da área verde em toda a bacia hidrográfica). Proposição de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica.
Preventiva $0,31 \leq IPI_{(T)} \leq 0$ 	Revisão de plano de urbanização que considere manutenção de áreas verdes, lazer e revitalização do mobiliário urbano. Revisão do plano de uso e ocupação do solo, mantendo parâmetros urbanísticos (CA e TO), do percentual de áreas permeáveis de lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica. Revisão do plano de controle de sedimentos que possam atuar sobre obras civis, com proposição de intervenções não-estruturais (aumento da proteção das margens das linhas de água com vegetação ripária). Revisão de taxa de drenagem para habitações e lotes que ocupam toda a bacia hidrográfica.

Assume-se que, ao implementar estas ações pode-se gerir as causas das inundações e da contaminação dos cursos de água, pela regulação da quantidade e qualidade da água e dos sedimentos na bacia hidrográfica sobre a linha de água (Tucci e Genz, 1995; Morelli e Barbassa, 2009). Ainda que para tal regulação alguns parâmetros devam ser definidos, mapear a estimativa da produção de sedimentos, permeabilidade, zoneamento urbano e do risco hidráulico de inundações na bacia hidrográfica são critérios suficientes para mapear a prioridade de intervenção urbana e ambiental.

PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A concepção da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (Wischmeier e Smith, 1978) e da versão revista [(R)EUPS] proposta por Renard et al., (1997), foram concebidas para realizar a estimativa da perda anual média de solo (A), por um período em bacias hidrográficas, cuja classificação dos graus estão definidos em Irvem et al., (2007). Ambas são expressas por formulação que conjuga seis fatores:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

Onde “ R ” é o fator energético de chuvas ($MJha^{-1}mmh^{-1}$); “ K ” está relacionado a erodibilidade do solo ($thMJ^{-1}mm^{-1}$), “ LS ” é o fator fisiográfico, “ C ” é relativo uso e manejo do solo, e “ P ” é o fator de prática conservacionistas. Os fatores “ LS ”, “ C e “ P ” são adimensionais, obtidos pela razão entre perdas de solo num local específico e perdas de solo na unidade EUPS (i.e. 22,1 m de comprimento, com 9% inclinação, sem vegetação, com áreas de cultivo ao longo do declive).

Contudo, “ A ” não considera a deposição do solo. Assim, para estimar essa deposição consideram-se os sedimentos entregues nas linhas de água, ou seja, a produção de sedimentos (I_{PS}), função do coeficiente de produção de sedimentos (CPS) a partir de:

$$I_{PS} = A \cdot CPS \quad (3)$$

Fu et al., (2005) referiu que o CPS de bacias hidrográficas é condicionado por fatores geomorfológicos, hidrológicos, ambientais e associados à própria bacia, quantificado pela seguinte equação:

$$CPS = a(A_d)^{-b} \quad (4)$$

Onde “ A_d ” é a área de drenagem da bacia. E, “ a ” e “ b ” são coeficientes aferidos por Vanoni (1975); Boyce (1975); USDA (1979). Assim, I_{PS} está condicionado pelas estimativas de variáveis que compõem os fatores do modelo (R)EUPS.

O comprimento da encosta (L) e declividade média do terreno (S), e o fator de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas (P) se apresentam com forte variabilidade espaço-temporal (Lisboa et al., 2017).

O comprimento “ L ” pode ser obtido conforme Paiva et al., (1995) a partir da quarta parte da largura do retângulo equivalente (Le), uma vez que a parcela é substituída pela bacia hidrográfica, em que a largura de “ Le ” é expressa por:

$$L = Le = \frac{k_c \sqrt{A_b}}{1,128} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Onde “ A_b ” é a área da bacia (m^2); e “ k_c ” é o coeficiente de compacidade obtido por:

$$k_c = 0,282 \cdot \frac{P_e}{\sqrt{A_b}} \quad (6)$$

Em que P_e é o perímetro da bacia, expressa em metros (m). A declividade pode ser obtida pela equação proposta por Renard et al., (1997), função do ângulo de declive de cada célula (θ) igual a:

$$S = 10,8 \cdot \operatorname{sen}\theta + 0,03 \rightarrow \text{declividade} < 9\% \quad (7)$$

A conjunção dessas duas variáveis produz o fator fisiográfico (LS) estimado por Wischmeier e Smith (1978):

$$LS = \left(\frac{L}{22,1} \right)^m \cdot (0,065 + 0,0454 \cdot S + 0,0065 \cdot S^2) \quad (8)$$

Em que “ m ” é o expoente declive-comprimento que, de acordo com Mills et al., (1985) pode assumir valor em função da declividade iguais a: 0,2 ($S < 1\%$), 0,3 ($1 > S < 3\%$), 0,4 ($3 < S < 5\%$) e 0,5 ($S > 5\%$).

O fator “ C ” foi conceituado por Wischmeier e Smith (1978) como a relação esperada entre: perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes do terreno mantido continuamente descoberto e cultivado.

Por sua vez, o fator “ P ” representa a razão entre a perda de solo que ocorre em dada prática conservacionista e aquela que ocorre para cultivos no sentido do declive máximo do terreno (plantio morro abaixo). Portanto, esse fator é um ponderador de “ C ” em situações especiais de uso de manejo do solo.

Esses fatores quando analisados individualmente buscam a interpretação mais adequada da produção agrícola conservacionista. No entanto, Stein et al., (1987) analisaram “ C ” e “ P ” conjuntamente estabelecendo valores em função de diferentes grupos e categorias de vegetação. Esses autores concluíram que os referidos fatores possuem forte correlação entre si de tal maneira que, não se pode analisá-los individualmente.

A perda anual de solo em uma bacia é influenciada, quer pelo total da precipitação do mês considerado (P_t), quer por precipitação média anual (P_{ma}), cujo produto final de ambas as considerações resulta no fator “ R ”. Kim et al., (2005) considerou P_{ma} para determinar “ R ” em países de clima tropical, expresso por:

$$R = 587,8 - 1,219xP_{ma} + 0,004105xP_{ma}^2 \quad (9)$$

A conjunção das variáveis relacionadas à morfologia e química produz termos dependentes, nomeadamente “M” e “r”, componentes da equação (10) que quantifica o fator “K”. Essa equação é resultado do trabalho de Levy (1995) que, baseado na estimativa indireta pelo “Nomograma de Wischmeier” formulou:

$$K = 7,5 \cdot 10^{-6} \cdot M + 44,8 \cdot 10^{-4} \cdot p - 6,3 \cdot 10^{-2} \cdot DMP + 10,4 \cdot 10^{-3} \cdot r \quad (10)$$

O valor de “M” é obtido a partir de valores granulométricos, pela soma de % de silte e % de areia fina, multiplicados pela soma de % de silte, % de areia fina e % de areia grossa. O termo “r” é referente ao produto do % matéria orgânica e % areia grossa.

O termo “p”, obtido pelo referido “Nomograma”, é relacionado por cinco classes de permeabilidade: 1) rápida; 2) moderada a rápida; 3) moderada; 4) moderada a lenta; 5) lenta; 6) muito lenta. O termo *DMP* é obtido pela equação (11), para partículas < 2 mm:

$$DMP = \sum C_i \cdot P_i \quad (11)$$

Em que C_i é referente ao centro de cada classe textual expresso em mm, obtido por meio de uma escala $\phi(phi)$ que pode ser consultada em Zaroni et al., (2006), no qual o “DMP” é igual a 0,65 (areia grossa), 0,150 (areia fina), 0,0117 (silt) e 0,00024 (argila). O termo P_i é relacionado a proporção da classe textual (g/g).

PERMEABILIDADE DA BACIA HIDROGRÁFICA

Veról (2013) referiu que, os efeitos da impermeabilização do solo na bacia hidrográfica podem ser avaliados pela relação entre a área permeável da bacia (A_p) e sua área total (A_{total}).

$$I_{PM} = \frac{A_p}{A_{total}} \quad (12)$$

Assim, quanto mais impermeável estiver a bacia, menor é a possibilidade de favorecimento da infiltração, havendo correspondente o aumento na parcela do escoamento superficial. Nesse caso, o indicador será pior quando se aproximar de zero “0”.

E, quanto maior for a possibilidade de favorecer a infiltração na bacia, maiores o indicador se aproxima da unidade “1”. Entretanto, assumindo que esta proposição metodológica adota a escala entre “0” e “1”, de maneira diferente do que foi proposto por Veról (2013), o referido indicador será aferido em conformidade ao coeficiente “run-off”.

ZONEAMENTO URBANO

Este critério está relacionado a avaliação de instrumentos urbanísticos, como o coeficiente de aproveitamento (CA) e a), taxa de permeabilização (TP) e ocupação do solo de lotes que integram a bacia hidrográfica. Importa ressaltar que o CA é a relação entre a área total da edificação e área do lote. Baseado nestes parâmetros (TO). Assim, baseado nestes parâmetros, deve-se avaliar cada caracterização, objetivos e diretrizes do zoneamento urbano de cidades.

Deste modo, em geral, assume-se que, quanto maior for o valor de CA, menor será o impacto das chuvas sobre o sistema de drenagem pluvial, posto que, há um proporcional aumento da área com potencial de ser construída.

Ainda que zoneamentos urbanos das cidades brasileiras considerem CA mínimo e básico, adota-se o valor de CA máximo ($CA_{máx}$) para avaliar o efeito deste parâmetro sobre intervenções na bacia hidrográfica, nomeadamente quanto a regulação do ciclo hidrológico, bem como da purificação da água e degradação de contaminantes (e.g., Naumann et al., 2018; Tóth et al., 2022). Assim, assumiu-se a seguinte definição (**Tabela 1**).

Tabela 1. Classe de renda e índice renda para aferir danos socioeconômicos das inundações.

CA_{máx}	I_{zu}	Caracterização
> 3,0	0,0 a 0,2	Potencial altamente favorável a permeabilização da área
> 2,5 a ≤ 3,0	0,2 a 0,4	Potencial favorável a permeabilização da área
> 1,5 a ≤ 2,5	0,4 a 0,6	Potencial moderadamente desfavorável a permeabilização da área
≥ 1,0 a ≤ 1,5	0,6 a 0,8	Potencial desfavorável a permeabilização da área
< 1,0	0,8 a 1,0	Potencial altamente desfavorável a permeabilização da área

Portanto, o indicador I_{zu} caracteriza o potencial de impermeabilização de lotes que integram a área da bacia hidrográfica. Deste modo, quanto maior o $CA_{máx}$ mais potencialmente favorável a área do terreno a permeabilização, em face a área total da edificação.

RISCO HIDRÁULICO DE INUNDAÇÕES

O conceito de risco hidráulico corresponde ao(s) dano(s) causado(s) por uma possível inundaçāo (CIRF, 2006). Como proposto por Verol (2013), o índice de risco hidráulico, tem conotação de “perigo”, ou seja, se refere a condição intrínseca do próprio alagamento, sem avaliar direta ou especificamente as consequências, mas considera apenas alagamentos nas áreas especificadas de ocupação urbana, podendo haver danos associados.

Portanto, em geral, o referido indicador avaliará o grau de alagamento da bacia hidrográfica urbanizada, ao considerar o volume de alagamento no pico da cheia em relação ao volume total precipitado, sendo expresso por:

$$I_{RH} = 1 - \frac{V_a}{V_t} \quad (13)$$

Em que o termo “ V_t ” é o volume total da precipitação, calculado através do total precipitado, da área e do coeficiente de escoamento. E o termo “ V_a ” se refere ao volume de alagamento total na bacia no momento máximo do pico da cheia, expresso pela equação (14).

$$V_a = Alag_{(máx)} \times A_{arm} \quad (14)$$

Onde $Alag_{(máx)}$ é o alagamento máximo (nível de água no pico da cheia), e A_{armaz} se refere a área de armazenagem total na bacia. Assim, este critério considera a capacidade de drenagem da bacia hidrográfica, i.e., de não alagamento, diante de um evento de precipitação.

A atribuição da importância relativa dos critérios que compõem o $IPI_{(UA)}$ foi efetuada considerando atender os ODS, da ONU, nomeadamente quanto a “vida na água” e “cidades e comunidades sustentáveis”.

Neste contexto, ainda que os rios urbanos apresentem menor magnitude hídrica quando comparado aos oceanos e mares, em termos de volume e vazão, mas que, entretanto, possam estar interconectados, é imprescindível conservar e utilizar de forma sustentável estes recursos hídricos e seus ecossistemas, pelo que se alinha ao que refere a ODS nº 14.

Assim, os critérios que referem sobre a produção de sedimentos, seguido da permeabilidade e zoneamento urbano, do ponto de visto sobre o coeficiente de aproveitamento do solo, além de atuarem na regulação do ciclo hidrológico, podem promover a qualidade da água e da biota aquática dos canais fluviais.

Entretanto, considerando a apenas a perspectiva de tornar as cidades e comunidades mais seguras, resilientes e sustentáveis frente aos eventos de inundações urbanas, no âmbito de se atingir o ODS nº 11, pondera-se a importância da produção de sedimentos, que podem assorear canais fluviais, e risco hidráulico.