

MODELAGEM HIDROLÓGICA E TÉCNICAS DE
GEOPROCESSAMENTO NA ESTIMATIVA DA IMPERMEABILIZAÇÃO
DO SOLO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO ANICUNS - GOIÂNIA (GO)

*HYDROLOGIC MODELING AND GIS TECHNIQUES TO ESTIMATE THE
SOIL IMPERMEABILIZATION AND THE SURFACE RUNOFF IN THE
HYDROGRAPHIC BASIN OF ANICUNS RIVER – GOIANIA (GO)*

*EL MODELO HIDROLÓGICO Y LAS TÉCNICAS DE SIG PARA
ESTIMARSE LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO Y LA
ESCOARENTÍA SUPERFICIAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL
RÍO ANICUNS – GOIANIA (GO)*

Fabrizia Gioppo Nunes

Doutora em Geologia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná- UFPR
Profa. do Instituto de Estudos Socioambientais – IESA/UFG.
Campus Samambaia Caixa Postal 131.
Goiânia – GO
E-mail: fabrizia.iesa.ufg@gmail.com

Resumo

O presente trabalho trata da avaliação da impermeabilização do solo urbano da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, que engloba algumas das principais sub-bacias urbanizadas do município de Goiânia. A partir de uma série histórica temporal de chuvas máximas diárias esperadas para a bacia hidrográfica do Anicuns, foi aplicado com o auxílio de técnicas de geoprocessamento o Modelo Hidrológico *Curve Number*, que é um método bem conhecido e amplamente utilizado para estimar o escoamento superficial. O método *Curve Number* calcula o coeficiente de escoamento superficial considerando os diversos percentuais de impermeabilização da cobertura superficial do terreno e as características físicas e de umidade antecedente, dos grupos hidrológicos de solos encontrados em uma bacia hidrográfica. Para estimativa dos parâmetros hidrológicos foram utilizadas diversas cartas temáticas elaboradas em meio digitais como: carta de grupo hidrológico de solos, carta de declividade e carta de coberturas superficiais do terreno. Todos os parâmetros hidrológicos considerados foram analisados em conjunto e integrados em ambiente SIG, tendo como resultado final a quantificação e o mapeamento da capacidade de armazenamento do terreno e dos índices de escoamento superficial.

Palavras-chave: escoamento superficial, modelo hidrológico, impermeabilização do solo.

Abstract

This current work deals with the evaluation of urban soil impermeabilization of the Anicuns River basin, which includes some of the most urbanized sub-basins in the municipality of Goiania. Based on a series of expected maximum daily rainfall for the basin Anicuns, it was applied - with the aid of GIS techniques - the Hydrological Model Curve Number, which is a well-known method widely used to estimate a surface runoff. The Curve Number method calculates the coefficient of surface runoff with basis on various percentages of impermeabilization of the terrain's surface cover and of the physical characteristics and antecedent humidity in hydrologic soil groups found in the basin. For an estimation of hydrological parameters, it was used several thematic digitally created maps, such as: a map of hydrologic soil group, a map of terrain slope and a map of land surface cover. All hydrologic parameters were taken into account and were analyzed as a set and integrated in GIS environment, as the means to achieve as a result the quantification and the mapping of soil's storage capacity as well as the rates of surface runoff.

Keywords: surface runoff, hydrologic model, mapping, impermeabilization.

Resumen

Este artículo hace la evaluación de la impermeabilización del suelo urbano de la cuenca del río Anicuns, que incluye algunas de las principales sub-cuencas urbanizadas del municipio de Goiania. Con una serie histórica temporal de precipitación máxima diaria para la cuenca del río Anicuns, se ha aplicado - con la ayuda de técnicas del SIG - el modelo hidrológico de *Curve Number*, que es un método bien conocido y ampliamente utilizado para estimar la escorrentía superficial. Con el método *Curve Number* se calcula el coeficiente de escorrentía de los diferentes porcentajes de impermeabilización de la cubierta de la superficie del terreno y de las características físicas y la humedad precedente en los grupos hidrológicos de suelos en la cuenca. Para una estimativa de los parámetros hidrológicos se utilizaron varios mapas temáticos creados digitalmente, por ejemplo: mapa de grupo de suelo hidrológico, mapa de declividad del terreno y el mapa de las cubiertas superficiales del terreno. Todos los parámetros hidrológicos fueron analizados en conjunto e integrados en el SIG, teniendo como resultado final la cuantificación y mapeamiento de la capacidad de almacenamiento del suelo, bien como, los índices de escorrentía superficial.

Palabras clave: escorrentía superficial, modelo hidrológico, impermeabilización del suelo.

Introdução

O processo de adensamento urbano das capitais brasileiras tem ocasionado diversos impactos sobre o regime hídrico, associados com o aumento do escoamento superficial e consequente alteração do pico de vazão de cheia de seus canais de drenagem. Estes fatores agravam cada vez mais os problemas de inundações, que em

muitos casos são resultantes da impermeabilização dos lotes que são revertidos em obras de engenharia por meio das edificações, pavimentações, arruamentos, calçadas, aterros, canalização dos corpos d'água, entre outras construções.

Para Hewlett (1982), a água proveniente da precipitação pode seguir diferentes caminhos, ora transformando-se em vazão que irá alimentar os rios e canais, ora evaporando a partir das superfícies do solo ou das copas das árvores, ou se infiltrando no solo indo alimentar os aquíferos subterrâneos.

Na questão da urbanização, Spin (1995, p.23) afirma que em seu conjunto, as atividades urbanas, a densidade da forma urbana, os materiais impermeáveis com os quais são construídos, o padrão de assentamento e suas relações com a rede de drenagem natural, o projeto dos sistemas de drenagem e os descontroles das enchentes, produzem um regime hídrico urbano característico. O escoamento superficial abundante e rápido dos temporais cria vazões de água extremamente altas durante e imediatamente após as chuvas. A pavimentação reduz a infiltração e baixa o nível da água do subsolo. As atividades urbanas e sua localização, a forma urbana e seus materiais de construção influenciam o nível das enchentes e a sua localização.

Na visão de Tucci (1995, p.17), o recobrimento do solo por obras de engenharia e urbanização gera um maior volume de escoamento superficial em um tempo menor, resultando no aumento da vazão de pico, redução do tempo de concentração e diminuição da vazão de base, o que acarreta no aumento das inundações. Surge então a necessidade de estudos mais detalhados que visem compreender a variação do regime hidrológico causado pelo processo de adensamento urbano.

Neste sentido, modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos para realizar estudos voltados à análise dos principais efeitos da urbanização nos recursos hídricos. Entre eles, destaca-se o elaborado pelo *Soil Conservation Service* (SCS), que permite a partir do parâmetro *Curve Number*, identificar características referentes ao potencial de escoamento superficial nas diferentes superfícies do terreno.

Visando uma melhor quantificação e representação da distribuição espacial dos principais componentes hidrológicos que influenciam no regime hídrico de bacias hidrográficas urbanas, o presente trabalho objetiva a aplicação do modelo hidrológico *Curve Number* em uma bacia hidrográfica amostral. Tem como área de análise as sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns situadas no município de Goiânia. O

presente modelo tem por base a análise dos efeitos dos impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem, utilizando a técnica de quantificação do aumento das áreas impermeáveis e da representação das características superficiais do terreno, para simular os índices dos parâmetros hidrológicos de infiltração e escoamento superficial do terreno.

Estudos realizados por Santos (2010, p.34) revelam que a porção centro-sul do município de Goiânia, apresenta grande quantidade de ocorrências de inundações decorrentes das modificações empreendidas no sistema de drenagem urbana. Nessa porção, destacam-se as bacias que apresentam altos níveis de ocupação e ocorrência de eventos de inundação associados principalmente aos córregos Macambira, Cascavel e ribeirão Botafogo, que fazem parte dos afluentes da foz do ribeirão Anicuns. Além disso, para a construção de vias que desobstruíssem o trânsito da capital, esses córregos foram canalizados e suas margens foram transformadas em vias de trânsito rápido, a exemplo das marginais Botafogo e Cascavel.

Preocupação com a caracterização da problemática das inundações na área em questão pode ser vista, no trabalho de Santos e Romão (2010), onde as autoras objetivaram espacializar as áreas de risco de inundação em Goiânia, suas causas e consequências, por intermédio de registros em noticiários de jornais e da Defesa Civil. Santos et. al (2009) apresentam também, um estudo interessante sobre o uso do solo e escoamento superficial na bacia do Córrego Pedreira em Goiânia, utilizando imagens de satélite de alta resolução. Para caracterizar o uso e ocupação da bacia, neste estudo, buscaram-se elementos que leva-se à compreensão da ocorrência de inundações na região, resultando em um mapa que representa o nível de impermeabilização da bacia.

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, com uma área de 230 km², está localizada na região centro-sul do município de Goiânia (Figura 1). Essa área abrange os principais cursos d'água urbanos como os córregos Macambira, Cascavel e Botafogo. Na influência destes córregos são encontrados alguns dos bairros mais antigos da capital, como: Parque Amazônia, Jardim América, Setor Sudoeste, Setor Bueno, Bairro dos Aeroviários, Setor Campinas, entre outros.

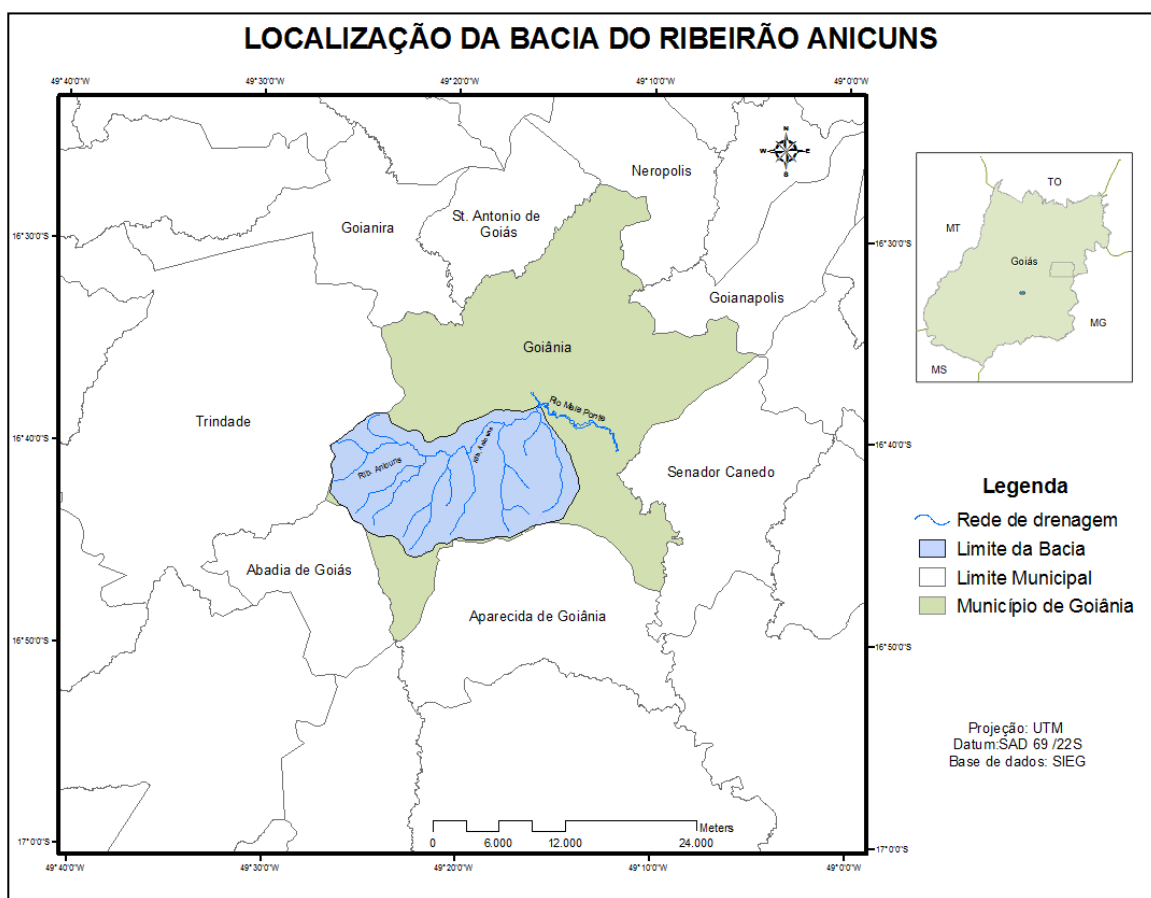


Figura 1: Mapa de localização da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns.

Suas nascentes localizam-se na zona de cimeira que constitui os limites entre Goiânia, Trindade e Abadia de Goiás, em um relevo rampeado para leste, levemente convexo no topo e côncavo na base, onde se destacam os córregos Salinas, Cavalo Morto e Taquaral (CUNHA, 2005, p.11). A margem direita é composta pelas sub-bacias desses três córregos mais as sub-bacias dos córregos Macambira, Cascavel e Botafogo, correspondendo a quase 80% do total da bacia, enquanto que a margem esquerda engloba apenas alguns córregos de primeira ordem e de pequena extensão, representando pouco mais de 20% da área.

Do médio ao baixo curso, o ribeirão Anicuns atravessa áreas intensamente urbanizadas da região de Goiânia, com os córregos de suas principais sub-bacias, canalizados e retificados nas proximidades de sua confluência com o rio Meia Ponte. Suas nascentes ainda são rurais apresentando áreas de campos, pastagens, agricultura e alguns remanescentes da vegetação arbustiva. Em certas porções, já pode ser observado alguns registros da expansão urbana.

Aspectos Físicos da Paisagem

Por quase toda extensão da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns ocorrem rochas metamórficas representadas por micaxistos do Grupo Araxá-Sul de Goiás. Este complexo litológico aparece sob um relevo de formas planas rampadas, desenvolvidas nas áreas de ocorrência do Planalto Rebaixado e também do Planalto Dissecado de Goiânia. Ao norte são verificadas rochas do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu (Arqueano Superior/Paleo Proterozóico Inferior), constituído predominantemente por gnaiesses e granulitos. Em sua foz na Planície aluviais do rio Meia Ponte a litologia é caracterizada por uma pequena representação dos depósitos aluvionares recentes, constituídos por silte e argila (CPRM,1994).

Na Figura 2, que representa os tipos de solos da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, podem ser verificadas quatro classes de solos distintas: Latossolos, Podzólicos, Cambissolos e Gleissolos, de acordo com o mapeamento de solos realizado pelo IPLAN/ IBGE/UFG (1991), para o estado de Goiás.

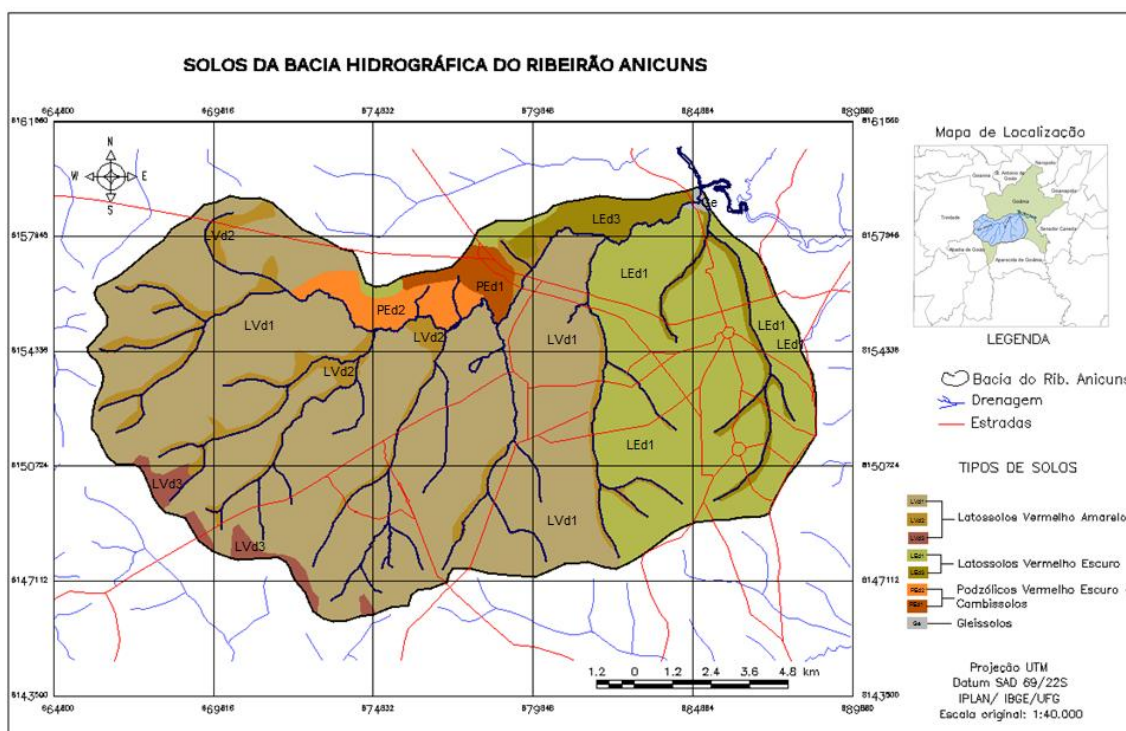


Figura 2: Mapa de solos da bacia do ribeirão Anicuns.

Essas classes de solos, associados ou não, constituem as seguintes unidades: 1) **Latossolos Vermelho Amarelo distróficos** (LVd1), (LVd2) e (LVd3) ambos com A moderado e textura argilosa. A primeira unidade aparece em relevo plano, a segunda em relevo suave ondulado e a terceira em relevo suave ondulado a ondulado; 2) **Latossolos Vermelho Escuro distróficos** com A moderado (LEd1) com textura argilosa a muito argilosa, sobre um relevo plano e, (LEd3) com textura argilosa, em relevo suave ondulado; 3) A associações de **Podzólicos Vermelho Escuro distróficos Tb** com A moderado + **Cambissolos eutrófico Tb** cascalhento, com A moderado (PEd1) e (PEd2). A primeira unidade situa-se em relevo suave ondulado a ondulado com textura média argilosa, e a segunda em relevo ondulado a forte ondulado, com textura argilosa e; 4) **Gleissolo eutrófico Ta** (Ge) com A chernozênico, textura argilosa, localizado em relevo de áreas planas.

Os Latossolos Vermelho Amarelado, localmente lateríticos, com contribuição de material coluvial nas partes mais baixas, são predominantes na área da bacia, com perfis profundos, porosos e bem drenados. Esta classe de solo localiza-se principalmente nas regiões das declividades menos acentuadas, onde os depósitos dos materiais pedológicos são mais espessos. Situados na porção leste da bacia, os Latossolos Vermelho Escuro são solos não hidromórficos, com baixa relação textural B/A, muito profundos, porosos, com boa permeabilidade e bem drenados (MONTEIRO et al., 2007, p.288).

As associações de Podzólicos + Cambissolos ocorrem na margem esquerda do médio curso do ribeirão Anicuns, nas áreas das maiores declividades, em terrenos com encostas mais abruptas e convexas. São solos porosos, porém com perfis pouco evoluídos e de menor profundidade. A drenagem varia de acentuada a imperfeita, podendo o Podzólico apresentar um horizonte subsuperficial mais argiloso, por acumulação de argila por iluviação. Tal fato pode representar um obstáculo à infiltração da água ao longo do perfil, diminuindo a sua permeabilidade e favorecendo o escoamento superficial e subsuperficial (GUERRA e BOTELHO, 1998, p.184).

Na área da bacia, os Gleissolos estão presentes sobre o relevo de planície aluvial, no encontro do Anicuns com o rio Meia Ponte, onde a circulação da água é baixa. São solos com deficiência de drenagem, geralmente encharcados devido à grande influência do lençol freático à superfície ou próxima dela.

Método Curve Number

O modelo hidrológico *Curve Number* (Soil Conservation Service, 1971) é bastante conhecido e difundido na conservação do solo e da água, sendo usado para estimar o escoamento superficial direto gerado por um determinado evento de precipitação pluviométrica. O modelo é fundamentado em um parâmetro que busca descrever o tipo de uso do solo e a condição da superfície do terreno, em relação ao potencial de gerar escoamento superficial. Este parâmetro é representado pela sigla CN ('*curve number*' ou '*complex number*'), tendo tradução em português de "Número de Escoamento" (OSTA, 1997).

O valor de CN é compreendido entre zero e 100, sendo zero a representação de uma bacia de condutividade hidráulica infinita e 100 o valor correspondente a uma bacia totalmente impermeável. De acordo com o Manual de Fundamentos do Modelo IPHS1 (2004) e Chow et al. (1988), o algoritmo do CN está baseado na proporção:

$$C = \left[\frac{(P - 0,2.S)^2}{(P + 0,8.S)} \right] \quad \text{equação (1)}$$

onde:

P = precipitação acumulada, ou seja, a precipitação total de um evento de chuva máxima considerada (mm);

C = coeficiente de escoamento superficial, dado em (mm);

S = coeficiente de armazenamento superficial, por infiltração, que está relacionado com os parâmetros que caracterizam a superfície (CN), dado em (mm).

No método a perda inicial de água (*Ia*) que é igual à quantidade de precipitação, que não produz escoamento no início da chuva de tormenta, é considerada como 20% das perdas potenciais máximas, sendo: $Ia = 0,2 \times S$, já introduzida na equação (1).

Para determinar a capacidade máxima de infiltração da camada superficial do terreno (valor de S), o método relaciona esse parâmetro com o fator de CN pela seguinte expressão:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{equação (2)}$$

A equação retrata as condições de cobertura superficial do terreno e do solo, variando desde superfície muito impermeável até superfície completamente permeável. Assim, os valores de CN dependem do grupo hidrológico do solo, umidade antecedente do solo e da cobertura superficial do terreno (PRUSKI et al., 2004, p.37).

Segundo Tucci et al. (2000), a aplicação do método *Curve Number* consiste nas seguintes etapas:

- a) determinação do grupo hidrológico do solo;
- b) escolha das condições de saturação do solo;
- c) determinação dos valores de CN para a condição de umidade do solo desejada e;
- d) determinação do escoamento superficial.

De acordo com Tucci et. al (1995, p.116), no método são considerados quatro grupos hidrológicos de solos, sendo os seguintes: **Solos A** – solos arenosos profundos e com baixo teor de silte e argila total, são solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração; **Solos B** – solos menos permeáveis que o anterior, são arenosos e com maior teor de argila total, menos profundos que o solos A e com permeabilidade superior a média; **Solos C** – solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração média, contendo percentagem considerável de argila; **Solos D** – solos bem argilosos, com 30% a 40% de argila total, com baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Após a determinação dos valores de CN são calculados os valores de S pela equação (2) e destes, os valores de C pela equação (1). Os valores de CN, S e C foram determinados para cada tipo de cobertura superficial e grupo hidrológico de solos, considerando sempre uma perda inicial de 20%.

Técnicas de Geoprocessamento

Os dados da cobertura superficial da bacia foram gerados com base na interpretação de imagem de satélite de alta resolução. Para tanto, foi utilizada uma cena dos sistemas orbitais Quickbird, em composição colorida com as bandas do visível, apresentando resolução espacial de 0,6 metros, obtida no ano de 2007.

Todo o procedimento de interpretação digital da imagem seguiu a metodologia de análise de dados espectrais, realizada no software Spring, descrita por Moreira (2011). Desta forma, a imagem no formato Grib foi exportada para o módulo Spring realizando o tratamento de contraste, realce e composição colorida. Em seguida, realizou-se o registro da imagem, utilizando pontos de controles extraídos de imagem ortorretificada da NASA (TM/Landsat) e da carta topográfica georreferenciada, correspondente à região da área em estudo.

Para o mapeamento da cobertura superficial do terreno, foi lançado sobre a imagem, um plano de informação contendo o recorte da malha urbana municipal em formato vetorial, do Mapa Urbano Digital de Goiânia, cedido pelo departamento de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal/SEPLAM/Goiânia. Tendo por base esta informação, procedeu-se a aplicação do método híbrido de interpretação visual de imagem apresentado por Moreira (2011, p.250), identificando assim, os polígonos de cobertura superficial do terreno. No trabalho foram estabelecidas oito chaves interpretativas, que se converteram nas categorias de cobertura superficial do terreno, descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de cobertura superficial do terreno

Classes Temáticas
1- Edificação muito densa: partes centrais densamente construídas de uma cidade com cerca de 85% de impermeabilização.
2- Edificação não muito densa: zonas residenciais adjacentes ao centro, de menor densidade de habitação que as regiões centrais, com cerca de 65% de impermeabilização.
3- Edificações com superfícies livres: zonas residenciais com cerca de 38% de impermeabilização.
4- Edificações com muitas superfícies livres: zonas residenciais com construções esparsas com cerca de 30% de impermeabilização.
5- Zonas industriais e comerciais: áreas industriais e barracões de comércios com cerca de 72% de impermeabilização.
6- Campo e áreas verdes: parques, jardins, campos de esportes, áreas cultivadas e áreas com gramados.
7- Zonas florestais e vegetação densa: área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestadas em boas condições.
8- Corpos d'água: lagos artificiais ou naturais.

FONTE: Adaptado do método *Curve Number* in. Tucci et al. (1995).

O critério de classificação e edição vetorial dos polígonos seguiu a observação dos diferentes padrões de aglomerados urbanos, tamanho, forma, textura e o tipo de uso e ocupação do solo. Os diferentes padrões de aglomerados urbanos foram identificados

considerando o adensamento das unidades habitacionais, analisando sempre o percentual da impermeabilização e dos espaços livres existentes entre as construções, facilmente observados em imagens de alta resolução.

Por intermédio do Modelo Numérico de Elevação (SRTM) fornecido pela Embrapa Monitoramento por Satélite (2009), foi possível obter as curvas de nível e gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE). Com base neste modelo foram obtidos os dados da declividade do terreno e ajustados os canais da rede de drenagem.

Na produção dos mapas da capacidade de armazenamento do terreno e dos índices de escoamento superficial foi aplicada a técnica de álgebra de mapas, tendo por base a operação booleana, com a criação de um banco de dados contendo informações temáticas dos tipos hidrológicos do solo, da cobertura superficial e da declividade do terreno, estruturados por meio de representações cartográficas e de dados alfanuméricos. Estes dois produtos finais foram confeccionados utilizando a linguagem de programação espacial para geoprocessamento algébrico (LEGAL), desenvolvida no Spring 5.1.5, fundamentada na elaboração da diagramação sintática das informações temática.

Resultados e Discussões

Tendo por base o mapeamento dos tipos de solos registrados na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns (Figura 2) e da análise de suas características físicas e capacidades de drenagem foi, determinado, dois tipos de grupos hidrológicos de solos para a área em análise, indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Grupos hidrológicos de solos da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns

Solos	Características	Material de origem	Área em km ² (na bacia)	Grupos hidrológicos
LVd	Textura argilosa, porosos, bem drenados	Grupo Araxá-Sul de Goiás / Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu	148,85	C
LEd	Textura argilosa, porosos, bem drenados	Grupo Araxá-Sul de Goiás	66,52	C

PEd + Ca	Textura média argilosa a argilosa. Horizonte B com baixa capacidade de infiltração e mal drenado	Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu	12,45	D
Ge	Bem argiloso, com baixa capacidade de infiltração, mal drenados	Depósitos Aluvionares	0,63	D

Os aspectos do relevo da bacia do ribeirão Anicuns revelam que a declividade possui uma significativa diversidade de suas classes, representadas na Figura 3. Porém, a maior parte do terreno possui declividades que constituem relevo plano a suavemente ondulado. A declividade dos terrenos controla em boa parte a velocidade com que se dá o escoamento superficial afetando o tempo de concentração, ou seja, o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem. A magnitude dos picos de enchente e a maior ou a menor oportunidade de infiltração dependem da impermeabilização dos solos e da velocidade com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia.

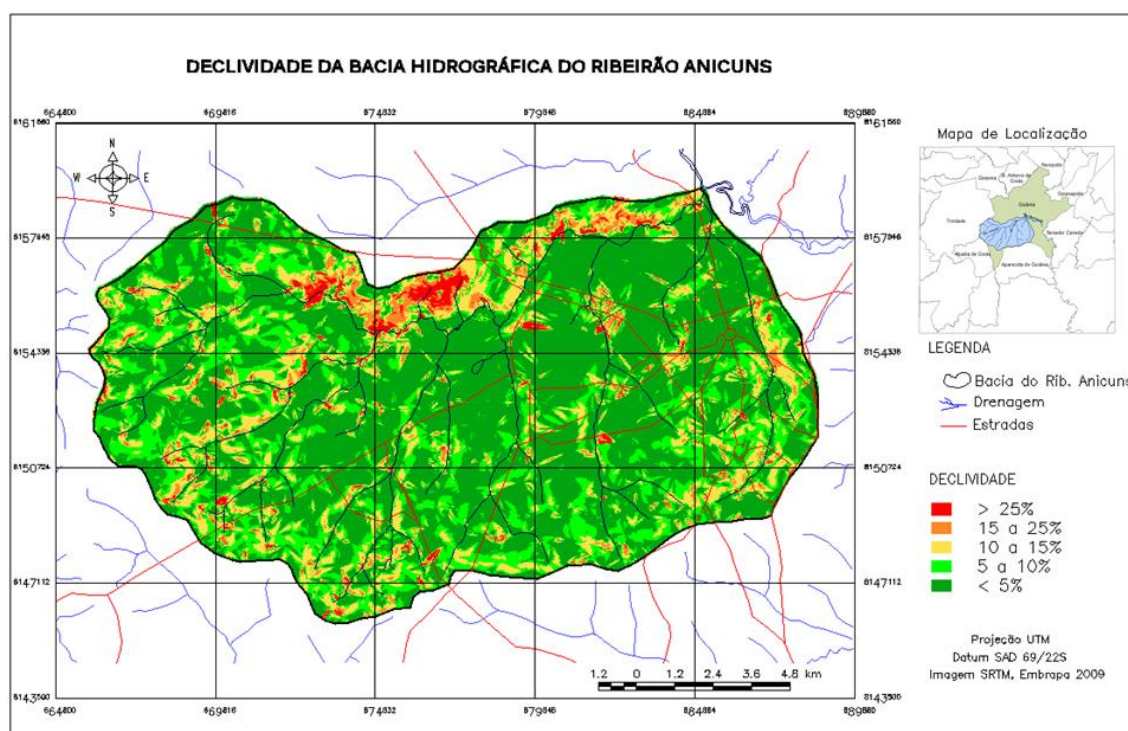


Figura 3: Mapa de declividades da bacia do ribeirão Anicuns.

O perímetro urbano da bacia apresenta aproximadamente 80% de sua área em regiões com declividades baixas entre 0 a 10%. Aparece preferencialmente no Planalto Rebaixado de Goiânia, em revelo com colinas suavemente onduladas e nas Planícies Aluviais do rio Meia Ponte.

As áreas que apresentam maiores declives se concentram na porção oeste, e limite norte da bacia, justamente onde se encontram a maioria das nascentes e as maiores altitudes configurando um relevo com encostas mais abruptas, esculpidas no Planalto Dissecado de Goiânia e nas proximidades dos fundos de vales das drenagens principais.

A quantificação da impermeabilização do terreno tornou-se possível a partir da operação de análise espacial, função medidas de classes, realizada pelo Spring. Para tal operação, foi executado o cálculo de áreas e verificada a dimensão de cada polígono que representam na carta temática (Figura 4), as classes de cobertura superficial do terreno.

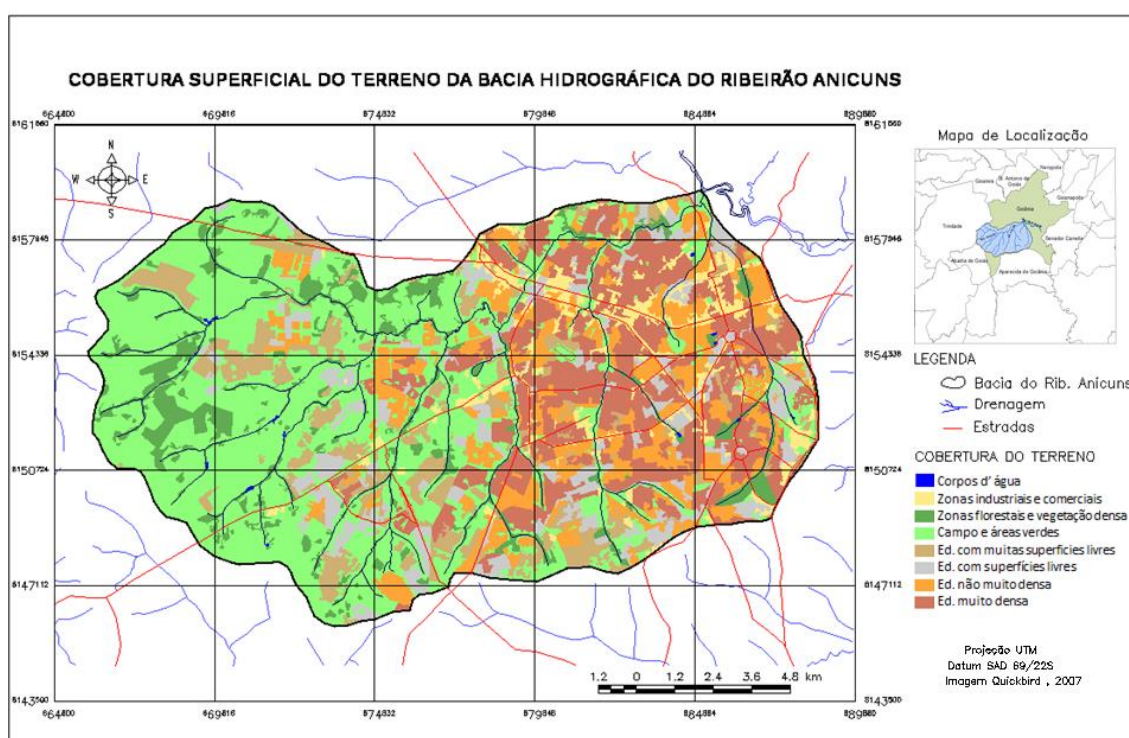


Figura 4: Mapa da cobertura superficial do terreno da bacia do ribeirão Anicuns.

Visando ainda o melhor detalhamento da quantificação das superfícies permeáveis e impermeáveis da bacia estudada, para cada classe de cobertura superficial do terreno foi realizada a separação do percentual de áreas pertencentes às superfícies

permeáveis do total pertencente às superfícies impermeáveis, demonstradas na Tabela 3. A análise do mapeamento das coberturas superficiais teve como critério básico que nenhuma das classes de edificações analisadas possui cem por cento de suas áreas impermeáveis, ou seja, o total de áreas impermeáveis não é equivalente ao total de áreas urbanizadas.

Tabela 3- Áreas das classes de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns (2007)

Descrição das Classes		Área na bacia do ribeirão Anicuns			
		km ²	%	Total das Classes	
				km ²	%
Edificação muito densa	Permeável	6,05	2,63	40,32	17,52
	Impermeável	34,27	14,89		
Edificação não muito densa	Permeável	10,3	4,47	29,42	12,78
	Impermeável	19,12	8,31		
Edificações com superfícies livres	Permeável	12,37	5,37	19,95	8,67
	Impermeável	7,58	3,29		
Edificação com muitas superfícies livres	Permeável	16,68	7,25	23,83	10,35
	Impermeável	7,15	3,10		
Zonas industriais e Comerciais	Permeável	3,52	1,53	12,56	5,46
	Impermeável	9,04	3,93		
Campo e áreas verdes	Permeável	82,10	35,67	82,10	35,67
Zonas florestais e vegetação densa	Permeável	19,91	8,65	19,91	8,65
Corpos d'água				2,07	0,9
Área total das classes	Permeável	150,93	65,57	230,16	100
	Impermeável	77,16	33,52		

Os valores de CN foram estimados a partir da utilização do módulo cálculo do CN, para bacias urbanas a parcialmente urbanizadas, contido no modelo hidrológico-hidrodinâmico IPHS1 para Windows, versão 2.1, elaborado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS e Faculdade de Engenharia Agrícola – UFPel.

Considerando os 20% da perda inicial da água precipitada, os valores de CN foram calculados para solos em condições úmidas, pela interpolação das características da cobertura superficial do terreno com cada grupo hidrológico de solos determinados (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de CN em função da cobertura superficial do terreno e dos grupos hidrológicos de solos

Tipo de Cobertura Superficial do Terreno	Valor de CN	
	Grupo Hidrológico de Solos	
	C	D
Edificação muito densa: em média 85% de áreas impermeáveis	96,97	98,00
Edificação não muito densa: em média 65% de áreas impermeáveis	94,91	96,00
Edificações com superfícies livres: em média 38% de áreas impermeáveis	91,79	92,80
Edificação com muitas superfícies livres: em média 30% de áreas impermeáveis	89,58	91,73
Zonas industriais e comerciais: em média 72% de áreas impermeáveis	94,00	95,94
Campo e áreas verdes	83,31	88,73
Zonas florestais e vegetação densa.	85,00	87,59

Em função do mapa de solos, combinado com o mapa de cobertura superficial do terreno, foi possível gerar o mapeamento da capacidade de armazenamento do terreno representado na Figura 5, obtido com base nos valores de CN tabelados e aplicados na equação 2.

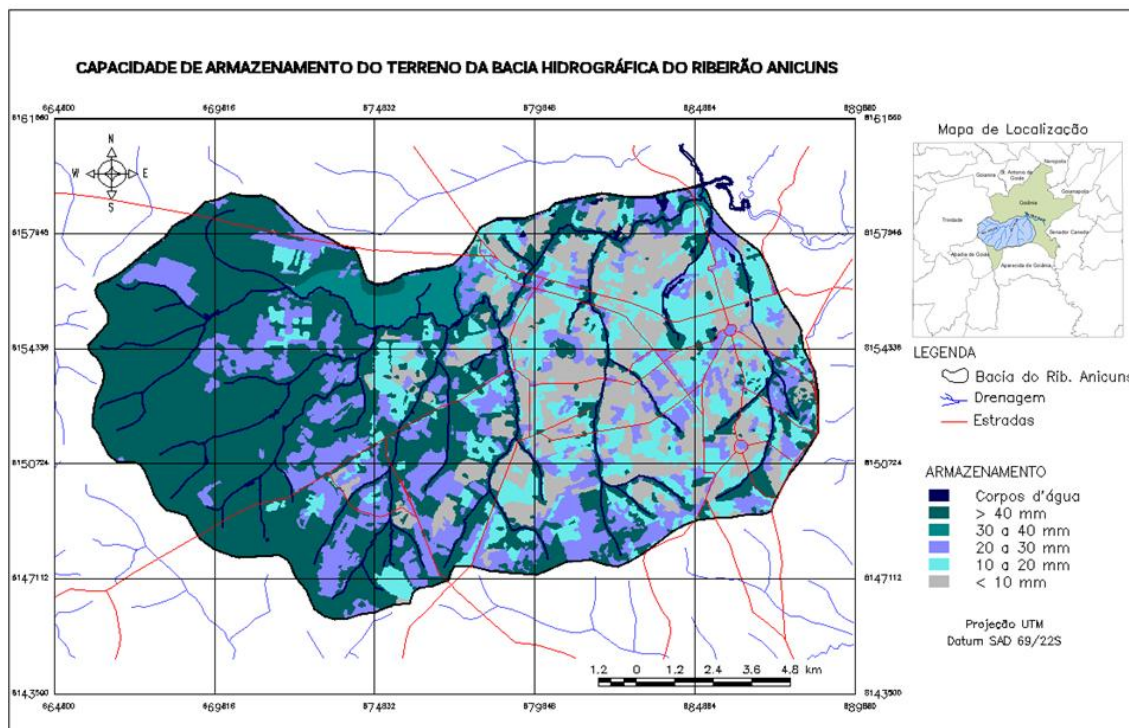


Figura 5: Mapa da capacidade de armazenamento do terreno da bacia do ribeirão Anicuns.

Os valores do coeficiente de escoamento superficial direto (coeficiente C) foram calculados para a precipitação máxima diária registrada pela estação pluviométrica de Anicuns, com Tempo de Retorno de 5 anos, determinada por Mesquita et al. (2009, p.78). Os autores obtiveram o valor da maior tormenta, mediante observações realizadas junto aos registros históricos disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA/2006), em uma série histórica que se estende entre os anos de 1972 a 2003, menos os anos falhos. Este valor foi convertido em precipitação de 24 horas, por intermédio da metodologia desenvolvida por DAEE-Cetesb (São Paulo, 1980) apud Mesquita et al. (2009, p.74), que converte as chuvas de um dia em chuvas de 24 horas. Sendo assim, os valores de C foram calculados para a chuva acumulada de 108,9mm.

Os dados resultantes da aplicação da equação 1 proporcionaram a estruturação do mapa dos índices de escoamento superficial (valor de C) da bacia do Anicuns (Figura 6), caracterizando a relação solos-cobertura superficial do terreno, declividade e precipitação máxima observada.

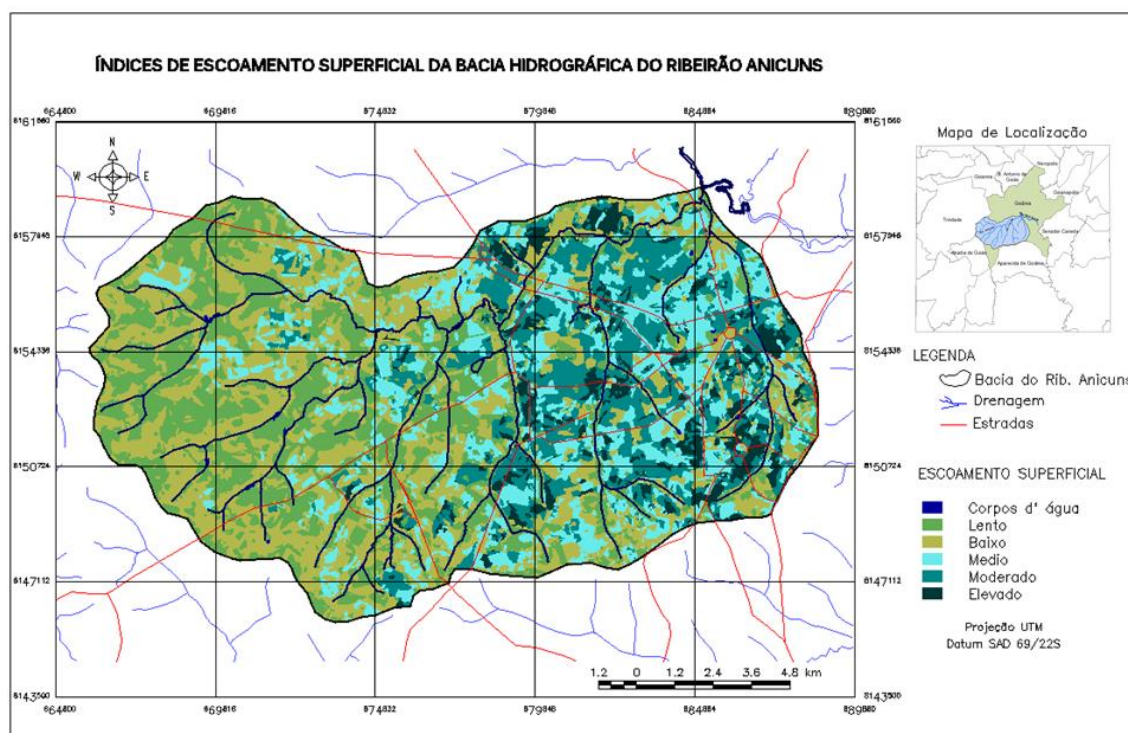


Figura 6: Mapa dos índices de escoamento superficial bacia do ribeirão Anicuns.

O mapa dos índices de C é de suma importância para simulação do escoamento superficial no que se refere à utilização do modelo proposto, visto que os diferentes

valores de CN, os quais variam de 83,3 a 98 demonstram a variabilidade espacial da relação grupo hidrológico de solos-cobertura superficial do terreno, evidenciando os diferentes potenciais de geração de escoamento superficial ao longo da bacia hidrográfica analisada (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores do coeficiente C para precipitação máxima diária de 108,9mm

Tipo de Cobertura Superficial do Terreno	Valor de C			
	Grupo Hidrológico de Solos			
	C		D	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Edificação muito densa: em média 85% de áreas impermeáveis	100,18	92	103,45	95
Edificação não muito densa: em média 65% de áreas impermeáveis	95,83	88	98,01	90
Edificações com superfícies livres: em média 38% de áreas impermeáveis	86,0	79	88,02	81
Edificação com muitas superfícies livres: em média 30% de áreas impermeáveis	80,58	74	86,03	79
Zonas industriais e comerciais: em média 72% de áreas impermeáveis	91,47	84	96,92	89
Campo e áreas verdes	65,34	60	78,4	72
Zonas florestais e vegetação densa	68,6	63	75,14	69

Em relação ao escoamento superficial, verifica-se que a região da bacia que possui a maior lamina de escoamento superficial, ou seja, volume por unidade de área da bacia de escoamento é a região de edificação muito densa, com o grupo de solos do tipo D. Estas condições do terreno proporcionam um escoamento de 95% do total de água precipitada.

Para melhor compreender a contribuição do escoamento superficial, para o pico de vazão no exutório do ribeirão Anicuns, foi calculada a média ponderada dos diversos valores de C correspondentes às suas áreas homogêneas. Assim, os valores de C foram determinados pelo produto da participação percentual de cada grupo hidrológico de solos pelos respectivos valores do produto do percentual da área de cada tipo de cobertura superficial do terreno, mais as declividades das encostas.

Como resultado final, constatou-se a partir da razão simples entre precipitação total ($P = 108,9$ mm) e média ponderada do escoamento superficial ($C = 79,98$ mm) que 73,5% da precipitação total em 24 horas de chuva incidente na área da bacia, escoou superficialmente. Valor relativamente alto decorrente das próprias características naturais

dos solos, intensificado pela impermeabilização do terreno oriunda das construções urbanas.

Considerações finais

Os índices de escoamento superficial simulados pelo Modelo Hidrológico *Curve Number* e estruturados com as técnicas de geoprocessamento, apresentaram resultados satisfatórios. A prática destas técnicas possibilitou a distribuição dos valores das variáveis hidrológicas ao longo de toda a área da bacia, conforme cada área homogênea determinada pelos aspectos físicos analisados, permitindo assim, que a contribuição de cada parcela distinta fosse contabilizada pela dimensão da área que esta representa.

As técnicas de geoprocessamento mostraram-se eficientes também, na apresentação dos resultados em forma de mapas. Estes mapas representam a variabilidade espacial dos parâmetros envolvidos no modelo, ou seja, tem-se a visualização espacial dos resultados. Esta visualização espacial permitiu identificar e localizar geograficamente as áreas de maior contribuição para o escoamento superficial, além da distribuição espacial da capacidade de armazenamento dos diferentes tipos de solos.

Uma das principais vantagens da interpretação da imagem de alta resolução em meio digital, durante a fase de mapeamento das áreas permeáveis e impermeáveis, é que esta técnica permitiu fazer a combinação espacial desta informação com outros elementos terrestres do ciclo hidrológico tais como: grupo hidrológico de solos e declividade do terreno, com informações contidas em um banco de dados georreferenciado. Isto não seria possível nos métodos que envolvem somente dados censitários, como o da densidade demográfica para determinar as áreas permeáveis e impermeáveis do terreno.

Comparando os mapas de cobertura superficial do terreno com o mapa de solos, visualiza-se que as maiores concentrações urbanas localizam-se do médio ao baixo curso da bacia hidrográfica, sobre as áreas de Latossolos. As características dos Latossolos, que são solos bem drenados, mas quando sujeitos a processos de compactação e impermeabilização apresentam problemas quanto à capacidade de infiltração, juntamente com o elevado índice de impermeabilização, justificam a presença dos maiores índices do coeficiente C nesta porção da bacia.

Apesar do mapeamento da cobertura superficial do terreno apresentar uma área ainda bastante coberta por floresta e campos, somando 44,32% de áreas livres de construções urbanas, esses dados quando tabulados e avaliados com as condições dos solos, relevo e regime pluviométrico revelam um escoamento relativamente alto, indicando uma bacia hidrográfica com tendência natural a inundações, agravada pelo adensamento urbano.

Referências Bibliográficas

CHOW, Ven Te et al. **Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1988.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**: Goiânia. Folha SE.22-X-B-IV - Estado de Goiás. Brasília: DNPM/ CPRM, 1994 (escala 1:100.000).

CUNHA, Bernardo Critóvão Colombo da. Aloformação Ribeirão Anicuns: Assoreamento da planície de inundação do Ribeirão Anicuns Goiânia – Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. 11º, Florianópolis, nov. 2005. **Anais do 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. 11p.

GUERRA, Antonio José Teixeira; BOTELHO, Rosangela Garrido Mchado. Erosão dos Solos. In: CUNHA, Sandra Baptista da; GUERRA, Antonio José Teixeira (org.). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 182–228.

HEWLETT, John. **Principles of Forest Hydrology**. Athens: The University of Georgia Press, 1982. 183p.

IPH-UFRGS; UFPel; DFIS-FURG. **Modelo IPH-S1: Manual de fundamentos**. Manual, Porto Alegre, 2004. 114p.

IPLAN – Instituto de planejamento Municipal / IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/ UFG – Universidade Federal de Goiás. **Mapa de Solos**. Carta de Risco de Goiás. Goiânia, 1991.

MESQUITA, Wilson Oliveira; GRIEBELER, Nori Paulo; OLIVEIRA, Luiz Fernando Coutinho de. Precipitações Máximas Diárias Esperadas para as Regiões Central e Sudeste de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 73-81, abr./jun., 2009.

MONTEIRO, Celso José et al. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamento do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicações**. 4. ed. Viçosa-MG: Editora da UFV, 2001.

OSTA, Alexandre Josef Sá Tobias. A Influência da urbanização no comportamento hidrológico de bacias de drenagem: município do Rio de Janeiro – RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA E I FÓRUM LATINO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. 7., Curitiba, 1997. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e I Fórum Latino-Americano de Geografia Física Aplicada**. Curitiba: Editora da UFPR, 1997. v. 2, 1 CD-ROM.

PRUSKI, Fernando Falco; BRANDÃO, Viviane dos Santos; SILVA, Demetrius David da. **Escoamento Superficial**. 2. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2004.

SANTOS, Késia Rodrigues dos; LEMES, Sandra Sardinha; ROMÃO, Patrícia de Araujo. Uso do solo e escoamento superficial na bacia do Córrego Pedreira em Goiânia (GO): uma análise a partir de imagens de alta resolução espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 14., Natal, 2009. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009. p.859-866.

SANTOS, Késia Rodrigues dos; ROMÃO, Patrícia de Araujo. Espacialização de inundações em Goiânia-GO (2004-2007). **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 2, p. 81-97, 2010.

SANTOS, Késia Rodrigues dos. **Distribuição espacial das inundações em Goiânia (GO) e análise desse fenômeno na bacia do Córrego Pedreira**. 2010. Dissertação de Mestre em Geografia- Instituto de Estudos SocioAmbientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SPIN, Anne Whiston. **O Jardim de Granito: A Natureza no Desenho da Cidade**. São Paulo: Editora da UFSP, 1995.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli et al. **Hidrologia: Ciência Aplicação**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFGS, 1993. 942p.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. et al. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFGS, 1995. 428p.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Coeficiente de Escoamento e Vazão Máxima de Bacias Urbanas. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61 -68, 2000.

Recebido para publicação em agosto de 2011
Aprovado para publicação em novembro de 2011