



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

LAURA GOMES GIRÃO PAIVA

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E ASSOCIAÇÃO DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO DA MICROBACIA DO
RIO GRANJEIRO, CRATO - CE**

FORTALEZA

2016

LAURA GOMES GIRÃO PAIVA

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E ASSOCIAÇÃO DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO DA MICROBACIA DO
RIO GRANJEIRO, CRATO - CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção de título de mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P169a Paiva, Laura Gomes Girão.
Análise da produção de sedimentos e associação do uso e ocupação do solo com a impermeabilização da microbacia do rio Granjeiro, Crato - CE / Laura Gomes Girão Paiva. – 2016.
66 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.
1. Geoprocessamento, Infiltração, Erosão, Erodibilidade. I. Título.

CDD 551

LAURA GOMES GIRÃO PAIVA

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E ASSOCIAÇÃO DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO DA MICROBACIA DO
RIO GRANJEIRO, CRATO - CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção de título de mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Sônia Maria Silva Vasconcelos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Renato Silvio da Frota Ribeiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me provido e capacitado a contribuir para o conhecimento da Sua criação.

À Universidade Federal do Ceará, em especial ao Departamento de Geologia.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo, pela sua orientação, apoio, cuidado e paciência, os quais me fizeram considerá-lo como um pai.

Aos professores Dr. José Carlos de Araújo e Dra. Sônia Maria Silva Vasconcelos, pelo tempo, pelas importantes colaborações e sugestões.

Ao importante parceiro, Luís Carlos Bastos Freitas, pelo qual esta pesquisa tornou-se possível, representando o apoio do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, que deu imprescindível suporte a execução deste trabalho.

Aos amigos Jefferson Lima dos Santos e Raul Carneio Gomes, que acrescentaram muito em conhecimento e apoiaram esta pesquisa.

Ao Laboratório de Geotécnica e Prospecção – LAGETEC, pela estrutura de realização dos ensaios e pela sua equipe maravilhosa, que me proveu momentos de muita felicidade e apoio: Vanusa Castelo, Amanda Batista, Joel Pedrosa, Alan Carnielli, Jérsica Bezerra, Geisa Rodrigues e Paulo Thales. Também a minha grande amiga Ana Clara e a amada Queilane Chaves.

À minha família, minha mãe Eloisa, meu pai Luiz Carlos e minhas irmãs, pelo amor, lar e sustento. À minha igreja e meus irmãos em Cristo, pela provisão espiritual, comunhão fraternal e sustento emocional.

RESUMO

A microbacia do rio Granjeiro é palco de riscos geológicos de deslizamentos de massa e inundações, devido à fatores geológico, geomorfológicos e climáticos ligados aos fenômenos de perda de solo por erosão e combinados aos problemas de adensamento do núcleo urbano e ocupação em área de risco. Este cenário proporcionou o desenvolvimento desta pesquisa que avalia o uso e ocupação, a impermeabilização, a erosão dos solos e produção de sedimentos na área. Na abordagem da análise territorial, foram relacionados os padrões de uso e ocupação com às condições de impermeabilização da microbacia e avaliada a distribuição espacial dos setores em níveis de permeabilidade e suas mudanças em dois anos (2006 e 2014). Os critérios dos padrões de uso e ocupação foram a densidade de edificações e áreas livres de revestimento (área urbana) e tipo de vegetação e exposição do solo (áreas rurais ou sem ocupação). Assim, foram atribuídos níveis de impermeabilização para cada classe. A principal mudança ocorreu na urbanização, que gerou crescimento de parcelas mais impermeáveis que avançavam para sul da área. Houve crescimento de 4% e 0,8% dos setores urbanos de alta e média densidade e das áreas de baixa densidade, respectivamente. A classe de uso correspondente a infiltração alta retraiu 4,3%, enquanto o nível de máxima infiltração manteve-se praticamente inalterado. Há perspectiva do surgimento de baixa a moderada infiltração para montante, ao longo de estradas, a partir do núcleo urbano. Na análise de erosão hídrica, foi estimada a produção de sedimentos da microbacia e correlacionada a erodibilidade dos solos. Para a erosão em áreas não urbanas (rurais) foi aplicada a USLE, sendo calculada com valores de erodibilidade do nomograma de Wischmeier et al. (1971) e da equação de Denardin (1990). Os sedimentos de origem urbana foram quantificados pela contribuição da população da área. Os resultados de erosão foram ajustados às características de dimensão e morfologia equacionadas pelo índice de transporte difuso (SDR). Portanto, foi possível obter uma produção de sedimentos por ano de 6,02 ton.ha⁻¹, onde 29% da erosão produziram sedimentos carreados para o exutório. Cerca de 4% dos sedimentos é de origem urbana. O modelo apresentou uma correlação forte para os dados de erodibilidade aferidos pelos dois procedimentos citados, com a observação que os valores da equação de Denardin são superestimados em relação aos do nomograma. A produção de sedimentos também apresentou sensibilidade significativa com relação a variação da erodibilidade, demonstrando também que a presença de áreas urbanas diminui a influência do fator K no modelo.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Infiltração. Erosão. Erodibilidade.

ABSTRACT

The watershed of the Granjeiro river has geological risks of mass landslides and floods due to geological, geomorphological and climatic factors linked to soil loss by erosion and combined with densification problems of the urban core and occupation in risk areas. This scenario provided the development of this research that evaluates the use and occupation, impermeabilization, soil erosion and sediment yield in the area. The approach to territorial analysis, were related to the use and occupancy patterns with the impermeabilization conditions of the watershed and evaluate the spatial distribution of sectors in permeability levels and your changes in two years (2006 and 2014). The criteria for use and occupancy patterns were the density of buildings and coating free areas (urban) and type of vegetation and exposure of soil (rural or unemployed). Thus, they were attributed impermeabilization levels for each class. The main change occurred in urbanization, which generated growth of more impermeable portions advancing south of the area. There was growth of 4% and 0.8% of the urban sectors of high and medium density and low-density areas, respectively. The use class corresponding to high infiltration retreated 4.3%, while the level of maximum infiltration remained virtually unchanged. There is perspective arise of the low to moderate infiltration upstream, along roads, from the urban center. In water erosion analysis, it was estimated sediment yield of the watershed and correlated to soil erodibility. For erosion in non-urban areas (rural) was applied to USLE, being calculated erodibility values nomogram Wischmeier et al. (1971) and equation of the Denardin (1990). The sediments of urban origin were quantified by the contribution of the population of the area. Erosion results were adjusted to the morphology characteristics calculated by diffuse transport index (SDR). Therefore, it was possible to obtain a production of sediments per year 6.02 ton.ha⁻¹, where 29% of the erosion produced for exutório carried sediments. About 4% of the sediments is of urban origin. The model showed a strong correlation to the erodibility data measured by the two mentioned procedures, with the observation that the values of Denardin equation are overestimated in relation to the nomogram. The production of pellets also showed significant sensitivity with respect to variation of erodibility also demonstrating that the presence of urban areas reduces the influence of the K-factor in the model.

Keywords: Geoprocessing. Infiltration. Erosion. Erodibility.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	ASSOCIAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO E SUA ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL NA MICROBACIA DO RIO GRANJEIRO, CRATO - CE	19
3	ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA MICROBACIA PERIURBANA NO CRATO, CEARÁ	43
4	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação de mestrado incorre na pesquisa “ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E ASSOCIAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO DA MICROBACIA DO RIO GRANJEIRO, CRATO - CE” em formato de artigos. A pesquisa foi realizada em parceria com o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, com o laboratório de geotécnica e prospecção – LAGETEC e do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará - UFC.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

As alterações decorrentes do uso da terra e ocupação antrópica podem modificar significativamente o equilíbrio do meio e os processos naturais, afetando, por exemplo, o ciclo hidrológico e resultando na impermeabilização e excessivo escoamento superficial. Diminuindo-se a permeabilidade dos solos, as águas pluviais vão se acumulando na superfície adquirindo volume e velocidade e saem dos sistemas de galerias pluviais, atingindo o solo dos fundos de vale com grande intensidade, provocando a erosão acelerada, assoreamento e enchentes (e.g. Hülsmeier & Souza, 2007).

A erosão hídrica laminar é um processo que, pela ação da água, promove a desagregação e transporte das partículas da superfície do solo. Este fenômeno está principalmente relacionado com a liberação de material sedimentar causada pelo impacto das gotas da chuva que golpeiam o solo, e que é deslocado através do escoamento superficial, propiciando a remoção de uma espessura relativamente uniforme de solo (Morgan, 2005; Guerra, 2012). Problemas causados pela perda de solo, como danos erosivos na agricultura e assoreamento de reservatórios, impulsionaram o desenvolvimento de métodos para definir os fatores e mensurar o processo de erosão.

Essas características são vistas na microbacia do rio Granjeiro. A área é palco de problemas de risco geológico (inundações e deslizamentos de massa), devido à combinação de fatores geológico, geomorfológicos e climáticos ligados aos problemas de adensamento do núcleo urbano e ocupação em área de risco (às margens do rio e em encostas). Um importante elemento que contribui à tais razões é a canalização do rio no trajeto em que percorre dentre a mancha urbana mais nucleada.

Os principais registros desses fenômenos ocorreram nos inícios dos anos de 2011 e 2015 e estão descritos em um histórico de pesquisas desenvolvidas na área, somadas aos

trabalhos anteriores a estes eventos, os quais abordam problemas de risco de inundação e deslizamento com diversos enfoques, sejam geomorfológicos, hidrológicos e/ou de gestão territorial (Guerra & Sampaio, 1996; Ribeiro, 2004; Carvalho & Ribeiro, 2007; Peulvast et al., 2011; Brito & Silva, 2012; Magalhães & Peulvast, 2013; Magalhães, 2014; Lima & Carvalho Neta, 2014; Cabral et al., 2014).

O tema proposto para esta pesquisa constitui nas avaliações de uso e ocupação, impermeabilização, erosão dos solos e produção de sedimentos da microbacia periurbana do rio Granjeiro, área que engloba uma significativa porção da sede municipal do Crato, no sul cearense. A área é palco de problemas de risco geológico (inundações e deslizamentos de massa), devido à combinação de fatores geológico, geomorfológicos e climáticos ligados aos problemas de adensamento do núcleo urbano e ocupação em área de risco (às margens do rio e em encostas).

1.2 OBJETIVOS

A primeira parte o referido trabalho propõe uma análise territorial – relacionar os padrões de uso e ocupação com às condições de impermeabilização da área da microbacia do rio Granjeiro e avaliar a distribuição espacial dos setores em níveis de permeabilidade e suas mudanças ao longo do tempo, através dos passos:

- a. Definir parâmetros específicos da área que sejam característicos dos elementos de uso e ocupação do solo e que sejam relevantes para a determinação da impermeabilização;
- b. Gerar uma hierarquia de classes que correlacione o uso e ocupação com a impermeabilização da área e representar suas zonas em mapa;
- c. Descrever e analisar a distribuição espacial e as mudanças dos níveis de impermeabilização, através do comparativo de duas imagens de satélite de anos distintos (2006 e 2014).

A segunda etapa dispõe numa análise da erosão hídrica laminar pela estimativa da produção de sedimentos da microbacia, através dos passos:

- a. Estimar a erosão do solo através da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e a produção de sedimentos de contribuição urbana;
- b. Simular a produção de sedimentos para toda a microbacia através do índice de transporte difuso (SDR);

- c. Analisar a correlação da produção de sedimentos com os valores de erodibilidade aferidos pelo nomograma de Wischmeier et al. (1971) e pela equação de Denardin (1990).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado está compilada essencialmente em dois artigos científicos. O Capítulo 1 apresenta a Introdução Geral, que discorre sobre as premissas da pesquisa, explicando as abordagens dos artigos consequentes e expondo as características da área de estudo. O Capítulo 2 compõe o artigo “ASSOCIAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO E SUA ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL NA MICROBACIA DO RIO GRANJEIRO, CRATO – CE” e o Capítulo 3 compõe o artigo “ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA MICROBACIA PERIURBANA NO CRATO, CEARÁ”.

Ambos os artigos estão formatados de acordo com as especificações exigidas pelas revistas as quais serão submetidos. Portanto, a dissertação segue o guia de normatização de trabalhos acadêmicos da UFC, exceto o escopo dos capítulos 2 e 3.

1.4 PARÂMETROS FISIOGRAFICOS E MORFODINÂMICOS

Localizada no município do Crato, Sul do Estado do Ceará, a área de estudo corresponde à área de influência da microbacia do rio Granjeiro. Ela compreende quase toda sede municipal que é atravessada pelo rio Granjeiro, onde nasce de ressurgências na encosta da Chapada do Araripe e termina ao encontrar-se com o rio Batateiras, próximo à saída para Juazeiro do Norte, ambas drenagens que fazem parte da área de influência da bacia do rio Salgado.

A geologia da área é definida pela porção pós-rifte da bacia sedimentar do Araripe, representando a sequência Aptiano-cenomaniana do Cretáceo. Na base estratigráfica está a Formação Barbalha (Assine, 1992), descrita como Formação Rio da Batateira por Ponte & Appi (1990), constituída basicamente por arenitos com lentes intercaladas de argilitos e folhelhos. Na área são encontrados arenitos friáveis, paraconglomerados de matriz grossa a média com estratificação cruzada, intercalados por níveis centimétricos de areia fina e argilosa plano paralela.

Em seguida está a Formação Santana, que tem uma seção inferior de fácies carbonatada a qual Beurlen (1962) chamou de Membro Crato, definida especificamente por calcários micríticos laminados com folhelhos pirobetuminosos. Sobreposto a Formação Santa ocorrem níveis de folhelhos calcíferos verdes com concreções carbonáticas fossilífera nomeados de Membro Romualdo (Beurlen, 1971). Esta detém uma grande importância econômica-mineral e fossilífera. Na área de estudo é possível identificar o solo residual correlato aos folhelhos nas cotas presumíveis da sua ocorrência.

Litotipos de natureza terrígena dão sequência à estratigrafia, definindo a porção pós-rifte II, com a Formação Araripina (Assine, 2007) e Formação Exu. A Formação Araripina é restrita à porção oeste da bacia, sendo constituída por associação de fácies heterolíticas, ritmitos argilo-siltosos. A Formação Exu é composta por arenitos quartzosos e caulíníticos de granulometria média a grossa, friáveis, por vezes com níveis conglomeráticos e com estratificações cruzadas planares e/ou acanaladas (Assine, 2007). Na área de estudo a Formação Araripina não é evidenciada claramente.

Uma característica marcante na área são os depósitos de tálus e lentes coluvionares, encontrados em várias cotas altimétricas, como em vales escavados nos Pedimentos sobre a Formação Santana. Esse material é oriundo dos fragmentos de arenitos silicificados do topo estratigráfico, possuindo arcabouço mal selecionado em uma matriz rica em ferro.

Em seus aspectos geomorfológicos, a área está associada com a Chapada do Araripe, um relevo com topo aplainado que chega a 950m de altitude, rodeado por escarpas erosivas íngremes e pedimentos. A microbacia está posicionada na porção oriental da Chapada, a partir da vertente que mergulha para NE e que tem aspecto de “anfiteatro”, de forma convergente côncava. A adaptação e detalhamento da compartimentação geomorfológica proposta por Lima et al. (2010) serviu de base para uma delimitação de maior detalhe.

O compartimento no topo da Chapada, o Platô, tem relevo plano e é definido entre as cotas de 960m a 950m. A Escarpa Erosiva é caracterizada por relevos montanhosos a forte ondulados, marcando de 950m a 765m de altitude. As Rampas Pedimentadas são definidas por relevo suave ondulado a forte ondulado, delimitadas entre as cotas 765m e 540m. A Depressão Periférica possui relevo suave ondulado a forte ondulado. A Planície Fluvial, de relevo plano, chega até aproximadamente 480m de atitude.

Em razão das diferenças dos ambientes de relevo que compõem a área de estudo, os aspectos climáticos são peculiares em relação aos aspectos do semiárido nordestino. A

porção da Depressão Sertaneja é caracterizada pelo clima semiárido e, pelas mudanças de altitude, o domínio da Chapada do Araripe apresenta o clima quente subúmido, possibilitando um regime pluviométrico superior e temperatura amena (IPECE, 2012). Segundo dados do IPECE (2012), o período chuvoso do município do Crato vai de janeiro a maio, com temperatura média anual variando de 24° a 26°C e pluviosidade média anual de 1090,9mm.

Apesar do regime pluviométrico, há ausência de drenagens no Platô da Chapada, isto evidenciado pela alta taxa de infiltração dos arenitos permoporosos da Formação Exu, que permite a instalação de 320m de um nível aquífero, o chamado aquífero superior (Veríssimo et al., 2007). Nessa situação, ao entrar em contato com a litologia impermeável logo abaixo (Formação Santana), o aquífero aflora para formar o rio Granjeiro, através de fontes difusas. O rio é canalizado quando chega ao núcleo urbano, atravessando bem ao centro.

2 ASSOCIAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO COM A IMPERMEABILIZAÇÃO E SUA ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL NA MICROBACIA DO RIO GRANJEIRO, CRATO – CE

RESUMO

A microbacia do rio Granjeiro abrange quase toda sede municipal do Crato e suas características de ocupação combinadas com relevos do entorno oeste da Chapada do Araripe e regimes pluviométricos superiores aos do semiárido favorecem a geração de enxurradas e inundações. Este trabalho procurou relacionar o uso e a ocupação do solo com níveis de impermeabilização do terreno, analisando a distribuição e mudanças espaciais desses fatores para os anos de 2006 e 2014, na referida área. Os critérios que definiram os padrões de uso e ocupação envolveram a densidade de edificações e áreas livres de revestimento (área urbana) e tipo de vegetação e exposição do solo (áreas rurais ou sem ocupação). Assim, foram atribuídos níveis de impermeabilização para cada classe. A principal mudança identificada foi a urbanização, que gerou crescimento de parcelas mais impermeáveis que avançavam para sul da área. Houve crescimento de 4% e 0,8% dos setores urbanos de alta e média densidade e das áreas de baixa densidade, respectivamente. A classe de uso correspondente a infiltração alta retraiu 4,3%, enquanto o nível de máxima infiltração manteve-se praticamente inalterado. Concluiu-se na perspectiva do surgimento de baixa a moderada infiltração para montante, ao longo de estradas, a partir do núcleo urbano.

Palavras-chave: Urbanização, Inundação, Infiltração, Fotomapeamento.

ABSTRACT

The watershed of the Granjeiro river covers almost the entire municipal seat of Crato. Their occupational characteristics combined with reliefs of the surroundings west of Chapada do Araripe and rainfall regimes higher than the semiarid, promote the generation of floods. This work tried to relate the use and land occupation with the land impermeabilization levels and analyze the spatial distribution and changes of these factors in 2006 and 2014, in that area. The criteria that defined the use and occupancy patterns involved the density of construction and uncoated areas (urban) and type of vegetation and exposure of soil (rural or unoccupied land). Thus, were defined impermeabilization levels for each class. The main change was

identified in urbanization, which generated growth of more impermeable portions who have advanced south of the area. There was growth of 4% and 0.8% of the urban sectors of high and medium density and low-density areas, respectively. The use class corresponding to high infiltration retreated 4.3%, while the level of maximum infiltration remained virtually unchanged. It was concluded from the perspective of the low to moderate infiltration upstream, along roads, from the urban center.

Keywords: Urbanization, Flooding, Infiltration, Photomapping.

INTRODUÇÃO

A ocupação antrópica no meio físico natural e as modificações causadas por ela na paisagem podem interferir consideravelmente nos processos dinâmicos do sistema ambiental em que está inserido. À medida que a sociedade necessita do espaço e recursos advindos deste meio físico, a gestão do território torna-se imprescindível para que a troca de energia e matéria das partes sociedade/natureza não resulte em desequilíbrio (e.g. Bertalanffy, 1972; Tricart, 1977; Guerra et. al, 1998).

As preocupações da sociedade relacionadas ao espaço geográfico estão ligadas aos aspectos ambientais e socioeconômicos, que por sua vez são afetados pelos impactos ambientais negativos decorrentes da má gestão da ocupação. Por isso, desastres naturais resultando em perdas e danos ao homem instigam a busca pelo entendimento da dinâmica da transformação ambiental inserida no processo de urbanização das cidades (Bispo & Levino, 2011)

Deste modo, reconhecendo o espaço físico estratégico que represente a interação das ações antropogênicas com seu ambiente, foi consolidada como célula de planejamento territorial a bacia hidrográfica (Brasil, 1997). As bacias hidrográficas representam uma unidade ideal de uso do solo por terem sua delimitação baseada em critérios geomorfológicos e integrarem uma visão conjunta do comportamento do meio uma vez que mudanças significativas, em resposta a atividades antrópicas, podem gerar alterações e/ou impactos a jusante e nos fluxos energéticos de saída (descarga, cargas sólidas e dissolvida) (Guerra et. al, 1998, 1999).

O adensamento e expansão urbana desordenada são processos de ocupação da terra que alteram significativamente as condições naturais, afetando o ciclo hidrológico daquele sistema e resultando na impermeabilização. Diminuindo-se a permeabilidade dos

solos, as águas pluviais vão se acumulando na superfície adquirindo volume e velocidade (escoamento superficial) e saem dos sistemas de galerias pluviais, atingindo o solo dos fundos de vale com grande intensidade, provocando a erosão acelerada, assoreamento e enchentes (e.g. Hülsmeier & Souza, 2007).

As práticas agrícolas e atividades de extração dos recursos naturais, sem práticas conservacionistas apropriadas, também modificam a resposta do solo quanto a infiltração, quando retirando a cobertura vegetal e alterando a concentração da matéria orgânica e porosidade do solo. Estas ações expõem o solo à ação do impacto da gota da chuva e consequente microsselamento superficial.

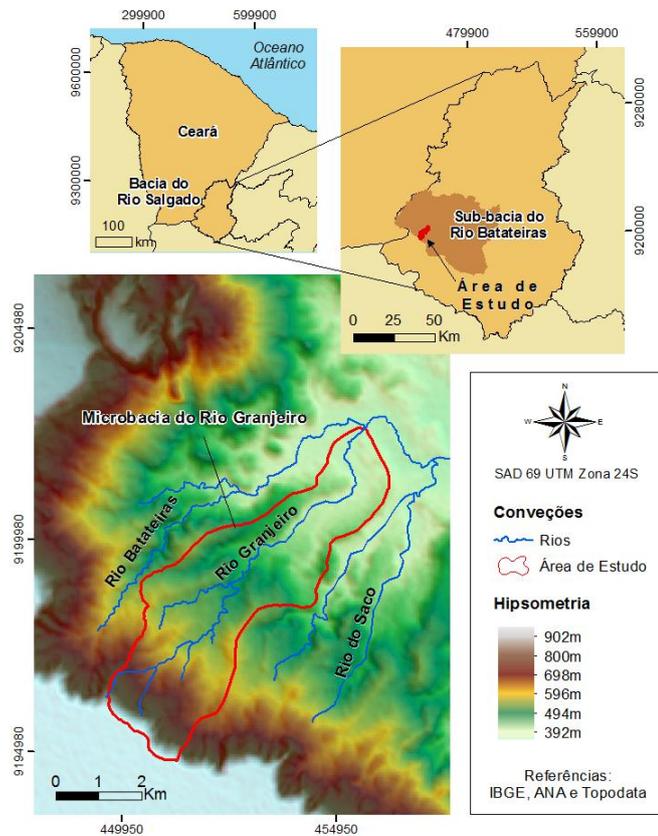
Tais fenômenos são observados na sede municipal do Crato, inserida na microbacia do rio Granjeiro. A conformidade do vale do Granjeiro relacionada a canalização do rio e ocupação urbana têm sido as principais causas de fenômenos de inundação em períodos de chuvas excepcionais, como ocorridos nos anos de 2011 e 2015. A área também é palco de riscos geológicos como movimentos gravitacionais de massa: escorregamentos e processos correlatos, como corrida de lama, de detritos, etc.

Diante desse cenário, este trabalho propõe para a microbacia do rio Granjeiro o estudo da associação do uso e ocupação do solo com níveis de impermeabilização do terreno, avaliando quais e como os elementos do uso e da ocupação, representativos da área, influenciam na sua impermeabilização, e analisar sua distribuição e mudança espacial entre os anos de 2006 e 2014.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município do Crato faz parte da região caririense, no extremo sul do Estado do Ceará. A sede municipal localiza-se a sudeste do município e quase que sua totalidade está inserida na microbacia do rio Granjeiro, definida como a área de estudo (Figura 1). O rio Granjeiro é o principal afluente, originado de ressurgências na encosta da Chapada do Araripe com exutório no encontro com o rio Batateiras, ambos parte da bacia do rio Salgado.

Figura 1 - Localização da área de estudo, segundo geografia política e hidrográfica. Município do Crato, Estado do Ceará.



Fonte: elaborada pelo autor

A geologia do local está relacionada à bacia sedimentar do Araripe, especificamente na porção pós-rifte Cretácea Aptiano-Cenomaniana, caracterizada pela ausência de basculamento das camadas estratigráficas, correspondentes as Formações Barbalha, Santana, Araripina e Exu, da base para o topo. A chamada Formação Rio da Batateira (Ponte & Appi, 1990) ou Formação Barbalha (Assine, 1992) é constituída basicamente por arenitos com lentes intercaladas de argilitos e folhelhos. Na área são encontrados arenitos friáveis paraconglomerados de matriz grossa a média.

Sobreposta a Formação Barbalha está a Formação Santana. Alvo de vários estudos de finalidade econômica-mineral e fossilífera, esta última Formação é dividida na sua base em um fácies carbonatado que Beurlen (1962) chamou de Membro Crato; e por níveis de folhelhos betuminosos, logo acima, contendo concreções carbonáticas fossilíferas nomeados de Membro Romualdo (Beurlen, 1971). Na área de estudo é possível identificar o solo residual correlato aos folhelhos nas cotas presumíveis da sua ocorrência.

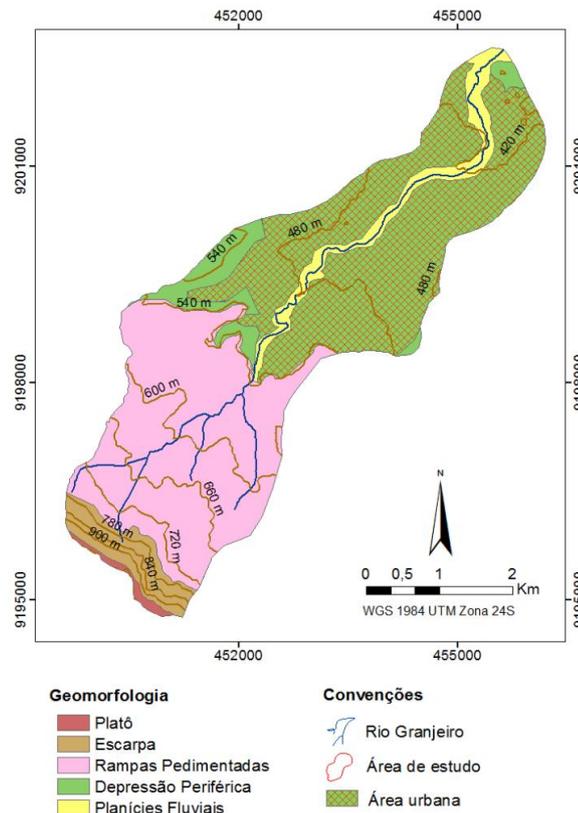
A porção pós-rift II da bacia, é caracterizada por litotipos de natureza terrígena, representados pelas Formação Araripina (Assine, 2007) e Formação Exu. A Formação

Araripina é restrita à porção oeste da bacia, sendo constituída por associação de fácies heterolíticas e ritmitos argilo-siltosos. Na área de estudo esta Formação não é evidenciada. A Formação Exu, porém, é bem marcada, composta por arenitos quartzosos e caulíníticos de granulometria média a grossa, friáveis, por vezes com níveis conglomeráticos e com estratificações cruzadas planares e/ou acanaladas (Assine, 2007).

Uma característica marcante na área são os depósitos de tálus e lentes coluvionares, encontrados tanto em cotas inferiores da Formação Barbalha, como em encaixes nos Pedimentos sobre a Formação Santana. Esse material é oriundo dos fragmentos de arenitos silicificados do topo estratigráfico, possuindo arcabouço mal selecionado em uma matriz rica em ferro.

A microbacia do Granjeiro possui seus aspectos geomorfológicos caracterizados pela Chapada do Araripe, um relevo com topo aplainado que chega a 950m de altitude, rodeado por escarpas erosivas íngremes e pedimentos. A forma da vertente tem aspecto de um anfiteatro convergente côncavo. A adaptação e detalhamento da compartimentação geomorfológica proposta por Lima et al. (2010) resultou na delimitação de descrição de cinco sistemas: Platô, Escarpa, Rampa Pedimentada, Depressão Periférica e Planície Fluvial (Figura 2).

Figura 2 - Compartimentação Geomorfológica da microbacia do rio Granjeiro. Fonte: elaborada pelo autor.



Relacionam-se os litotipos com os compartimentos geomorfológicos da microbacia do rio Granjeiro da seguinte forma: A Depressão Periférica é composta pelos arenitos da Formação Barbalha. As Rampas Pedimentadas, que vão da cota 540 m a 770 m, correspondem a Formação Santana. A Escarpa erosiva de 770 m a 945 m de altitude exhibe a Formação Araripina. No topo, o Platô é caracterizado pela Formação Exu, chegando até 960 m de altitude.

A permeabilidade dos arenitos da Formação Exu, que compõe o platô da Chapada, e da Formação Araripina, possibilita a ausência de rede de drenagem e consequente instalação do chamado aquífero superior, que possui uma espessura média de em 320 metros (Veríssimo et al., 2007). Nessa situação, ao entrar em contato com a litologia impermeável logo abaixo, o aquífero aflora dando origem ao rio Granjeiro, através de fontes difusas.

Em razão das diferenças dos ambientes de relevo que compõem a área de estudo, os aspectos climáticos são típicos. A porção relativa a Depressão Sertaneja tem clima semi-árido e, pelas mudanças de altitude, o domínio da Chapada do Araripe apresenta o clima quente sub-úmido, possibilitando um regime pluviométrico superior e temperatura amena (IPECE, 2012; Lima, 2008). Com base no IPECE (2012), o período chuvoso do município do Crato vai de janeiro a maio, com temperatura média anual variando de 24° a 26°C e pluviosidade média anual de 1090,9mm.

A sede municipal do Crato que coincide com a área de influência (aprox. 18.592.000m²) da microbacia do rio Granjeiro localiza-se onde alguns fatores naturais contribuem para que a área seja palco de expressivos processos morfodinâmicos, dentre eles estão a relação altitude/amplitude das compartimentações do relevo, os episódios de chuvas extraordinárias e as composições texturais das camadas sedimentares da bacia do Araripe.

Essas características contribuem juntamente com a configuração da zona de ocupação urbana para eventos de inundação e movimentos de massa em encostas de morro. A canalização do rio ao atravessar o núcleo urbano com arruamentos cerrados explica os registros que ocorreram em janeiro de 2011, onde a enchente provocou a parcial destruição do canal interurbano, com uma precipitação de 162mm. Além de outros registros menores ocorridos em março e abril de 2015, respectivamente com precipitações de 105mm e 140mm, segundo dados da FUNCEME (2014) (Figura 3).

Figura 3 - Trechos do canal do rio Granjeiro. a) parcialmente destruído com fluxo d'água turbulento. Situação registrada em janeiro de 2011. Fonte: website Diário do Nordeste, 29/02/2012. b) Deposição de sedimentos carregados do morro do Seminário através do sistema de drenagem.



Fonte: elaborada pelo autor.

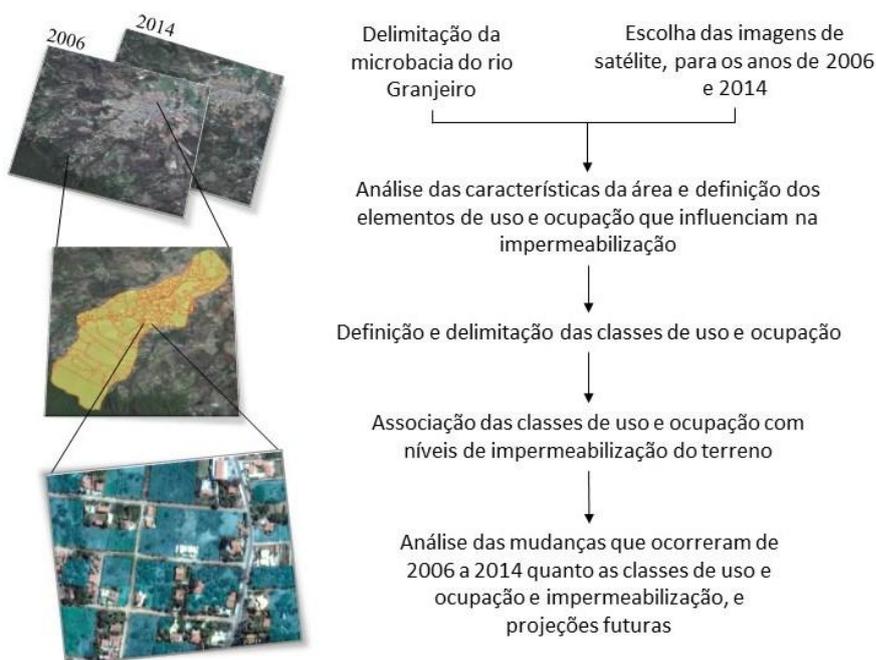
Os litotipos também influenciam nos problemas de risco urbano, caracterizados pelos arenitos das Formações Exu e Barbalha e pelas lentes coluvionares em paleovales encontrados em diversas altitudes. Chuvas intensas carregam material sedimentar da encosta da Chapada, gerando um fluxo viscoso e de alta rapidez o suficiente para transportar blocos rochosos drenagem abaixo.

A área também apresenta feições de morro como interflúvios, onde há ocupação desordenada, falta de vegetação protegendo o solo e má dimensionamento do sistema de drenagens e esgoto. Assim, a erosão concentrada se intensifica e um elevado aporte de sedimentos é transportado para o vale, como mostra a Figura 3b.

MATERIAIS E MÉTODOS

A análise de uso e ocupação foi feita através do fotomapeamento de imagens orbitais de alta resolução espacial em composição colorida verdadeira cor, disponibilizadas pela empresa DigitalGlobe no programa Google Earth Pro. Foram selecionadas imagens de dois anos distintos - 27 de julho de 2006 e 23 de agosto de 2014. As etapas metodológicas estão discriminadas na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: elaborada pelo autor.

As imagens foram escolhidas por registrarem o período pós chuvas, pois tornaram-se as mais adequadas para análise por não apresentarem a vegetação exuberante dos meses úmidos, que mascaram as áreas visualmente degradadas e a exposição de solo. As cores vívidas da vegetação do período chuvoso também dificultam a distinção da vegetação de grande a pequeno porte. Nota-se que a imagem de 2006 ainda possui características de vegetação advinda de período úmido, porém o mês de julho abre o período seco para esse ano.

A caracterização de uso e ocupação da área seguiu uma metodologia específica para poder atender a finalidade da pesquisa. Desta forma, deve-se destacar que a referida pesquisa não teve como finalidade segmentar as classes segundo os aspectos socioeconômicos, considerando seu valor industrial, comercial, residencial ou tipo de plantio e cultura em um meio rural, entre outros. Estes aspectos, apesar de presentes na área, não foram definidos como os parâmetros basilares, mas estão incorporados como propriedades de cada classe.

Portanto, foi feito o reconhecimento da área por imagens de satélite, considerando características como: pouca verticalização das edificações, variados padrões de arruamento, tamanho dos loteamentos de acordo com diferentes setores e características do meio urbano e do meio rural. A partir daí, foram estabelecidos os padrões que caracterizavam as classes típicas e relevantes ao estudo de impermeabilização.

Para as localidades com características de ocupação urbana, os padrões foram a densidade de edificações e áreas livres permeáveis do terreno. A densidade de edificações é

representada pela proporção de áreas livres no quarteirão. As áreas livres foram definidas como parcelas de terreno sem revestimento impermeabilizante (quintais) e áreas verdes (gramas, jardins, arbustos e árvores).

Associado aos parâmetros citados está o tipo de revestimento do arruamento. Ruas asfaltadas foram atribuídas como elementos equivalentes ao maior nível de adensamento. Já ruas sem pavimentação, revestidas de pedra tosca ou de piçarra, estão associadas às áreas livres, presentes em classes de menor adensamento, e às classes rurais.

No caso de locais não ocupados e/ou de uso rural, foram considerados a presença de solo exposto, a preservação e porte da vegetação. O porte da vegetação foi classificado em dois tipos: vegetação secundária, representada pela vegetação degradada da mata nativa e cultivo agrícola, e vegetação robusta, representada por porte arbustivo médio e arbóreo da mata preservada definida como a Floresta Nacional do Araripe (FLONA do Araripe).

Estes elementos da paisagem foram encontrados nas classificações de uso e ocupação de Wilken (1978) e Valério Filho et al. (2003), os quais tornaram-se referência a este trabalho, por considerarem os fatores que influenciam no coeficiente de escoamento superficial das águas pluviais e por correlacionarem a impermeabilização com a densidade das urbanizações. As classificações dos autores acima citados não se adequam totalmente a realidade local, por isto, foram feitas as adaptações necessárias.

Os padrões da área foram aferidos numa escala de 1:4.000 e vetorizados manualmente em ambiente SIG. Especificamente na área urbana e periferias, o quarteirão foi estabelecido como a menor unidade de referência para a definição das classes. Em casos que os arruamentos não tinham o formato de quarteirões bem definidos ou as residências se alocavam ao longo de uma estrada, foram feitos recortes.

Dessa forma, para se estabelecer a diferença entre as classes hierárquicas, foi atribuído que o quarteirão contivesse uma determinada proporção entre edificações e áreas livres, como demonstrado na Figura 5 que evidencia as parcelas de terreno não revestido dos quarteirões. Já em áreas rurais que não apresentavam quarteirões, foram usados os limites das classes circunvizinhas.

Figura 5 - Comparação das parcelas de áreas livres (azul), por quarteirão, demonstrando a diferença entre as classes de ocupação. a) setor de média densidade. Fonte: Google Earth (07/2006). b) Setor de baixa densidade. Fonte: Google Earth (08/2014). As áreas livres são do tipo terrenos sem revestimento: jardins, quintais, campos de futebol.



Fonte: elaborado pelo autor.

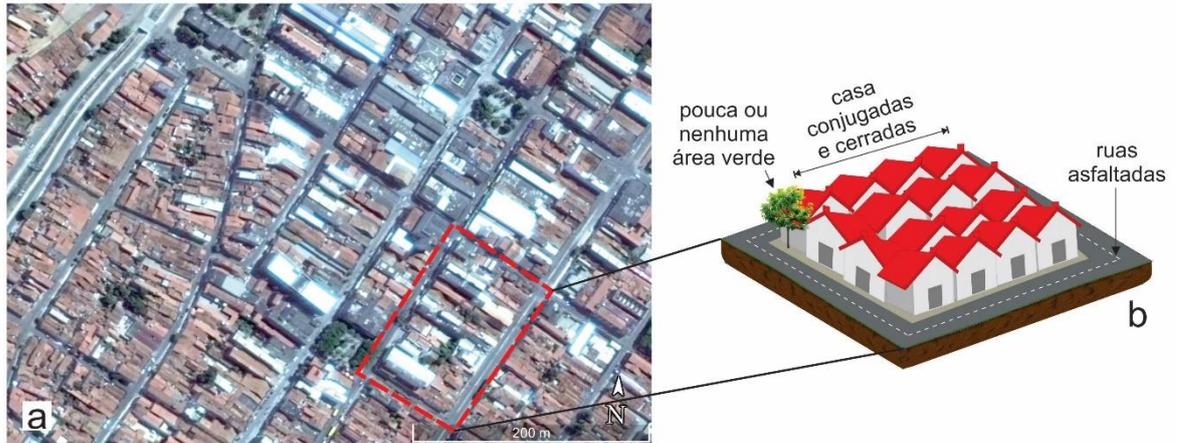
RESULTADOS E DISCUSSÕES

As cinco classes de uso e ocupação definidas para a microbacia do rio Granjeiro são as seguintes:

Setor urbano de alta densidade (Figura 6) – apresenta edificações cerradas e conjugadas, por vezes com lajes e edificações de mais de dois andares correspondendo, principalmente, ao núcleo central da cidade e aos setores justapostos a ele. Esta parcela espacial expõe pouca ou nenhuma arborização e possui ruas asfaltadas. Quando há parques ou praças estão extensamente revestidos com pedra portuguesa, blocos intertravados ou concreto e ruas asfaltadas.

Neste setor, são encontrados quarteirões de diversas formas em média com 7.000 m², onde se instalam aproximadamente de 28 a 68 edificações por quarteirão.

Figura 6 - a) Área tipo do Setor urbano de alta densidade. Porção do centro comercial da cidade e áreas residenciais sem quintais. Fonte: Google Earth (08/2014). b) Representação ilustrativa dos elementos do quarteirão (sem escala).



Fonte: elaborada pelo autor.

Setor urbano de média densidade (Figura 7) – abrange setores do tecido urbano que podem estar próximos às margens do centro da cidade. Esta classe possui casas conjugadas, porém, é definida quando áreas livres, caracterizadas por quintais, terrenos sem revestimento e árvores (núcleo verdejante) recobrem uma área menor que 50% do quarteirão (Verificar Figura 5). O tipo de pavimentação das ruas é diversificado, podendo ser asfáltico ou em pedra tosca.

Figura 7 - Área tipo do Setor urbano de média densidade. Observar alguns terrenos sem construção e núcleos arbóreos. Fonte: Google Earth (08/2014). b) Representação ilustrativa dos elementos do quarteirão (sem escala).



Fonte: elaborada pelo autor.

Setor urbano de baixa densidade (Figura 8) – são ajuntamentos em consolidação, com residências em arruamentos espaçados, circundadas por quintais com árvores, gramas e/ou piscina e normalmente distantes da concentração urbana. As ruas podem conter ou não pavimentação asfáltica, mas a maioria encontra-se em pedra tosca. Estas áreas apresentam arruamento definido, que cresce a partir de uma rodovia principal, mas a malha de edificações dos loteamentos não está consolidada. Por isso, são identificadas por apresentarem área livre igual ou maior que 50% da área de um quarteirão (Figura 05b).

Figura 8 - Área tipo do Setor urbano de baixa densidade. Fonte: Google Earth (08/2014). b) Representação ilustrativa dos elementos do quarteirão (sem escala). Fonte: autores.

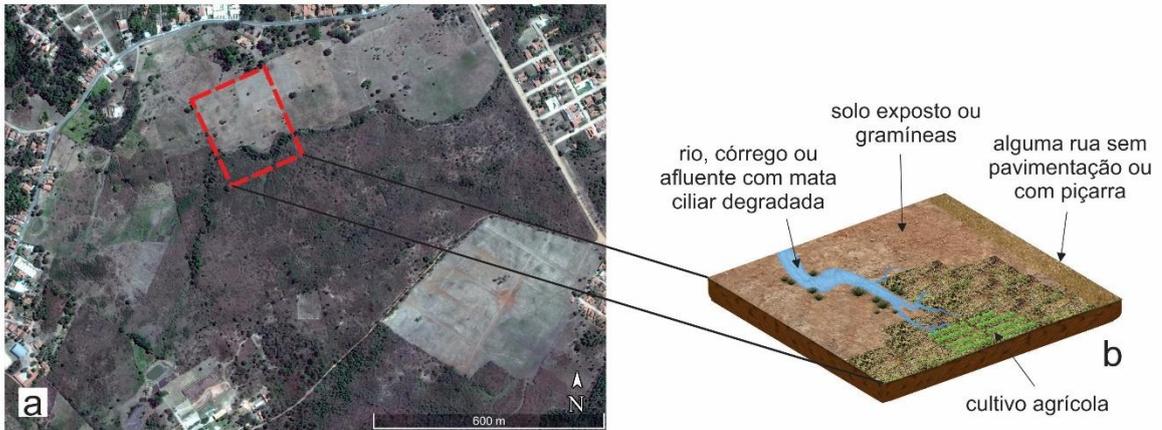


Fonte: elaborada pelo autor.

Neste setor é comum a presença de chácara com características de propriedade rural, mas que se destinam como recreação e lazer, ou mesmo residências de famílias mais abastardas que representam a concepção de isolamento do núcleo urbano em busca de qualidade de vida.

Solo exposto e vegetação secundária (Figura 9) – correspondem as áreas onde houve intenso desmatamento para fins agrícolas e abertura de loteamentos, o que fomentou a exposição dos solos e, posteriormente, o desenvolvimento de vegetação secundária de porte herbáceo a arbustivo. Na maioria dos casos esta porção espacial não pode ser dimensionada por quarteirão, havendo a necessidade de delimitá-la à demarcação livre.

Figura 9 - Área tipo Solo exposto e campos com vegetação secundária. Fonte: Google Earth (08/2014). b) Representação ilustrativa dos elementos do quarteirão (sem escala). Fonte: autores.



Fonte: elaborada pelo autor.

Apresenta parcelas espaciais geométricas com alguns traçados irregulares tipo de feições de cultivo ou abertura de lotes inconsolidados, onde também atravessam estruturas lineares como ruas ou acessos sem pavimentação. A mata ciliar, tanto ao longo da extensão não canalizada do rio Granjeiro como em córregos nas periferias da zona urbana, fica associada a esta classe por apresentar degradação.

Vegetação robusta da Chapada e Pedimento (Figura 10) – é encontrada no extremo sul da microbacia hidrográfica, onde estão os relevos de platô, escarpados e côncavos, compostos por materiais litológicos porosos e solos profundos (Latosolos e Argissolos). Possui uma vegetação densa de mata úmida até as escarpas e mata seca nos pedimentos. Acima da cota 900m é definida a Floresta Nacional do Araripe, uma cobertura florestal nativa, com baixa densidade de drenagens, formadas por riachos e nascentes de pequeno porte.

Figura 10 - Vegetação robusta da Chapada e Pedimento. Google Earth (08/2014). b) Representação ilustrativa dos elementos do quarteirão (sem escala). Fonte: autores.



Fonte: elaborada pelo autor.

Definidas as classes de uso do solo, para cada uma delas foi associado um nível relativo de impermeabilização. Os níveis se adequam às classes segundo os critérios de adensamento, revestimento do solo e vegetação. Todavia, para a análise completa de infiltração das águas pluviais em áreas não urbanas existem a influência dos parâmetros morfopedogênicos, como o tipo de litologia e solo, a declividade e comprimento de rampa, os tipos de culturas e práticas agrícolas, entre outros.

A resposta das características litopedológicas à impermeabilização vai se tornando significativa à medida que os terrenos apresentam pouca ou nenhuma ocupação urbana. Ou seja, o setor Solo exposto e campos com vegetação secundária e o setor vegetação robusta da Chapada e Pedimento estão mais sujeitos às respostas de infiltração em decorrência das variações litopedológicas do que os demais setores urbanos.

Apesar dos parâmetros supracitados, o contraste de impermeabilização entre as classes propostas neste trabalho está vinculado com o tipo de uso e ocupação da terra. Na pesquisa, portanto, não foi discorrido sobre os demais critérios morfopedogênicos, apesar de serem parcialmente considerados quando feitas algumas considerações após a descrição dos níveis de impermeabilização dos setores não urbanos.

Logo, estão de acordo os seguintes níveis:

Área Impermeável – corresponde ao setor urbano de alta densidade, que possui pouquíssima ou nenhuma área de infiltração, as chamadas áreas livres. Os principais tipos de revestimentos (edificações, calçadas e asfalto) compõem quase que totalmente o solo na dimensão do quarteirão (Figura 6), produzindo uma alta taxa de escoamento superficial.

Área de Infiltração baixa – corresponde ao setor urbano de média densidade (Figura 7). É possível identificar elementos que facilitam a infiltração das águas pluviais no solo, como os núcleos verdejantes e quintais de fundo, os terrenos sem revestimento e algumas ruas ainda em pedra tosca. Essas características compõem uma parcela inferior a 50% do quarteirão, indicativo que algumas superfícies ocasionam escoamento superficial considerado.

Área de infiltração moderada – corresponde ao setor urbano de baixa densidade (Figura 8). Possui parcelas de terreno sem construções ou revestimento, áreas verdes com gramíneas e árvores e ruas com pavimentação em pedra tosca ou piçarra, que representam área igual ou maior que 50% do quarteirão.

Área de Infiltração alta – corresponde a classe Solo exposto e campos com vegetação secundária. O desmatamento e tipos de manejos agrícolas expõem o solo ao efeito do splash das gotas da chuva e tornam a sua superfície micro selada e aumenta o escoamento superficial, o primeiro com mais intensidade que o segundo. Apesar disto, a permeabilidade é superior nessas áreas que em terrenos revestidos de construções urbanas. Pode haver algum acesso de estrada sem pavimentação ou uma divisão de terrenos para loteamento.

Área de Infiltração muito alta – corresponde a classe vegetação robusta da Chapada e Pedimento. Esta unidade contém os elementos que mais contribuem para a infiltração das águas pluviais. A principal característica é o porte arbóreo e a densidade da mata, que ocasiona a proteção do solo contra o micro selamento e a quantidade de matéria orgânica com a porosidade das raízes induz o aumento da infiltração.

As unidades de solo exposto e campos com vegetação secundária localizam-se predominantemente na porção sul, desde a cota 550m, coexistindo em proporções equivalentes a partir da cota aproximada de 480m. As partes de vegetação robusta da Chapada e Pedimento aparecem aproximadamente a partir de 690m. Como essas classes possibilitam que as características físicas do solo sejam mais coadjuvantes, algumas considerações serão dadas sobre os aspectos litopedológicos.

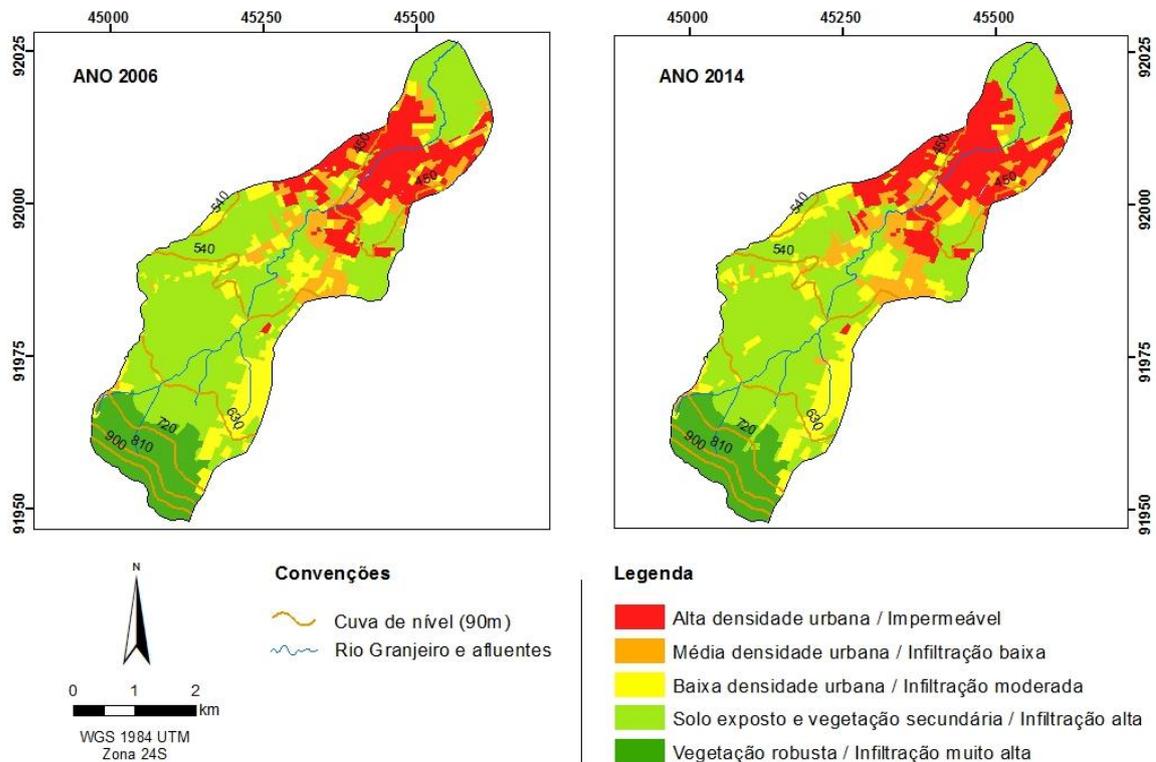
A quarta classe de uso e ocupação, referente a área de infiltração alta, coincide com a área dos calcários e folhelhos da Formação Santana, quando nas cotas em que sua extensão predomina. A priori, os solos residuais dessas litologias possuem baixa permeabilidade se considerando a granulometria, mas é possível que sedimentos oriundos do escarpamento das litologias areníticas do topo da Chapada tenham contribuído na formação de solos bem porosos.

Já a área de infiltração muito alta recebe a contribuição dos arenitos permoporosos das Formações Exu e Araripina. Os Latossolos instalados no platô podem possuir um teor de argilominerais e sesquióxidos no horizonte A que dificulte a permeabilidade no nível superficial, porém, a porosidade produzida pela quantidade de matéria orgânica e raízes da mata exuberante garante que esta classe seja definida como o maior nível de infiltração da microbacia.

Na distribuição geral nos anos estudados, os setores urbanos de alta e média densidade estão predominantemente instalados na porção norte/nordeste da área da bacia, tendo uma disposição espacial em alinhamento com o canal do rio Granjeiro. À medida que a ocupação se aproxima da Chapada, para altitudes mais elevadas, há transição do setor de média densidade para baixa densidade, no entanto, o predomínio da classe solo exposto e vegetação secundária é evidente. Logo ao sul, a vegetação robusta da Chapada e Pedimento é bem marcada.

A análise espaço-temporal do mapa de uso e ocupação elaborado para os anos de 2006 e 2014 (Figura 11) possibilitou observar duas principais mudanças: o deslocamento expansivo urbano, do centro para o sul da área, e as mudanças de classes para níveis de maior impermeabilização.

Figura 11 - Uso e ocupação e impermeabilização do solo da microbacia do Rio Granjeiro para os anos 2006 e 2014. Fonte: autores.



Fonte: elaborada pelo autor.

Tanto no ano 2006 como em 2014 é visto que a situação da ocupação referente ao setor urbano de alta densidade se apresenta mais nucleada e conjugada que as outras duas ocupações urbanas. Desta forma, neste intervalo de oito anos, este setor foi se consolidando internamente, onde alguns espaços dentro da mancha urbana de alta densidade foram preenchidos.

Áreas de alta densidade cresceram se alargando e substituindo classes de níveis inferiores, se estendendo preferencialmente para a margem leste do canal. As três classes urbanas também cresceram substituindo das áreas de Solo exposto e campos de vegetação secundária e expandindo em direção preferencial para montante, através de arruamentos perpendiculares a uma rodovia principal N-S. O setor urbano de média densidade cresceu preferencialmente para centro/oeste da área, substituindo os setores de baixa densidade nas periferias do núcleo urbano.

Já a vegetação robusta da Chapada e Pedimento, permaneceu quase que inalterada no intervalo de tempo estudado. Parte da área envolve a Floresta Nacional do Araripe, delimitada a partir da cota 800m, mantendo essa porção protegida. A zona das Rampas

Pedimentadas que abrange essa classe possui algumas poucas ocupações próximas, como clubes, hotéis e sítios, mas algumas porções de terreno bem acidentado dificulta a instalação de edificações.

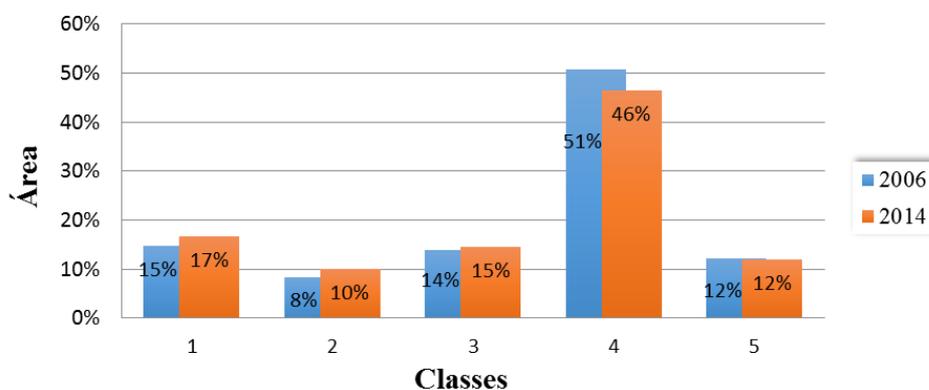
A Tabela 1 e a Figura 12 demonstram a porcentagem de área de cada classe, nos anos 2006 e 2014, inserida na área da microbacia do rio Granjeiro. Em oito anos os setores urbanos de alta e média densidade cresceram aproximadamente 2% cada um, enquanto o setor de baixa densidade cresceu cerca de 0,8% de área total. Esse desenvolvimento foi comedido pela redução de um pouco mais de 4% de área composta por solo exposto e vegetação secundária. A vegetação da Chapada e Pedimento sofreu a supressão de 35.869m² de área, uma mudança irrisória de 0,2%.

Tabela 1 - Dados das áreas das classes de uso e ocupação com relação a área total (aprox. 18.592.000m²) dos anos de 2006 e 2014 e a diferença ao longo dos anos. 1 - Setor urbano de alta densidade; 2 - Setor urbano de média densidade; 3 - Setor urbano de baixa densidade; 4 - Solo exposto e vegetação secundária; 5 - Vegetação robusta da Chapada e Pedimento.

Classe	Área da microbacia do rio Granjeiro			
	2006		2014	
	m ²	%	m ²	%
1	2.751.788	14,7	3.109.228	16,6
2	1.535.433	8,3	1.872.015	10,1
3	2.580.138	13,9	2.723.767	14,7
4	9.438.185	50,8	8.634.225	46,5
5	2.278.660	12,3	2.245.795	12,1

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 12 - Gráfico da porcentagem da área das classes de uso e ocupação do solo em relação a área total da microbacia do rio Granjeiro, equivalente a aproximadamente 18.592.000 m². Comparação entre os anos de 2006 e 2014.



Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a distribuição dos níveis de impermeabilização do terreno em cada compartimento geomorfológico da microbacia, as áreas impermeáveis estão ocupando uma considerável porção da Planície fluvial e Depressão periférica. A área de infiltração baixa está bastante disseminada, mas se limita na Depressão periférica. As áreas de infiltração moderada e alta permanecem distribuídas tanto na depressão periférica como nos Pedimentos, enquanto a área de infiltração muito alta está concentrada da borda do Platô e na Escarpa, incluindo uma parte dos Pedimentos.

É notável que a área mais problemática quanto a impermeabilização do terreno envolve os arredores da canalização do rio Granjeiro. Com base na delimitação geomorfológica demonstrada na Figura 2, uma área de aproximadamente 380 m² da Planície fluvial indica não haver infiltração. Ou seja, a alta densidade de ocupação está em um ambiente seriamente vulnerável a cheias.

Além desse ambiente de risco, a oeste do canal se estende o morro do Seminário, uma região de interflúvio de até 500 m de altitude. Ali há alguma área de infiltração alta devido à vegetação pouco preservada da encosta. Essa distinção de níveis de permeabilidade incorre em problemas na estabilidade da encosta, através da erosão concentrada e desenvolvimento de sulcos e voçorocas.

Caracterizando as mudanças dos setores de permeabilidade, houve o aumento das áreas impermeáveis em detrimento das parcelas de alta infiltração. Da mesma forma que nas classes de ocupação, a ascensão de níveis de infiltração baixa e moderada acontece preferencialmente a montante do rio Granjeiro. No setor a leste do rio é expressiva a expansão

das áreas de infiltração baixa e moderada. No setor oeste a ampliação das áreas impermeáveis e áreas de infiltração baixa são mais significativas. Em contraponto a esse crescimento houve a supressão de 4% de área de infiltração alta até 2014, não deixando, portanto, que esta classe ainda represente quase metade da área da microbacia.

De acordo com os resultados, observa-se que a expansão urbana ocorrida na sede municipal do Crato é acompanhada pelo acréscimo populacional de 10.230 habitantes em todo município, dos anos de 2007 a 2010 (IBGE, 2016). Dessa forma é coerente que as ocupações urbanas estejam se consolidando.

Lima & Carvalho Neta (2014) desenvolveram o mapeamento do uso e ocupação da microbacia do rio Granjeiro para o ano de 2013. As semelhanças no contraste das áreas de ocupação antrópica com a vegetação e solo exposto são notáveis, porém é importante ressaltar que há distinções metodológicas que justificam demais diferenças, como a data e período do ano da imagem analisada, a diferença dos critérios de interpretação das classes e a acurácia da delimitação da microbacia.

É possível perceber a relação entre o desenvolvimento da ocupação e a tendência de impermeabilização do terreno. Se a urbanização se consolida ao longo do tempo, as áreas de impermeabilização crescem proporcionalmente. Portanto, o nível área impermeável tende a nuclear ainda mais, assim como expandir. Também há perspectiva da diminuição dos níveis permeáveis preferencialmente para montante do rio Granjeiro devido à expansão dos setores de média e baixa densidade nessa direção.

CONCLUSÕES

O escopo da pesquisa foi determinado pela aferição das classes de uso e ocupação, onde as três primeiras classes foram elaboradas segundo a densidade da ocupação (Setor urbano de alta, média e baixa densidade) e as duas seguintes pelo tipo de cobertura vegetal (Solo exposto com vegetação secundária e Vegetação robusta da Chapada e Pedimento).

A densidade urbana foi definida pelo adensamento das casas e a quantidade de superfície livre no quarteirão, enquanto o tipo de vegetação foi diferenciado pela preservação e porte. Essas características possibilitaram a diferenciação de níveis de permeabilidade para cada área de uso e ocupação, os quais são: Área Impermeável, infiltração baixa, infiltração moderada, infiltração alta, infiltração muito alta.

Dessa forma, o mapeamento demonstrou que os setores de alta densidade associados às áreas impermeáveis se concentravam na zona da Depressão periférica à

Chapada, englobando a maior parte da canalização do rio Granjeiro e sendo referência de uma área problemática. Os setores de Infiltração baixa e moderada encontram-se mais disseminados, alinhados principalmente ao longo de rodovias, quando se distanciando do núcleo urbano. Já as áreas de vegetação, consideradas de alto e muito alto valor de infiltração, estão mais presentes a montante do sopé, nas áreas de pedimento, escarpa e platô.

A pesquisa também identificou que as mudanças ocorridas ao longo de oito anos foram através do deslocamento espacial expansivo urbano e da substituição de algumas classes em detrimento de outras. O crescimento dos setores urbanos de alta e média densidade atingiu quase 4% da área total da microbacia e as áreas de baixa densidade cresceram tímidos 0,8%. Por outro lado, houve a retração de 4,3% da classe solo exposto e vegetação secundária e quase nenhuma supressão da vegetação robusta.

A delimitação das classes possibilitou a espacialização de informações importantes para o estudo de risco à inundações e enxurradas, dando respaldo ao planejamento de ocupação e manejo, havendo ciência dos vetores de expansão antrópica e de áreas de impermeabilização na microbacia do rio Granjeiro. Assim, é possível diagnosticar em projeções futuras que a supressão de vegetação secundária tende a acontecer para montante a partir de rodovias que dão acesso ao da área.

Sugerindo outra forma de análise, a partir dos dados de uso e ocupação é possível aferir o coeficiente de escoamento superficial das águas pluviais no solo e determinar os níveis de impermeabilização pelos valores absolutos calculados, ou seja, a pesquisa da margem a futuros esforços para se entender melhor a dinâmica urbana e ambiental da bacia.

REFERÊNCIAS

- ASSINE, M. L.. Análise estratigráfica da bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, p. 289-300, 1992.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 15, p. 371-389, 2007.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: um esboço metodológico. IGEOG/USP. **Caderno de Ciências da Terra**, n. 13, p. 1-27, 1971.
- BEURLEN, K. A geologia da Chapada do Araripe. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 34, n. 3, p. 365-370, 1962.
- BEURLEN, K.. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 43, p. 411-415, 1971.
- BISPO, T. C., & LEVINO, N. D. Impactos ambientais decorrentes do uso e ocupação desordenada do solo: um estudo da região da periferia de Maceió/AL. **Anais do XXXI Encontro Nacional De Engenharia De Produção**, 2011.
- BRASIL. Lei Federal 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- BRAUN, O. P. **Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da região nordeste do Brasil: Bacias de Tucão-Jatobá, Mirandiba e Araripe**. Rio de Janeiro: Divisão de Geologia e Mineralogia/ Departamento Nacional da Produção Mineral, Boletim, n. 236, 75 p. 1966.
- CHAGAS, D. B., ASSINE, M. L., & FREITAS, F. I. Facies sedimentares e ambientes deposicionais da Formação Barbalha no vale do cariri, bacia do araripe, nordeste do Brasil. **Geociências UNESP**, 26(4): 313-322.
- DIÁRIO DO NORDESTE. **Diário Cariri - Canal do Rio Grangeiro em debate: famílias poderão ser retiradas de áreas de risco**. (Publicado em 29/02/2012), disponível em Diário do Nordeste: <http://blogs.diariodonordeste.com.br/cariri/cidades/canal-do-rio-grangeiro-em-debate-familias-poderao-ser-retiradas-de-areas-de-riscos/>, Acesso em: ago 2015.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe**. Recife: Programa nacional de estudos dos distritos mineiros, 1996
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 1999.
- FUNCEME - FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Atlas eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará.**, disponível em Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará: <http://atlas.srh.ce.gov.br/gestao/postos->

pluviometricos/pluviometriaAnual.php?cd_postopluiometricos=11158, Acesso em: 30 mar 2015.

FUNCEME, FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos - Mesorregião do Sul Cearense. Escala 1:100.000.** Fortaleza: FUNCEME, 2012.

GOOGLE EARTH. Versão Pro 7.1.2.2041. Imagens de satélite da DigitalGlobe. Datas de aquisição: 27 de julho de 2006 e 23 de agosto de 2014.

GUERRA, A. J., & CUNHA, S. B. (Organizadores). **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 396 p., 1998.

GUERRA, A. J., SILVA, A. S., & BOTELHO, R. M. **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 344 p., 1999.

HÜLSMEYER, A. F., & SOUZA, R. C. Avaliação das áreas permeáveis como subsídio ao planejamento de áreas verdes urbanas de Umuarama - PR. **Akropolis, Revista de Ciências Humanas da UNIPAR**, v. 15, n. 1, p. 49-59, 2007.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades - Evolução Populacional.** Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/painel/populacao.php?lang=&codmun=230420&search=ceara|crato|info%20gr%20fic%20s%20-%20evol%20-%20populacional-e-pir%20mide-et%20ria>. Acesso em 10ago2016

IPECE - INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal do Crato.** Secretaria de Planejamento e Gestão do Ceará, 2012.

LIMA, F. J., CESTARO, L. A., & ARAÚJO, P. C. Sistemas geoambientais do município do Crato/CE. **Mercator**, v. 9, n. 19, p. 129-142, 2010.

LIMA, M. R., & PERINOTTO, J. A. Palinologia de sedimentos da parte superior da formação Missão Velha, Bacia do Araripe. **Geociências**, v. 3, n.1, p. 67-76. 1984.

LIMA, M. T., & CARVALHO NETA, M. D. As geotecnologias na representação cartográfica dos padrões de uso e ocupação do solo na área da microbacia do rio Granjeiro, Crato/CE. **Anais VI Congresso Iberoamericano de Estudios Territoriales y Ambientales.** São Paulo, p. 1645-1662, 2014.

MABESOONE, J. M., & TINOCO, I. M. Palaeoecology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 14, n. 2, p. 97-118, 1973.

MORAES, J. F., SANTOS, J. S., & MASCARENHAS, J. D. **Projeto Santana: Relatório final da etapa I.** Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Superintendencia Regional de Recife, 1976.

PONTE, F. C., & APPI, C. J. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. **Anais Congresso brasileiro de geologia**, 36. Natal: Sociedade Brasileira de

Geologia, v. 1, p. 211-226, 1990.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria técnica SUPREM, 1997.

VALÉRIO FILHO, M., ALVES, M., GARCIA, R., & FANTIN, M. Caracterização de bacias hidrográficas impermeabilizadas pelo processo de urbanização com o suporte de geotecnologias. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, p. 1977-1983, 2003. CD-ROM, On-Line. ISBN 85- 17-00017-X. Disponível em: <http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005/biblioteca/>. Acesso em: 20 set 2016.

VERÍSSIMO, L. S., CAVALCANTE, I. N., AGUIAR, R. B., & THIAGO, J. Recursos Hídricos subterrâneos da bacia sedimentar do Araripe - Zona leste, Estado do Ceará. **XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste**, 2007. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22202/14553>. Acesso em: set2016.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 87p., 1978.

3 ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA MICROBACIA PERIURBANA NO CRATO, CEARÁ

RESUMO

Estimar a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica torna-se importante para a resolução de problemas causados pela erosão, como prejuízos à agricultura e assoreamento de rios e reservatórios. Essa produção pode ser obtida pela modelagem preditiva de erosão dada pela Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), associada à taxa de aporte de sedimentos. A EUPS estima a perda média anual de solo através do produto de seis fatores topográficos, climáticos, do solo e de uso e ocupação do solo. Para estimar a produção de sedimentos de uma bacia também deve ser considerada a contribuição da população em termos de material sedimentar, caso haja área urbana, pois a EUPS não se aplica a este tipo de ocupação do solo. A produção de sedimentos foi estimada para a bacia hidrográfica do rio Granjeiro (aproximadamente 19 km²), uma área que ocupa grande parcela da sede municipal do Crato, no Ceará, para o período de 1974 a 2016. Para a erosão em áreas rurais foi aplicada a EUPS, com valores de erodibilidade do solo calculados por dois procedimentos: o nomograma de Wischmeier et al. (1971) e a equação de Denardin (1990). Os sedimentos de origem urbana foram quantificados em função da população de cada sub-bacia da área em estudo. A razão de aporte de sedimentos (SDR) foi calculada em função das características morfológicas da bacia. Avaliou-se que a produção de sedimentos na bacia foi de 6,02 ton.ha-1.ano-1. A taxa (SDR) foi estimada em 29%, portanto, pouco mais de um quarto da erosão bruta foi carreada para o exutório da bacia. Cerca de 4% dos sedimentos são de origem urbana. Os valores de erodibilidade segundo a equação de Denardin superestimaram os do nomograma. Verificou-se que a produção de sedimentos apresentou sensibilidade significativa com relação à erodibilidade e que a presença de áreas urbanas diminui a influência do fator de erodibilidade sobre o modelo.

Palavras-chave: Equação Universal de Perda de Solos. Erosão. Erodibilidade dos solos.

ABSTRACT

Estimating the production of sediments in a watershed becomes important for the resolution of problems caused by erosion, such as damage to agriculture and silting of rivers and

reservoirs. This production can be obtained by the predictive model of erosion given by the Universal Soil Loss Equation (USLE), associated to the sediment contribution rate. The USLE estimates the average annual loss of soil through the product of topographic, climatic, soil and land use factors. To estimate the sediment yield of a basin should also be considered the population's contribution in terms of sedimentary material, if any urban area, because the USLE does not apply to this type of land use. Sediment production was estimated for the river basin of Granjeiro (approximately 19 km²), an area that occupies a large part of the municipal headquarters of Crato, in Ceará, from 1974 to 2016. For erosion in rural areas the USLE was applied, with values of soil erodibility calculated by two procedures: the nomogram of Wischmeier et al. (1971) and the Denardin equation (1990). The sediments of urban origin were quantified according to the population of each sub-basin of the study area. The sediment delivery ratio (SDR) was calculated according to the morphological characteristics of the basin. It was evaluated that the sediment production in the basin was 6.02 ton.ha⁻¹.an⁻¹. The SDR was estimated at 29%, so, a little more than a quarter of the gross erosion was carried to the exudate of the basin. About 4% of the sediments are of urban origin. The values of erodibility according to the Denardin equation overestimated those of the nomogram. It was verified that the sediment production presented significant sensitivity with regard to erodibility and that the presence of urban areas reduces the influence of the erodibility factor on the model.

Keywords: Universal Equation of Soil Loss. Erosion. Erodibility of soils.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica laminar é um processo que, pela ação da água, promove a desagregação e transporte das partículas da superfície do solo. Este fenômeno está principalmente relacionado com a liberação de material sedimentar causada pelo impacto das gotas da chuva que golpeiam o solo, e que é deslocado através do escoamento superficial, propiciando a remoção de uma espessura relativamente uniforme de solo (Morgan, 2005; Guerra, 2012). Problemas causados pela perda de solo, como danos erosivos na agricultura e assoreamento de reservatórios, impulsionaram o desenvolvimento de métodos para definir os fatores e mensurar o processo de erosão.

Uma variável relevante para o estudo de uma bacia é a produção de sedimentos que saem desse sistema, medida em um período de tempo (De Moor & Verstraeten, 2008). Essa produção pode ser obtida pela Equação Universal de Perda de Solo (EUPS ou, em inglês, USLE), desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978), que é uma modelagem preditiva de erosão. A EUPS é comumente utilizada por ter como base um robusto banco de dados e por sua simplicidade (Bagarello et al., 2012). A equação estima a perda média de solo através do produto de seis fatores que envolvem parâmetros topográficos, climáticos, além de características físicas do solo e de uso da terra.

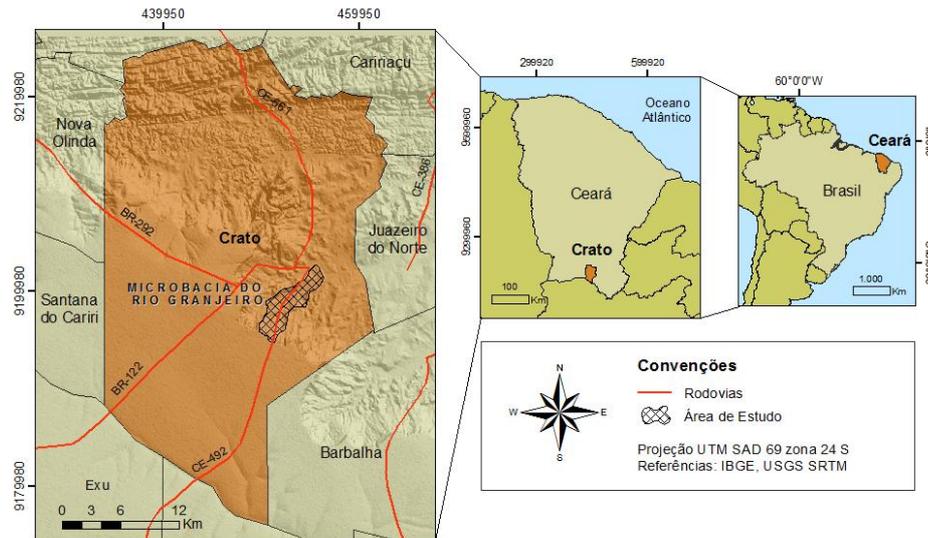
A EUPS faz aproximações de erosão localizada, mas deve ser ajustada para a produção de sedimentos (PS) em uma bacia hidrográfica. A estimativa *in situ* de PS demonstra que ela é geralmente bem inferior à soma dos valores de erosão bruta, conforme calculada pela EUPS. Deve ser considerado, portanto, que o sedimento produzido nos processos erosivos é transportado de modo difuso sendo, em grande parte, redepositado no trajeto rumo ao exutório (Khanbilvardi & Rogowski, 1984; Mamede, 2002; Medeiros et al., 2014). Como se objetiva calcular a produção de sedimentos em uma bacia parcialmente urbanizada, a erosão (EUPS) deve ser somada à contribuição da população na produção de material sedimentar (Araújo, 2003).

A bacia hidrográfica do rio Granjeiro, no município do Crato, representa a área de estudo da presente pesquisa. O objetivo é simular a produção de sedimentos por erosão laminar e de contribuição urbana. Além disso, almeja-se avaliar a sensibilidade da modelagem ao método de cálculo da erodibilidade do solo. Para isso, os valores de erodibilidade foram estimados segundo dois procedimentos diferentes.

ÁREA DE ESTUDO

Localizada no município do Crato, extremo sul do Estado do Ceará (Figura 1), a área de estudo corresponde à área de influência da bacia do rio Granjeiro. Ela drena uma área de aproximadamente 19 km², compreende quase que toda sede municipal, sendo é traspassada pelo rio Granjeiro que nasce de ressurgências na encosta da Chapada do Araripe e termina ao encontrar-se com o rio Batateiras, próximo à saída para Juazeiro do Norte.

Figura 1 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Granjeiro, referente também a sede municipal do Crato, sul Cearense.



Fonte: elaborada pelo autor.

A geologia da área é definida pela porção pós-rifte da bacia sedimentar do Araripe, representando a sequência Aptiano-cenomaniana do Cretáceo. Os litotipos são arenitos intercalados com argilitos e folhelhos da Formação Barbalha, folhelhos e calcários da Formação Santana e arenitos caulíníticos da Formação Exu (Assine, 1992). Uma característica marcante na área são os depósitos de tálus e lentes coluvionares em cotas correspondente a Formação Barbalha e em encaixes nos Pedimentos sobre a Formação Santana. Esse material é composto por arenitos silicificados e possui arcabouço mal selecionado em uma matriz rica em ferro.

A área está associada com a geomorfologia do entorno oeste da Chapada do Araripe, um relevo com topo aplainado que chega a 950m de altitude, rodeado por escarpas erosivas íngremes e pedimentos. A microbacia está posicionada na porção oriental da Chapada, a partir da vertente que mergulha para NE e que tem aspecto de “anfiteatro”, de forma convergente côncava. A adaptação e detalhamento da compartimentação geomorfológica proposta por Lima et al. (2010) serviu de base para uma delimitação de maior detalhe.

O compartimento no topo da Chapada, o Platô, tem relevo plano e é definido das cotas de 960m a 950m. A Escarpa Erosiva é caracterizada por relevos montanhosos a forte ondulados, marcando de 950m a 765m de altitude. As Rampas Pedimentadas são definidas por relevo suave ondulado a forte ondulado, delimitadas entre as cotas 765m a 540m. A

Depressão Periférica possui relevo suave ondulado a forte ondulado. A Planície Fluvial, de relevo plano, chega até aproximadamente 480m de altitude.

Em razão das diferenças dos ambientes de relevo que compõem a área de estudo, os aspectos climáticos são típicos. Na porção da Depressão Sertaneja é caracterizado o clima semiárido e, pelas mudanças de altitude, o domínio da Chapada do Araripe apresenta o clima quente subsumido, possibilitando um regime pluviométrico superior e temperatura amena (IPECE, 2012). Segundo dados do IPECE (2012), o período chuvoso do município do Crato vai de janeiro a maio, com temperatura média anual variando de 24° a 26°C, pluviosidade média anual de 1090,9mm e evapotranspiração potencial de 7,6mm.

Apesar do regular regime pluviométrico, há ausência de drenagens no Platô da Chapada, isto evidenciado pela alta taxa de infiltração dos arenitos porosos da Formação Exu, que permite a instalação de 320m de um nível aquífero, o chamado aquífero superior (Veríssimo et al., 2007). Nessa situação, ao entrar em contato com a litologia impermeável logo abaixo (Formação Santana), o aquífero aflora para formar o rio Granjeiro, através de fontes difusas. O rio é canalizado quando chega ao núcleo urbano, transpassando bem ao centro.

O Levantamento de média intensidade dos solos, produzido pela FUNCEME & EMBRAPA (2012) na escala de 1:200.000, permitiu o reconhecimento de Latossolos amarelos com Argissolos amarelos e Latossolos vermelho-amarelos, instalados no topo da Chapada. Na Escarpa erosiva estão presentes associações de Neossolos e Argissolos, assim como rocha exposta.

Nos Pedimentos, Neossolos se instalam em relevos de ondulado a montanhoso, com Argissolos e Latossolos nos setores de relevo suave a fortemente ondulado. Os solos presentes na Depressão Periférica têm associação de Argissolos Vermelho-amarelos com inclusões de Neossolos Litólicos nas porções centro-leste da microbacia e Neossolos flúvicos com Vertissolos nos relevos planos da Planície Fluvial.

A sede municipal do Crato inserida na área de influência da microbacia do rio Granjeiro é palco de expressivos processos morfodinâmicos, caracterizando problemas de risco geológico. Esses fenômenos são provocados pela combinação de fatores geológico-geomorfológicos e climáticos: a relação altitude/amplitude das compartimentações do relevo, os episódios de chuvas extraordinárias e as composições texturais das camadas sedimentares da bacia do Araripe.

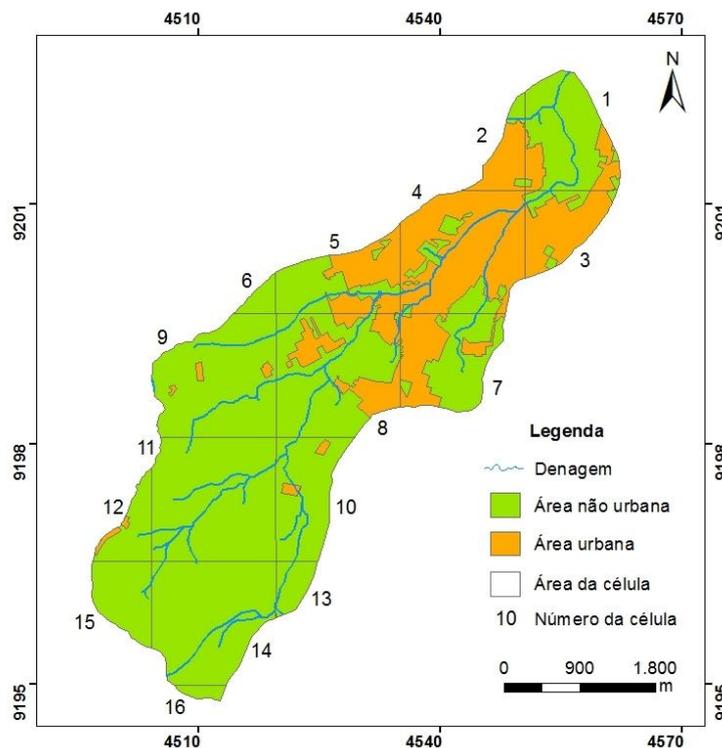
Essas características contribuem juntamente com a configuração da zona de ocupação urbana para eventos de inundação e movimentos de massa em encostas de morro. A

canalização do rio ao atravessar o núcleo urbano com arruamentos cerrados explica os registros que ocorreram em janeiro de 2011, onde a enchente provocou a parcial destruição do canal interurbano, com uma precipitação de 162mm. Além de outros registros menores ocorridos em março e abril de 2015, respectivamente com precipitações de 105mm e 140mm, segundo dados da FUNCEME (2014).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução da referida pesquisa, a microbacia hidrográfica do rio Granjeiro foi delimitada, compreendendo uma área de 18,6 km². Seus aspectos fisiográficos foram estudados numa resolução de escala de 1:50.000 e a análise de uso e ocupação definida na escala de 1:4.000. Para fins de modelagem, a área foi subdividida em quadrículas (células) que abrangiam áreas específicas e homogêneas, resultando em 16 subáreas (Figura 2). Foram calculadas as variáveis para cada célula para uma posterior integração e atribuição a toda bacia.

Figura 2 - Área de estudo com divisões das células.



Fonte: modificado de Paiva, 2016.

Para quantificar a produção de sedimentos por erosão laminar (PS), a microbacia foi delimitada em áreas não urbanas, definidas por áreas rurais, onde se aplicaria o cálculo da EUPS, e em áreas urbanas, onde se calcularia a massa de sedimentos de contribuição da população. Deste modo, foi utilizado o mapeamento de uso e ocupação elaborado por Paiva (2016) para o ano de 2014, com adaptações. Os valores de erosão obtidos foram somados ao fator de transporte difuso de sedimentos para gerar a produção de sedimentos da microbacia

Especificamente para o fator de erodibilidade (K) foram utilizados o nomograma de Wischmeier et al. (1971) e a equação de Denardin (1990). A equação é um modelo algébrico para o nomograma, excluindo somente a variável da estrutura do solo. Foi estipulado o grau de correlação entre os valores da produção de sedimentos que adotaram os dois tipos de fator K, pela análise de regressão.

A análise de sensibilidade é a investigação das variações e erros de algum parâmetro e de seus impactos no produto final de um modelo (Pannell, 1997). Essa metodologia foi utilizada para explicar a variação na produção de sedimentos (dado de saída) em função de variações nos valores de K (dado de entrada). Nesse caso, a variação de K se dá em função do método de cálculo: se obtidos pelo nomograma de Wischmeier et al. (1971) ou se pela equação de Denardin (1990). O valor de K do nomograma foi admitido como o de referência; e o da equação de Denardin, o valor com desvio.

Erosão localizada bruta

A erosão localizada pode ser mensurada pela Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), para áreas rurais. A EUPS é uma equação empírica que considera parâmetros topográficos, climáticos, características físicas do solo e de uso da terra, como indicadores que influenciam na erosão do solo (Wischmeier & Smith, 1978). Está definida pela Equação 1. Foi calculado um valor da USLE para cada célula que continha parcelas de área não urbana.

$$E = R \times K \times L \times S \times C \times P \times A \quad (1)$$

Na equação, E é a erosão localizada ($t \cdot ano^{-1}$); R o fator de erosividade da chuva ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$); K o fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); L o fator topográfico, função do comprimento de declive do terreno natural (adimensional); S o fator topográfico, função da declividade do terreno (adimensional); C o fator de cobertura vegetal e

uso do solo (adimensional); P o fator que reflete práticas conservacionistas (adimensional); e A a área de contribuição (ha).

Fator erosividade da chuva (R)

Lombardi & Moldenhauer (1992) obtiveram a Equação 2 para experimentos feitos na região de Campinas. Entretanto, Araújo (2003) comprovou a validade da Equação 2 também para a região semiárida do Brasil, aplicando-a a sete bacias hidrográficas. Foram obtidos os dados pluviométricos do posto Crato, para os anos de 1974 a 2016 (FUNCEME, 2016).

$$EI = 6,886 \left(\frac{Pm^2}{Pa} \right)^{0,85} ; R = \sum_{m=1}^{12} Rm \quad (2)$$

Na Equação 2, EI é a erosividade mensal da chuva (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.mês⁻¹); Pm é igual à precipitação mensal (mm.mês⁻¹); Pa é a precipitação média anual (mm.ano⁻¹); R a erosividade anual (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹); e ‘m’ o índice referente ao mês.

Fator erodibilidade do solo (K)

O fator K foi estimado tanto pelo nomograma de Wischmeier et al. (1971), quanto pela equação de Denardin (1990). Os dois procedimentos configuram métodos de estimativa indireta. O nomograma é uma representação gráfica baseada em dados de solos do Meio-Oeste dos Estados Unidos, de textura média, baixa agregação e teor de silte inferior a 70% (Demarch e Zimback, 2014). Os parâmetros adotados são as porcentagens de silte e areia, porcentagens de matéria orgânica, classes de estrutura e permeabilidade.

As frações granulométricas correspondem ao sistema de classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, descritos na Tabela 1. Foi adotada a denominação didática de Renard et al. (1997) para os intervalos granulométricos do referido sistema usados no método: fração “silte modificado” significando a soma de silte e areia fina (0,002 a 0,1mm) e fração “areia modificada” significando a porção areia propriamente dita (diâmetros 0,1 a 2,0mm).

Denardin (1990) analisou diretamente dados de erodibilidade de trinta e um perfis de solo do Brasil e quarenta e seis perfis de solo dos Estados Unidos. Os parâmetros

considerados são semelhantes ao de Wischmeier et al. (1971): frações de argila, silte e areia, permeabilidade e teor de matéria orgânica, excetuando o tipo de estrutura do solo. Os resultados produziram a Equação 3.

$$K = 7,48 \times 10^{-6}(M) + 4,48 \times 10^{-3}(P) - 6,31 \times 10^{-2}(DMP) + 1,03 \times 10^{-2}(R) \quad (3)$$

A variável M representa a relação de “silte modificado” e “areia modificada” (%), dada pela Equação 4. A variável DMP é o diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2 mm, expressa pela equação 5, em que Dm é o diâmetro médio de cada fração (mm) e Pp é a proporção de peso de cada fração (g). R é a relação entre o teor de matéria orgânica e o teor de “areia modificada” (%), expresso na Equação 6.

$$M = \text{silte modificado} \times (\text{silte modificado} + \text{areia modificada}) \quad (4)$$

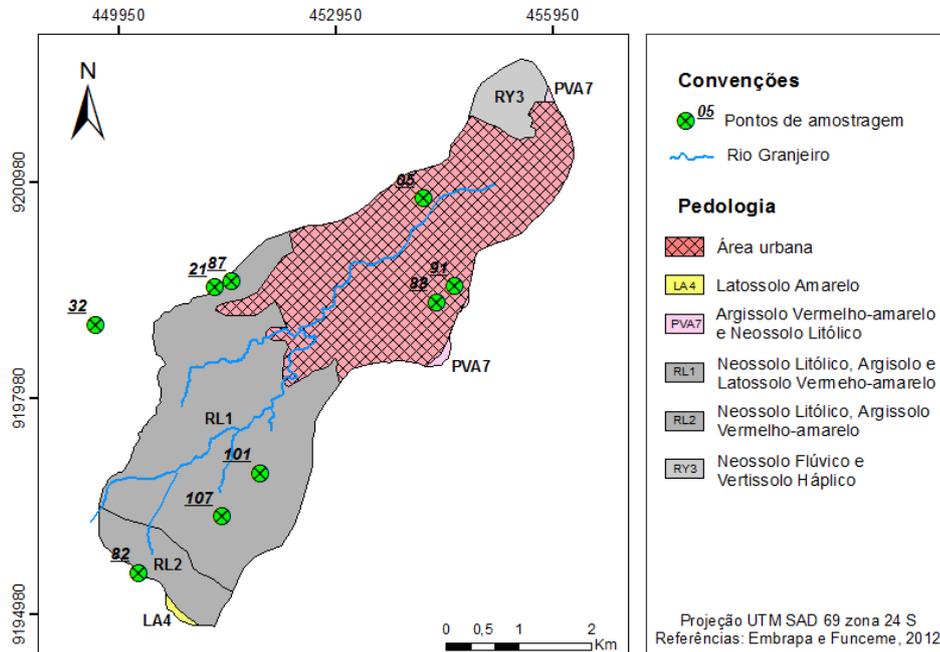
$$DMP = \frac{\sum Dm \times Pp}{\sum Pp} \quad (5)$$

$$R = \frac{\text{areia modificada} \times MO(\%)}{100} \quad (6)$$

Para o cálculo do diâmetro médio ponderado, o diâmetro médio de cada fração é calculado pela média aritmética dos seus intervalos. Assim, foram avaliadas as frações: areia muito grossa, de 2,0 a 1,0mm (Dm = 1,5mm); areia grossa, de 1,0 a 0,5mm (Dm = 0,75mm); areia média, de 0,5 a 0,25mm (Dm = 0,375); areia fina, de 0,25 a 0,1 (Dm = 0,175); areia muito fina, de 0,1 a 0,05mm (Dm = 0,075mm); silte, de 0,05 a 0,002 (Dm = 0,026mm) e argila, considerando 0,002mm (Dm = 0,002mm).

A coleta para cada amostra foi feita do horizonte A, ou horizonte mais superficial. Somente uma amostra foi coletada do arenito pouco consolidado da Formação Barbalha, sob justificativa do decapeamento intenso do solo ocorrido localmente e da exposição desse nível litológico, onde já se pronunciava pontos de erosão. A Figura 3 demonstra a distribuição dos pontos de coleta na área.

Figura 3 - Mapa da área de estudo, com a distribuição dos pontos de amostragem de solo para avaliação dos ensaios físicos e químicos referentes ao fator erodibilidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

A distribuição do tamanho dos grãos tem uma grande influência sobre a erodibilidade do solo: quanto maior o teor de silte e quanto menor o teor de areia, maior erodibilidade do solo. Por outro lado, solos argilosos são mais coesos e mais resistentes a desagregação provocada pelo impacto da gota da chuva. Para aferir a granulometria dos solos, foram realizados os procedimentos que constam nas normas de preparação de amostras para ensaio de caracterização - NBR 6457/86, análise granulométrica - NBR 7181/1984 e a densidade real do grão pelo método do picnômetro - DNER-ME 093/94.

Para os intervalos exigidos no método, foi necessário o acréscimo da peneira de 0,1mm que afere um intervalo mais específico de areia (areia muito fina - 0,1 a 0,05mm) e, portanto, utilizado o sistema classificação do Departamento de agricultura dos Estados Unidos, conforme descrito na Tabela 1. McElroy et al. (1976) explica que as partículas de areia muito fina são subtraídas do percentual total de areia e correlacionadas ao de silte por se comportar mais como silte do que como areia.

Tabela 1 – Classificação do diâmetro dos grãos, segundo o Sistema USDA (1951).

Frações Granulométricas	Diâmetro dos grãos (mm)
Areia muito grossa	2,0 - 1,0
Areia grossa	1,0 - 0,5
Areia média	0,5 - 0,25
Areia fina	0,25 - 0,10
Areia muito fina	0,10 - 0,05
Silte	0,05 - 0,002
Argila	< 0,002

Fonte: USDA (1951).

Wischmeier et al. (1971), com base no Soil Survey Manual (USDA, 1951), consideram quatro tipos principais de estruturas que são plotados no nomograma de acordo com seu código, como demonstrados na Tabela 2. As três primeiras classes são tipos de um solo do tipo granular, onde os agregados são arredondados. A quarta classe engloba blocos (agregados em blocos com três dimensões mais ou menos iguais, variando de 3 a 4 polegadas), lâminas (disposição em placas) ou maciço (unidades grandes e irregulares) (McElroy et al., 1976).

Tabela 2 – Classificação da estrutura do solo

Código Estrutura	Classificação	Diâmetro do agregado (mm)
1	Granular muito fina	< 1
2	Granular fina	1 - 2
3	Granular média e grossa	2 - 10
4	Blocos, Lâminas ou maciço	

Fonte: Wischmeier et al. (1971) apud McElroy et al. (1976).

Este parâmetro foi expresso pela lei de Darcy (Darcy, 1856), através dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - NBR 13292/95 e de solos argilosos à carga variável - NBR 14545/00. Os solos foram coletados como amostra indeformadas em cilindro de cravação. Esse dado é inserido no nomograma através dos códigos de permeabilidade da Tabela 3.

A matéria orgânica foi aferida pelo método Walkley-Black (Embrapa, 1997). O processo se dá pela oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, empregando-se como fonte de energia o calor despreendido do ácido sulfúrico

e/ou aquecimento. O excesso de dicromato após a oxidação é titulado com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr).

Fator topográfico (LS)

O fator LS foi estimado através da Equação 7 de Bertoni & Lombardi Neto (2005), para condições de rampa padrão. O comprimento médio da rampa em bacias pode ser estimado como proposto por Fernandes (2000, Equação 8).

$$LS = 9,84^{-3} \times Lr^{0,63} \times D^{1,18} \quad (7)$$

$$Lr = \frac{Ac}{(4 \times \Sigma L)} \quad (8)$$

Nas equações 7 e 8, Lr é o comprimento médio de rampa (m); D é o grau de declive (%); Ac é a área da célula (m²); L significa o comprimento dos cursos d'água e das estradas que se comportam como drenos de águas pluviais, calculado para a célula. O declive é dado pela Equação 9, em que ΔH é o intervalo das curvas de nível (m); ΣL é o comprimento de todas as linhas das curvas (m) da célula.

$$D = \frac{\Delta H \times \Sigma L}{Ac} \quad (9)$$

Como o fator LS é calculado por célula, algumas delas não possuem drenagens expressivas ao ponto de gerar uma distorção nos valores finais. Para corrigir, o valor da célula que apresentava o problema foi obtido pela média dos valores de três células vizinhas.

Fatores de uso e manejo do solo e de práticas conservacionistas (CP)

A ferramenta utilizada foi o mapa de uso e ocupação de 2014 da bacia do rio Granjeiro de Paiva (2016), com adaptações as especificidades dos valores de C tabelados na literatura. Pesquisas que envolvem o uso do fator C no Brasil comumente utilizam a referência de Bertoni & Lombardi, desenvolvida para região de São Paulo. Porém, é entendido que os valores de Roose (1976) obtidos para o oeste africano são mais adequados para a realidade do semiárido nordestino (Araújo, 2003).

Para ponderar os valores de acordo com as características da área, foram utilizadas também algumas estimativas referidas por Carvalho (2008). As práticas conservacionistas (P) expressam o modo como a cultura foi feita adotando-se determinada prática de mitigação da erosão. Quando os plantios não apresentam tais práticas, considera-se o valor 1, como o caso da área de estudo.

Sedimento de contribuição urbana

Como a bacia do rio Granjeiro delimita quase toda a sede municipal do Crato, é necessário considerar que as parcelas urbanas têm uma resposta diferente à erosão por conta dos terrenos revestidos. Entretanto, não é excluído o fato que há uma contribuição urbana na geração de tipos específicos de sedimentos. Assim, definida como sedimentos de origem urbana (Surb), o cálculo da contribuição urbana é aplicado por Araújo (2003) pela Equação 10, resultado do produto da população contribuinte (Pop) com a contribuição *per capita* de sedimentos (ω).

$$\text{Surb} = \text{Pop} \times \omega \quad (10)$$

A contribuição *per capita* foi obtida pelo valor elaborado para a área urbana do entorno do açude Santo Anastácio, por Soares (2003), onde cada habitante contribui com 56 g anualmente para o assoreamento do referido açude. Como o cálculo de produção de sedimento urbano é feito por célula, a população foi calculada através dos dados de habitantes por domicílio (IBGE, 2015) e números de domicílios por célula. Esse dado foi compensado para menos ao comparar com o número total de habitantes na área urbana (IBGE, 2010), visto que devem ser considerados os bairros comerciais e de serviços.

Índice de transporte difuso de sedimento – SDR

Para se calcular a erosão em toda uma bacia é preciso considerar o fator de depósito e retenção difusa dos sedimentos, pois até então foram calculadas aproximações de erosão localizadas (Araújo, 2003). Khanbilvardi & Rogowski (1984) explicam que esse fator é a razão entre a massa de sedimentos que deixa uma bacia e a massa de sedimentos localmente erodida, o chamado índice de transporte difuso (no inglês, Sediment Delivery Ratio - SDR). Maner (1958) apresenta a formulação do SDR adotada neste trabalho, descrita

pela Equação 11. L_m representa o comprimento máximo da bacia (m) e Fr é a diferença de nível entre o exutório e a média das cotas do divisor.

$$\text{Log}(\text{SDR}\%) = 2,943 - 0,824 \times \text{Log}\left(\frac{L_m}{Fr}\right) \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na subdivisão da bacia por células, todas incluíam área rural, porém algumas células não possuíam área urbana, principalmente aquelas a sul da área.

O fator de erosividade (R), com o valor de $8.597 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, caracterizou-se como erosividade forte ($7357 < R \leq 9810 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) pela classificação de Carvalho (2008) modificada por Machado et al. (2014). A erosividade foi considerada única para toda a bacia. O fator de erodibilidade (K) calculado pelo nomograma gerou valores entre $0,005$ e $0,052 \text{ ton.MJ}^{-1}.\text{h.mm}^{-1}$, e pela equação de Denardin, de $0,007$ a $0,045 \text{ ton.MJ}^{-1}.\text{h.mm}^{-1}$. A média de variação entre os dois tipos de determinação do K é de $0,01 \text{ ton.MJ}^{-1}.\text{h.mm}^{-1}$. Como a erodibilidade é aferida pontualmente, foram feitas as médias dos valores plotados dentro da célula para atribuir um único valor, levando em conta também a coerência da topografia com a continuidade do solo.

O fator LS admitido por célula obteve valores maiores para sul da área, onde os relevos escarpados estão presentes. O fator de uso e manejo do solo (C) obteve os menores valores para sul da área, onde está a Floresta Nacional do Araripe. O maior índice de C , correspondente a solo exposto, está próximo ao núcleo urbano, mas a maioria dos valores em toda a microbacia condiz com uma vegetação rasteira e degradada. Práticas conservacionistas (P) não foram observadas na área. A Tabela 4 discrimina as variáveis medidas por célula (para o posicionamento das células na microbacia, verificar Figura 2).

Tabela 4 – Grandezas medidas por célula. PS = produção de sedimentos, nom = calculado com o K do nomograma, den = calculado com o K da equação de Denardin.

Valores por célula	Células															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Área urbana (ha)	26,7	34,8	66,1	185,9	59,8	ausente	56,4	57,5	4,2	4,4	ausente	3,2	ausente	ausente	ausente	ausente
Área rural (ha)	112,6	7,2	17,2	33,6	59,7	14,2	76,3	166,9	196,6	102,6	236,4	39,9	25,6	200,3	61,8	8,8
Fator R (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹ .ano ⁻¹)	8,596*															
Fator K nom (ton.MJ ⁻¹ .h.mm ⁻¹)	0,021	0,021	0,021	0,021	0,017	0,013	0,010	0,012	0,032	0,005	0,005	0,007	0,007	0,009	0,015	0,015
Fator K den (ton.MJ ⁻¹ .h.mm ⁻¹)	0,041	0,041	0,041	0,041	0,034	0,027	0,011	0,021	0,037	0,018	0,018	0,018	0,018	0,019	0,030	0,030
Fator LS	1,24	0,79	0,96	0,65	1,32	2,02	1,55	2,08	2,40	1,40	2,78	4,71	0,63	6,76	10,09	5,17
Fator CP	0,01	0,01	0,10	0,10	0,10	0,10	1,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	0,01	0,001	0,001
População (habitantes)	3.991	5.197	9.869	27.752	8.921	-	8.416	8.577	621	661	-	478	-	-	-	-
Erosão rural (nom) (ton.ano ⁻¹)	251	10	300	392	1.148	315	10.135	3.556	13.126	618	2.830	113	98	1.047	80	6
Erosão rural (den) (ton.ano ⁻¹)	492	20	588	768	2.322	669	11.333	6.388	14.838	2.179	9.979	292	253	2.156	159	12
Erosão urbana (ton.hab ⁻¹ .ano)	82	106	202	567	182	-	172	175	13	14	-	10	-	-	-	-
PS total (nom)	97	34	146	280	388	92	3.005	1.088	3.831	184	825	36	29	305	23	2
PS total (den)	167	37	230	389	730	195	3.355	1.914	4.330	639	2.909	88	74	629	46	3

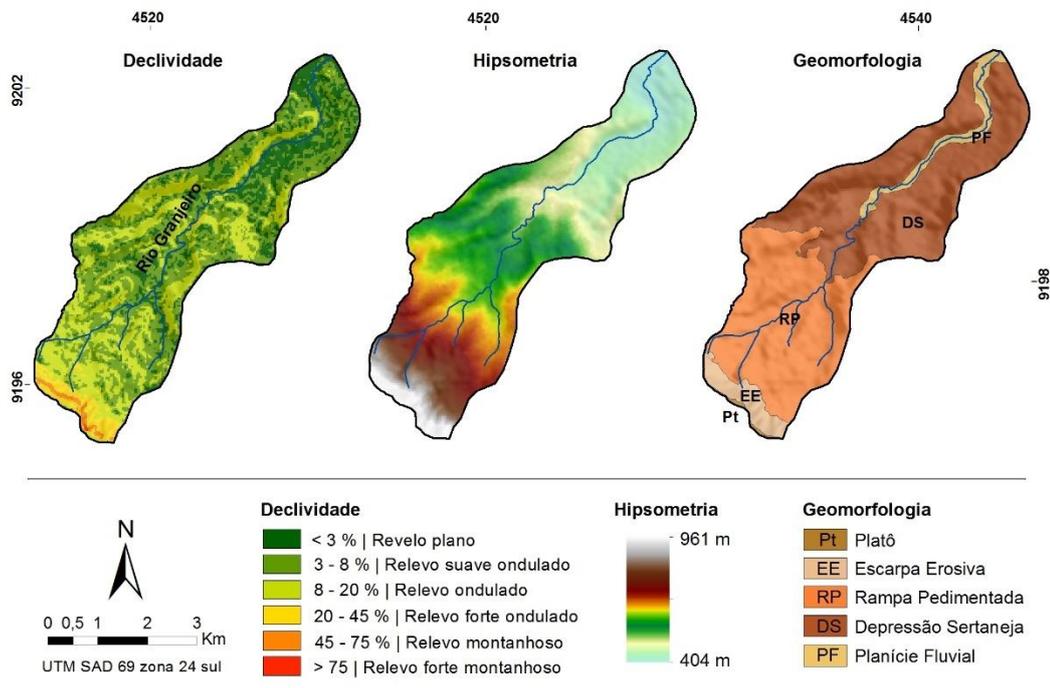
* o valor da erosividade anual é o mesmo para todas as células

Fonte: elaborado pelo autor.

Das medidas que compõem o índice de transporte difuso de sedimento (SDR), foram calculados o comprimento da bacia $L_m = 8.886\text{m}$ e a diferença de altitude entre o divisor e o exutório $Fr = 142,7\text{m}$. Para a bacia, o SDR teve resultado de 29%, significando que pouco mais de um quarto da erosão bruta produziu sedimentos carregados para o exutório. Esse valor é relativamente alto, podendo ser explicado pela configuração do relevo acidentado que confere alto fluxo para transporte de material, apesar de o comprimento máximo da bacia ser grande em relação à sua área, que proporcionaria mais ambientes de deposição a jusante (Figura 4).

A produção de sedimentos (PS) foi calculada com a erodibilidade do nomograma de Wischmeier et al. (1971) e da equação de Denardin (1990). Para isto, uma determinação mais refinada foi feita para toda a bacia levando em conta a erosão bruta mensal com o dado de erosividade de cada mês (dos anos de 1974 a 2016). Assim, foi calculado um valor de PS por mês para gerar uma média anual. O resultado foi a PS por ano de $6,02\text{ ton.ha}^{-1}$ com os valores do K nomograma e $9,15\text{ ton.ha}^{-1}$ com os valores da equação. De outra forma, a PS foi medida por célula com um valor de erosão bruta anual calculado por um único valor erosividade média dos anos de 1974 a 2016, resultando numa produção de $5,58\text{ ton.ha}^{-1}.ano^{-1}$ com a variável do nomograma e $8,47\text{ ton.ha}^{-1}.ano^{-1}$ com a variável da equação de Denardin (Tabela 5).

Figura 4 – Declividade, hipsometria e geomorfologia da bacia do rio Granjeiro.



Elaboração: Autores
Referência: USGS, 2015 - SRTM; Embrapa, 1979 - Classificação da declividade

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Valores para a microbacia. PS = produção de sedimentos, nom = calculado com o K do nomograma, Den = calculado com o K da equação de Denardin.

Valores obtidos para a microbacia do rio Granjeiro		
Área da microbacia (ha)	1.859	
Área urbana (ha)	499	
Área rural (ha)	1.359	
Índice SDR (%)	29	
PS (nom) (ton.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	6,02 ¹	5,58 ²
PS (den) (ton.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	9,15 ¹	8,47 ²
Sensibilidade (K,PS)	0,85	

¹ calculado com dados de erosão mensal (1974 a 2016)

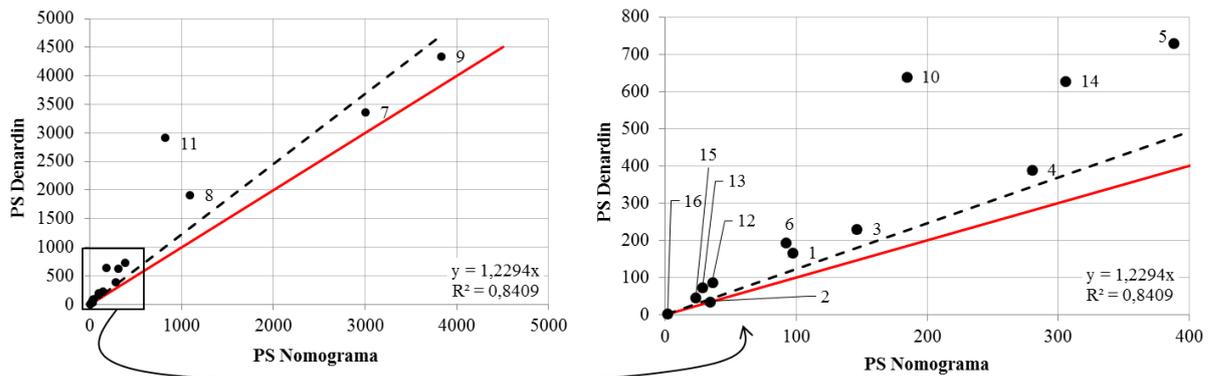
² calculado, por célula, com o dado da erosão anual (1974 a 2016)

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar na Figura 5 que a relação da PS gerada pelos dois tipos propostos para o fator K possui uma correlação forte ($r = 0,92$). As células com valores mais correlatos são as que produzem menor quantidade de sedimentos e as com maior taxa de erosão bruta, como as células 11 e 8 (Figura 2), são as mais discrepantes. Estas também são células que estão no centro da bacia e possuem maior extensão de área. Assim como os resultados da PS total da bacia, os resultados para as células, que se alocam acima da linha

identidade, mostram que a equação de Denardin tem a tendência de superestimar a produção em relação ao nomograma (Figura 5).

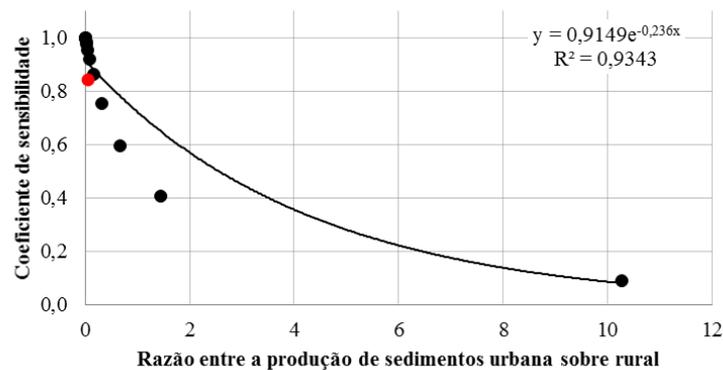
Figura 5 – Gráfico de dispersão da produção de sedimentos (PS) com a erodibilidade do Nomograma e da equação de Denardin, das 16 células divisoras da microbacia. Retta pontilhada = linha de tendência; retta vermelha = linha identidade.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para a análise de sensibilidade que correlaciona a produção de sedimentos com a erodibilidade foi admitido que o fator K do nomograma seria o valor de entrada esperado. A Figura 6 demonstra os coeficientes de sensibilidade atribuídos à relação entre a produção de sedimentos urbanos e rurais, por célula. A variação dos valores do K é significativa para a PS, demonstrada pelo grau de sensibilidade da bacia de 0,85.

Figura 6 – Regressão exponencial da sensibilidade pela razão da produção de sedimentos urbanos e rurais. Ponto vermelho = sensibilidade da microbacia (0,85).



Fonte: elaborada pelo autor.

Da produção total da bacia, 4% dos sedimentos é de origem urbana. Quanto maior a proporção de área urbana na célula, menor a influência do K na variação da produção de

sedimentos, ou seja, a grau de sensibilidade é baixo, como observado nas células 2 e 4 que correspondem a uma parte do núcleo urbano (Figura 2).

CONCLUSÕES

A estimativa de referência para a produção de sedimentos da bacia foi o valor de 6,02 ton.ha⁻¹.ano⁻¹. Este resultado está bem relacionado com as características da área, principalmente os parâmetros físicos da bacia como a amplitude do relevo, fator que contribuiu para que 29% da erosão produziram sedimentos carregados para o exutório, segundo o calculado pelo transporte difuso de sedimento (SDR).

Com a estimativa da produção de sedimentos por áreas rurais e urbanas foi possível também observar a contribuição espacial da bacia nessa produção, isto porque a zona urbana instalada ao centro-norte da área que contribui com 4% na produção de sedimentos totais. Ampla porção ao sul da área responde por 18,3 ton.ha⁻¹.ano⁻¹.

A correlação forte $r = 0,92$ entre resultados dos dois procedimentos de aferição da erodibilidade (K) mostra que equação de Denardin simula satisfatoriamente o nomograma. Também é observado que os valores da equação de Denardin são superestimados em relação ao nomograma. A sensibilidade do modelo à variação dos valores de K mostrou-se alta. A presença de áreas urbanas colabora para uma menor influência da variação na erodibilidade, pois o solo é uma variável considerada em áreas não urbanas (rurais).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. C. DE. Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 39-56, 2003.
- ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, p. 289-300, 1992.
- AUERSWALD, K.; FIENER, P.; MARTIN, W.; ELHAUS, D. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: an alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. **Catena**, v. 118, p. 220-225, 2014.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação dos solos**. São Paulo: Ícone, 355 p., 2005.
- CARVALHO, N. DE O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed., ver., atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 600 p., 2008.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon- Exposition et application des principes fi suivre et des formules fi employer dans les questions de distributions d'eau.** Paris: Victor Dalmont, 1856.

DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos.** Piracicaba, 1990. 81p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PRODUTOS AGROPECUÁRIOS. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p., 1997.

FUNCEME, FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS; EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PRODUTOS AGROPECUÁRIOS. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos - Mesorregião do Sul Cearense.** Fortaleza: FUNCEME - Núcleo de Recursos Hídricos e Ambientais, 280 p., 2012.

FUNCEME, FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará. Produtos e serviços. Postos pluviométricos. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorológico/572-postos-pluviométricos>. Acesso em: 30mar2015.

GOOGLE. Google Earth Pro. Versão 7.1.2.2041. 2012. Nota (Imagem Street View no município do Crato, Ceará. Registrada em 2012).

GUERRA, A. J. T. O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 13, p. 43-52, 1990.

GUERRA, A. T., DA SILVA, A. S., BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2ª ed., 340 p., 2012.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2000. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=29&uf=23>. Acesso em: set2016

IPECE, INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal do Crato.** Fortaleza: Secretaria de Planejamento e Gestão do Ceará, 18 p., 2012

KHANBILVARDI, R. M. & ROGOWSKI, A. A. Quantitative evaluation of sediment delivery ratios. **Water Resources Bulletin**, vol. 20, n. 6, p. 865-874, 1984

LIMA, F. J.; CESTARO, L. A.; ARAÚJO, P. C. Sistemas geoambientais do município do Crato/CE. **Mercator**, v. 9, n. 19, p. 129-142, 2010.

MACHADO, D.O.; SOBRINHO, T.A.; RIBEIRO, A. da S.; Ide, C.N.; OLIVEIRA, P.T.S. Erosividade da chuva para o bioma Pantanal. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.19, n.2, p.195-202, 2014.

MANER, S. B. Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 39, n. 4, p. 669-675, 1958.

MCELROY, A. D.; CHIU, S.Y.; NEBGEN, J.W.; ALETI, A.; BENNETT, R.W. **Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources**. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1976.

MEDEIROS, P.H.A.; ARAÚJO, J.C. de; MAMEDE, G.L.; CREUTZFELDT, B.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1938-1948, 2014

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. Inglaterra: Blackwell Publishing, 3.ed. 304p, 2005.

PAIVA, L. G. G. (submetido). Relação do uso e ocupação do solo com a impermeabilização e sua análise espaço-temporal na microbacia do rio Granjeiro, Crato – CE. **Geociências UNESP**.

PANNELL, D. J. Sensitivity analysis: strategies, methods, concepts, examples. **Agric Econ**, v. 16, p. 139-152, 1997.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. (Coordenadores). **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington, DC: US Government Printing Office, 404 p, 1997.

ROOSE, E.J. Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. **In Soil erosion: prediction and control**. Iowa: Soil Conservation Society of America Ankeny, v. 21, p. 60-74, 1976.

SOARES, F. A. **Assoreamento de bacia urbana: estudo de caso do açude Santo Anastácio, Fortaleza, Ceará**. MSc Thesis, DEHA, Universidade Federal do Ceará, 2003.

SRTM, SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION. Nota (dados da imagem: s08w040, 23-SEP-14, 1-arc). USGS EarthExplorer - U.S. Geological Survey. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 20fev2016.

USDA, U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil survey manual. **Agric. Handb. No. 18**. 1951.

VERÍSSIMO, L. S.; CAVALCANTE, I. N.; AGUIAR, R. B.; THIAGO, J. Recursos Hídricos subterrâneos da bacia sedimentar do Araripe - Zona Leste, Estado do Ceará. Gramado: XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços/**I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste**, 2007.

WISCHMEIER W. H. **A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation**. Soil Science Society of America Journal, v.23, n.3, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H., & SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to**

conservation planning. Washington: USDA Agricultural Handbook n. 537, 58p, 1978.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Journal of Soil and Water Conservation*, v. 26, n.5, p. 189-193, 1971.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que os critérios de definição dos padrões de uso e ocupação envolveram a densidade de edificações e áreas livres de revestimento (área urbana) e tipo de vegetação e exposição do solo (áreas rurais ou sem ocupação). Assim, foram atribuídos níveis de impermeabilização com suas classes de uso e ocupação: Área Impermeável corresponde ao setor urbano de alta densidade; Área de Infiltração baixa corresponde ao setor urbano de média densidade; Área de infiltração moderada corresponde ao setor urbano de baixa densidade; Área de Infiltração alta corresponde a classe Solo exposto e campos com vegetação secundária; Área de Infiltração muito alta corresponde a classe vegetação robusta da Chapada e Pedimento.

A principal mudança identificada foi a urbanização, que gerou crescimento de parcelas mais impermeáveis que avançavam para sul da área. Houve crescimento de 4% e 0,8% dos setores urbanos de alta e média densidade e das áreas de baixa densidade, respectivamente. A classe de uso correspondente a infiltração alta retraiu 4,3%, enquanto o nível de máxima infiltração manteve-se praticamente inalterado. Concluiu-se na perspectiva do surgimento de baixa a moderada infiltração para montante, ao longo de estradas, a partir do núcleo urbano.

Avaliou-se que a produção de sedimentos na bacia foi de 6,02 ton.ha-1.ano-1. A taxa (SDR) foi estimada em 29%, portanto, pouco mais de um quarto da erosão bruta foi carregada para o exutório da bacia. Cerca de 4% dos sedimentos são de origem urbana. Os valores de erodibilidade segundo a equação de Denardin superestimaram os do nomograma. Verificou-se que a produção de sedimentos apresentou sensibilidade significativa com relação à erodibilidade e que a presença de áreas urbanas diminui a influência do fator de erodibilidade sobre o modelo.

REFERÊNCIAS

- ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, p. 289-300, 1992.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, p. 371-389, 2007.
- AUERSWALD, K.; FIENER, P.; MARTIN, W.; ELHAUS, D. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: an alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. **Catena**, v. 118, p. 220-225, 2014.
- BEURLIN, K. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais da Academia brasileira de Ciências**, v. 43, p. 411-415, 1971.
- BRITO, D. da S.; SILVA, J. M. O. Estudo dos impactos pluviométricos e os eventos extremos no município de Crato – Ce. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v.1, n.5, p.964 – 976, 2012.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CARVALHO, S. M.; RIBEIRO, S. C. Identificação das áreas de riscos de deslizamentos urbanos e periurbanos da cidade do Crato/CE. **Cadernos de cultura e ciência**, v.2, n. 1, p. 1-9, 2007.
- DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon- Exposition et application des principes fi suivre et des formules fi employer dans les questions de distributions d'eau**. Paris: Victor Dalmont, 1856.
- DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, 1990. 81p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- GUERRA, A. J. T.; SAMPAIO, J. J. D. A. Processos erosivos acelerados, movimentos de massa e assoreamento na cidade do Crato - CE. **Anu. Inst. Geocienc.** [online]. 1996, v.19 [citado 2016-05-09], pp. 09-20. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-97591996000100002&lng=pt&nrm=iso>. ISSN 0101-9759.
- IPECE, INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal do Crato**. Fortaleza: Secretaria de Planejamento e Gestão do Ceará, 18 p., 2012.
- LIMA, F. J.; CESTARO, L. A.; ARAÚJO, P. C. Sistemas geoambientais do município do Crato/CE. **Mercator**, v. 9, n. 19, p. 129-142, 2010.
- MAGALHÃES, A. D. O.; PEULVAST, J. P. Aléas et risques naturels dans l’intérieur semi-aride du Nordeste brésilien: la crue-éclair du Rio Grangeiro (Crato, Ceará) du 28 janvier 2011, **EchoGéo**, n. 26, 2013.

MAGALHÃES, A. O. Crues éclair et inondations urbaines dans le sertão du Nordeste Brésilien (Rio Grangeiro, Crato, Ceará): perception et gestion d'un risque naturel méconnu. **Bulletin de l'Association de Géographes Français**, v. 3, p. 257-275, 2014.

MCKENZIE, N. J., COUGHON, K. J.; CRESSWELL, H. P. **Soil Physical Measurements and Interpretation for Land Evaluation**. CSIRO Publishing, Melbourne, 392 p., 2002.

PEULVAST, J. P., BÉTARD, F., & DE OLIVEIRA MAGALHÃES, A. Scarp morphology and identification of large-scale mass movements in tropical tablelands: the eastern Araripe basin (Ceará, Brazil). **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 17, n. 1, p. 33-52, 2011.

PONTE, F. C.; APPI, C. J. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. **XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 36, n. 1, p. 211-226, 1990.

RIBEIRO, S. C. **Susceptibilidade aos processos erosivos superficiais com base na dinâmica geomorfológica na microbacia do Rio Grangeiro, Crato/CE**. Rio de Janeiro, 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ.

VERÍSSIMO, L. S.; CAVALCANTE, I. N.; AGUIAR, R. B.; THIAGO, J. Recursos Hídricos subterrâneos da bacia sedimentar do Araripe - Zona Leste, Estado do Ceará. Gramado: XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços/I **Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste**, 2007.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, n.5, p. 189-193, 1971.

WISCHMEIER W. H.; MANNERING, J. V. **Relation of Soil Properties to its Erodibility**. Soil Science Society of America Journal, v. 33, n.1, 131-137, 1969.