



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EFRAIM MARTINS ARAÚJO**

**INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO  
USANDO ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA EM UMA GRANDE  
BACIA SEMIÁRIDA: O CASO DO ORÓS**

**FORTALEZA  
2013**

EFRAIM MARTINS ARAÚJO

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO USANDO  
ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA EM UMA GRANDE BACIA SEMIÁRIDA:  
O CASO DO ORÓS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

Fortaleza – CE  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- A688i Araújo, Efraim Martins.  
Investigação do processo de geração de escoamento usando análise estatística multivariada em uma grande bacia semiárida : o caso do Alto Jaguaribe - CE / Efraim Martins Araújo. – 2013.  
87 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2013.
- Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
Orientação: Prof. Dr. George Leite Mamede.
1. Escoamento. 2. Análise multivariada. I. Título.

EFRAIM MARTINS ARAÚJO

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE  
ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA EM UMA GRANDE BACIA SEMIÁRIDA:  
O CASO DO ORÓS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

APROVADO EM: 25/01/13/

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. George Leite Mamede (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)



Bolsista PNPB/CAPES. Dra. Ana Célia Maia Meireles  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Á Deus.

A minha família, meus pais Lucimi e Luiza, meus irmãos Eliakim e Erika, minhas tias Luciene, Vera, Ana e Claudia e meus avós Hermínia, Luiza e Francisco.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por sempre está do meu lado e me dado força, coragem e determinação de enfrentar todos os obstáculos até aqui superados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de estudos.

À Companhia de Gestão de Recursos Hídricos por ter gentilmente disponibilizados os dados dos reservatórios da bacia do Orós.

À Universidade Federal do Ceará pela possibilidade de cursar uma pós-graduação.

Aos professores do departamento de Engenharia Agrícola que tive a oportunidade de estudar e por todo conhecimento transmitido.

A os colegas de departamento pelo convívio e troca de informações.

Ao meu grande amigo e orientador George Leite Mamede, que sem sua ajuda não seria possível o desenvolvimento desse trabalho. Exemplo de professor e ser humano. Não tenho palavras para agradecer o que ele fez por mim no desenvolvimento dessa pesquisa, pois sempre esteve disponível a tirar todas as minhas dúvidas e responder todos os questionamentos, seja na universidade ou na sua residência.

Ao amado irmão, amigo Eliakim Martins Araújo, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, tirando as dúvidas, estudando e ajudando no que fosse preciso para o desenvolvimento do mestrado. E tudo o que fizemos juntos desde a graduação.

À Doutora Ana Celia Maia Meireles por ter ajudado bastante na análise compreensão da estatística multivariada, sem sua contribuição não seria possível o desenvolvimento dessas análises.

Aos membros da banca examinadora professor Doutor Iran Lima Neto e Doutora Ana Celia Maia Meireles, pelas contribuições.

A toda a minha família, à minha mãe, Maria Luiza Martins. Meu amado papai, José Lucimi Araújo da Silva, que sempre esteve ao meu lado em todas as etapas de minha vida me apoiando. A minha amada irmã, Erika Martins Araújo, que sempre está ao meu lado aconselhando e apoiando. Às minhas queridas tias, Maria Luciene Araújo da Silva, Vera Lucia Araújo da Silva, Ana Lucia Araújo da Silva, por serem responsáveis pela minha educação e por tudo o que fizeram por mim. Aos meus avós, Hermínia Josina Araújo, Luiza Maria de Sousa e Francisco da Silva, por tudo.

Aos meus amigos João Paulo Bringel Junior, Elias Paulino Medeiros, Jorge Israel Luciano Machado, Romenigh Araújo Sousa, Alexandre Viana Oliveira e Iderlan Alves pelos

grandes momentos compartilhados e a excelente convivência em Fortaleza o que tornou esses dois anos de mestrado agradável.

A todos obrigado.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do Orós, localizada no Semiárido brasileiro, com uma área de 24 636 km<sup>2</sup>, o que representa 16,5% da área do território cearense. Para avaliar a variação das respostas hidrológicas das 17 sub-bacias que constituem a bacia do Orós, em função de suas características físicas (solo, declividade, vegetação e geologia), utilizou a análise estatística multivariada. A análise estatística multivariada pela técnica agrupamento hierárquica indicou a existência de quatro diferentes grupos de bacias hidrográficas com características homogêneas no que diz respeito à precipitação média e correspondente resposta hidrológica, o que possibilitou uma regionalização de aspectos relacionados com a geração de escoamento. A análise de fatores, por sua vez, possibilitou a identificação dos pesos (grau de importância) das classes de solo, declividade, vegetação e geologia na geração de escoamento. Os resultados mostram que o solo do tipo Vertissolo, com área inferior a 1,3% da bacia, responde por 23,95% do escoamento gerado. No caso de declividade, constata-se que os maiores pesos foram encontrados nas regiões mais íngremes, com 52,21% do total para declividades superiores a 20%. Os resultados da análise estatística para as componentes de solo e de declividade corroboraram com o que se observou no estudo hidrológico, em que áreas com declives mais acentuados e solos menos permeáveis geram mais escoamentos, comprovando a eficácia desta ferramenta. Por outro lado, a análise da componente de vegetação não apresentou resultados satisfatórios, dado que não há uma boa discretização da cobertura vegetal na bacia do Orós. Alguns tipos de vegetação ocupam extensas áreas com duas ou mais sub-bacias de diferentes respostas hidrológicas, o que dificulta uma análise estatística apropriada desta componente. Dentre as classes geológicas a metamórfica foi a que apresentou maior carga fatorial, respondendo 25,99% na geração do escoamento superficial. Considerando-se as respostas da análise estatística, que indicam as componentes de solo e declividade como principais responsáveis pelo escoamento, as Unidades de Solo e Declividade (USD), resultante da superposição de mapas utilizando-se ferramentas de SIG, foram conjuntamente analisadas com a estatística multivariada. Os resultados mostraram que a componente de solo tem maior importância que a de declividade nos processos de geração de escoamento na bacia do Orós.

**Palavras-chaves:** Unidades de solo e declividade, análise estatística multivariada, coeficiente de escoamento.

## ABSTRACT

This work aims to study the hydrological behavior of the Upper Orós basin, located in the Brazilian semiarid, with an area of 24 636 km<sup>2</sup>, which represents 16.5% of the area of the State of Ceará. To evaluate the variability of hydrological responses from 17 sub-basins of the Orós basin as a function of its physical properties (soil, slope, vegetation and geology), the multivariate statistical analysis is used. Cluster analysis of multivariate statistics indicates that there are four different groups of watersheds with homogeneous characteristics related to the corresponding average rainfall and hydrological response, which enables the regionalization of those characteristics. The analysis of factors enables the identification of weighting factors (level of importance) of soil, slope, vegetation and geology classes for the runoff generation. The results show that the Vertissolo soil class with area less than 1.3% of the basin accounts for 23,95% of the generated flow. In the case of slope, it is noted that higher weighting factors are found for steeper areas, with 52,21% for steepness higher than 20%. The results of the statistical analysis for the components of soil and slope corroborate with those found in hydrological studies, in which areas with higher slopes and lower permeability generate more runoff, proving the effectiveness of this tool. On the other hand, the analysis of vegetation component does not present satisfactory results, since there is not a good discretization of vegetation cover in the Orós basin. Some vegetation types occupy large areas covering up to six classes with different hydrological responses, which prevent a proper statistical analysis of this component. Among the geological classes, the metamorfica one shows the highest weighting factor, accounting for 25.99% of the generated runoff. Taking into account statistical analysis responses, which indicate that the soil and slope components as major factors explaining the runoff generation, the Soil and Slope Unit (USD) are defined, resulting from maps overlap using GIS tools. Then they are analyzed together as a single unit using the multivariate statistics. The results show that the soil component is more important than the slope one in explaining the runoff generating processes in the Orós basin.

**Keywords:** Units of soil and slope, multivariate statistical analysis, runoff coefficient.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico.....  | 21 |
| Figura 2 - Bacia do Orós – CE. ....   | 34 |
| Figura 3 - Espacialização da bacia do Orós e das sub-bacias. ....   | 35 |
| Figura 4 - Postos pluviométricos usados na espacialização da precipitação da bacia. ....  | 37 |
| Figura 5 - Mapa de solos da bacia do Orós – CE, conforme o levantamento exploratório de solos (RADAMBRASIL 1981) .....                                | 38 |
| Figura 6 - Modelo digital de elevação da bacia do Orós .....  | 39 |
| Figura 7 - Vegetação característica da bacia do Orós.....   | 41 |
| Figura 8 - Espacialização da geologia na bacia do Orós.....   | 42 |
| Figura 9 - Exemplo de uma sub-bacia com três unidades hidrológicas.....   | 45 |
| Figura 10 - Representação esquemática da geração de dados e produto das USD .....   | 45 |
| Figura 11 - Comportamento da precipitação e do fluxo em cada sub-bacia do Orós.....   | 50 |
| Figura 12 - Mapa das classes de declividade na bacia do Orós – CE.....  | 54 |
| Figura 13 - Mapa da composição das unidades de solo e declividade .....   | 57 |
| Figura 14 - Dendrograma do agrupamento das características hidrológicas (precipitação e coeficiente de escoamento médio) das sub-bacias do Orós ..... | 61 |
| Figura 15 - Espacialização das bacias através do agrupamento da precipitação e do coeficiente de escoamento médio .....                               | 63 |
| Figura 16 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais das classes de solo na geração do escoamento superficial.....                              | 66 |
| Figura 17 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para o componente solo.....  | 67 |
| Figura 18 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais das classes de declividade na geração do escoamento superficial .....                      | 68 |
| Figura 19 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente declividade .....  | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais dos tipos de vegetação na geração do escoamento superficial .....  | 70 |
| Figura 21 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente solo.....  | 71 |
| Figura 22 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais das classes geológicas na geração do escoamento superficial .....  | 72 |
| Figura 23 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente geologia ..  | 73 |
| Figura 24 - Mapa da composição das unidades de solo e declividade e as cargas fatoriais na geração do escoamento superficial .....  | 74 |
| Figura 25 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente USD .....  | 76 |
| Figura 26 - Fatores de USD usando área, comparados aos fatores de USD usando índices de permeabilidade do solo e declividade .....  | 78 |
| Figura 27 - Comportamento dos fatores de solo, declividade, vegetação, geologia e USD com a variação do coeficiente de escoamento anual médio (Gráfico A). Variação do fator de solo, declividade, vegetação e geologia ao longo dos anos (Gráfico B) ..... | 79 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Número de postos pluviométricos usados para obtenção da precipitação média da bacia .....  | 36 |
| Tabela 2 - Enquadramento do relevo a partir das características topográficas (EMBRAPA, 1999). .....   | 39 |
| Tabela 3 - Descrição das características dos reservatórios estratégicos da bacia do Orós – CE. ....   | 43 |
| Tabela 4 - Resumo da disponibilidade de dados para estimativa da vazão afluente aos reservatórios estudados pelo método do balanço hídrico..... | 44 |
| Tabela 5 - Elaboração das unidades hidrológicas na bacia do Orós – CE.....  | 44 |
| Tabela 6 - Intervalo do teste KMO.....  | 47 |
| Tabela 7 - Parâmetros físicos avaliados e suas unidades de medida.....  | 48 |
| Tabela 8 - Características de área, precipitação, escoamento e fluxo da bacia hidrográfica do Orós.....   | 49 |
| Tabela 9 - Percentual dos tipos de solo em cada sub-bacia hidrográfica em relação a área total. ....  | 51 |
| Tabela 10 - Permeabilidade média dos solos da bacia do Orós.....  | 52 |
| Tabela 11 - Descrição das classes de declividade das sub-bacia hidrográfica. ....   | 53 |
| Tabela 12 - Área das classes de declividade obtida na bacia do Orós. ....   | 53 |
| Tabela 13 - Percentual da vegetação na bacia do Orós. ....  | 55 |
| Tabela 14 - Percentual das classes geológicas na bacia do Orós. ....  | 56 |
| Tabela 15 - Valores de cada USD através do mapa de solo e declividade na bacia do Orós.....   | 56 |
| Tabela 16 - Porcentagem de área das USDs nas respectivas bacias hidrográficas estudadas. ...  | 58 |
| Tabela 17 - Coeficiente de aglomeração das bacias analisadas. ....  | 60 |
| Tabela 18 - Agrupamento das bacias usando precipitação e no coeficiente de escoamento médio.....  | 62 |
| Tabela 19 - Valores do teste de adequação KMO das variáveis analisadas. ....  | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 20 - Análise estatística de fator de cada classe de solo na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE. ....        | 65 |
| Tabela 21 - Análise estatística do fator de cada classe de declividade na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE. .... | 68 |
| Tabela 22 - Análise estatística do fator de cada de vegetação na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE. ....          | 70 |
| Tabela 23 - Análise estatística do fator de cada tipo geológico na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE. ....        | 72 |
| Tabela 24 - Análise estatística de fator de cada USD na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE. ....                   | 74 |
| Tabela 25 - Valores dos índices associados a característica de área, permeabilidade e declividade. ....                                 | 76 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| FUCEME  | Fundação cearense de meteorologia                                     |
| COGERH  | Companhia de Gestão de Recursos hídricos                              |
| ANA     | Agência Nacional de Águas   |
| UFC     | Universidade Federal do Ceará   |
| IFCE    | Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará         |
| Unilab  | Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                           |
| CPRM    | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais                            |
| FAO     | Organizações das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação         |
| IPECE   | Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará                 |
| INPE    | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                             |
| USD     | Unidade de solo e declividade   |
| SRTM    | Missão Topográfica Radar Shuttle                                      |
| SIG     | Sistema de Informações Geográficas                                    |
| Ae      | Neossolo flúvico  |
| Lvd     | Latossolo amarelo   |
| NC      | Luvissolo   |
| V       | Vertissolo  |
| Ter     | Nitossolo   |
| PE      | Argissolo vermelho-amarelo  |
| Pee     | Nitossolo vermelho  |
| PL      | Planossolo  |
| Re      | Neossolo litólicos  |
| Red     | Neossolo litólicos distrófico   |
| Dec     | Declividade   |
| AF      | Análise fatorial  |
| ACP     | Análise da componente principal                                       |
| iA      | Índice de área  |
| iP      | Índice de permeabilidade  |
| iD      | Índice de declividade   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |   |
|-------------------|---|
| %                 | Porcentagem                               |
| mm                | Milímetros                                |
| ha                | hectare                                   |
| km <sup>2</sup>   | Área – Quilômetros quadrados              |
| m <sup>2</sup>    | Área – metros quadrados                   |
| m                 | metro                                     |
| cm                | centímetros                               |
| h                 | Tempo                                     |
| m <sup>3</sup> /s | Vazão                                     |
| K <sub>o</sub>    | Condutividade hidráulica saturado do solo |
| p.                | página                                    |
| n <sup>o</sup>    | número                                    |



## SUMÁRIO

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 18 |
| <b>1.1</b>   | <b>Considerações Gerais</b> .....                                | 18 |
| <b>1.2</b>   | <b>Objetivos e Hipótese</b> .....                                | 19 |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....                               | 20 |
| <b>2.1</b>   | <b>Processos hidrológicos</b> .....                              | 20 |
| <b>2.1.1</b> | <i>Balanço Hídrico</i> .....                                     | 20 |
| <b>2.1.2</b> | <i>Precipitação</i> .....  | 22 |
| <b>2.1.3</b> | <i>Infiltração de água no solo</i> .....                         | 23 |
| <b>2.1.4</b> | <i>Escoamento superficial</i> .....                              | 24 |
| <b>2.1.5</b> | <i>Armazenamento de água no solo</i> .....                       | 25 |
| <b>2.1.6</b> | <i>Evaporação</i> .....  | 26 |
| <b>2.2</b>   | <b>Análise multivariada</b> .....                                | 27 |
| <b>2.2.1</b> | <i>Análise de agrupamento</i> .....                              | 29 |
| <b>2.2.2</b> | <i>Análise de fator</i> .....                                    | 31 |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                                  | 34 |
| <b>3.1</b>   | <b>Descrição da área de estudo</b> .....                         | 34 |
| <b>3.1.1</b> | <i>Localização</i> .....   | 34 |
| <b>3.1.2</b> | <i>Delimitação das bacias</i> .....                              | 35 |
| <b>3.1.3</b> | <i>Dados climatológicos</i> .....                                | 36 |
| <b>3.2</b>   | <b>Levantamento das características físicas das bacias</b> ..... | 38 |
| <b>3.2.1</b> | <i>Solos</i> .....   | 38 |
| <b>3.2.2</b> | <i>Declividade</i> .....   | 39 |
| <b>3.2.3</b> | <i>Vegetação</i> .....   | 40 |
| <b>3.2.4</b> | <i>NDVI</i> .....  | 41 |
| <b>3.2.5</b> | <i>Geologia</i> .....  | 42 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.6 | <i>Características dos Reservatórios Analisados</i> .....                                  | 43 |
| 3.2.7 | <i>Estimativa da vazão afluente</i> .....  | 43 |
| 3.3   | <b>Determinação de Unidades de Solo e Declividade (USD)</b> .....                          | 44 |
| 3.4   | <b>Análise multivariada das características físicas da bacia</b> .....                     | 45 |
| 3.4.1 | <i>Análise de agrupamento</i> .....  | 46 |
| 3.4.2 | <i>Análise de fator</i> .....  | 47 |
| 4     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 49 |
| 4.1   | <b>Características físicas da área de estudo</b> .....                                     | 49 |
| 4.2   | <b>Solo</b> .....  | 51 |
| 4.3   | <b>Declividade</b> .....   | 52 |
| 4.4   | <b>Vegetação</b> .....   | 54 |
| 4.5   | <b>Geologia</b> .....  | 55 |
| 4.6   | <b>Unidades de Solo e Declividade</b> .....  | 56 |
| 4.6.1 | <i>Ambiente SIG</i> .....  | 56 |
| 4.7   | <b>Análise de Agrupamento</b> .....  | 60 |
| 4.8   | <b>Análise de fator</b> .....  | 63 |
| 4.8.1 | <i>Teste de Adequação</i> .....  | 63 |
| 4.8.2 | <i>Cargas fatoriais do solo</i> .....  | 64 |
| 4.8.3 | <i>Cargas fatoriais da declividade</i> .....   | 67 |
| 4.8.4 | <i>Cargas fatoriais dos tipos de vegetação</i> .....                                       | 69 |
| 4.8.5 | <i>Cargas fatoriais das classes geológicas</i> .....                                       | 71 |
| 4.8.6 | <i>Cargas fatoriais das unidades de solo e declividade</i> .....                           | 73 |
| 4.8.7 | <i>Comparação das cargas fatoriais área x índices de permeabilidade e declividade</i> .... | 76 |
| 4.8.8 | <i>Verificação de Variabilidade Temporal de Cargas Fatoriais</i> .....                     | 78 |
| 5     | <b>CONCLUSÕES</b> .....  | 81 |
| 6     | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 82 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais

A água é um recurso natural indispensável para a sobrevivência do homem e demais seres vivos no Planeta. É uma substância fundamental para os ecossistemas da natureza. É importante para as formações hídricas atmosféricas, influenciando o clima das regiões. Infelizmente, este recurso natural encontra-se cada vez mais limitado e está sendo exaurido pelas ações impactantes nas bacias hidrográficas (ações do homem), degradando a sua qualidade e prejudicando os ecossistemas.

O Brasil é o país mais rico em água doce, com 12% das reservas mundiais. Do potencial de água de superfície do planeta, concentram-se 18%, escoando pelos rios aproximadamente  $257.790 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Apesar de apresentar uma situação aparentemente favorável, observa-se no Brasil uma enorme desigualdade regional na distribuição dos recursos hídricos. Quando comparamos estas situações com a abundância de água na Bacia Amazônica, que correspondem às regiões Norte e Centro-Oeste, contrapondo-se a problemas de escassez no Nordeste e conflitos de uso nas regiões Sul e Sudeste, a situação agrava-se.

A região Nordeste, por sua vez, apresenta maior risco de escassez hídrica em virtude da má distribuição do regime pluviométrico e elevada evaporação, e fatores como a variabilidade climática com período chuvoso concentrado em poucos meses do ano e irregular distribuição geográfico-temporal de seus recursos hídricos superficiais e subterrâneos. As principais características do semiárido nordestino, em relação ao recurso água são: rios intermitentes; secas periódicas e cheias frequentes; abastecimento hídrico predominante humano e agropecuário; águas subterrâneas com baixa disponibilidade na formação cristalina; escoamento superficial pequeno, como resultado da baixa precipitação e alta evaporação, se comparado ao restante do país; baixa eficiência hidrológica dos reservatórios em função das altas taxas de evaporação.

As condições adversas do semiárido cearense, sujeito a secas periódicas, motivaram a adoção de uma política mitigadora dos efeitos da estiagem através da construção de reservatórios superficiais que se estabeleceram como encargo essencial para a obtenção de suprimentos de água confiáveis, sendo o Estado do Ceará o pioneiro na instalação da política de açudagem. Esses reservatórios tinham, inicialmente, como principal função o armazenamento das águas para o consumo humano e animal, mas passaram ser de importância fundamental nas relações sócio econômicas das comunidades rurais, pois foram

utilizados no desenvolvimento da irrigação fomentando a agricultura familiar, na piscicultura e na perenização de importantes cursos d'água que possibilitaram o incremento de grandes empreendimentos nos polos agrícolas distribuídos por todo o Estado do Ceará (ANDRADE, 1998, p.11). No estado do Ceará, 93% da água está armazenada em reservatórios superficiais, demonstrando a importância de estudos que mostrem como está a situação dos reservatórios quanto à qualidade e quanto à quantidade de água.

O trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Orós. O estudo analisou o comportamento hidrológico em toda a bacia, utilizando a análise estatística multivariada de características físicas da área, na determinação das variáveis mais importantes na geração do escoamento.

## **1.2 Objetivos e Hipótese**

O objetivo principal desta pesquisa foi investigar os processos de geração de escoamento na bacia hidrográfica do Orós, avaliando suas características físicas por meio da estatística multivariada.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Gerar mapas espacializados de características físicas da bacia tais como a declividade, solo, geologia e vegetação, para as dezoito sub-bacias do Orós;
- Gerar mapas resultantes de combinações de componentes físicas que possam explicar o escoamento superficial na bacia do Orós, a partir de superposição de mapas;
- Realizar a análise estatística de agrupamento para determinação de sub-bacias com características homogêneas na geração de escoamento;
- Proceder à análise estatística de fator para determinação de pesos das variáveis solos, declividade, geologia e vegetação na geração do escoamento superficial;

Como hipótese para a realização deste trabalho, sugere-se que a análise estatística multivariada pode ser uma ferramenta de suporte na análise de importância de características físicas na geração do escoamento superficial na bacia do Orós.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Processos hidrológicos

De acordo com Tucci (1993, p.3).

O ciclo hidrológico pode ser definido como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado pela radiação solar associada à gravidade e a rotação terrestre, constituindo-se em um processo contínuo de transporte de massas de água. Tal processo pode ocorrer no sentido superfície-atmosfera, sob a forma de vapor, sendo este considerado o principal elemento responsável pela contínua circulação de água no globo; ou no sentido atmosfera-superfície, com a água regressando a superfície nas fases líquida e sólida, por meio de precipitações.

Assim definido, o balanço hídrico pode ser entendido como sendo o próprio ciclo hidrológico, cujo resultado fornecerá a água disponível no sistema, após vários processos que envolvem o fluxo hídrico.

De acordo com Moraes (2007 p.1) a água que precipita nos continentes pode tomar diversos destinos, sendo uma porção devolvida diretamente à atmosfera por evapotranspiração; outra parcela escoar sobre a superfície do terreno (escoamento superficial), concentrando-se em canais que formarão os cursos de água; e a parte restante sofre infiltração. A parcela de água que penetra no solo pode aumentar o armazenamento, ou ser drenada para baixo das raízes (drenagem profunda), com ascensão capilar do lençol freático para a zona das raízes em períodos mais secos (PEREIRA *et al.* 1997). Já Fujieda *et al.* (1997, p. 6) relatam que do volume total de chuva que atinge o solo 11% escoar pela superfície, 59% é armazenado no solo, fluindo através das rotas sub-superficiais aos córregos durante todo o ano; e os 15% restantes sofrem evapotranspiração.

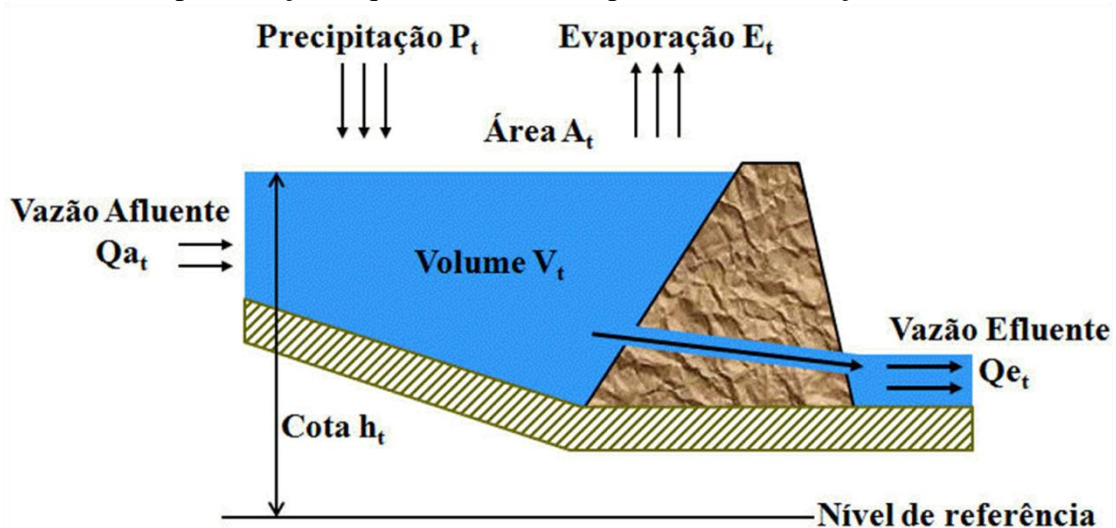
#### 2.1.1 Balanço Hídrico

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica constitui-se um valioso instrumento, tanto do ponto de vista teórico quanto prático, possibilitando uma correta avaliação da disponibilidade dos recursos hídricos de uma região, bem como de sua variabilidade espacial e temporal.

A simulação do balanço hídrico em açudes baseia-se na aplicação da equação balanço de massa (conservação de massa em um sistema), na sua forma diferencial, a um determinado volume de controle, neste caso o açude. Assim, tem-se que a variação do volume ( $dV$ ) no tempo ( $dt$ ) é igual ao que entra no volume de controle ( $I$ ) menos o que sai ( $O$ ) como esquematizado na Figura 1.

Os volumes precipitados e evaporados diretamente da superfície do açude (área da bacia hidráulica) são determinados como sendo a multiplicação da área da superfície do açude pela lâmina precipitada mensalmente, obtendo-se assim o volume precipitado, e pela lâmina evaporada, o que resulta no volume evaporado. Para se obter a área da superfície do açude, a interpolação linear é utilizada, já que os volumes calculados a cada passo de tempo não são aqueles dados pela curva cota-área-volume. Assim, os dados da curva cota-área-volume são utilizados no processo de interpolação linear e, geralmente, variam de metro em metro. Ou seja, quando um volume calculado encontra-se entre dois volumes conhecidos da curva cota-área-volume, uma interpolação linear com estes volumes e as respectivas áreas são realizadas a fim de se determinar a área correspondente ao volume calculado. Outro método para estimativa do valor da área poderia ser utilizado, seria o ajuste de uma equação aos dados da curva cota-área-volume, evitando-se assim a interpolação linear. Esta forma de cálculo será posteriormente implementada.

Figura 1 - Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico.



O balanço hídrico superficial em uma bacia hidrográfica baseia-se na aplicação da equação da continuidade, com os valores de evapotranspiração obtidos pela diferença entre a precipitação e a vazão no exutório. “A entrada de água no sistema é quantificada com uso de

pluviômetros, espacialmente distribuídos; e a saída de água da bacia obtida em estações fluviométricas.” (MOSCA, 2003 p. 1).

Além da continuidade de massa, o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica envolve a quantificação dos componentes deste sistema (precipitação, umidade do solo, evaporação, evapotranspiração, vazão, escoamento superficial e escoamento subterrâneo) (TUCCI, 1993, p. 4). Assim, o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, ou seja, as respostas emitidas na saída do canal principal, diante da entrada de energia pelos eventos de precipitação, são resultantes da interação de todos os elementos e fatores que compõem o interior desse sistema. Segundo Freitas (1998, p. 2), “[...] os processos que regulam a vazão durante os eventos de precipitação, seu volume e regime variam de acordo com o clima, a vegetação, o uso do solo, a topografia e as características da chuva.”.

### ***2.1.2 Precipitação***

A precipitação é a principal entrada do sistema constituinte de uma bacia hidrográfica, sendo a partir dela obtidas as outras variáveis do sistema, a exemplo do escoamento superficial e da infiltração. Assim, a precipitação pode ser definida como toda a água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre, sendo a sua disponibilidade anual em uma região o fator determinante para quantificar a necessidade de irrigação e abastecimento de água (TUCCI, 1993). A precipitação pode apresentar-se sob a forma de chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. No entanto, é comum tratá-la somente sob a forma de chuva, especialmente pela sua maior capacidade de produzir escoamento, contribuindo de forma significativa para a vazão dos rios (TUCCI, 1993; TOMASELLA e ROSSATO, 2005).

A quantidade de chuva pode ser expressa por meio de medidas obtidas em pontos previamente escolhidos, utilizando instrumentos denominados pluviômetros ou pluviógrafos e podem ser espacializadas utilizando-se metodologia adequada para isto. O pluviógrafo registra os dados automaticamente, enquanto que a aferição com uso do pluviômetro requer leituras manuais a intervalos de tempo fixos.

De modo geral, as chuvas coletadas e registradas por meio destes equipamentos, sobre a forma de altura de água precipitada em milímetros, pode ser convertida em volume se multiplicada pela área ou vazão de água, desde que se obtenha o tempo em que ocorreu a precipitação (TUCCI, 1993).

### 2.1.3 Infiltração de água no solo

O processo de infiltração de água no solo corresponde a penetração, através da superfície, da água proveniente da precipitação, que se move para o interior do solo sob a ação da gravidade, “[...] até atingir uma camada suporte, que a retém, formando a água armazenada do solo (PINTO *et al.*, 1976 p. 6).” Para um perfil de solo homogêneo, esse processo ocorre em cinco estágios ou zonas. A Zona saturada corresponde ao estágio inicial de infiltração, seguida pela Zona de transição que corresponde à região logo abaixo da anterior, caracterizada por uma queda rápida no teor de umidade do solo. Nestas duas primeiras zonas, mais saturadas de água, o potencial gravitacional torna-se proeminente. O terceiro estágio corresponde a zona de transmissão, que apresenta potencial de umidade constante, sendo o movimento de água gerado pelos potenciais gravitacional e matricial. No quarto estágio, ou zona de umedecimento, os teores de umidade decrescem rapidamente com a profundidade, formando um gradiente do potencial de água entre dois pontos, e condutibilidade hidráulica decrescendo exponencialmente. Por fim, forma-se a frente de molhamento, camada limite das partes úmida e seca do perfil, onde ocorre maior gradiente de potencial de água. Na zona de transmissão, com o passar do tempo, há um aumento de espessura e a infiltração diminui, havendo um maior distanciamento entre a zona saturada e a frente de umedecimento, diminuindo assim o gradiente do potencial e a taxa ou velocidade de infiltração. Para Klar, (1984, p. 5) tal decréscimo ocorre até chegar um momento em que se pode considerar a velocidade constante, a qual pode ser denominada infiltração final. “A capacidade de infiltração pode ser definida como a quantidade máxima de água que um solo em determinadas condições pode absorver, na unidade de tempo por unidade de área horizontal (LIBARDI, 1995, p. 12).”

A capacidade de infiltração depende de condições variáveis, dentre elas, as características físicas e hídricas do solo, bem como de sua cobertura vegetal; sendo o conhecimento desses fatores de fundamental importância para o manejo racional dos recursos naturais de uma região (GALVÍNCIO, 2005). Baceilar, (2005, p. 4) afirma que o tipo de cobertura vegetal possui relevante importância no processo de infiltração, visto a vegetação de porte incorporar grande quantidade de matéria orgânica ao solo, o que favorece a formação de micro e macro porosidade que aumentam a infiltração sob florestas. Além disso, solos com cobertura florestal se caracterizam por expressiva camada de resíduos vegetais (serrapilheira) e por um horizonte A rico em matéria orgânica. “A matéria orgânica é comprovadamente



eficiente para manter os agregados do solo, preservando sua porosidade”. (BERTONI e LOMBARDI NETTO, 1993, p. 4). Quando as condições do solo após o desmatamento ficam deterioradas, o solo pode sofrer compactação ocasionada pela energia da chuva, gerando a redução da capacidade de infiltração e aumento do escoamento superficial, com conseqüente diminuição do potencial de alimentação do aquífero (MORAES, 2007 p. 36). Sendo assim, se uma precipitação atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração, já que o solo está se umedecendo. Moraes (2007, p. 52) diz que se a precipitação continuar, dependendo da sua intensidade, pode ocorrer um momento em que a capacidade de infiltração diminua tanto que sua taxa se iguale ou até fique menor que a intensidade da precipitação.

A taxa de infiltração corresponde a velocidade média do escoamento da água através de um solo saturado, sendo obtida pela relação entre a quantidade de água que atravessa a unidade de área do material do solo e o tempo, determinando assim o deflúvio superficial (runoff) ou enxurrada, bem como o balanço de água na zona das raízes. Durante o processo de infiltração, a taxa de infiltração diminui relativamente com o passar do tempo, tendendo para zero no caso da infiltração horizontal, e tendendo para a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ) no caso de infiltração vertical. Segundo Reichardt e Timm, (2004, p. 31) “[...] com a redução da velocidade de infiltração em função do tempo, a intensidade da chuva pode se tornar maior que a taxa de infiltração do solo, havendo neste caso escoamento superficial de parte da água pela superfície do solo”.

#### ***2.1.4 Escoamento superficial***

O escoamento superficial corresponde à combinação do fluxo de água em pequena profundidade na superfície com o escoamento em pequenos canais que constituem a drenagem da bacia hidrográfica, podendo ocorrer por excesso de saturação na superfície do solo, por saturação em função da disposição das camadas do solo, ou ainda, pelo excesso de infiltração, denominado escoamento Hortoniano. No entanto, existem áreas onde praticamente não ocorre escoamento superficial e toda a precipitação infiltra, tendo um significativo escoamento sub-superficial que é transportado pelos macroporos, podendo aparecer na superfície por meio de fontes, produzindo escoamento superficial em conjunto com a precipitação local (TUCCI, 2002, p. 8).

O escoamento superficial sofre influência de diversos fatores que facilitam ou prejudicam a sua ocorrência. Estes fatores podem ser de natureza climática, relacionados à precipitação e evaporação; ou de natureza fisiográfica, ligadas às características físicas da bacia (GALVÍNCIO, 2005, p. 5).

Segundo Tucci (1993) os principais fatores que influenciam a forma de um hidrograma são: o relevo (densidade de drenagem, declividade do rio ou da bacia, capacidade de armazenamento e forma da bacia), a cobertura da bacia (vegetação e áreas impermeabilizadas), as modificações artificiais no rio (regularização e canalização) a distribuição, duração e intensidade da precipitação (em bacias pequenas, precipitações convectivas podem provocar maiores enchentes, enquanto em bacias maiores as chuvas frontais resultam em maiores vazões) e o solo (condições iniciais de umidade).

O escoamento superficial pode ser quantificado por meio da coleta de água que escoar em uma dada área. Seu fluxo é considerado positivo quando a contribuição é proveniente de montante, e negativo quando se trata de uma perda a jusante. Em função da grande variabilidade das condições físicas das bacias, do estado de umidade do sistema e da intensidade de chuva sua representação detalhada é complexa (REICHARDT e TIMM, 2004 p. 3; TUCCI, 1993 p. 8). Assim, em bacias hidrográficas, a estimativa da vazão pode simplificar a mensuração do escoamento superficial, sendo esta realizada com base na medição das velocidades observadas em uma seção hidráulica do curso de água. A partir daí, estabelece-se uma curva de cotas do nível de água, com vazões correspondentes e medições sistemáticas substituídas pelos valores das cotas, com as quais se estimam as vazões.

### ***2.1.5 Armazenamento de água no solo***

Segundo Pereira *et al.* (1997, p. 2), a água das chuvas penetra no solo aumentando o armazenamento, contudo, cada tipo de solo apresenta uma capacidade de armazenamento (Capacidade de Campo) específica. Assim, as propriedades físicas do solo podem afetar significativamente a sua Capacidade de Campo. Tucci (1993, p. 21) afirma que solos com textura mais fina, em função da sua maior superfície específica, retêm maior quantidade de água se comparado aos solos de textura grosseira. Além disso, o conteúdo de água no solo é função do tamanho e do volume dos seus poros, estando a umidade intimamente relacionada à pressão capilar. O tipo de cobertura vegetal também propicia diferenças na capacidade de armazenamento do solo, visto que culturas florestais apresentam sistema radicular profundo,

alcançando várias dezenas de metros de profundidade, com maior capacidade de armazenamento de água disponível no solo, se comparadas à vegetação de campo ou culturas agrícolas com sistema radicular raso (CAMARGO, 2005, p. 11).

“O saldo de água no solo é obtido pela variação no armazenamento de água do perfil, podendo a água sair deste sistema pelos processos de drenagem profunda, evapotranspiração e escoamento superficial.” (MENDES, 2006, p. 18).

### **2.1.6 Evaporação**

Um fator de grande importância na análise da vazão máxima permissível para a concessão de outorga se refere às perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização. A obtenção dos valores de evaporação permite avaliar a quantidade de água que se perde ou se ganha com a construção de um reservatório (KAN E DIAS, 1999, p. 19); portanto, estimativas confiáveis de evaporação nos reservatórios são essenciais, tanto no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos como em estudos de impacto ambiental.

As altas taxas de evaporação, aplicadas a superfícies livres de água, representam uma perda significativa na disponibilidade hídrica de uma região e como a presença de açudes é um cenário constante no semiárido, o conhecimento das perdas por evaporação é a base para se determinar qual o volume potencial disponível, informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos da região.

Embora a disponibilidade de água no Brasil seja abundante, está distribuída de forma irregular, como mostram os dados do balanço hídrico da bacia amazônica, com escoamentos superficiais na ordem de 34,2 l/s/km<sup>2</sup> e da região semiárida com 2,81 l/s/km<sup>2</sup> (MMA, 2000). Percebe-se, assim, a grande diversidade hidrológica do território brasileiro, sendo que, a região semiárida configura o cenário mais crítico no que se refere à escassez hídrica, necessitando de subsídios para implantação de uma gestão que vise a racionalização do uso de suas águas com base na sua realidade hídrica.

Diante desses dados percebe-se a relevância de estudos para minimizar as perdas nos corpos d'água. Destaca-se o entendimento da evaporação, uma variável crítica dentro do balanço hídrico de regiões semiáridas, chegando a representar 92% do volume precipitado anual médio. Estudos realizados no semiárido estimam que cerca de 40% das águas acumuladas em reservatórios se perde com a evaporação (SUASSUNA, 2002, p. 13).

Percebe-se então que, o fenômeno da evaporação no semiárido tem papel fundamental no dimensionamento e manejo de obras hídricas, que deve ser minuciosamente

investigado para subsidiar ações de planejamento e gerenciamento, na busca de um melhor aproveitamento das águas reservadas.

Medidas diretas da evapotranspiração são raras, especialmente pela dificuldade de quantificação com aparelhos normalmente utilizados em estações meteorológicas. Neste caso, recomenda-se o uso de estimativas oriundas de modelos físicos ou empíricos (TUCCI, 1993, p 51), com destaque para o modelo de Thornthwaite, pela facilidade dos cálculos; e o modelo de Penman-Monteith, pela precisão dos resultados (PEREIRA *et al.*, 1997, p. 24). Berlato e Molion (1981, p. 1) salientam que no momento da escolha de um método para a determinação da evapotranspiração deve-se considerar a praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micro meteorológico serem baseados em princípios físicos, eles apresentam algumas limitações, o que pode restringir a sua utilização.

Segundo Carvalho e Stipp (2004, p. 4),

“[...] o critério para adoção de um dos diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração baseia-se na dependência de uma série de fatores, dentre eles, a disponibilidade de dados meteorológicos, a escala de tempo requerida, além das condições climáticas para as quais o método foi desenvolvido.”

Sediyama (1996, p. 8) ressalta que o método ideal deve incorporar todos os fatores que influenciam na evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, as condições de solo, e as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferências de energia e massa.

Os modelos matemáticos são também empregados na comparação entre dados medidos e simulados, como forma de se buscar um método de avaliação que represente da melhor forma possível o que ocorre na natureza. Por meio desses modelos, efetua-se o acompanhamento dos parâmetros naturais de forma simples e a baixo custo, além da possibilidade de simular panoramas futuros, o que é fundamental no que se refere à gestão dos recursos hídricos (LIMA *et al.*, 2001, p. 1).

## **2.2 Análise multivariada**

Existem vários métodos de análise multivariada com finalidades bem diversas entre si. Portanto, o primeiro passo, é saber que conhecimento se pretende gerar. Ou seja, o que se pretende afirmar a respeito dos dados.

Para Chiguti (2005, p.1) os métodos estatísticos são escolhidos de acordo com os objetivos da pesquisa, por isso, mostrar, predizer ou otimizar são fatores obtidos por métodos diferentes. A estatística multivariada, com os seus diferentes métodos, difere de uma prateleira de supermercados abarrotada de produtos com a mesma função, pois cada método tem sua fundamentação teórica e sua faixa de aplicabilidade.

A análise multivariada se preocupa com métodos estatísticos para descrever e analisar dados de muitas variáveis simultaneamente.

A necessidade de entender o relacionamento entre as diversas variáveis aleatórias faz da análise multivariada uma metodologia com grande potencial de aplicação, principalmente na época atual com a computação eletrônica veloz e barata (JOHNSON & WICHERN, 1988, p. 2).

Segundo, Johnson e Wichern (1988, p. 3), a análise multivariada pode ser usada para:

- Redução ou simplificação de dados.
- Distribuição e agrupamentos.
- Investigação da dependência entre variáveis.
- Predição.
- Teste de hipótese.

De acordo com Chaves Neto (1997, p. 2), a análise multivariada consiste no estudo de soluções para problemas relacionados com:

- Inferências sobre médias multivariadas.
- Análise da estrutura de covariância de uma matriz de dados.
- Técnicas de classificação e agrupamentos.

Para Johnson e Wichern (1988, p. 4), no estudo de problemas que envolvem  $p$  variáveis ( $p \geq 1$ ), toma-se  $n$  observações de cada vetor aleatório  $X$ . Assim, as medidas registradas são  $X_{ij}$  com  $j=1, 2, \dots, p$  e  $i=1, 2, \dots, n$  que podem ser agrupadas em uma matriz de dados genérica  ${}_nX_p$  (ou seja, com  $n$  linhas e  $p$  colunas). Assim:

$${}_nX_p = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & X_{np} \end{bmatrix}$$

De forma geral pode-se escrever  ${}_nX_p = (X_{ij})$  com  $i=1, 2, \dots, n$  itens e  $j=1, 2, \dots, p$  variáveis, ou ainda considerar as linhas representando observações (pessoas, objetos, processos, escoamento nas diferentes sub-bacias, etc.), enquanto que as colunas

representariam características (peso, altura, sexo, tipo de solo, declividade, tipo de vegetação, etc), por exemplo.

A matriz de dados  $n \times p$  contém  $n$  observações do vetor aleatório  $p$ -dimensional,  $X' = [X_1, X_2, \dots, X_p]$  composto por  $p$  variáveis aleatórias, que representam características de algum objeto ou processo. Por outro lado, essa matriz corresponde a uma amostra aleatória de tamanho  $n$  do vetor  $p$ -dimensional  $X$ .

Um grande conjunto de dados é volumoso, e seu tamanho é um grande obstáculo para qualquer tentativa de extrair visualmente informações pertinentes. Muitas das informações contidas na matriz de dados podem ser acessadas calculando certos números sumários, conhecido como estatística descritiva. Por exemplo, a média aritmética ou a simples média é uma estatística descritiva que obtém o valor central para um conjunto de números. E com o aumento do quadrado das distâncias de todos os números da média obtém-se a média da variação dos números.

A vantagem das técnicas multivariadas é sua habilidade para acomodar múltiplas variáveis no sentido de compreender a complexa relação que não é possível com métodos univariados ou bivariados. Aumentando o número de variáveis também se aumenta a possibilidade de que as variáveis não sejam todas não correlacionadas e representativas de conceitos distintos. Por outro lado, grupos de variáveis podem ser inter-relacionados no sentido de que eles são todos representativos de um conceito mais geral. O pesquisador deve saber como as variáveis sejam inter-relacionadas para interpretar melhor o resultado.

No caso dos mapas temáticos, cada classe é uma variável qualitativa (categórica), que é o objeto principal de análise nesta pesquisa. Desta forma, tem-se então, as variáveis nominais ou qualitativas (usam-se códigos), também chamadas de binomiais ou binárias, quando se refere à presença (1) ou ausência (0) de determinada característica, onde a diferença ou ordem dos números não tem nenhum significado.

### ***2.2.1 Análise de agrupamento***

De acordo com Mingoti (2005, p. 1), a análise de agrupamentos também é conhecida como Análise de Conglomerados ou Análise de Classificação ou Cluster Analysis. Seu objetivo é agrupar os elementos da amostra ou população em grupos. Os elementos de um mesmo grupo são homogêneos entre si, no que se refere às variáveis (características) que neles foram medidas. Por outro lado estes grupos já formados são heterogêneos entre eles em relação as estas mesmas características.

Segundo Hairet *et al.*, (2005, p. 1), o objetivo principal da Análise de Agrupamentos é situar as observações homogêneas em grupos, a fim de definir uma estrutura para os dados. Para isto, são abordadas algumas questões básicas que devem ser consideradas durante a análise.

A análise de agrupamento, também conhecida como análise de segmentação ou análise de taxonomia, é um conjunto de técnicas para realizar tarefas de dividir um conjunto de dados ( $n$  observações com  $k$  variáveis) em subconjuntos relativamente homogêneos, baseado na *distância ou similaridade* entre os dados. Seja, então, um conjunto de dados com  $n$  observações com  $k$  variáveis, que podem ser representadas em forma de matriz:

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{21} & X_{k1} \\ X_{12} & X_{22} & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{1n} & X_{2n} & X_{kn} \end{pmatrix}$$

onde  $x_{ij}$ : observação  $j$ -ésima da variável  $i$ , sendo que  $\mathbf{x}_i$  é uma linha de observação ( $x_{i1} x_{i2} \dots x_{ik}$ ) e  $\mathbf{x}$  é outra linha de observação ( $x_{1j} x_{2j} \dots x_{kj}$ ).

Objetiva-se encontrar  $m$  grupos quaisquer (onde  $m \leq n$ ), de maneira que cada observação tenha a menor diferença possível das demais que pertençam ao mesmo grupo e a maior diferença possível das demais observações que pertençam a outros grupos, de acordo com critério, que pode ser a distância ou similaridade entre observações ou distância ou similaridade entre grupos. Porém, na natureza existem diversos tipos de variáveis, cujo conceito de distância é distinto.

A primeira decisão na análise se refere à medida de similaridade que deve ser estabelecida. Ou seja, deve-se estabelecer a associação de dois objetos baseada nas variáveis estatística de agrupamento. Hair *et. al* (2005, p. 2) define a “variável estatística de agrupamento” como “o conjunto das variáveis que representam as características usadas para comparar objetos na análise de agrupamentos”.

Para Mingoti (2005), é indispensável decidir à priori, a medida de similaridade que será utilizada para se proceder ao agrupamento de elementos. Para isto, existem medidas apropriadas para análise de variáveis qualitativas e quantitativas. As medidas apropriadas para variáveis quantitativas também são ditas “de dissimilaridade”. Neste caso, quanto menores os seus valores, mais similares serão os elementos que estão sendo comparados. Algumas dessas

medidas de distância são: distância euclidiana, distância generalizada (ou Ponderada) e distância de Minkowsky.

A segunda decisão na análise se refere-se a escolha do algoritmo de agrupamento. É também um método aglomerativo, pelos agrupamentos serem formados pela combinação de outros já existentes. Existem vários métodos de agrupamentos hierárquicos e a maioria já se encontram disponíveis nos softwares estatísticos, quais sejam: método de ligação simples; método de ligação completa; método de ligação média; método do centroide; método de ward, entre outros.

A última decisão na análise refere-se à escolha do número de agrupamentos. “Deve-se haver um equilíbrio entre definir a estrutura mais básica com o nível de similaridade dentro dos agrupamentos porque quando o número de agrupamento diminui a homogeneidade dentro dos grupos necessariamente diminui”. (HAIR, 2005, p. 4).

Alguns dos critérios para a determinação do número ideal de agrupamentos citados por Mingoti (2005, p. 13) são: análise de comportamento do nível de fusão (distância); análise de comportamento do nível de similaridade; análise da soma dos quadrados entre grupos; correlação semi-parcial; e estatística pseudo.

### ***2.2.2 Análise de fator***

A análise de fator (AF) é formada por um conjunto de técnicas estatísticas, e possui como objetivo reduzir o número de variáveis iniciais com a menor perda possível de informação. Em outras palavras, pode-se dizer que AF é aplicada à busca de identificação de fatores num conjunto de medidas realizadas, sendo que esses fatores identificados pela AF são uma descoberta feita pelo pesquisador. Inicialmente, ele tem várias medidas e não será possível identificar quais variáveis poderão ser reunidas num fator. A AF é quem vai descobrir isso, pois ela permite identificar novas variáveis, em um número reduzido em relação às variáveis iniciais, sem uma perda significativa de informação contida nos dados originais.

A versão clássica da AF determina os fatores ortogonais que descrevem aproximadamente e sucessivamente os vetores-resposta de  $n$  indivíduos a um conjunto constituído por  $m$  testes psicológicos. As primeiras pesquisas realizadas nesta área foram desenvolvidas por Karl Pearson (1901) e por Charles Spearman (1904). Spearman estudou a hipótese da existência de um só fator de inteligência e da impossibilidade de medi-lo diretamente, ele desenvolveu esta análise para que fosse possível estudar o fator inteligência



indiretamente a partir das correlações entre diferentes testes. Em 1947 Thurstone partiu da ideia inicial de Spearman e desenvolveu a AF, por acreditar que existe mais de um fator de inteligência. Essa análise permite identificar mais de um fator nos dados iniciais.

A AF não se refere, apenas, a uma técnica estatística, mas a um conjunto de técnicas relacionadas, para tornar os dados observados mais claros para a interpretação. Isso é feito analisando-se os inter-relacionamentos entre as variáveis, de tal modo que essas possam ser descritas convenientemente por um grupo de categorias básicas, em número menor que as variáveis originais, chamado fatores.

Os fatores podem ser denominados como um constructo, que pode ser uma variável não observada, escalas, itens, ou uma medida de qualquer espécie. Na análise, fatores explicam a variância das variáveis observadas, tal como se revelam pelas correlações entre as variáveis que estão sendo analisadas.

A AF é uma técnica que é aplicada para identificar fatores num determinado conjunto de medidas realizadas, sendo utilizada, também, como uma ferramenta na tentativa de reduzir um grande conjunto de variáveis para um conjunto mais significativo, representado pelos fatores. Esse método determina quais variáveis pertencem a quais fatores, e o quanto cada variável explica cada fator.

O primeiro passo a ser realizado, quando se aplica AF, é verificar as relações entre as variáveis, que pode ser feito utilizando-se o coeficiente de correlação linear como medida de associação entre cada par de variáveis. Conforme Reis (1997), “a matriz de correlação poderá permitir identificar subconjuntos de variáveis que estão muito correlacionadas entre si no interior de cada subconjunto, mas pouco associadas a variáveis de outros subconjuntos”. Nesse caso, utilizar a técnica de AF permitirá concluir se é possível explicar esse padrão de correlações mediante um menor número de variáveis.

A análise fatorial (AF) necessita que o número de fatores seja conhecido anteriormente, os fatores são determinados pela análise da componente principal (ACP). Na ACP, combinações lineares das variáveis são formadas. A primeira componente principal é a combinação que explica a maior contribuição para a variância na amostra. A segunda componente principal explica a segunda maior contribuição para a variância, sem estar correlacionada com a primeira (MORAIN, 1999; WUNDERLIN *et al*, 2001). Sucessivas componentes explicam porções progressivamente menores da variância da amostra total, sem apresentar correlação com as componentes anteriores. Mingoti, (2005, p. 18) mostra que o modelo matemático para AF apresenta semelhança com uma equação de regressão múltipla.

Cada variável é expressa por uma combinação linear de fatores (que não são observados de fato), da seguinte forma:

$$X_i = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + \dots + A_{ik}F_k + \varepsilon_i \quad (1)$$

F: fatores comuns, isto é, que formam uma nova variável;

$A_i$ : constantes usadas para combinar os fatores ( $i = 1, \dots, k$ )

k: número de fatores;

$\varepsilon_i$ : erro experimental.

Os fatores são deduzidos das variáveis observadas e podem ser calculados como combinações lineares. Considerando-se que, é possível que todas as variáveis contribuam para o fator analisado, espera-se que somente um único subconjunto de variáveis caracterize a esse fator, como indicado pelos seus grandes coeficientes. A expressão geral para estimativa do j-ésimo fator é:

$$F = A = \sum_{i=1}^N W_{ij} X_i \quad (2)$$

$W_i$ : coeficiente de contagem de cada fator;

$X_i$ : valor da cada variável normalizada ( $i = 1, \dots, n$ );

n: número de variáveis.

Para decidir quantos fatores/componentes seriam necessários para representar os dados, deve-se examinar a variância total explicada por cada uma. O critério comumente adotado foi descrito por Norusis (1990), segundo o qual somente componentes com variância superior a 1 são consideradas. Este critério fundamenta-se no postulado que qualquer fator deve explicar uma variância superior àquela apresentada por uma simples variável.

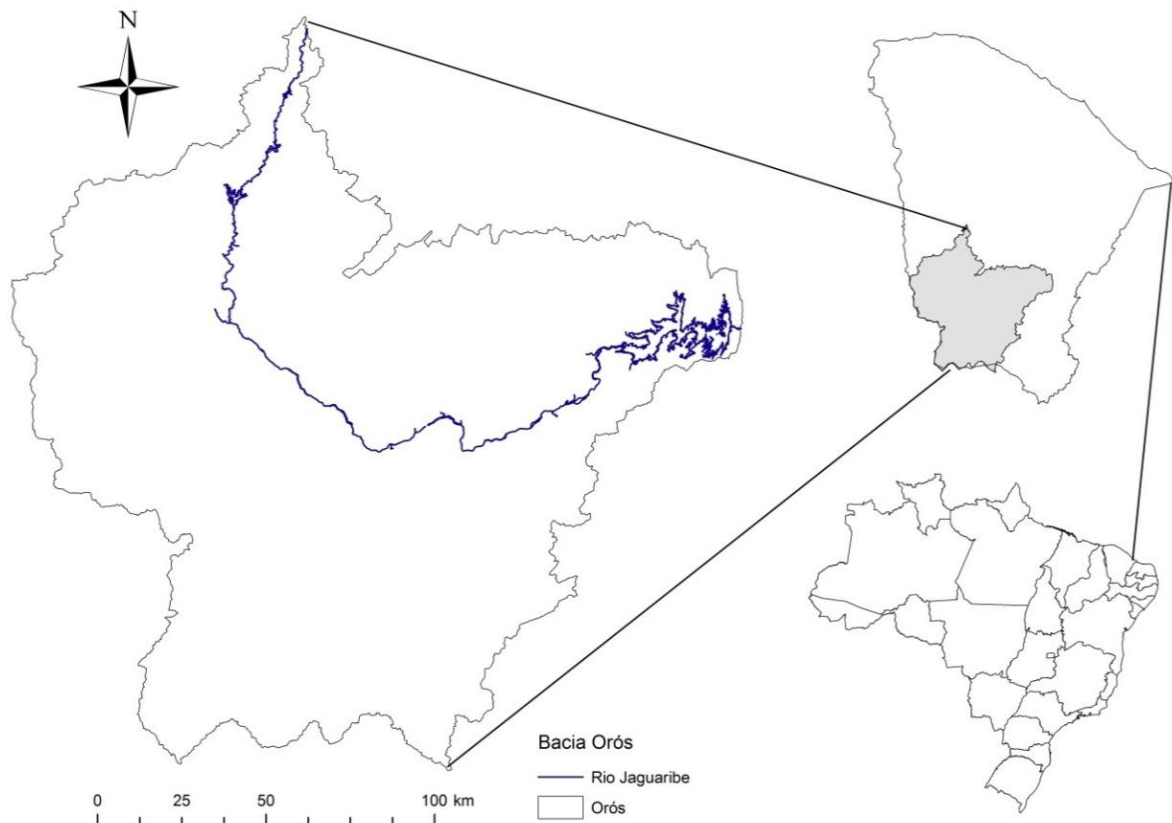
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição da área de estudo

##### 3.1.1 Localização

A pesquisa foi desenvolvida utilizando com área de estudo a bacia do Orós – CE, ilustrada na Figura 2. A bacia possui uma área de 24 636 Km<sup>2</sup>, que corresponde a 16,5% do território cearense, sendo a maior bacia hidrográfica do estado do Ceará. A bacia engloba o território de 24 municípios, possuem 18 reservatórios estratégicos, sendo o açude Orós o maior da bacia e o segundo maior do estado do Ceará com uma capacidade de armazenamento de aproximadamente de 1,9 bilhões de m<sup>3</sup> informado pela COGERH. Entenda-se por estratégico aqueles açude com capacidade superiores a 1 milhão de m<sup>3</sup> com monitoramento contínuo pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH. A bacia possui uma capacidade de armazenamento de águas superficiais de 2,8 bilhões de m<sup>3</sup>, sendo a segunda maior do estado com maior capacidade de armazenamento.

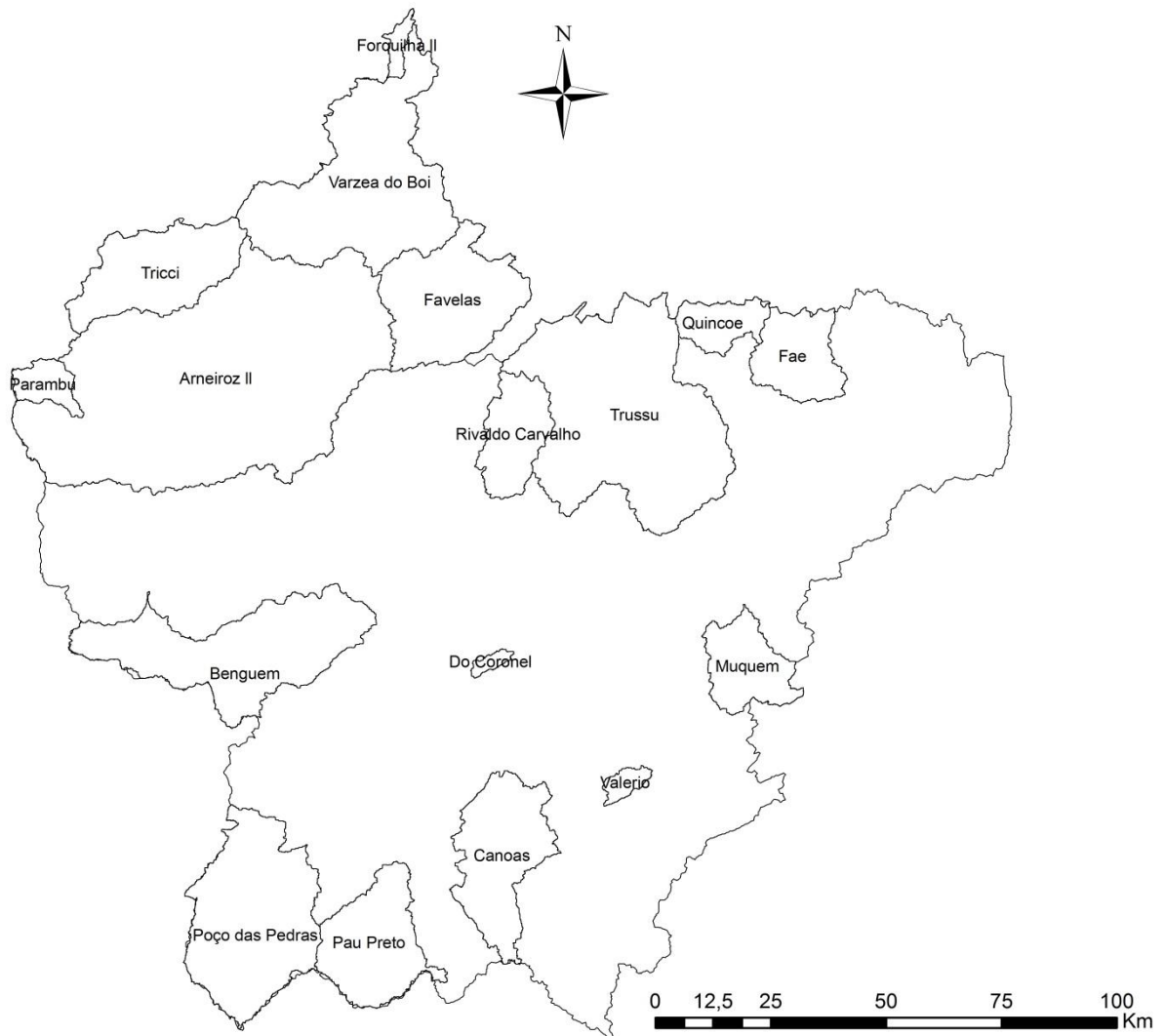
Figura 2 - Bacia do Orós – CE.



### 3.1.2 Delimitação das bacias

As bacias hidrográficas dos 18 reservatórios estratégicos foram geradas com base no modelo digital de elevação *Shuttle Radar Topography Mission* da agência americana de Administração do Espaço e Aeronáutica (SRTM/NASA), com resolução espacial de 90 x 90 metros (tamanho do pixel). O modelo digital de terreno (SRTM/NASA) da bacia do Orós foi processado utilizando ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG) para delimitação automática das sub-bacias dos 18 reservatórios considerados, como apresentado anteriormente na Figura 3.

Figura 3 - Espacialização da bacia do Orós e das sub-bacias.



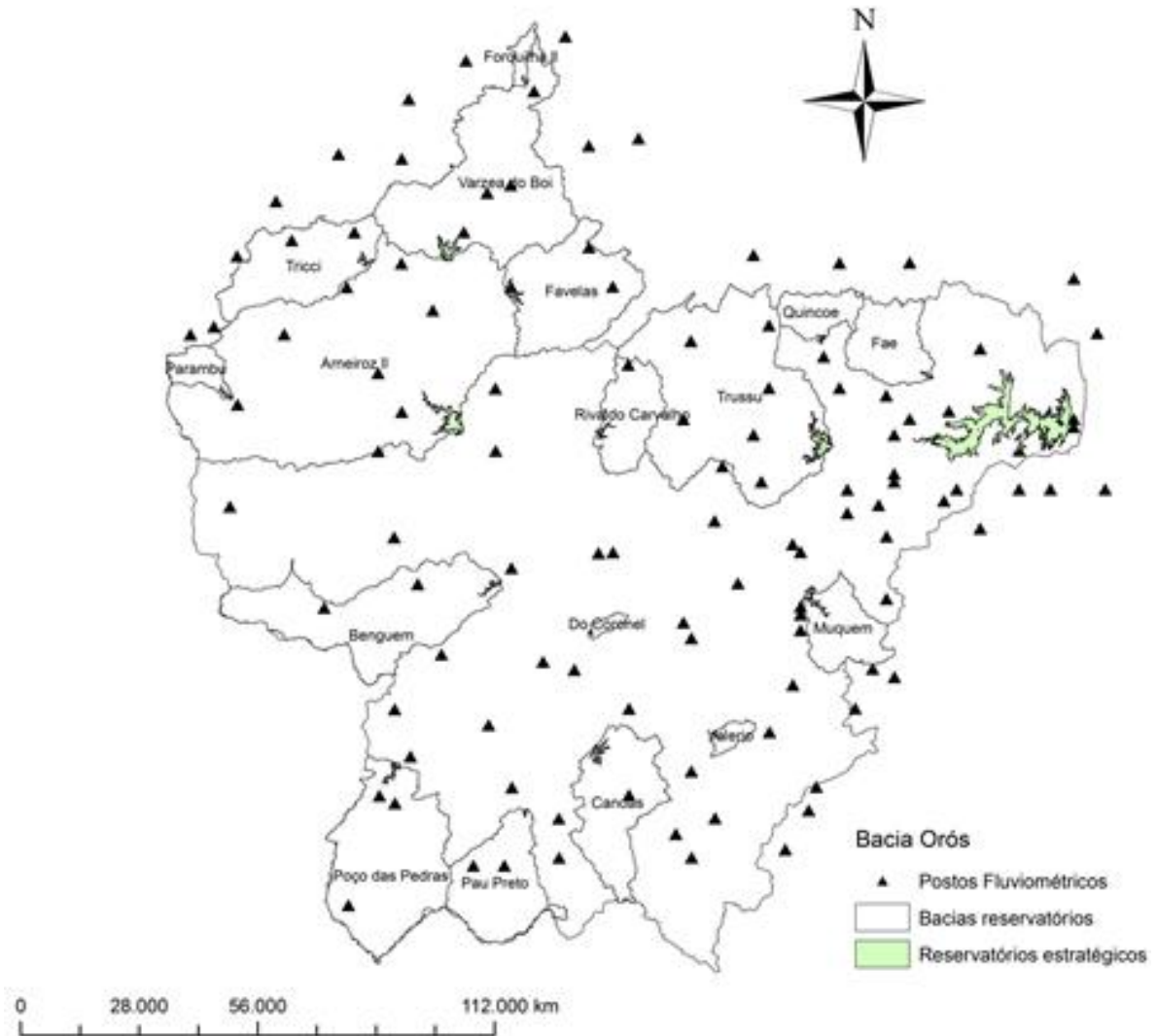
### 3.1.3 Dados climatológicos

Em estudos de escoamento superficial em bacias hidrográficas é indispensável se determinar a precipitação de maneira representativa dentro de toda a área, pois a variabilidade espacial da precipitação é um fator que pode influenciar consideravelmente nos valores reais de chuva dentro da área, como mostra a Figura 4. Buscando uma boa representatividade da distribuição espacial da precipitação, foram utilizados dados de 114 postos pluviométricos, localizados dentro e no entorno da bacia do Orós, e discretizados para as 18 sub-bacias dos reservatórios considerados, como está descrito na Tabela 1. Os dados foram adquiridos na plataforma da FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e de Recursos Hídricos).

Tabela 1 - Número de postos pluviométricos usados para obtenção da precipitação média da bacia.

| <b>Açude</b>     | <b>Nº de posto pluviométrico</b> |
|------------------|----------------------------------|
| Do Coronel       | 3                                |
| Pau Preto        | 5                                |
| Valério          | 3                                |
| Forquilha II     | 3                                |
| Quincoé          | 4                                |
| Parambu          | 3                                |
| Trici            | 3                                |
| Rivaldo Carvalho | 3                                |
| Benguê           | 6                                |
| Faé              | 4                                |
| Favelas          | 4                                |
| Muquém           | 6                                |
| Várzea do Boi    | 6                                |
| Poço das Pedras  | 6                                |
| Canoas           | 4                                |
| Arneiroz II      | 14                               |
| Trussu           | 11                               |
| Orós             | 114                              |

Figura 4 - Postos pluviométricos usados na espacialização da precipitação da bacia.



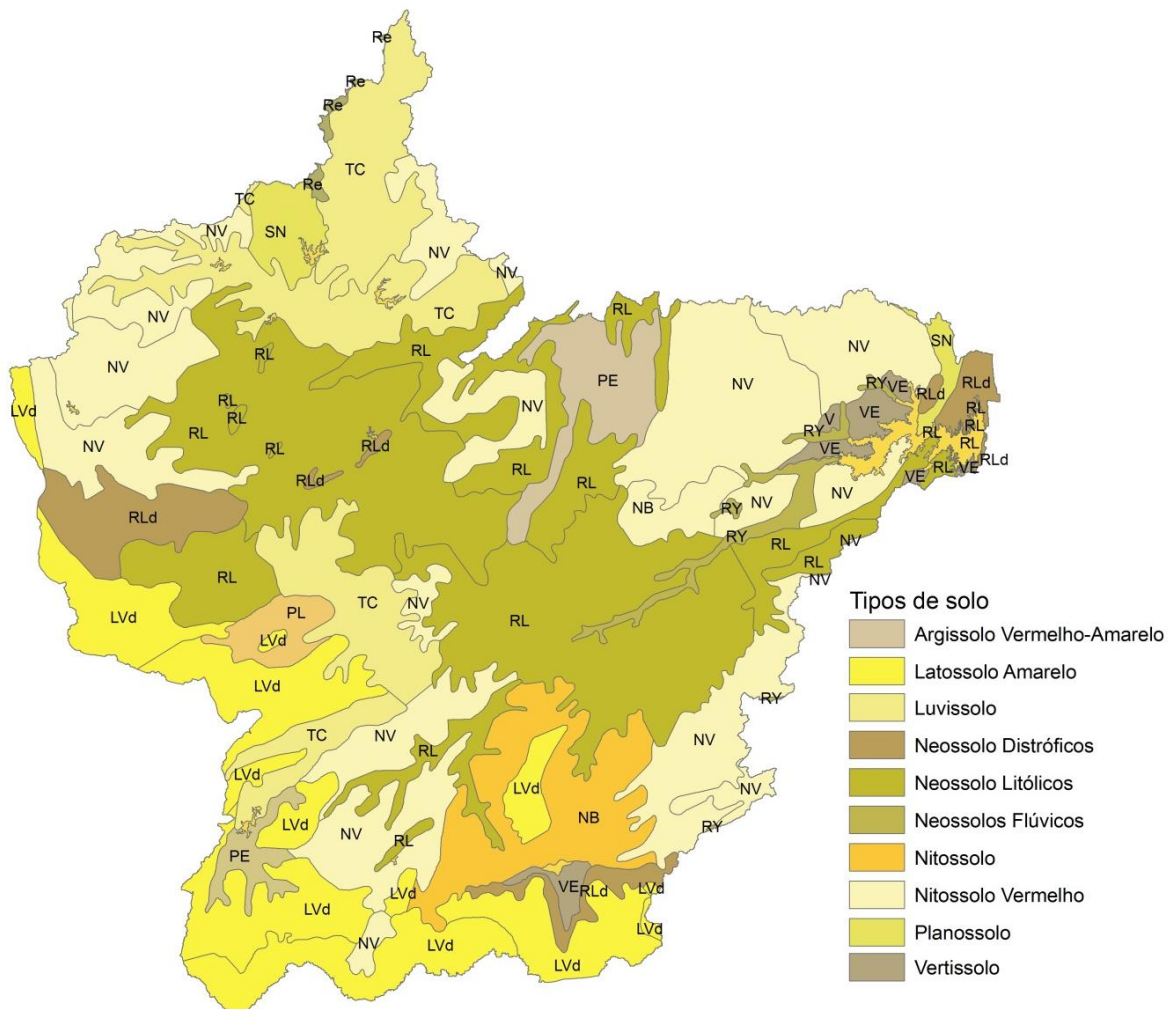
Para se determinar a evaporação, foram utilizados dados meteorológicos de temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa e insolação dos anos de 1992 - 2011, das estações meteorológicas localizadas nos municípios de Iguatu, Tauá e Campos Sales, adquiridos juntos ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Os dados foram obtidos na escala temporal diária, e foram agrupados em escala mensal. Utilizou-se o software REF-ET desenvolvido por Allen (2000) para o cálculo da evaporação pelo o método de Penman Monteith FAO 56, considerado o método padrão para estimativa da evaporação.

### 3.2 Levantamento das características físicas das bacias

#### 3.2.1 Solos

Os tipos de solo existentes na bacia do Orós foram considerados segundo a classificação do levantamento exploratório de solos (RADAMBRASIL 1981). Em toda a área da bacia do Orós são encontradas 10 classes principais de solos. Foram encontrados os solos do tipo: Neossolos Flúvicos (Ae), Nitossolo Vermelho (Pee), Vertissolo (V), Nitossolo (Ter), Argissolo Vermelho-Amarelo (PE), Neossolo Litólicos (Re), Neossolo Distrófico (Red), Luvisso (NC), Latossolo Amerelo (Lvd) e Planossolo (PL) conforme mostra a Figura 5.

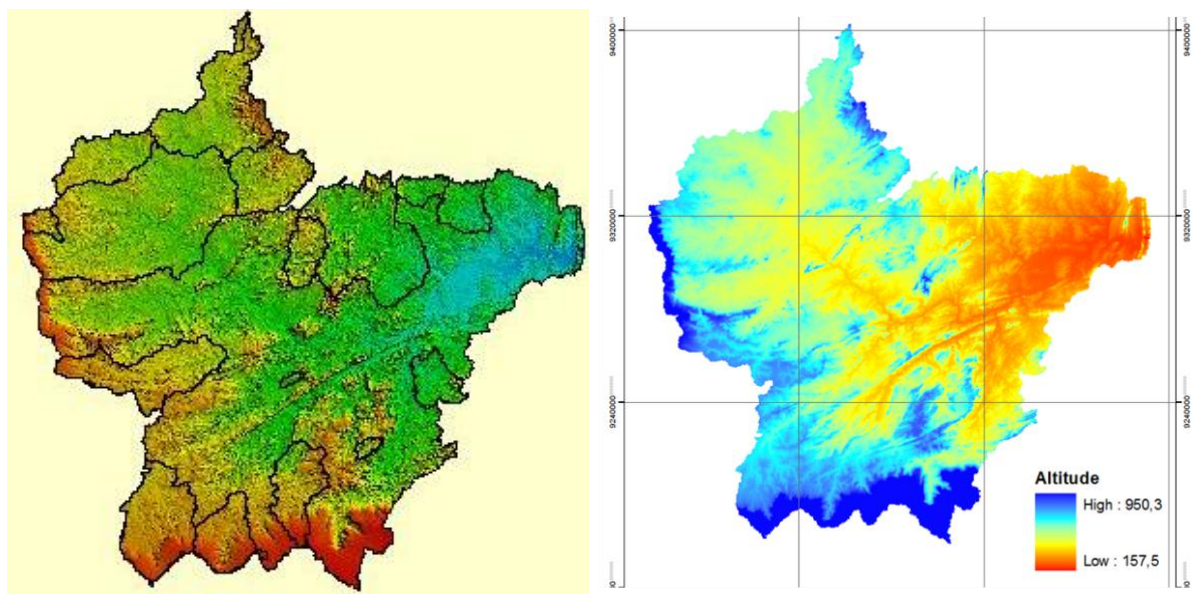
Figura 5 - Mapa de solos da bacia do Orós – CE, conforme o levantamento exploratório de solos (RADAMBRASIL 1981).



### 3.2.2 Declividade

A declividade da bacia foi também obtida através do modelo digital de elevação de terreno (SRTM/NASA) após processamento usando ferramentas de SIG das cenas S06W40, S06W41, S07W39, S07W40, S07W41, S08W40 e S08W41. As classes de declividade da bacia foram determinadas através da ferramenta slope. A Figura 6 apresenta o modelo digital de terreno usado para confecção do mapa de declividade da bacia do Orós.

Figura 6 - Modelo digital de elevação da bacia do Orós.



Para a determinação das classes de declividade da bacia utilizou-se a classificação proposta pela EMBRAPA (1999), o que possibilitou um melhor entendimento e especialização das classes de declividade da bacia do Orós. A classificação estabelece seis classes de declividade, como está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Enquadramento do relevo a partir das características topográficas (EMBRAPA, 1999).

| Classe de relevo | Características do relevo  |
|------------------|--|
| Plano            | Superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades de 0 a 3%  |
| Suave ondulado   | Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjuntos de colinas e/ ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50 m e de 50 a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves. Predominantemente variáveis de 3 a 8 % |
| Ondulado         | Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto   |



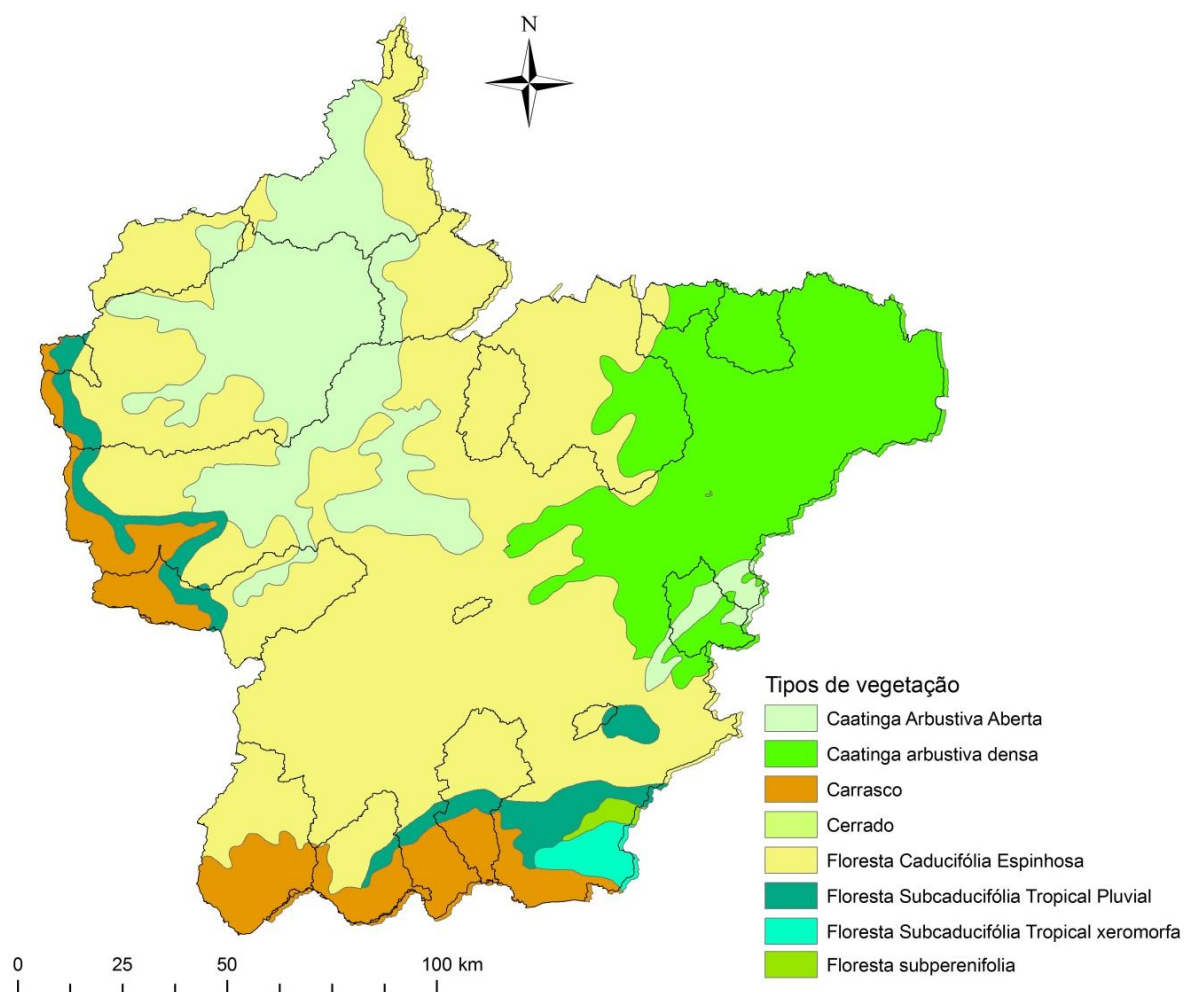
de colinas, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8 a 20 %

|                |   |
|----------------|---|
| Forte ondulado | Superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros (elevações de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes relativas, respectivamente) e raramente colinas, com declives fortes, predominantemente variáveis de 20 a 45%   |
| Montanhoso     | Superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, predominantemente variáveis de 45 a 75 % |
| Escarpado      | Áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos, tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuestras, falésias, vertentes de declives muito fortes, usualmente ultrapassando 75 %  |

### 3.2.3 *Vegetação*

O tipo de cobertura vegetal, que é uma característica imprescindível para se conhecer o comportamento do escoamento superficial, foi determinado através do mapa de vegetação do estado do Ceará, fornecido pelo IPECE 2007 (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará) ilustrado na Figura 7, mapa que melhor representou a cobertura vegetal da região estudada.

Figura 7 - Vegetação característica da bacia do Orós.



### 3.2.4 NDVI

Para obter informações sobre o uso e ocupação dos solos utilizou-se o NDVI, que é um índice que mede a quantidade e condições de estresse hídrico. Este índice pode variar de -1 a 1, os valores menores que 0 ocorrem em regiões com presença de água, valores entre 0 e 0,3 ocorre em regiões de solo exposto, e maiores que 0,3 até 1 em regiões vegetadas. Foram utilizadas duas imagens geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5, compostas de sete bandas espectrais.

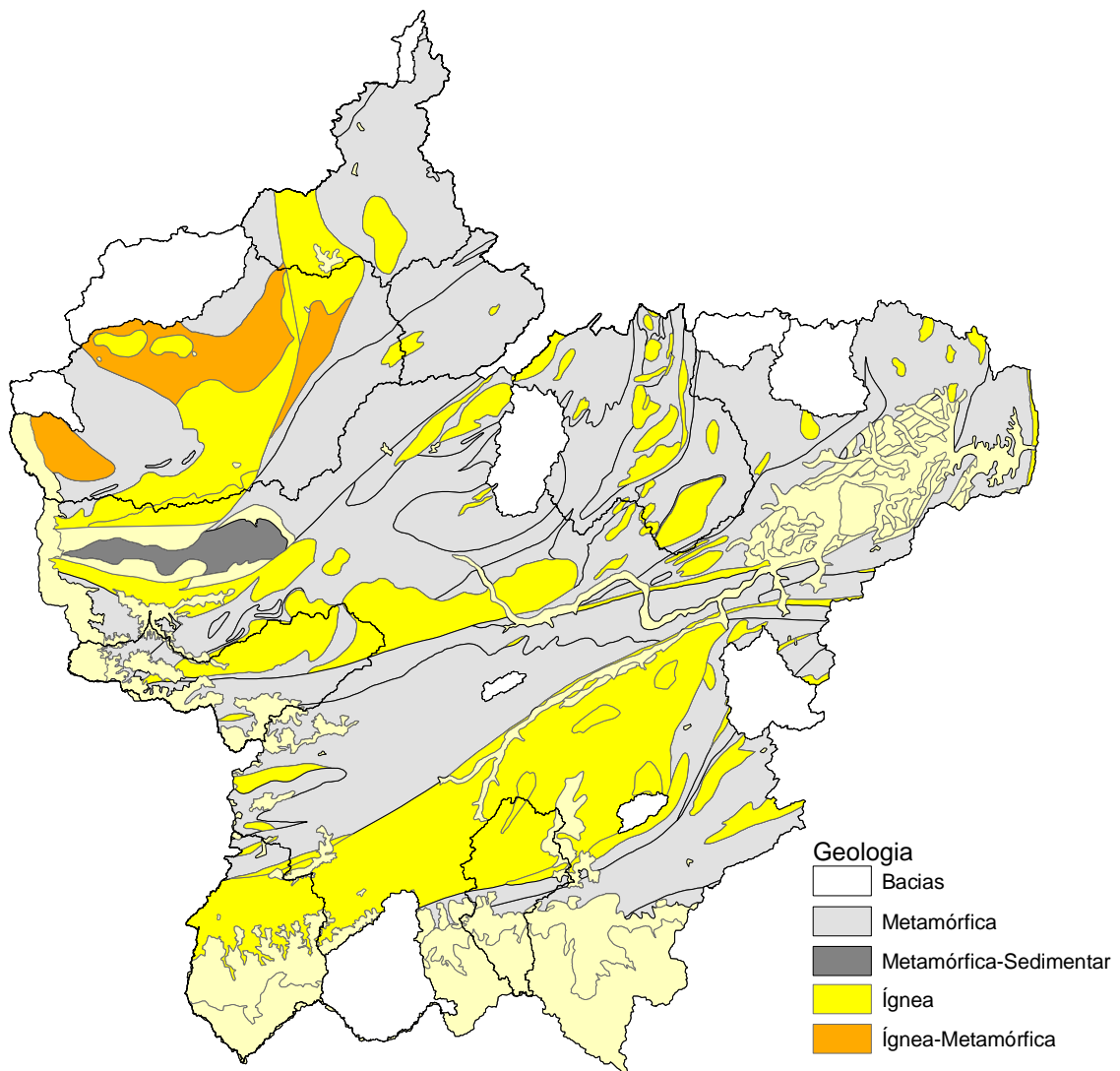
A obtenção do NDVI da bacia do Orós foi realizada através do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) através do uso de um software SIG. O cálculo do NDVI foi feito usando imagens de satélite Landsat 5. As imagens foram adquiridas no endereço eletrônico do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Foram utilizadas

imagens dos anos de 2000 a 2012 e das senas 217/64, 217/65, 218/64.e 218/65 para abranger toda a área da bacia.

### 3.2.5 Geologia

As classes geológicas da bacia do Orós foram obtidas através do mapa da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM 2001), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Espacialização da geologia na bacia do Orós.



### 3.2.6 Características dos Reservatórios Analisados

Para análise do comportamento hidrológico espacializado na bacia do Orós, os dados de balanço hídrico dos 18 reservatórios estratégicos monitorados pela COGERH foram armazenados e processados. Na Tabela 3 estão apresentados alguns dados técnicos destes reservatórios.

Tabela 3 - Descrição das características dos reservatórios estratégicos da bacia do Orós – CE.

| <b>Açude</b>     | <b>Cidade</b> | <b>Capacidade (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Área da bacia hidrográfica (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% da área da bacia</b> |
|------------------|---------------|-----------------------------------|--|---------------------------|
| Do Coronel       | Saboeiro      | 1 770 000                         | 26,5   | 0,1                       |
| Pau Preto        | Potengi       | 1 808 767                         | 491,8  | 2,0                       |
| Valério          | Assaré        | 2 020 000                         | 49,7   | 0,2                       |
| Forquilha II     | Tauá          | 3 400 000                         | 45,4   | 0,2                       |
| Quincoé          | Acopiara      | 7 130 000                         | 168  | 0,7                       |
| Parambu          | Parambu       | 8 530 000                         | 112,4  | 0,5                       |
| Trici            | Tauá          | 16 500 000                        | 552,9  | 2,2                       |
| Rivaldo Carvalho | Catarina      | 19 520 000                        | 306,4  | 1,2                       |
| Benguê           | Aiuaba        | 19 560 000                        | 924,2  | 3,8                       |
| Faé              | Quixelô       | 24 408 688                        | 313,1  | 1,3                       |
| Favelas          | Tauá          | 3 0100 000                        | 663,8  | 2,7                       |
| Muquém           | Cariús        | 47 643 000                        | 296,8  | 1,2                       |
| Várzea do Boi    | Tauá          | 51 910 000                        | 1200,6   | 4,9                       |
| Poço das Pedras  | Campos Sales  | 52 000 000                        | 932,9  | 3,8                       |
| Canoas           | Assaré        | 69 250 000                        | 551,8  | 2,2                       |
| Arneiroz II      | Arneiroz      | 197 060 000                       | 2 829,0  | 11,5                      |
| Trussu           | Iguatu        | 301 000 000                       | 1 567,1  | 6,4                       |
| Orós             | Orós          | 1 940 000 000                     | 24 636,0   | 100                       |

FONTE: COGERH

### 3.2.7 Estimativa da vazão afluyente

Para estimativa da vazão afluyente aos reservatórios estratégicos utilizou-se o balanço hídrico diário destes mananciais, dado que não há monitoramento de descargas líquidas a montante destes. Os demais dados necessários para realização do balanço hídrico diário, tais como elevação, área, volume, vazão liberada e vazão de sangria, foram fornecidos pela COGERH. Os dados de precipitação e evaporação diária foram obtidos dos postos através das estações meteorológicas mais próximas. O balanço hídrico foi calculado desde o

início do monitoramento do açude até o mês de dezembro de 2011 (Tabela 4), onde o mesmo foi determinado contabilizando todas as entradas e saídas no reservatório.

Tabela 4 - Resumo da disponibilidade de dados para estimativa da vazão afluente aos reservatórios estudados pelo método do balanço hídrico.

| <b>Reservatório</b> | <b>Data Início</b> | <b>Data Final</b> | <b>Numero de anos</b> |
|---------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|
| Arneiroz            | 03/03/2005         | 31/12/2011        | 6                     |
| Benguê              | 01/08/2000         | 28/07/2011        | 11                    |
| Canoas              | 27/03/1999         | 31/12/2011        | 12                    |
| Do Coronel          | 01/05/1999         | 31/12/2011        | 12                    |
| Faé                 | 02/03/2005         | 31/12/2011        | 6                     |
| Favelas             | 01/03/1992         | 31/12/2011        | 19                    |
| Forquilha II        | 01/05/1996         | 31/12/2011        | 15                    |
| Muquém              | 16/03/2001         | 31/12/2011        | 10                    |
| Orós                | 01/01/1986         | 31/12/2011        | 25                    |
| Parambu             | 01/01/1999         | 31/12/2011        | 12                    |
| Pau Preto           | 28/01/2004         | 31/12/2011        | 7                     |
| Poço da Pedra       | 01/01/1998         | 31/12/2011        | 13                    |
| Quincoé             | 01/01/1995         | 31/12/2011        | 16                    |
| Rivaldo Carvalho    | 10/04/2001         | 31/12/2011        | 10                    |
| Trici               | 01/03/1992         | 31/12/2011        | 19                    |
| Trussu              | 01/06/1996         | 31/12/2011        | 15                    |
| Valério             | 01/01/2000         | 31/12/2011        | 11                    |
| Várzea do Boi       | 01/04/1996         | 31/12/2011        | 15                    |

### 3.3 Determinação de Unidades de Solo e Declividade (USD)

Unidades de Solo e Declividade (USD) são áreas com mesmas características topográficas e pedológicas, resultante da superposição dos mapas destas duas componentes, pelo produto dos códigos definidos para cada classe de solo e declividade, conforme sumarizado na Tabela 5 e ilustrado exemplarmente na Figura 9.

Tabela 5 - Elaboração das unidades hidrológicas na bacia do Orós – CE.

| <b>Solo</b>            |       |       |        |         |         |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------|-------|--------|---------|---------|------|------|------|------|------|
| Tipo                   | Ae    | LVd   | NC     | PE      | Pee     | PL   | Re   | Red  | V    | Ter  |
| Valor                  | 1,01  | 1,02  | 1,03   | 1,04    | 1,045   | 1,05 | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 1,09 |
| <b>Declividade (%)</b> |       |       |        |         |         |      |      |      |      |      |
| Classe                 | 0 - 3 | 3 - 8 | 8 - 20 | 20 - 45 | 45 - 75 |      |      |      |      |      |
| Valor                  | 1     | 2     | 3      | 4       | 5       |      |      |      |      |      |

As USD da bacia é o produto do casamento de um tipo de solo, com uma faixa de declividade, após ter a sobre posição de todos os mapas disponíveis da bacia para observar áreas com mesma resposta no processo hidrológico, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Exemplo de uma sub-bacia com três unidades hidrológicas.

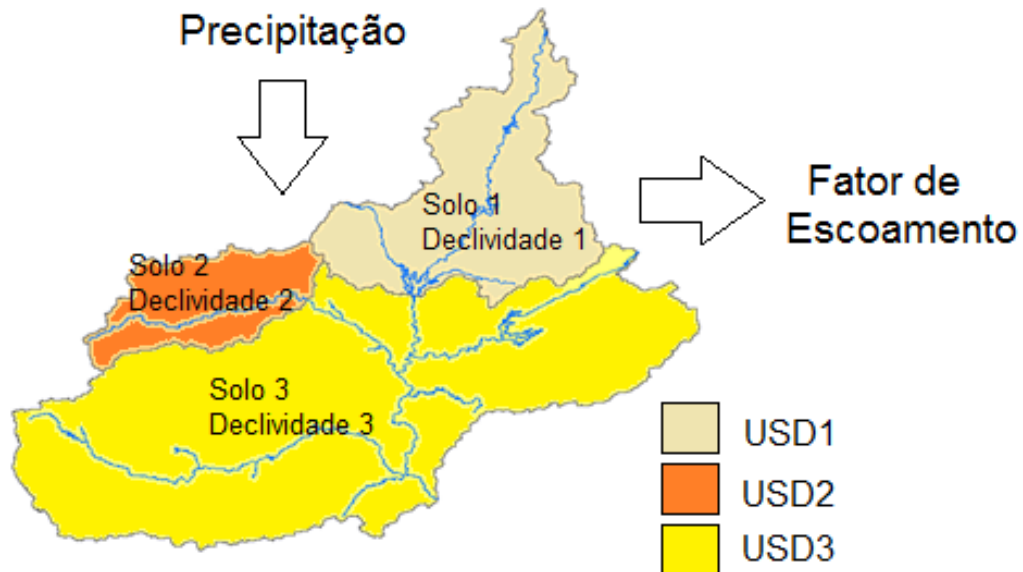
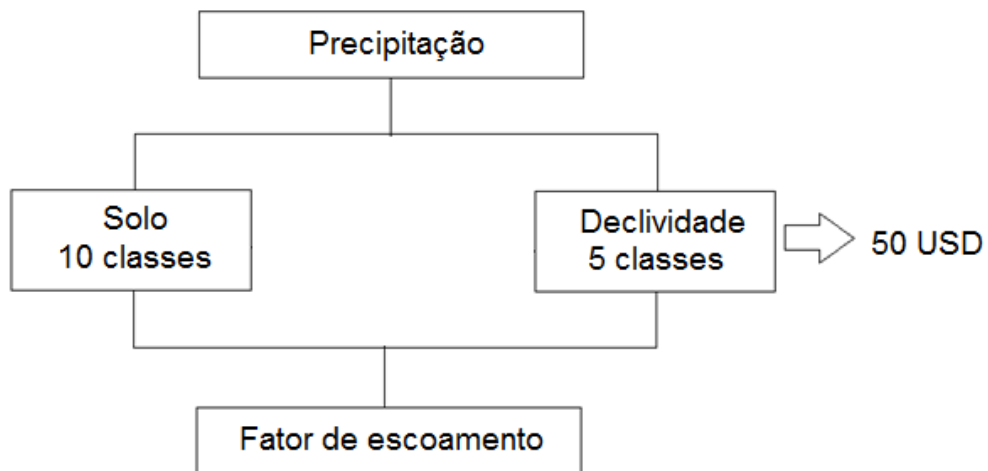


Figura 10 - Representação esquemática da geração de dados e produto das USD.



### 3.4 Análise multivariada das características físicas da bacia

A análise de agrupamento, também conhecida como análise de segmentação ou análise de taxonomia, é um conjunto de técnicas para realizar tarefas de dividir um conjunto

de dados ( $n$  observações com  $k$  variáveis) em subconjuntos relativamente homogêneos, baseado na distância ou similaridade entre os dados. Seja, então, um conjunto de dados com  $n$  observações com  $k$  variáveis, que podem ser representadas em forma de matriz.

A análise estatística neste trabalho teve como variáveis independentes o solo e a topografia. A precipitação foi considerada uma variável dependente, pois duas precipitações de mesma intensidade podem apresentar respostas diferentes em uma mesma área, dependendo das condições que se encontra o solo. O produto da análise foi a vazão específica que é a vazão por área, onde a análise multivariada vai buscar responder qual o peso das variáveis independentes no processo de geração de escoamento.

O método de rotação adotado nesta pesquisa foi o Varimax. Este método tem por finalidade minimizar a contribuição dos parâmetros de menor significância no fator (WUNDERLIN *et al.*, 2001), de modo que os parâmetros passam a apresentar pesos próximos à zero ou à unidade, eliminando os valores intermediários responsáveis por dificultar a interpretação.

### 3.4.1 Análise de agrupamento

A análise de agrupamento ou análise de correspondência estuda as relações de associação entre as variáveis discretas, apresentadas na forma de tabelas de contingência. Além de analisar essas relações existentes entre as variáveis, permite avaliar como está estruturada essa associação, descrevendo proximidades que permitem identificar “variáveis causas da associação”. É uma redução de dimensão para tabelas de contingência, onde as variáveis similares aparecem mais próximas entre si que as variáveis diferentes, solo, declividade, vegetação, geologia e USD. Possibilita criar uma figura representando as linhas da tabela por pontos no espaço, de modo que a distância Euclidiana seja igual à distância qui-quadrado calculada entre as linhas da tabela. A linha de corte é determinada através de interpolação, considerando os valores máximos e mínimos do coeficiente de aglomeração e da distância euclidiana. Adota-se, portanto, o valor que apresentar maior ganho na distância euclidiana:

$$\text{Distância recomendada} = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (3)$$

$X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – Distâncias euclidianas mínima e máxima, respectivamente;

$C_i$ ,  $C_{\min}$ ,  $C_{\max}$  – Coeficiente de aglomeração da variável  $i$ , mínima e máxima, respectivamente;

### 3.4.2 Análise de fator

A identificação dos parâmetros mais importantes para a geração dos pesos do escoamento superficial aplicando o modelo de estatística multivariada, Análise Fatorial (AF), foi realizada em etapas.

A primeira etapa é a medida de adequação dos dados, muito importante, sugerida por Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Adequacy (KMO). O KMO serve para avaliar o valor de entrada das variáveis para o modelo, sendo que seu valor possibilita prover resultados no alcance de 0 a 1. Para encontrar o valor do KMO, utiliza-se a expressão na equação:

$$KMO = \frac{\sum \sum_{i=j} r_{ij}^2}{\sum \sum_{i=j} r_{ij}^2 + \sum \sum_{i=j} a_{ij}^2} \quad (4)$$

sendo a razão da soma dos quadrados das correlações de todas as variáveis dividida por essa mesma soma, acrescida da soma dos quadrados das correlações parciais de todas as variáveis.

Onde:

$r_{ij}$ : é o coeficiente de correlação observado entre as variáveis  $i$  e  $j$ ;

$a_{ij}$ : é o coeficiente de correlação parcial entre as mesmas variáveis, que é, simultaneamente, uma estimativa das correlações entre os fatores. O  $a_{ij}$  deverá estar próximo de zero, pelo fato de os fatores serem ortogonais entre si.

Se a soma dos coeficientes de correlação parciais ao quadrado entre os pares de variáveis for pequena comparada à soma dos coeficientes de correlação simples ao quadrado, as medidas de KMO serão próximas a um, indicando que não há restrição ao uso do modelo da análise dos fatores. Valores pequenos para o KMO indicam que o modelo de análise de fator não se aplica. A Tabela 6 lista os intervalos do referido teste.

Tabela 6 - Intervalo do teste KMO

| Valor de KMO         | Aplicação do modelo |
|----------------------|---------------------|
| $KMO \geq 0,9$       | Excelente           |
| $0,8 \leq KMO < 0,9$ | Ótimo               |
| $0,7 \leq KMO < 0,8$ | Bom                 |
| $0,6 \leq KMO < 0,7$ | Regular             |
| $0,5 \leq KMO < 0,6$ | Ruim                |
| $KMO < 0,5$          | Inadequado          |

Fonte: Adaptado por Silveira e Andrade (2002)



As comunalidades medem a capacidade que têm as componentes formadas de explicar a variação de cada variável original; apresentam valores variando de 0 a 1 (SILVEIRA, 2002). “Zero” indica que as componentes não explicam nada da variância e “Um” indica que toda a variância é explicada pelas componentes que compõe o modelo. A comunalidade é estimada pela seguinte equação:

$$C_i = \sum A^2_{ij} \quad (5)$$

A : variância referente à variável  $x_{ij}$  ;

$C_i$  : valor da comunalidade referente de cada variável;

Para atribuir os pesos a cada USD, foram tomados como base os resultados obtidos na análise multivariada com a análise de cargas fatoriais e a análise de comunalidades. Neste procedimento foram utilizados as variâncias das componentes e o peso atribuído a cada parâmetro nos fatores extraídos na ACP.

Inicialmente foram calculados os somatórios de todos os fatores multiplicados pela explicabilidade de cada parâmetro. Em seguida foram ponderados os valores de  $w_i$  para cada parâmetro, de forma que a soma de todos os  $w_i$  fosse igual a um, pela fórmula:

$$F = \frac{\sum f_j \cdot A_j}{\sum f_j \cdot A_{pi}} \quad (6)$$

F – peso da USD na geração de escoamento;

$f_j$  – autovalor da componente;

$A_j$  – explicabilidade do parâmetro pelo fator;

i - numero de parâmetros selecionados no modelo.

Tabela 7 - Parâmetros físicos avaliados e suas unidades de medida.

| <b>Parâmetro</b>       | <b>Unidades</b>                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Área da bacia          | Km <sup>2</sup>                 |
| Precipitação           | Mm                              |
| Fator de escoamento    | -                               |
| Fluxo                  | m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> |
| Declividade            | %                               |
| Permeabilidade do solo | mm.dia <sup>-1</sup>            |

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características físicas da área de estudo

As características detalhadas da área de estudo são apresentadas a seguir na Tabela 8. A bacia do Orós tem uma área de 24 636 km<sup>2</sup> o que caracteriza uma bacia hidrográfica de grande porte, apresentando uma área bem diversificada no que diz respeito ao comportamento hidrológico ao longo da sua área. Apresenta uma precipitação média anual de 753 mm por ano o que gera um coeficiente de escoamento de 7,3%. O escoamento superficial médio gerado na bacia do Orós, calculado através do balanço hídrico do reservatório, foi de 44,86 m<sup>3</sup>/s, açude este que tem uma capacidade de armazenamento de 1,9 bilhões de m<sup>3</sup> e está localizado no exutório da bacia.

A bacia do Orós é um sistema composto por 17 sub-bacias, apresentadas na Tabela 8, com as respectivas características de área, precipitação, coeficiente de escoamento e fluxo. A sub-bacia do reservatório Arneiroz II é a que apresenta a maior área com 5 407 km<sup>2</sup> o que corresponde a 21,9% da área da bacia do Orós. A precipitação média na bacia é de 775,5 mm e gera um coeficiente de escoamento de 1,49%, valor esse classificado como menor valor de coeficiente de escoamento entre as bacias estudadas. O fluxo médio na bacia do Arneiroz II é de 1,98 m<sup>3</sup>/s.

Tabela 8 - Características de área, precipitação, escoamento e fluxo da bacia hidrográfica do Orós.

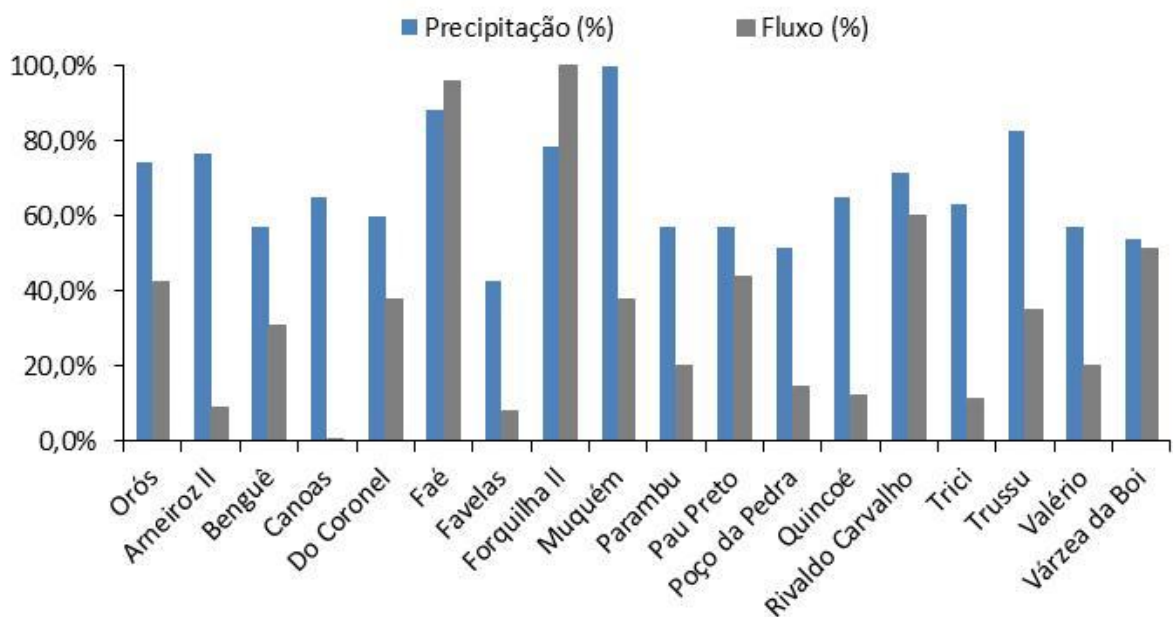
| Açude           | Área km <sup>2</sup> | Precipitação média (mm) | Coeficiente de escoamento médio % | Fluxo médio (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Orós            | 24 636,0             | 753,8                   | 7,30                              | 44,860                          |
| Arneiroz II     | 5 407                | 775,5                   | 1,49                              | 1,986                           |
| Benguê          | 1 062                | 580,1                   | 6,89                              | 1,346                           |
| Canoas          | 69,25                | 659,7                   | 7,35                              | 0,847                           |
| Do Coronel      | 65,16                | 607,9                   | 8,08                              | 0,038                           |
| Faé             | 313,1                | 892,7                   | 13,98                             | 1,223                           |
| Favelas         | 678                  | 432,4                   | 2,36                              | 0,219                           |
| Forquilha II    | 45,4                 | 793,1                   | 16,36                             | 0,178                           |
| Muquém          | 296,8                | 1011,4                  | 4,84                              | 0,458                           |
| Parambu         | 112,4                | 578,3                   | 4,48                              | 0,085                           |
| Pau Preto       | 59,2                 | 578,3                   | 9,81                              | 0,106                           |
| Poço das Pedras | 800                  | 520,8                   | 3,57                              | 0,471                           |
| Quincoé         | 168                  | 657,8                   | 2,37                              | 0,076                           |

|                  |         |       |       |       |
|------------------|---------|-------|-------|-------|
| Rivaldo Carvalho | 306,4   | 724,7 | 10,75 | 0,786 |
| Trici            | 552,9   | 640,9 | 2,32  | 0,262 |
| Valério          | 61,1    | 837,2 | 5,40  | 2,278 |
| Várzea do Boi    | 1209,6  | 576,9 | 4,49  | 0,050 |
| Trussu           | 1 567,1 | 543,0 | 12,27 | 2,554 |
| Média            | 442,4   | 675,8 | 6,89  | 3,21  |

Dentre as 18 bacias estudadas, a bacia do reservatório Forquilha II é a que possui menor área, com 45,4 km<sup>2</sup>, mas em contrapartida apresenta o maior coeficiente de escoamento que é de 16,36%, o que pode ser explicado pela predominância de solos com baixa permeabilidade. A precipitação média da bacia é de 793,1 mm e o fluxo médio é de 0,178 m<sup>3</sup>/s.

Analisando a variável hidrológica precipitação nas bacias estudadas, observa-se um valor máximo para a bacia do Muquém com 1 011,4 mm por ano de lâmina precipitada, valor esse que é o maior entre todas as 18 bacias avaliadas. Já a bacia do açude Favelas foi a que apresentou menor precipitação, ou seja, 432,4 mm por ano como pode ser visualizado na Tabela 8. Como se pode observar na Figura 11, a resposta hidrológica apresenta uma alta variabilidade com regiões apresentando alta precipitação e baixo coeficiente de escoamento e vice-versa. Os resultados mostram coeficientes de escoamento variando entre 1,49% e 16,36%.

Figura 11 - Comportamento da precipitação e do fluxo em cada sub-bacia do Orós.



## 4.2 Solo

Diferentes classes de solos podem apresentar características diferenciadas quanto aos processos hidrológicos, mesmo para condições semelhantes de topografia, cobertura vegetal e práticas de manejo.

Na bacia foram identificados dez tipos de solos, distribuídos por toda a bacia, conforme apresentado na Tabela 9. O solo do tipo neossolo litólicos, compreende a maior porção da bacia do Orós, com uma área de 7250 km<sup>2</sup> o que representa 29,76% da área total.

Os tipos de solos levantados na bacia são bem distribuídos. Os solos dos tipos argissolo vermelho-amarelo e neossolo litólicos são os que predominam, sendo observado em 12 das 18 bacias estudadas. Entre os solos encontrados nas bacias o que apresentou menor percentual de área foi o solo vertissolo, encontrado em apenas 1,09 % da área da bacia.

Tabela 9 - Percentual dos tipos de solo em cada sub-bacia hidrográfica em relação a área total.

| Sub-bacia        | Ae   | LVd   | NC   | PE    | Pee  | PL   | Re    | Red  | V    | Ter  |
|------------------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| Orós             | 1,19 | 14,11 | 11,9 | 26,76 | 3,38 | 2,57 | 29,76 | 3,9  | 1,08 | 5,14 |
| Faé              | -    | -     | -    | 100   | -    | -    | -     | -    | -    | -    |
| Trussu           | -    | -     | -    | 33,0  | 36,6 | -    | 30,2  | -    | -    | -    |
| Quincoé          | -    | -     | -    | 98,4  | -    | -    | 1,55  | -    | -    | -    |
| Rivaldo Carvalho | -    | -     | -    | -     | 51,9 | -    | 48,0  | -    | -    | -    |
| Muquém           | 0,75 | -     | -    | 49,4  | -    | -    | 49,7  | -    | -    | -    |
| Valério          | -    | -     | -    | 1,2   | -    | -    | -     | -    | -    | 98,7 |
| Do Coronel       | -    | -     | -    | -     | -    | -    | 100   | -    | -    | -    |
| Canoas           | -    | 36,5  | -    | -     | -    | -    | 0,06  | 0,03 | 0,01 | 0,53 |
| Pau Preto        | -    | 71,1  | -    | 27,7  | -    | -    | 1,1   | -    | -    | 0,01 |
| Poço das Pedras  | -    | 97,1  | 2,2  | 0,6   | -    | -    | -     | -    | -    | -    |
| Benguê           | -    | 59,4  | 11,4 | -     | -    | 27,1 | 1,8   | -    | -    | -    |
| Arneiroz II      | -    | 1,2   | 34,8 | 32,1  | -    | 5,2  | 26,0  | 0,35 | -    | -    |
| Parambu          | -    | 22,5  | -    | 77,4  | -    | -    | -     | 0,03 | -    | -    |
| Trici            | -    | -     | 40,7 | 59,2  | -    | -    | -     | -    | -    | -    |
| Favelas          | -    | -     | 51,0 | 20,8  | -    | -    | 28,1  | -    | -    | -    |
| Várzea do Boi    | -    | -     | 64,6 | 13,1  | -    | 19,9 | 2,2   | -    | -    | -    |
| Forquilha II     | -    | -     | 98,6 | -     | -    | -    | 1,3   | -    | -    | -    |

Ae - neossolos flúvicos, Pee - nitossolo vermelho, V - vertissolo, Ter - nitossolo, PE - argissolo vermelho-amarelo, Re - neossolo litólicos, Red - neossolo distrófico, NC - luvisolo, LVd - latossolo amarelo e PL - planossolo.

A permeabilidade do solo é afetada por diversos fatores inerentes ao solo. Pode-se destacar, entre eles, o tamanho das partículas, o índice de vazios, a mistura, a estratificação e o grau de saturação do solo. Na bacia, o solo neossolo flúvico é o que apresenta maior valor de permeabilidade, valor que é de 324 mm.dia<sup>-1</sup>. Dentre os solos identificados na bacia o vertissolo foi o que apresentou menor permeabilidade média, que é de aproximadamente 24 mm.dia<sup>-1</sup> como está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Permeabilidade média dos solos da bacia do Orós.

| <b>Tipo de solos</b>                  | <b>Sigla</b> | <b>Permeabilidade média<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> |
|---------------------------------------|--------------|---|
| Neossolos flúvicos                    | Ae           | 324   |
| Argissolo vermelho-amarelo eutróficos | PE           | 211   |
| Argissolo vermelho-amarelo            | Pee          | 181   |
| Latossolo amarelo                     | LVd          | 170   |
| Planossolo                            | PL           | 94  |
| Argissolo vermelho-amarelo            | Ter          | 86  |
| Neossolo litólicos                    | Re           | 84  |
| Neossolo distrófico                   | Red          | 72  |
| Luvissolo                             | NC           | 32  |
| Vertissolo                            | V            | 24  |

Fonte: (Jacomini 1973)

Outra característica importante para explicação do escoamento é a umidade antecedente do solo, pois regula a menor ou maior taxa de infiltração em função do tempo. Se uma determinada chuva for precedida por outros dias chuvosos é mais provável que o solo tenha dificuldade em reter mais água, pois está próximo à saturação, tendo sua capacidade de infiltração diminuída, permitindo a ocorrência de escoamento superficial.

### 4.3 Declividade

A declividade deve ser analisada para o entendimento da dinâmica hidrológica e ambiental. Sua determinação por levantamento de campo padrão é onerosa, tanto economicamente quanto temporalmente, tendo ainda que considerar a dinâmica das transformações ambientais que alteram continuamente essa topografia.

Para conhecer as características hidrológicas de cada bacia é indispensável se determinar a topografia da área de estudo de maneira detalhada e também de forma separada, já que o estudo leva em consideração as características de cada sub-bacia.

As sub-bacias Do Coronel, Quincoé, Rivaldo Carvalho, Benguê, Muquém, Várzea do Boi, Canoas, Arneiroz II, Trussu e Orós apresentaram as cinco classes de declividade e as demais apenas 4 classes, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Descrição das classes de declividade das sub-bacia hidrográfica.

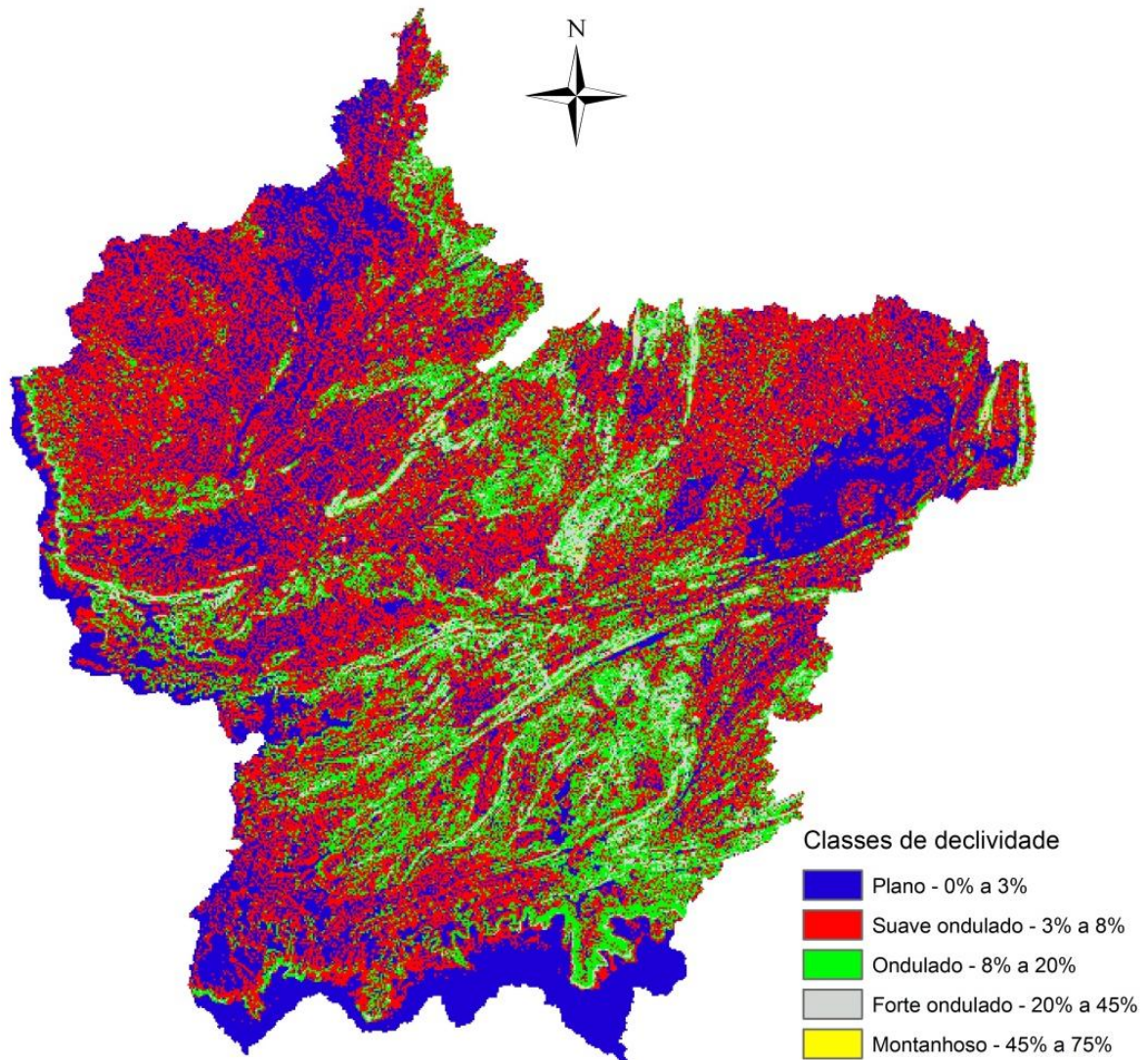
| Nº | Sub-bacia        | 0 - 3% | 3 - 8% | 8 - 20% | 20 - 45% | 45 - 75% |
|----|------------------|--------|--------|---------|----------|----------|
| 1  | Do Coronel       | 16,27  | 46,92  | 23,25   | 13,24    | 0,32     |
| 2  | Pau Preto        | 44,84  | 42,98  | 11,55   | 0,63     | -        |
| 3  | Valério          | 10,71  | 42,90  | 41,20   | 5,19     | -        |
| 4  | Forquilha II     | 35,07  | 59,41  | 5,09    | 0,43     | -        |
| 5  | Quincoé          | 20,65  | 62,12  | 14,92   | 2,18     | 0,13     |
| 6  | Parambu          | 17,57  | 56,38  | 23,80   | 2,25     | -        |
| 7  | Trici            | 36,91  | 60,90  | 2,15    | 0,04     | -        |
| 8  | Rivaldo Carvalho | 11,06  | 50,08  | 35,34   | 3,46     | 0,05     |
| 9  | Benguê           | 38,98  | 44,50  | 15,11   | 1,41     | 0,01     |
| 10 | Faé              | 25,96  | 67,45  | 6,58    | 0,01     | -        |
| 11 | Favelas          | 18,56  | 54,15  | 24,98   | 2,31     | -        |
| 12 | Muquém           | 21,21  | 51,47  | 23,39   | 3,92     | 0,01     |
| 13 | Várzea do Boi    | 43,06  | 42,63  | 12,02   | 2,29     | 0,04     |
| 14 | Poço das Pedras  | 58,01  | 34,28  | 7,22    | 0,49     | -        |
| 15 | Canoas           | 28,47  | 42,91  | 25,46   | 3,14     | 0,01     |
| 16 | Arneiroz II      | 33,81  | 57,07  | 8,18    | 0,94     | 0,02     |
| 17 | Trussu           | 20,24  | 46,90  | 24,28   | 8,37     | 0,21     |
| 18 | Orós             | 50,8   | 7,8    | 33,3    | 7,9      | 0,2      |

Além dos resultados acima apresentados a pesquisa buscou obter o peso das variáveis físicas da bacia no processo de geração de escoamento. Para isso é imprescindível o levantamento detalhado da declividade da bacia. Na bacia do Orós a classe de declividade do tipo plano foi a que apresentou maior área de ocupação, tendo uma área de 50,8%, como está apresentado na Tabela 12 e Figura 12.

Tabela 12 - Área das classes de declividade obtida na bacia do Orós.

| Declividade  | Classes de relevo | Área %     | Área Km <sup>2</sup> |
|--------------|-------------------|------------|----------------------|
| 0% a 3%      | Plano             | 50,8       | 12 376,4             |
| 3% a 8%      | Suave ondulado    | 7,8        | 1 900,31             |
| 8% a 20%     | Ondulado          | 33,3       | 8112,87              |
| 20% a 45%    | Forte ondulado    | 7,9        | 1924,67              |
| 45% a 75%    | Montanhoso        | 0,2        | 48,72                |
| < 75%        | Escarpado         | 0          | 0                    |
| <b>Total</b> |                   | <b>100</b> | <b>24 336</b>        |

Figura 12 - Mapa das classes de declividade na bacia do Orós – CE.



#### 4.4 Vegetação

Para estimar os diferentes usos de solo na bacia, procedeu-se o processo de tratamento de imagens de satélite usando informações do NDVI da área. Contudo, os resultados obtidos não foram satisfatórios, em virtude da extensa área da bacia e consequente necessidade de se obter 4 cenas, para cobrir toda a bacia, do mesmo período e com baixa nebulosidade. O NDVI encontrado em diversos anos não apresentou resultados coerentes, com elevada cobertura de nuvem em pelo menos uma das quatro cenas, o que inviabilizou o uso desta ferramenta para expressar o uso e ocupação do solo na área de estudo.

Embora não tenha sido possível a identificação dos diferentes usos do solo usando o NDVI, optou-se por utilizar os mapas de vegetação do IPECE. Em toda a bacia do Orós foram encontradas oito tipos de vegetação. A vegetação do tipo floresta caducifólia espinhosa foi a que apresentou maior percentual de área, 50,63%. A vegetação do tipo Floresta subperenifolia apresentou a menor área com apenas 0,31% da área total da bacia, como pode ser visualizado na Tabela 13.

Tabela 13 - Percentual da vegetação na bacia do Orós.

| Sub-bacia     | CAAd  | CAAa  | CAR  | Cer  | FCE   | FSTP | FSTX | FSP  |
|---------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| Orós          | 19,39 | 17,14 | 7,67 | 0,38 | 50,63 | 3,62 | 0,92 | 0,31 |
| Arneiroz II   | 0,0   | 0,0   | 2,6  | 0,0  | 86,2  | 11,2 | 0,0  | 0,0  |
| Benguê        | 0,0   | 8,7   | 23,5 | 0,0  | 56,1  | 11,7 | 0,0  | 0,0  |
| Canoas        | 0,0   | 0,0   | 26,3 | 0,0  | 61,6  | 12,1 | 0,0  | 0,0  |
| Do Coronel    | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Faé           | 100,0 | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Favelas       | 0,0   | 22,1  | 0,0  | 0,0  | 77,9  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Forquilha II  | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Muquém        | 68,2  | 31,8  | 0,0  | 0,0  | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Parambu       | 0,0   | 0,0   | 19,8 | 0,0  | 30,1  | 50,2 | 0,0  | 0,0  |
| Pau Preto     | 0,0   | 0,0   | 44,9 | 0,0  | 48,0  | 7,1  | 0,0  | 0,0  |
| Poço Pedra    | 0,0   | 0,0   | 48,4 | 0,0  | 51,6  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Quincoé       | 68,3  | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 31,7  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Rivaldo C.    | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Trici         | 0,0   | 16,4  | 0,0  | 0,0  | 83,6  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Trussu        | 31,3  | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 68,7  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Valério       | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 100,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Várzea do Boi | 0,0   | 60,5  | 0,0  | 0,0  | 39,5  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |

CAAd – caatinga arbustiva densa, CAAa – caatinga arbustiva aberta, CAR – carrasco, Cer - Cerrado, FCE - Floresta Caducifólia Espinhosa, FSTP - Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial, FSTX - Floresta Subcaducifólia Tropical xeromorfa, FSP – Floresta subperenifolia..

#### 4.5 Geologia

Em toda a bacia do Orós, foram encontradas seis classes geológicas. A classe geológica que apresentou maior área foi à classe metamórfica com percentual de 54,48% da total, o que corresponde a uma área de 13 422 km<sup>2</sup>. Já a classe geológica sedimentar-metamórfica foi encontrada em apenas 0,81% da área total da bacia, sendo essa a classe geológica que apresentou menor área, como mostra a Tabela 14.



Tabela 14 - Percentual das classes geológicas na bacia do Orós.

| <b>Classe Geológica</b> | <b>Área %</b> |
|-------------------------|---------------|
| Ígnea                   | 23,81%        |
| Ígnea-metamórfica       | 3,67%         |
| Metamórfica             | 54,48%        |
| Metamórfica-sedimentar  | 1,03%         |
| Sedimentar              | 16,21%        |
| Sedimentar-metamórfica  | 0,81%         |

## 4.6 Unidades de Solo e Declividade

### 4.6.1 Ambiente SIG

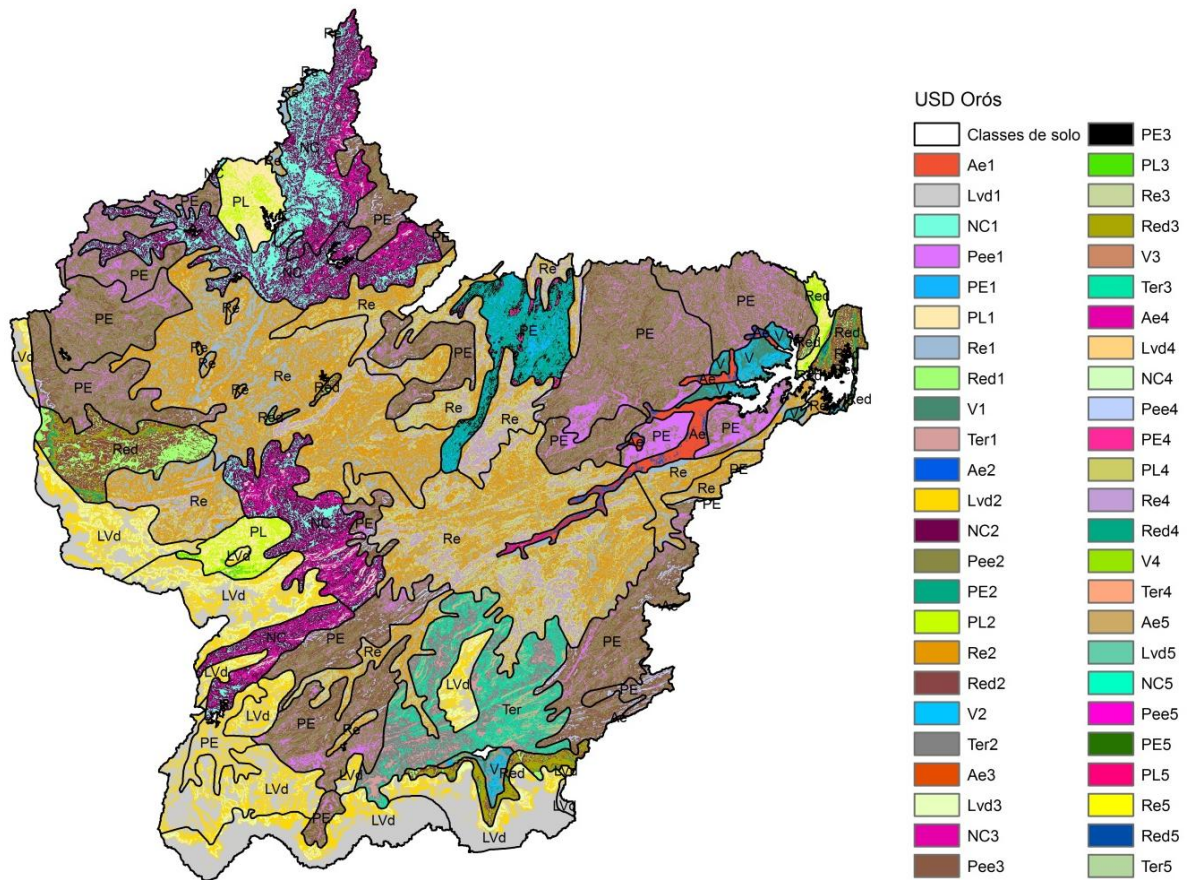
Com a multiplicação do mapa de solo pelo mapa de declividade, usando ferramentas de SIG, foram encontradas 49 unidades de solo e declividade. Poderiam ser encontradas 50 USDs (Tabela 15), já que a combinação foi feita entre dez tipos de solo e cinco tipos de declividade, mas o solo do tipo vertissolo não apareceu em nenhuma parte da bacia com a declividade da classe 5, que corresponde a valores entre 45% e 75% de declividade, como pode ser observado na Tabela 16. A distribuição das USD ao longo da bacia do Orós pode ser visualizada na Figura 13.

Tabela 15 - Valores de cada USD através do mapa de solo e declividade na bacia do Orós.

| <b>Tipo de Solo</b> | <b>Valores</b> | <b>Classes de declividade (%)</b> |          |          |          |          |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                     |                | 0 - 3                             | 3 - 8    | 8 - 20   | 20 - 45  | 45 - 75  |
|                     |                | <b>1</b>                          | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
| Ae                  | <b>1,01</b>    | 1,01                              | 2,02     | 3,03     | 4,04     | 5,05     |
| LVd                 | <b>1,02</b>    | 1,02                              | 2,04     | 3,06     | 4,08     | 5,1      |
| NC                  | <b>1,03</b>    | 1,03                              | 2,06     | 3,09     | 4,12     | 5,15     |
| PE                  | <b>1,04</b>    | 1,04                              | 2,08     | 3,12     | 4,16     | 5,2      |
| Pea                 | <b>1,045</b>   | 1,045                             | 2,09     | 3,135    | 4,18     | 5,225    |
| PL                  | <b>1,05</b>    | 1,05                              | 2,1      | 3,15     | 4,2      | 5,25     |
| Re                  | <b>1,06</b>    | 1,06                              | 2,12     | 3,18     | 4,24     | 5,3      |
| Red                 | <b>1,07</b>    | 1,07                              | 2,14     | 3,21     | 4,28     | 5,35     |
| V                   | <b>1,08</b>    | 1,08                              | 2,16     | 3,24     | 4,32     | 5,4*     |
| Ter                 | <b>1,09</b>    | 1,09                              | 2,18     | 3,27     | 4,36     | 5,45     |

\*Combinação de solo e declividade não encontrada na bacia

Figura 13 - Mapa da composição das unidades de solo e declividade..



Avaliando os resultados das USD geradas, podemos observar a sub-bacia do Arneiroz II foi a que apresentou maior número de unidades de solos e declividade, sendo encontradas nessa bacia 25 USDs, de um total de 49 encontradas na bacia do Orós como mostra a Tabela 16. Nas sub-bacias do Coronel e Faé foram encontradas apenas 4 USD, sendo essas duas áreas as que apresentaram menor número de unidades de solo e declividade.

Dentre as 49 unidades de solo e declividade encontradas, a USD Pee2 (solo do tipo nitossolo vermelho com declividade da classe 2) ocupa maior área na bacia, sendo encontrada em 14,2% da área total, conforme sumarizado na Tabela 16.

Tabela 16 - Porcentagem de área das USDs nas respectivas bacias hidrográficas estudadas.

| USD  | BACIAS HIDROGRÁFICAS |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | 1                    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
| Ae1  | 0,7                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,1  | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Lvd1 | 7,5                  | 0,4  | 24,1 | 16,8 | -    | -    | -    | -    | -    | 7,3   | 38,8 | 56,9 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| NC1  | 3,6                  | 9,8  | 3,3  | -    | -    | -    | 0,5  | 34,6 | -    | -     | -    | 0,3  | -    | -    | 15,6 | -    | 25,6 | -    |
| Peel | 6,1                  | 5,4  | 0,01 | -    | -    | 25,9 | 3,2  | -    | 6,5  | 9,5   | 5,7  | -    | 20,5 | 6,3  | 20,8 | 14,9 | 1,3  | 9,4  |
| PE1  | 0,6                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| PL1  | 1,3                  | 27,0 | 10,5 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 12,6 | 8,7  |
| Re1  | 6,3                  | 6,8  | 0,6  | 0,9  | 16,2 | -    | 4,9  | 0,3  | 14,5 | -     | 0,2  | -    | 0,0  | 4,6  | -    | -    | 2,7  | 2,0  |
| Red1 | 1,0                  | 0,7  | -    | 0,8  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| V1   | 0,6                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Ter1 | 0,7                  | -    | -    | 9,8  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | 14,9 | -    | -    |
| Ae2  | 0,2                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,4  | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Lvd2 | 4,8                  | 0,2  | 21,9 | 10,7 | -    | -    | -    | -    | -    | 5,96  | 26,3 | 32,5 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| NC2  | 6,0                  | 13,5 | 7,3  | -    | -    | -    | 32,1 | 59,1 | -    | -     | -    | 1,3  | -    | -    | 24,1 | -    | 30,1 | -    |
| Pee2 | 14,2                 | 14,6 | -    | -    | -    | 67,4 | 10,1 | 0,0  | 23,2 | 49,17 | 15,6 | 0,2  | 61,7 | 26,7 | 36,4 | 15,1 | 5,6  | -    |
| PE2  | 1,3                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 17,7 |
| PL2  | 1,1                  | 1,2  | 14,4 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 5,6  | 19,9 |
| Re2  | 13,6                 | 10,8 | 0,8  | 2,9  | 46,9 | -    | 17,3 | 0,2  | 27,7 | -     | 0,8  | -    | 0,3  | 23,3 | -    | -    | 0,8  | 0,1  |
| Red2 | 1,7                  | 0,1  | -    | 1,5  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 9,1  |
| V2   | 0,5                  | -    | -    | 0,6  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Ter2 | 2,0                  | -    | -    | 27,5 | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | 13,6 | -    | -    |
| Ae3  | 0,1                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,2  | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Lvd3 | 2,0                  | 0,1  | 12,3 | 7,4  | -    | -    | -    | -    | -    | 6,5   | 5,3  | 7,0  | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| NC3  | 1,7                  | 2,4  | 0,6  | -    | -    | -    | 11,1 | 4,5  | -    | -     | -    | 0,2  | -    | -    | 0,7  | -    | 7,15 | -    |
| Pee3 | 5,1                  | 3,6  | -    | -    | -    | 6,5  | 8,2  | -    | 15,9 | 16,9  | 6,1  | 0,1  | 14,3 | 16,9 | 1,4  | 14,2 | 4,72 | -    |
| PE3  | 0,4                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| PL3  | 0,1                  | 0,0  | 1,9  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,7  | 5,2  |

|              |           |           |           |           |          |          |           |          |           |          |           |          |           |          |          |          |           |           |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Re3          | 6,9       | 1,8       | 0,2       | 2,7       | 23,2     | -        | 8,4       | 0,5      | 7,2       | -        | 0,5       | -        | 0,5       | 18,4     | -        | -        | 0,1       | 6,5       |
| Red3         | 0,9       | 0,5       | -         | 1,1       | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| V3           | 0,1       | -         | -         | 0,0       | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | 12,5      |
| Ter3         | 1,9       | -         | -         | 14,0      | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | 14,3     | -         | -         |
| Ae4          | 0,6       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| Lvd4         | 0,3       | 0,7       | 1,4       | 1,3       | -        | -        | -         | -        | -         | 2,2      | 0,5       | 0,4      | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| NC4          | 0,3       | 0,2       | 0,7       | -         | -        | -        | 0,9       | 0,2      | -         | -        | -         | -        | -         | -        | 0,8      | -        | 1,1       | -         |
| Pee4         | 0,8       | 0,4       | -         | -         | -        | -        | 1,2       | -        | 3,8       | 0,3      | 0,1       | -        | 1,6       | 1,6      | 0,3      | -        | 1,1       | -         |
| PE4          | 0,9       | -         | -         | -         | -        | 0,8      | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| PL4          | 0,1       | 0,2       | 0,2       | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | 0,1       | -         |
| Re4          | 2,3       | 0,9       | 0,2       | 0,4       | 13,2     | -        | 0,4       | 0,2      | 0,1       | -        | -         | -        | 0,5       | 1,7      | -        | -        | 0,2       | 0,7       |
| Red4         | 0,1       | 0,1       | -         | 0,1       | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| V4           | 0,6       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| Ter4         | 0,4       | -         | -         | 1,5       | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | 12,8     | -         | -         |
| Ae5          | 0,5       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| Lvd5         | 0,3       | -         | 0,01      | 0,5       | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| NC5          | 0,1       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| Pee5         | 0,1       | 0,1       | -         | -         | -        | -        | -         | -        | 0,2       | -        | -         | -        | 0,6       | 0,5      | -        | -        | 0,4       | -         |
| PE5          | 0,3       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| PL5          | 0,5       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| Re5          | 0,7       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | 0,7       | -        | -        | -        | -         | -         |
| Red5         | 0,9       | -         | -         | -         | -        | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -         | -        | -        | -        | -         | -         |
| <b>Total</b> | <b>49</b> | <b>25</b> | <b>18</b> | <b>19</b> | <b>4</b> | <b>4</b> | <b>12</b> | <b>9</b> | <b>12</b> | <b>8</b> | <b>11</b> | <b>9</b> | <b>10</b> | <b>9</b> | <b>8</b> | <b>7</b> | <b>17</b> | <b>11</b> |

1 – Orós, 2 – Arneiroz II, 3 – Benguê, 4 – Canoas, 5 – Do Coronel, 6 – Faé, 7 – Favelas, 8 - Forquilha II, 9 – Muquém, 10 – Parambu, 11 – Pau Preto, 12 – Poço da Pedra, 13 – Quincoó, 14 – Rivaldo Carvalho, 15 – Trici, 16 – Valério, 17 – Várzea do Boi, 18 – Trussu. Ae - neossolos flúvicos, Pee - nitossolo vermelho, V - vertissolo, Ter - nitossolo, PE - argissolo vermelho-amarelo, Re - neossolo litólicos, Red - neossolo distrófico, NC - luvisso, LVd - latossolo amarelo e PL – planossolo.; 1 - declividade > 3%; 2 – declividade de 3% - 8%; 3 – declividade de 8% - 20%; 4 – declividade de 20% - 45%; 5 - declividade > 75%.

#### 4.7 Análise de Agrupamento

Os grupos foram definidos analisando o dendrograma gerado (Figura 14). A linha de corte para determinação dos grupos foi definida com base na Equação 03, para uma distância euclidiana de 10,85, por apresentar o maior incremento para as 18 sub-bacias analisadas, e não se distanciar tanto do valor zero.

Os resultados obtidos através análise de agrupamento da estatística multivariada mostram que a bacia do Orós pode ser dividida em quatro grupos diferentes caracterizados pela precipitação média e coeficiente de escoamento, como pode ser visualizado na Tabela 17.

Vale ressaltar que a análise de agrupamento avalia a amplitude de cada variável, ou seja, o valor máximo e mínimo, e atribui um peso para cada variável. Desta forma, é possível analisar variáveis com unidades de medidas diferentes como o é o caso dessa pesquisa, que considera precipitação (mm) e coeficiente de escoamento (%).

A análise de agrupamento indica a ocorrência de seis grupos com características homogêneas quanto às variáveis analisadas, como segue:

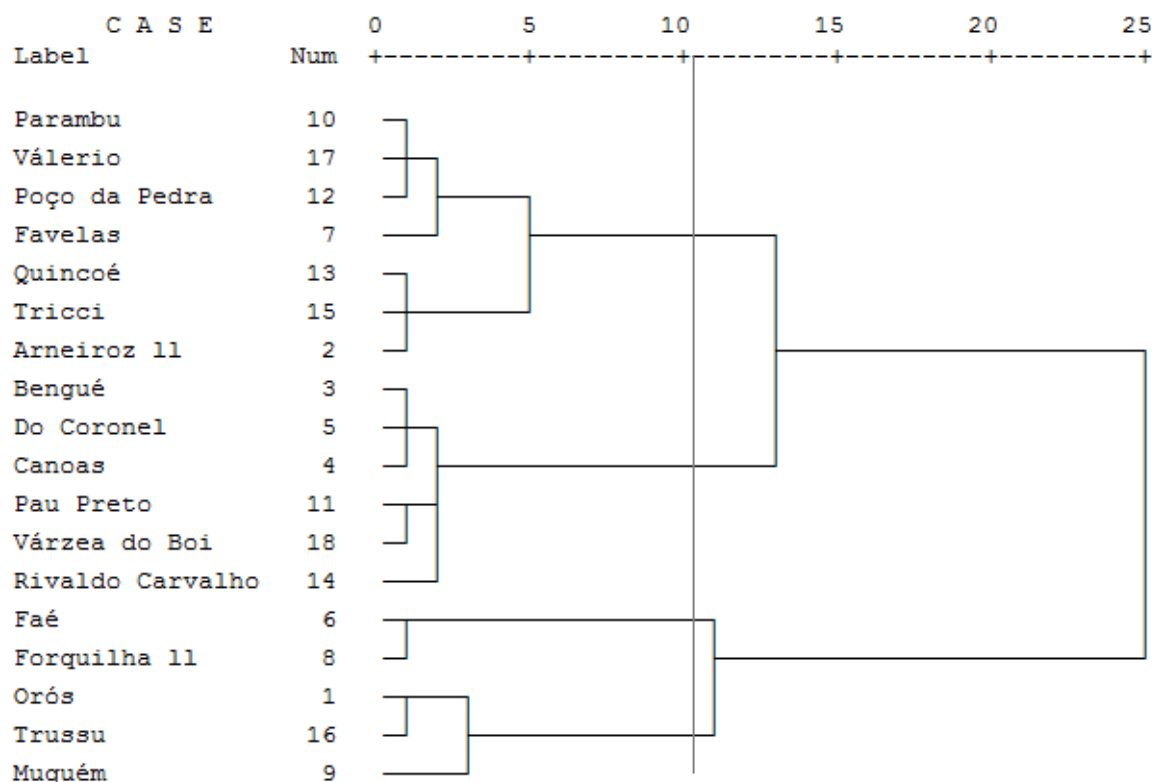
- Grupo 1 é formado por Parambu, Valério, Poço da Pedra, Favelas, Quincoé, Trici, e Arneiroz II;
- Grupo 2 é composto pelas bacias do Benguê, Do Coronel, Canoas, Várzea do Boi, Pau Preto e Rivaldo Carvalho;
- Grupo 3 por, Forquilha II e Faé;
- Grupo 4 fazem parte Trussu, Orós e Muquém;

Tabela 17 - Coeficiente de aglomeração das bacias analisadas.

| Variáveis | Coeficiente de Aglomeração | Diferença | Distância Euclidiana |
|-----------|----------------------------|-----------|----------------------|
| 1         | 0,000                      | -         | -                    |
| 2         | 0,007                      | -         | -                    |
| 3         | 0,063                      | -         | -                    |
| 4         | 0,194                      | -         | -                    |
| 5         | 0,329                      | -         | -                    |
| 6         | 0,522                      | -         | -                    |
| 7         | 0,783                      | -         | -                    |
| 8         | 1,169                      | -         | -                    |
| 9         | 1,691                      | -         | -                    |
| 10        | 2,385                      | -         | -                    |
| 11        | 3,227                      | -         | -                    |

|    |        |       |              |
|----|--------|-------|--------------|
| 12 | 4,223  | -     | -            |
| 13 | 5,761  | 2,42  | 5,06         |
| 14 | 8,182  | 5,68  | 6,77         |
| 15 | 13,862 | 6,72  | <b>10,78</b> |
| 16 | 20,591 | 13,40 | 15,53        |
| 17 | 34,000 | -     | -            |

Figura 14 - Dendrograma do agrupamento das características hidrológicas (precipitação e coeficiente de escoamento médio) das sub-bacias do Orós.



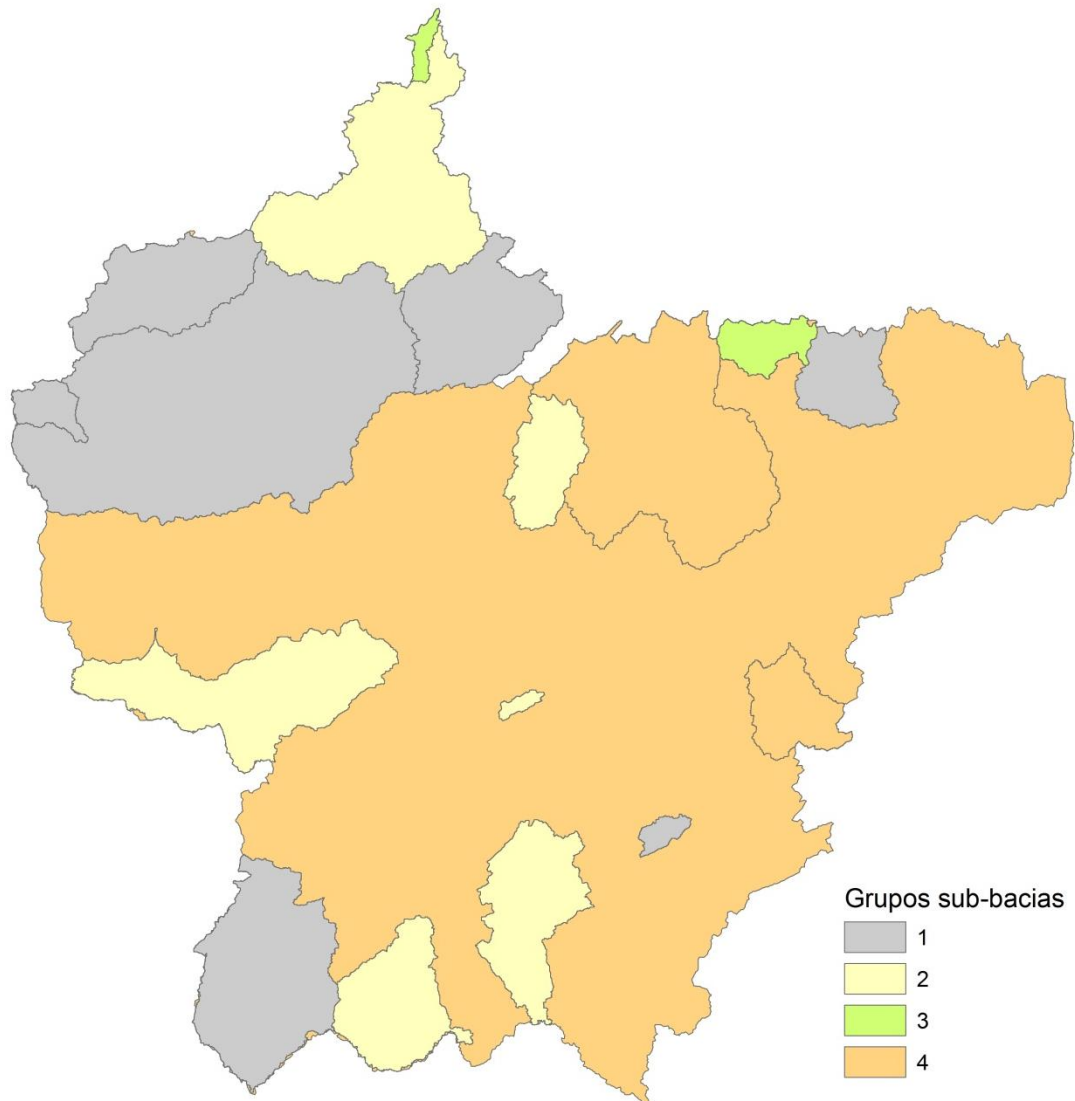
Os grupos formados através da análise de agrupamento apresentam característica homogênea de precipitação e coeficiente de escoamento. De acordo com a Tabela 18, podem-se observar respostas hidrológicas diferentes para os grupos identificados, como segue: grupo 1, com baixa pluviosidade e baixo coeficiente de escoamento; grupo 2, com moderada pluviosidade e moderado coeficiente de escoamento; grupo 3, com moderada pluviosidade e coeficiente de escoamento de moderado a alto; grupo 4, com alta pluviosidade e moderado coeficiente de escoamento. Este tipo de análise possibilitou a identificação de áreas com características homogêneas que podem ser usadas para regionalização de parâmetros associados a respostas hidrológicas.

Tabela 18 - Agrupamento das bacias usando precipitação e no coeficiente de escoamento médio.

| <b>Grupo</b> | <b>Sub-bacia</b> | <b>Precipitação (mm)</b> | <b>Coefficiente de escoamento %</b> |
|--------------|------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 1            | Favelas          | 432,4                    | 2,36                                |
|              | Parambu          | 578,3                    | 4,48                                |
|              | Poço Pedra       | 520,8                    | 3,57                                |
|              | Valério          | 576,9                    | 4,49                                |
|              | Quincoé          | 657,8                    | 2,37                                |
|              | Trici            | 640,9                    | 2,32                                |
|              | Arneiroz II      | 775,5                    | 1,49                                |
| 2            | Benguê           | 580,1                    | 6,89                                |
|              | Do Coronel       | 607,9                    | 8,08                                |
|              | Canoas           | 659,7                    | 7,35                                |
|              | Pau Preto        | 578,3                    | 9,81                                |
|              | Várzea do Boi    | 543,0                    | 12,27                               |
|              | Rivaldo Carvalho | 724,7                    | 10,75                               |
| 3            | Faé              | 892,7                    | 13,98                               |
|              | Forquilha II     | 793,1                    | 16,36                               |
| 4            | Orós             | 753,8                    | 7,30                                |
|              | Trussu           | 837,2                    | 5,40                                |
|              | Muquém           | 1011,4                   | 4,84                                |

Para um melhor entendimento e visualização das bacias com características semelhantes de precipitação e coeficiente de escoamento foi gerado um mapa com a espacialização dos grupos, como pode ser visualizado na Figura 15.

Figura 15 - Espacialização das bacias através do agrupamento da precipitação e do coeficiente de escoamento médio.



## 4.8 Análise de fator

### 4.8.1 Teste de Adequação

O teste da adequabilidade (Kaiser-Meyer-Olkin, KMO), aplicado para comparar a magnitude dos coeficientes. Entre as variáveis analisadas solo, declividade, vegetação, geologia e USD, a variável declividade foi a que melhor se adequou ao teste, apresentando valor de KMO igual 0,617, o que significa uma adequação regular dos dados ao modelo, indicando que o modelo fatorial pode ser aplicado aos dados sem restrições, uma vez que a



limitação do modelo começa quando KMO é inferior a 0,5. Os valores de KMO das variáveis analisadas estão descrito na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores do teste de adequação KMO das variáveis analisadas.

| Variável    | KMO   | Aplicação do modelo |
|-------------|-------|---------------------|
| Solo        | 0,557 | Ruim                |
| Vegetação   | 0,523 | Ruim                |
| Geologia    | 0,551 | Ruim                |
| Declividade | 0,617 | Regular             |
| USD         | 0,578 | Ruim                |

#### 4.8.2 Cargas fatoriais do solo

No intuito de obter as resposta de cada tipo de solo na geração de escoamento utilizou-se a análise de fator da estatística multivariada, que permite observar os pesos de cada classe de solo na geração de escoamento. A variável dependente nessa análise foi o coeficiente de escoamento superficial, que varia em cada bacia.

Na análise estatística de fator para a componente de solos não foi informada a permeabilidade média destes, o que poderia implicar em um resultado tendencioso. Nesta análise, levou-se em consideração apenas o percentual de área de ocupação do solo em cada sub-bacia e a resposta hidrológica nestas, ou seja, o fator de escoamento médio.

O solo do tipo vertissolo, segundo a análise estatística é o que mais responde ao escoamento superficial, sendo responsável por 23,95%, com um percentual de área de apenas 1,3% da área total da bacia. Mesmo sem analisar a característica hidrológica do solo, com baixa permeabilidade média ( $24 \text{ mm.dia}^{-1}$ ), a análise estatística foi capaz de comprovar tal informação. Já o solo do tipo neossolo litólicos é o que ocupa a maior área da bacia, com 29,7%, mas só responde por 7,70% do escoamento total gerado, dada a sua maior permeabilidade, como está descrito na Tabela 20.

O solo neossolo flúvico foi o que apresentou o segundo maior peso na geração de escoamento superficial, mesmo ocupando uma área de apenas 1,2% da área total da bacia, e considerando, ainda, a alta permeabilidade média associada ( $324 \text{ mm.dia}^{-1}$ ). Este solo é encontrado apenas na região mais baixa da bacia, próximo ao município de Iguatu. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato dessa mancha de solo, por estar situado no trecho do rio Jaguaribe à montante do açude Orós, apresentar condições favoráveis ao umedecimento, em virtude dos fluxos provenientes não somente da precipitação direta, mas

também pelo escoamento oriundo de outras porções da bacia, seja na parte mais alta da encosta ou gerada nas bacias de montante e conduzida pela calha do rio até atingir essa mancha se solo. Este umedecimento favorece a ocorrência de escoamento por saturação do solo, mesmo sabendo que este tipo de solo apresenta maiores espessuras e, portanto, maior capacidade de armazenamento que outros mais superficiais sobre embasamento cristalino.

Os resultados da análise estatística multivariada mostram, ainda, que os solos da classe Latossolo amarelo, Luvisolo, Argissolo vermelho-amarelo, Nitossolo vermelho e Nitossolo respondem muito pouco pela geração do escoamento, como mostra a Tabela 20.

Observa-se que no fator/componente as variáveis Ae, NC, PE, PL, Red e V apresentaram uma carga superior a 0,8. Em relação à comunalidade, observam-se valores superiores 0,8 em sete das dez variáveis consideradas, o que significa dizer que estas explicam mais de 80% variância total desses parâmetros.

Tabela 20 - Análise estatística de fator de cada classe de solo na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE.

| Tipo de solo | F1    | Comunalidade | Fator % | Área % |
|--------------|-------|--------------|---------|--------|
| Ae           | 0,827 | 0,858        | 22,70   | 1,2    |
| LVd          | 0,143 | 0,734        | 2,88    | 14,1   |
| NC           | 0,275 | 0,901        | 5,43    | 11,9   |
| PE           | 0,015 | 0,926        | 1,57    | 26,7   |
| Pee          | 0,051 | 0,628        | 0,51    | 3,4    |
| PL           | 0,384 | 0,807        | 8,26    | 2,57   |
| Re           | 0,332 | 0,747        | 7,70    | 29,7   |
| Red          | 0,811 | 0,835        | 22,38   | 3,9    |
| V            | 0,863 | 0,927        | 23,95   | 1,3    |
| Ter          | 0,176 | 0,769        | 4,64    | 5,1    |

Variância – 2,659 %

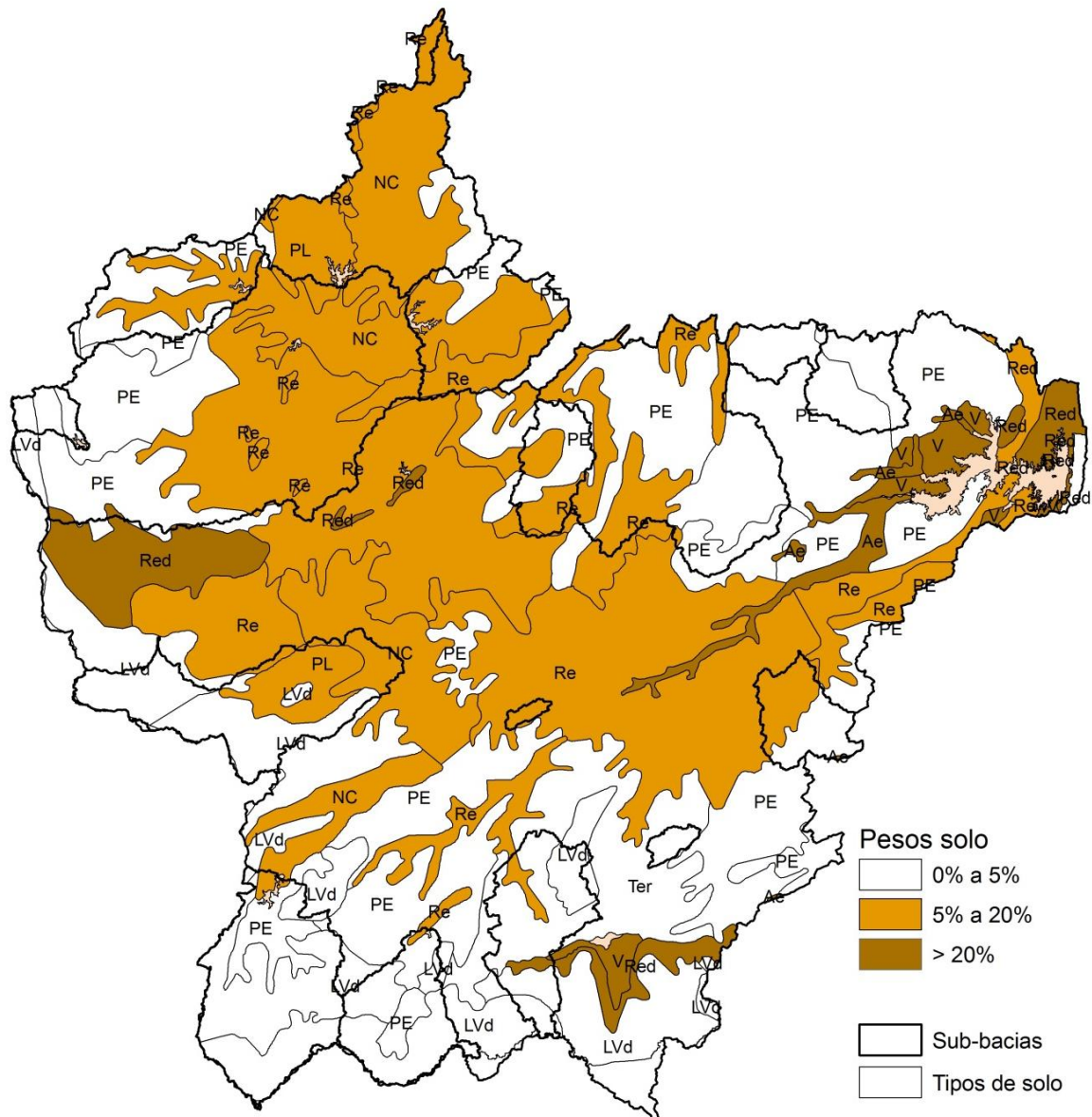
Ae - neossolos flúvicos, Pee - nitossolo vermelho, V - vertissolo, Ter - nitossolo, PE - argissolo vermelho-amarelo, Re - neossolo litólicos, Red - neossolo distrófico, NC - luvisolo, LVd - latossolo amarelo e PL - planossolo.

O cálculo dos pesos das variáveis foi determinado pela Equação 07, como detalhado abaixo, exemplarmente para os solos Neossolos flúvicos e Latossolo amarelo. No cálculo, altera-se apenas o valor do F1 para se determinar o peso de cada tipo de solo, como segue:

$$\text{Fator Ae} = \frac{2,659 \times 0,872}{2,659 \times (0,827 + 0,143 + 0,275 + 0,015 + 0,051 + 0,384 + 0,332 + 0,811 + 0,863 + 0,176)}$$

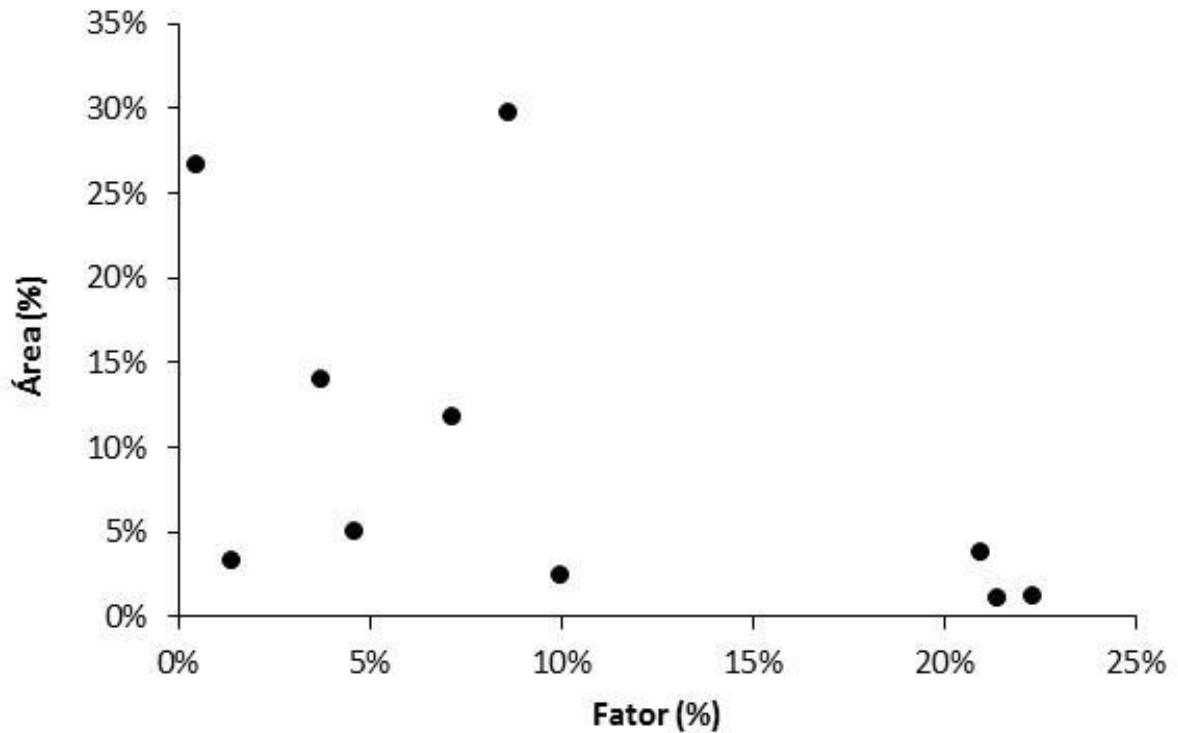
$$\text{Fator LVd} = \frac{2,659 \times 0,143}{2,659 \times (0,827 + 0,143 + 0,275 + 0,015 + 0,051 + 0,384 + 0,332 + 0,811 + 0,863 + 0,176)}$$

Figura 16 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais das classes de solo na geração do escoamento superficial.



Os fatores de peso dos tipos de solo são poucos relacionados com o percentual de área de ocupação, como pode ser observar nas Figuras 16 e 17. Os resultados mostram que classes de solo com pequenas áreas podem apresentar maior peso na geração de escoamento, como evidenciado para o caso do solo vertissolo.

Figura 17 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para o componente solo.



#### 4.8.3 Cargas fatoriais da declividade

A análise estatística de fator para a componente de declividade da bacia mostrou que as classes com declives mais acentuados (classes 4 e 5, com declividades superiores a 20%) respondem por 52,21% do escoamento superficial gerado na bacia do Orós, apesar de possuírem uma área de apenas 8,1% da total, conforme apresentado na Tabela 21 e Figura 18. Por outro lado, a classe de declividade 1, mesmo representando 50,8% da área da bacia, responde por apenas 17,53% do escoamento. Os resultados indicam que a análise de fator da estatística multivariada foi capaz de apontar os terrenos mais declivosos como principais geradores de escoamento, apesar de não terem sido informados ao modelo, nos dados de entrada, os valores da variável declividade. A Figura 18, por sua vez, confirma o comportamento descrito acima, com maior peso na geração de escoamento para as classes que ocupam menores áreas.

Tabela 21 - Análise estatística do fator de cada classe de declividade na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE.

| Classe de declividade | F1    | Comunalidade | Fator % | Área % |
|-----------------------|-------|--------------|---------|--------|
| D1                    | 0,56  | 0,924        | 17,53%  | 50,8   |
| D2                    | 0,181 | 0,88         | 5,67%   | 7,8    |
| D3                    | 0,786 | 0,624        | 24,60%  | 33,3   |
| D4                    | 0,915 | 0,847        | 28,64%  | 7,9    |
| D5                    | 0,753 | 0,554        | 23,57%  | 0,2    |

Variância – 2,77

D1 - declividade > 3%; D2 – declividade de 3% - 8%; D3 – declividade de 8% - 20%; D4 – declividade de 20% - 45%; D5 - declividade > 75%.

Figura 18 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais das classes de declividade na geração do escoamento superficial.

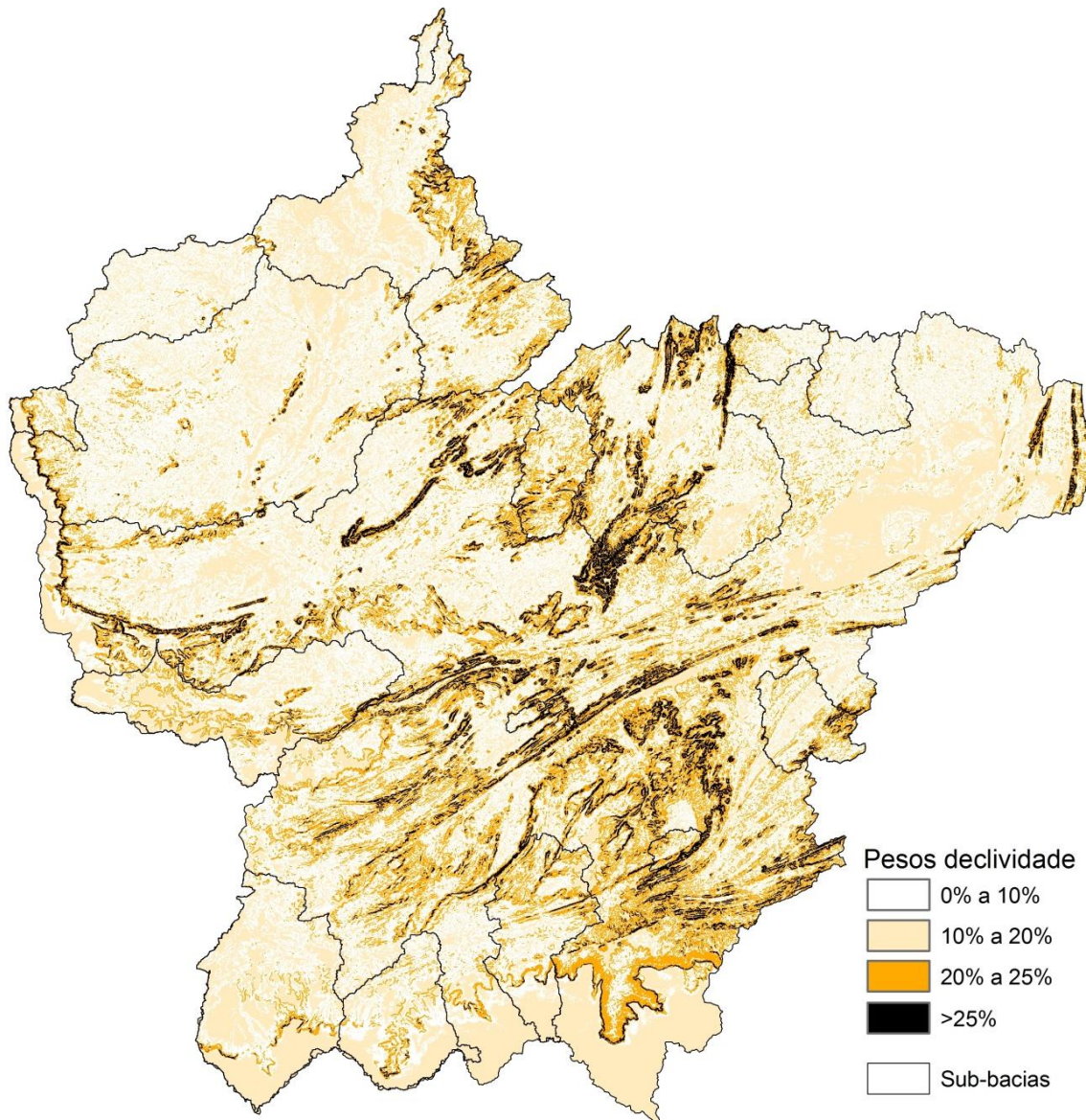
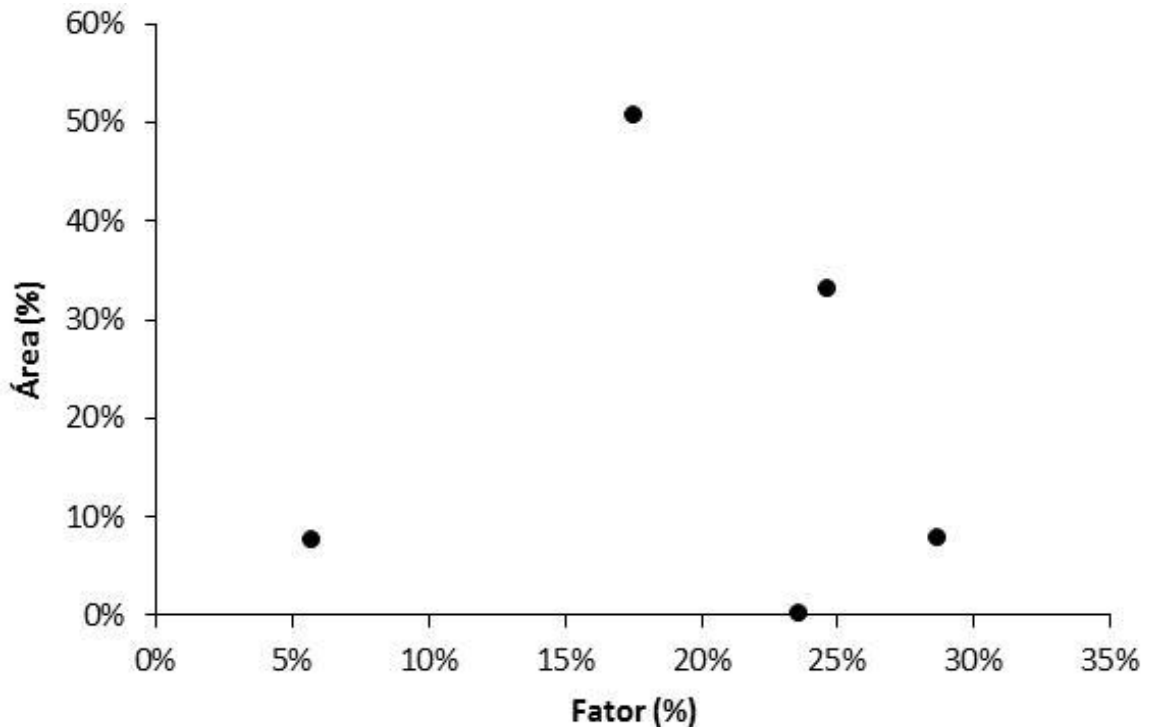


Figura 19 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente declividade.



#### 4.8.4 Cargas fatoriais dos tipos de vegetação

Analisando o peso dos diferentes tipos de vegetação na geração do escoamento superficial, pode-se observar que os tipos de vegetação que apresentaram maiores cargas fatoriais foram Cerrado, Floresta subcaducifólia Tropical xeromorfa e Floresta subperenifolia, todas respondendo por 26,85% do escoamento superficial gerado, conforme sumarizado na Tabela 22 e ilustrado na Figura 20. Por outro lado, os tipos de vegetação Carrasco e Floresta caducifólia espinhosa apresentaram carga fatorial zero. No caso do Carrasco, respostas similares foram encontrados por (MEDEIROS *et al.*, 2010), apontando baixo escoamentos em áreas com esta cobertura na bacia do Benguê. A Floresta caducifólia espinhosa, por sua vez, cobre uma extensa área da bacia, sendo o único tipo de vegetação em cinco das sub-bacias estudadas e a classe predominante na maioria das demais bacias. Como estas bacias apresentam respostas hidrológicas diferentes, este tipo de vegetação não pode ser o elemento a explicar tal variação, sendo assim atribuído a ele peso baixo. A Figura 20 mostra, ainda, que não há uma clara relação entre o fator e área da classe analisada.



Tabela 22 - Análise estatística do fator de cada de vegetação na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE.

| Tipo de Vegetação | F1    | Comunalidade | Fator % | Área % |
|-------------------|-------|--------------|---------|--------|
| CAAd              | 0,126 | 0,817        | 3,42%   | 19,39  |
| CAAa              | 0,236 | 0,279        | 6,41%   | 17,14  |
| CAR               | 0,094 | 0,607        | 2,55%   | 7,67   |
| Cer               | 0,989 | 0,998        | 26,85%  | 0,38   |
| FCE               | 0,169 | 0,977        | 4,59%   | 50,63  |
| FSTP              | 0,091 | 0,623        | 2,47%   | 3,62   |
| FSTX              | 0,989 | 0,998        | 26,85%  | 0,92   |
| FSP               | 0,989 | 0,998        | 26,85%  | 0,31   |

Variância – 3,055

CAAd – caatinga arbustiva densa, CAAa – caatinga arbustiva aberta, CAR – carrasco, Cer - Cerrado, FCE - Floresta Caducifólia Espinhosa, FSTP - Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial, FSTX - Floresta Subcaducifólia Tropical xeromorfa, FSP – Floresta subperenifolia..

Figura 20 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais dos tipos de vegetação na geração do escoamento superficial.

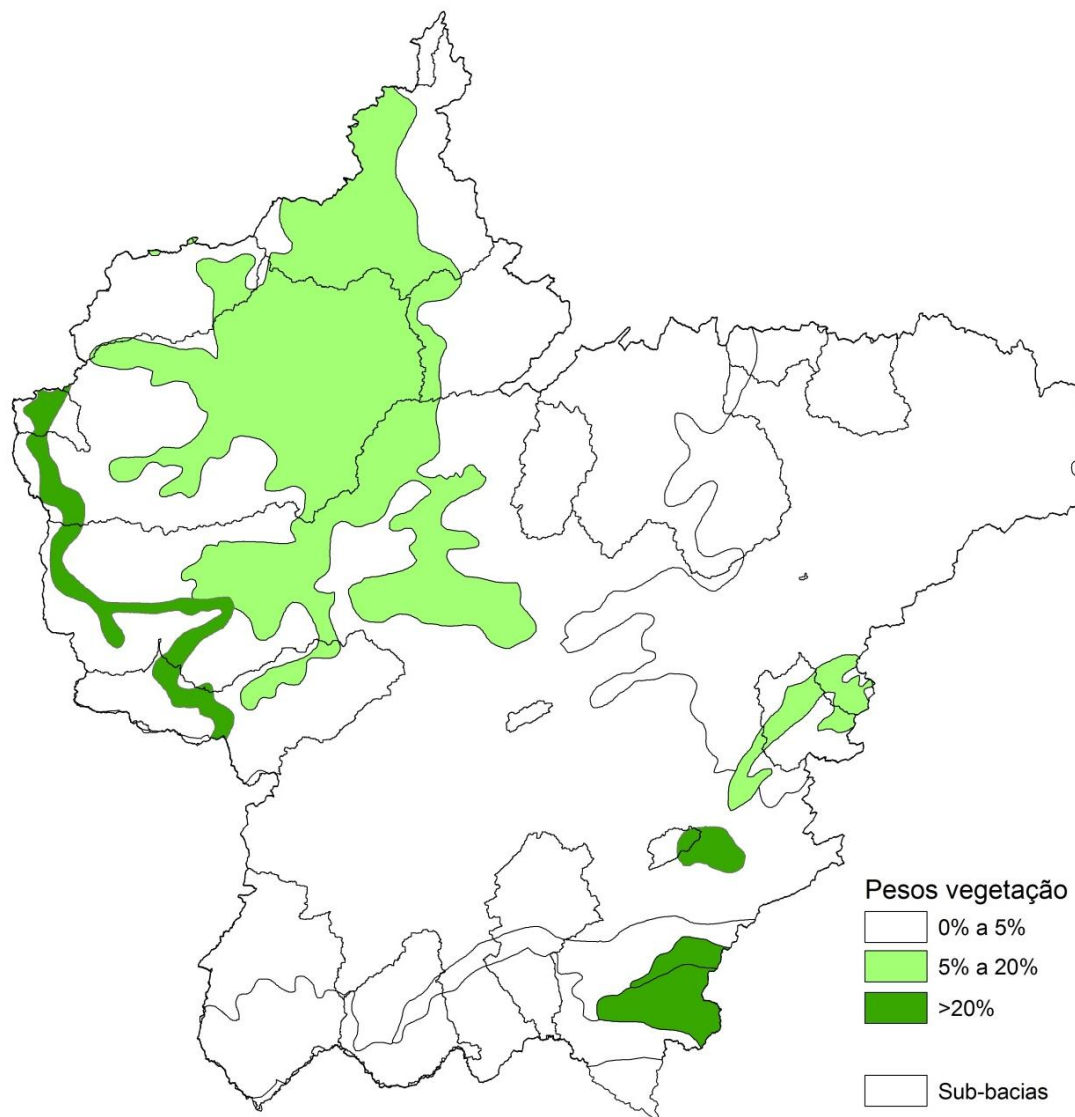
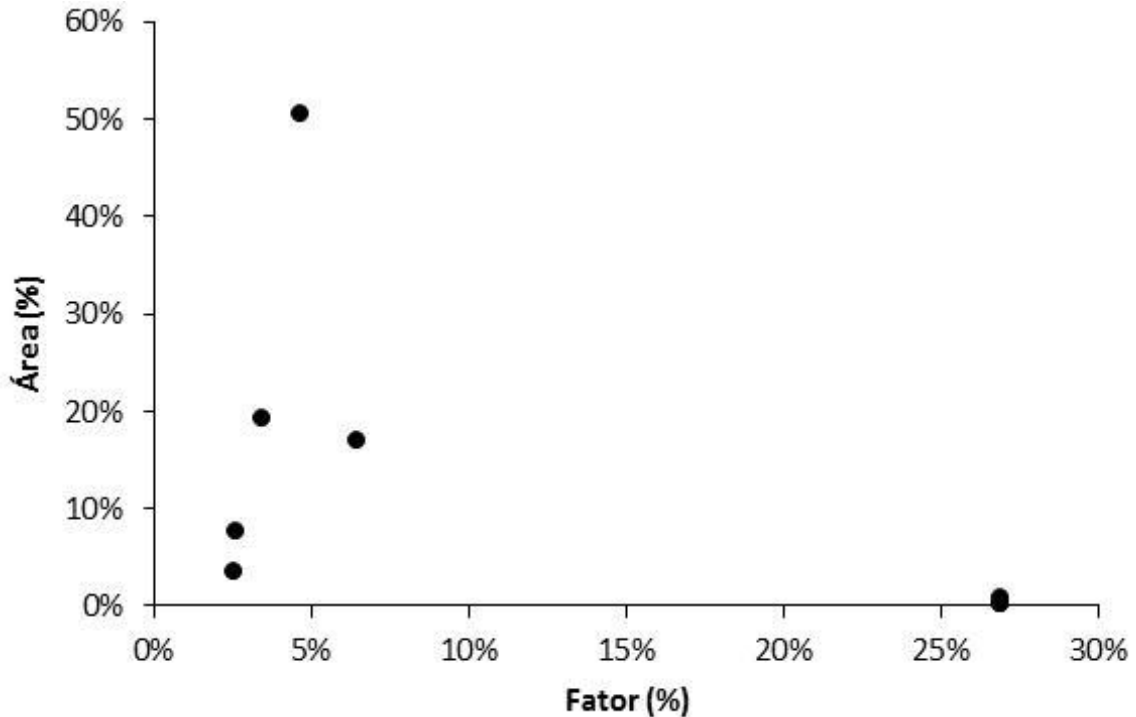


Figura 21 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente solo.



#### 4.8.5 Cargas fatoriais das classes geológicas

Dentre as seis classes geológicas encontradas na bacia do Orós, o tipo geológico que apresentou maior peso na geração do escoamento superficial, segundo a análise estatística de fator, foi a classe metamórfica, com uma carga fatorial de 25,99%, conforme apresentado na Tabela 23 e Figura 22. Resultado semelhante foi encontrado por Medeiros (2009) para a bacia hidrográfica do Benguê, com maior escoamento superficial nas regiões com formação geológica do tipo metamórfica.

As classes geológicas ígnea-metamórfica apresentou baixa carga fatorial, o que indica que tais classes contribuem muito pouco para o escoamento superficial. O modelo estatístico mostrou a classe sedimentar como a terceira classe produtora de escoamento, dentre as três principais, ficando acima das classes de transição, o que pode ser explicado pelo fato desta classe incluir áreas da bacia com a presença do solo do tipo neossolos flúvicos, onde se constatou nesta análise um elevado escoamento superficial. Acredita-se que, com um detalhamento das classes geológicas em sub-classes, seria possível detectar tal fato. A Figura 22, por sua vez, confirma a inexistência de qualquer relação de linearidade entre área e carga fatorial da componente.



Tabela 23 - Análise estatística do fator de cada tipo geológico na geração do escoamento superficial na bacia do Orós – CE.

| Classe geológica       | F1    | Comunalidade | Fator % | Área % |
|------------------------|-------|--------------|---------|--------|
| Ígnea                  | 0,824 | 0,799        | 23,05   | 23,81  |
| Ígnea-metamórfica      | 0,195 | 0,68         | 5,45    | 3,67   |
| Metamórfica            | 0,929 | 0,968        | 25,99   | 54,48  |
| Metamórfica-sedimentar | 0,425 | 0,999        | 11,89   | 1,03   |
| Sedimentar             | 0,777 | 0,661        | 21,73   | 16,21  |
| Sedimentar-metamórfica | 0,425 | 0,999        | 11,89   | 0,81   |
| Variância – 2,599      |       |              |         |        |

Figura 22 - Espacialização das faixas das cargas fatoriais das classes geológicas na geração do escoamento superficial.

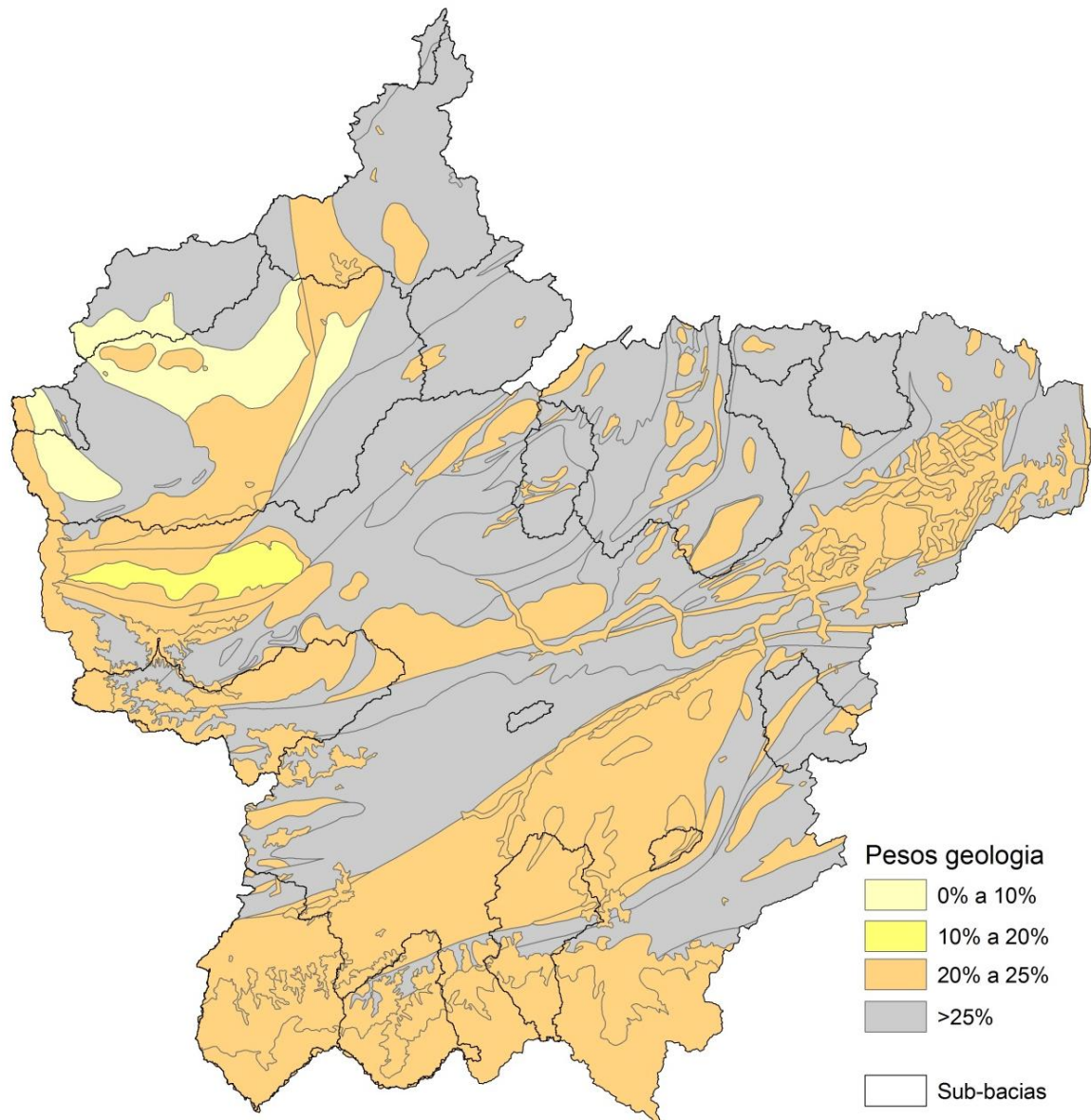
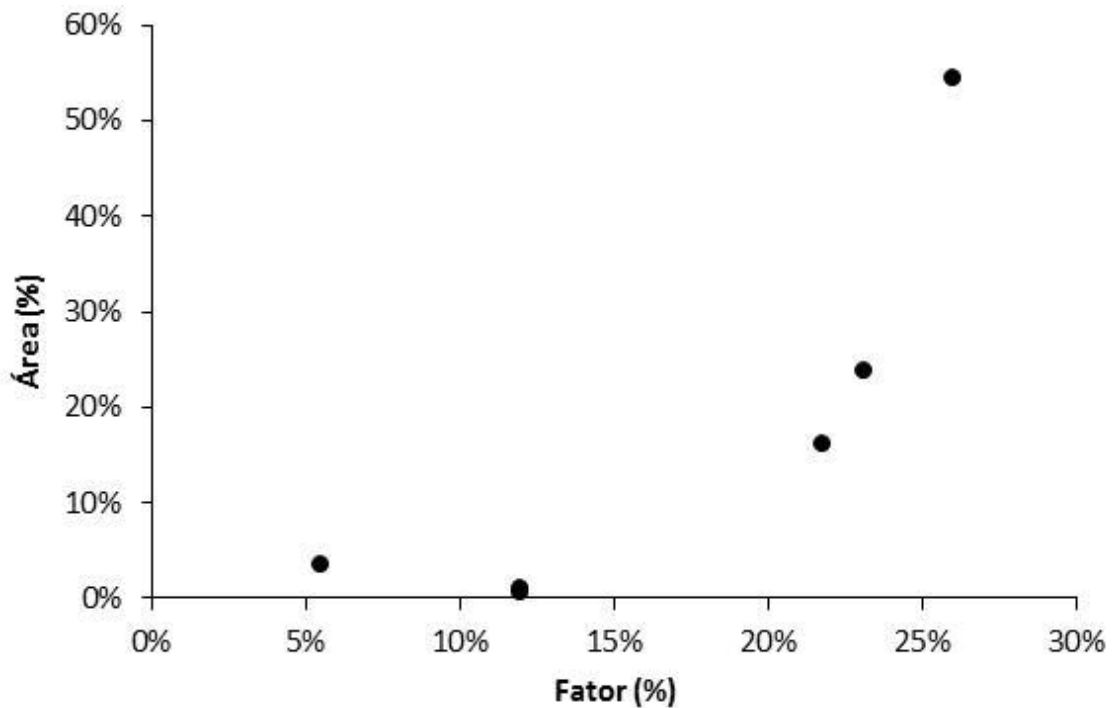


Figura 23 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente geologia.



#### 4.8.6 Cargas fatoriais das unidades de solo e declividade

Como já apresentado anteriormente, a superposição dos mapas de solo e de declividade resultaram em 49 USDs distribuídas na bacia do Orós. Para determinação do peso de cada USD na geração do escoamento foram analisadas as cargas fatoriais das 49 USDs, utilizando-se a estatística multivariada, como pode ser visualizada na Tabela 24 e Figura 24. A variável independente foi o percentual de área da USD em cada sub-bacia e a variável dependente foi o coeficiente de escoamento médio da sub-bacia. Os resultados mostraram maiores pesos para USDs com presença dos solos Vertissolos, solos Neossolo litólico e distrófico, e solos Neossolos flúvicos, mesmo quando combinados com terrenos menos declivosos (inferiores a 20%), o que sugere uma maior importância da componente de solo sobre a de declividade na geração do escoamento superficial na bacia do Orós. Complementarmente, para avaliar a existência de alguma relação entre a carga fatorial e a área da classe analisada, os valores dessas variáveis são plotados na Figura 24, confirmando a inexistência de qualquer relação.

Figura 24 - Mapa da composição das unidades de solo e declividade e as cargas fatoriais na geração do escoamento superficial.

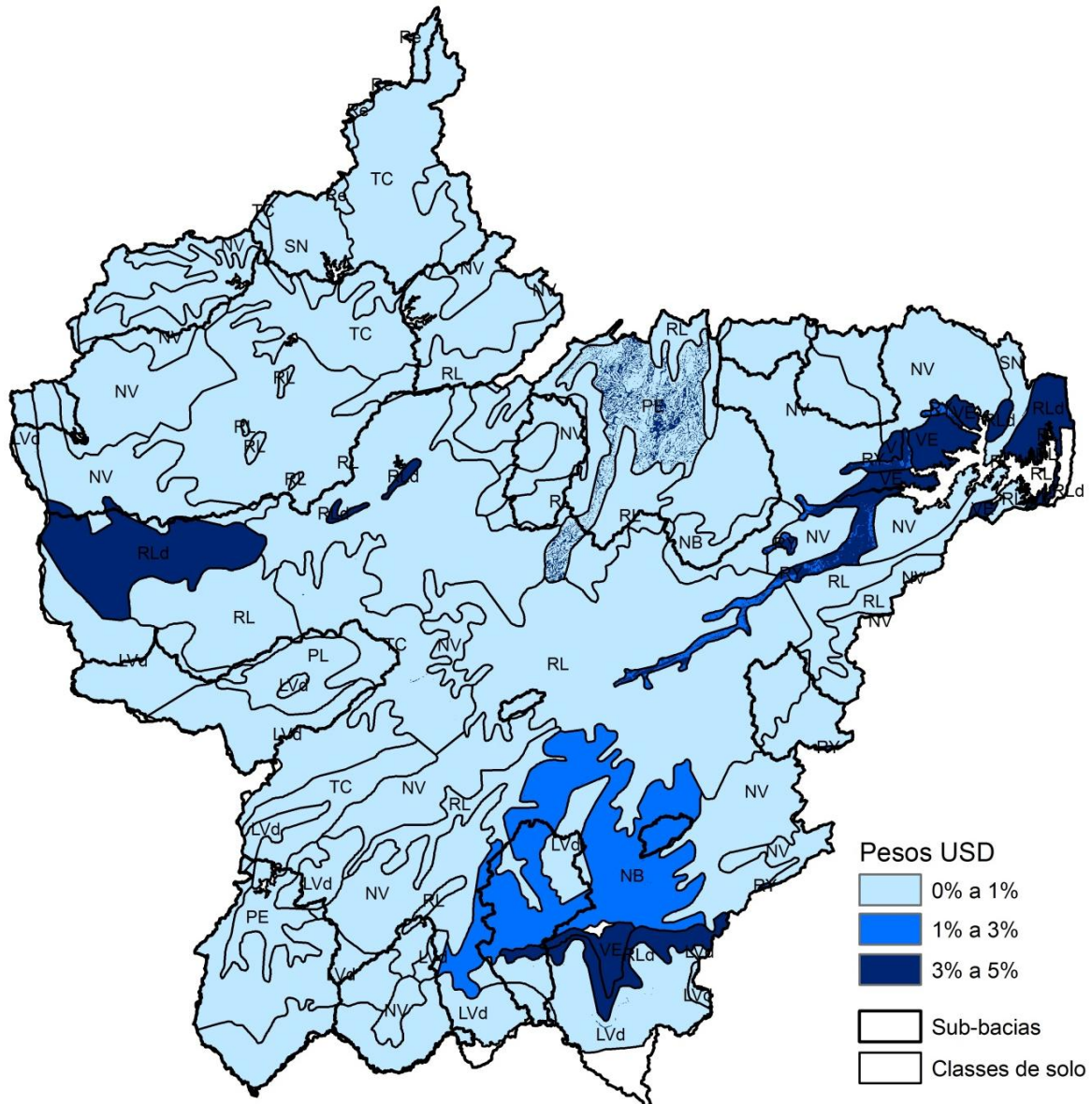


Tabela 24 - Análise estatística de fator de cada USD na geração do escoamento superficial na bacia do Orós - CE.

| USD  | F1    | Comunalidade | Fator % | Área % |
|------|-------|--------------|---------|--------|
| V3   | 0,992 | 0,992        | 4,86%   | 0,14   |
| V2   | 0,962 | 0,978        | 4,71%   | 0,52   |
| Red4 | 0,946 | 0,996        | 4,63%   | 0,20   |
| Red1 | 0,944 | 0,998        | 4,62%   | 1,01   |
| Red2 | 0,929 | 0,998        | 4,55%   | 1,75   |
| V1   | 0,927 | 0,992        | 4,54%   | 0,61   |
| PE1  | 0,921 | 0,986        | 4,51%   | 0,62   |
| Ae4  | 0,921 | 0,997        | 4,51%   | 0,06   |
| V4   | 0,921 | 0,984        | 4,51%   | 0,01   |
| Ae5  | 0,921 | 0,999        | 4,51%   | 0,00   |
| NC5  | 0,921 | 0,965        | 4,51%   | 0,00   |

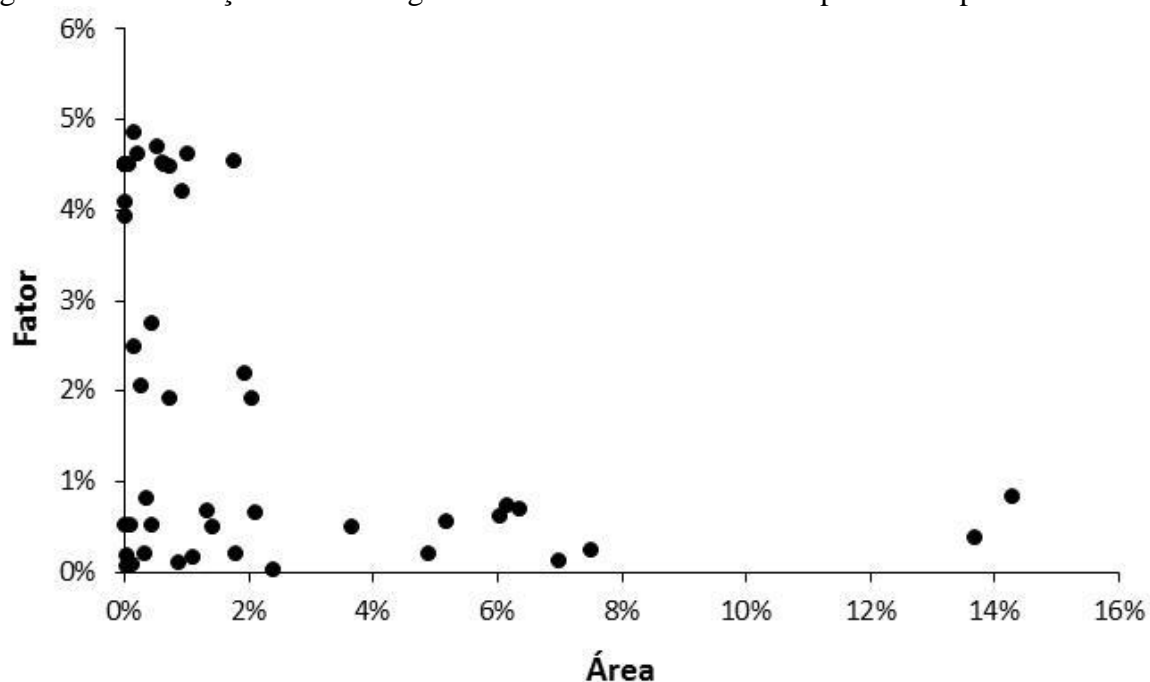
|      |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
| PL5  | 0,921 | 0,991 | 4,51% | 0,00  |
| Red5 | 0,921 | 0,956 | 4,51% | 0,01  |
| Ae1  | 0,917 | 0,965 | 4,49% | 0,73  |
| Red3 | 0,859 | 0,999 | 4,21% | 0,90  |
| Lvd5 | 0,836 | 0,998 | 4,09% | 0,00  |
| Ter5 | 0,805 | 0,998 | 3,94% | 0,00  |
| Ter4 | 0,563 | 0,997 | 2,76% | 0,43  |
| Ae3  | 0,509 | 0,993 | 2,49% | 0,13  |
| Ter3 | 0,449 | 0,997 | 2,20% | 1,91  |
| Ae2  | 0,42  | 0,992 | 2,06% | 0,25  |
| Ter2 | 0,393 | 0,997 | 1,92% | 2,03  |
| Ter1 | 0,392 | 0,997 | 1,92% | 0,71  |
| Pee2 | 0,174 | 0,947 | 0,85% | 0,33  |
| Lvd4 | 0,168 | 0,589 | 0,82% | 6,35  |
| Pee1 | 0,151 | 0,901 | 0,74% | 2,09  |
| Re1  | 0,145 | 0,957 | 0,71% | 13,67 |
| PL1  | 0,14  | 0,412 | 0,69% | 0,31  |
| Lvd3 | 0,136 | 0,972 | 0,67% | 7,51  |
| NC2  | 0,126 | 0,872 | 0,62% | 4,87  |
| Pee3 | 0,114 | 0,908 | 0,56% | 0,02  |
| PE4  | 0,108 | 0,993 | 0,53% | 6,98  |
| PE5  | 0,108 | 0,993 | 0,53% | 0,87  |
| PE3  | 0,106 | 0,993 | 0,52% | 0,08  |
| NC1  | 0,104 | 0,809 | 0,51% | 3,64  |
| PE2  | 0,103 | 0,993 | 0,50% | 6,15  |
| Re2  | 0,079 | 0,982 | 0,39% | 1,31  |
| Lvd1 | 0,053 | 0,941 | 0,26% | 6,04  |
| Lvd2 | 0,045 | 0,959 | 0,22% | 14,26 |
| NC3  | 0,045 | 0,872 | 0,22% | 1,39  |
| NC4  | 0,045 | 0,874 | 0,22% | 1,10  |
| Pee5 | 0,041 | 0,659 | 0,20% | 1,79  |
| PL2  | 0,037 | 0,966 | 0,18% | 5,17  |
| Re3  | 0,028 | 0,925 | 0,14% | 0,42  |
| Pee4 | 0,022 | 0,961 | 0,11% | 0,11  |
| Re5  | 0,02  | 0,912 | 0,10% | 0,09  |
| PL3  | 0,019 | 0,98  | 0,09% | 0,02  |
| PL4  | 0,014 | 0,981 | 0,07% | 2,38  |
| Re4  | 0,007 | 0,973 | 0,03% | 0,00  |

---

Variância – 16,03

Ae - neossolos flúvicos, Pee - nitossolo vermelho, V - vertissolo, Ter - nitossolo, PE - argissolo vermelho-amarelo, Re - neossolo litólicos, Red - neossolo distrófico, NC - luvisso, LVD - latossolo amarelo e PL – planossolo; 1 - declividade > 3%; 2 – declividade de 3% - 8%; 3 – declividade de 8% - 20%; 4 – declividade de 20% - 45%; 5 - declividade > 75%.

Figura 25 - Relação entre a carga fatorial e a área da sub-bacia para a componente USD.



#### 4.8.7 Comparação das cargas fatoriais área x índices de permeabilidade e declividade

Buscando atribuir valores às unidades de solo e declividade (USD) que expressasse as componentes que as formam, optou-se por atribuir um fator combinado resultante da multiplicação de índices de área, permeabilidade do solo e declividade, relativizados com base nos seus valores máximos e mínimos, conforme sumarizado na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores dos índices associados a característica de área, permeabilidade e declividade.

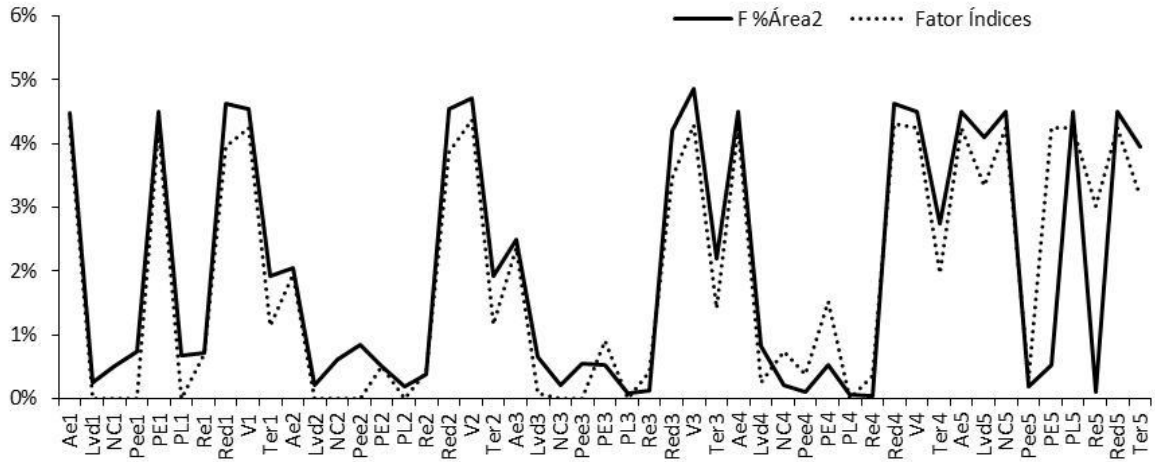
| USD  | % área | P (mm.dia <sup>-1</sup> ) | Dec % | iA   | iP     | iD     | iusd    |
|------|--------|---------------------------|-------|------|--------|--------|---------|
| Ae1  | 0,007  | 324                       | 3     | 0,05 | 0,0003 | 0,0014 | 3,4E-09 |
| Lvd1 | 0,075  | 170                       | 3     | 0,53 | 0,5133 | 0,0014 | 5,3E-05 |
| NC1  | 0,036  | 32                        | 3     | 0,26 | 0,9730 | 0,0014 | 4,9E-05 |
| Pee1 | 0,062  | 181                       | 3     | 0,43 | 0,4767 | 0,0014 | 4,1E-05 |
| PE1  | 0,006  | 211                       | 3     | 0,04 | 0,3767 | 0,0014 | 3,2E-06 |
| PL1  | 0,013  | 94                        | 3     | 0,09 | 0,7665 | 0,0014 | 1,4E-05 |
| Re1  | 0,064  | 84                        | 3     | 0,45 | 0,7998 | 0,0014 | 7,0E-05 |
| Red1 | 0,010  | 72                        | 3     | 0,07 | 0,8398 | 0,0014 | 1,2E-05 |
| V1   | 0,006  | 24                        | 3     | 0,04 | 0,9997 | 0,0014 | 8,4E-06 |
| Ter1 | 0,007  | 86                        | 3     | 0,05 | 0,7931 | 0,0014 | 7,8E-06 |
| Ae2  | 0,003  | 324                       | 8     | 0,02 | 0,0003 | 0,0706 | 5,9E-08 |
| Lvd2 | 0,049  | 170                       | 8     | 0,34 | 0,5133 | 0,0706 | 1,8E-03 |
| NC2  | 0,060  | 32                        | 8     | 0,42 | 0,9730 | 0,0706 | 4,2E-03 |
| Pee2 | 0,143  | 181                       | 8     | 1,00 | 0,4767 | 0,0706 | 4,8E-03 |

|      |         |     |    |      |        |        |         |
|------|---------|-----|----|------|--------|--------|---------|
| PE2  | 0,014   | 211 | 8  | 0,10 | 0,3767 | 0,0706 | 3,7E-04 |
| PL2  | 0,011   | 94  | 8  | 0,08 | 0,7665 | 0,0706 | 6,0E-04 |
| Re2  | 0,137   | 84  | 8  | 0,96 | 0,7998 | 0,0706 | 7,7E-03 |
| Red2 | 0,017   | 72  | 8  | 0,12 | 0,8398 | 0,0706 | 1,0E-03 |
| V2   | 0,005   | 24  | 8  | 0,04 | 0,9997 | 0,0706 | 3,7E-04 |
| Ter2 | 0,020   | 86  | 8  | 0,14 | 0,7931 | 0,0706 | 1,1E-03 |
| Ae3  | 0,001   | 324 | 20 | 0,01 | 0,0003 | 0,2368 | 1,1E-07 |
| Lvd3 | 0,021   | 170 | 20 | 0,15 | 0,5133 | 0,2368 | 2,5E-03 |
| NC3  | 0,018   | 32  | 20 | 0,13 | 0,9730 | 0,2368 | 4,1E-03 |
| Pee3 | 0,052   | 181 | 20 | 0,36 | 0,4767 | 0,2368 | 5,8E-03 |
| PE3  | 0,004   | 211 | 20 | 0,03 | 0,3767 | 0,2368 | 3,8E-04 |
| PL3  | 0,001   | 94  | 20 | 0,01 | 0,7665 | 0,2368 | 2,1E-04 |
| Re3  | 0,070   | 84  | 20 | 0,49 | 0,7998 | 0,2368 | 1,3E-02 |
| Red3 | 0,009   | 72  | 20 | 0,06 | 0,8398 | 0,2368 | 1,8E-03 |
| V3   | 0,001   | 24  | 20 | 0,01 | 0,9997 | 0,2368 | 3,2E-04 |
| Ter3 | 0,019   | 86  | 20 | 0,13 | 0,7931 | 0,2368 | 3,6E-03 |
| Ae4  | 0,001   | 324 | 45 | 0,00 | 0,0003 | 0,5831 | 1,3E-07 |
| Lvd4 | 0,003   | 170 | 45 | 0,02 | 0,5133 | 0,5831 | 9,9E-04 |
| NC4  | 0,003   | 32  | 45 | 0,02 | 0,9730 | 0,5831 | 1,7E-03 |
| Pee4 | 0,009   | 181 | 45 | 0,06 | 0,4767 | 0,5831 | 2,4E-03 |
| PE4  | 0,001   | 211 | 45 | 0,01 | 0,3767 | 0,5831 | 2,0E-04 |
| PL4  | 0,000   | 94  | 45 | 0,00 | 0,7665 | 0,5831 | 7,4E-05 |
| Re4  | 0,024   | 84  | 45 | 0,17 | 0,7998 | 0,5831 | 1,1E-02 |
| Red4 | 0,002   | 72  | 45 | 0,01 | 0,8398 | 0,5831 | 9,6E-04 |
| V4   | 0,000   | 24  | 45 | 0,00 | 0,9997 | 0,5831 | 3,7E-05 |
| Ter4 | 0,004   | 86  | 45 | 0,03 | 0,7931 | 0,5831 | 2,0E-03 |
| Ae5  | 0,00005 | 324 | 75 | 0,00 | 0,0003 | 0,9986 | 1,6E-08 |
| Lvd5 | 0,00004 | 170 | 75 | 0,00 | 0,5133 | 0,9986 | 1,8E-05 |
| NC5  | 0,00002 | 32  | 75 | 0,00 | 0,9730 | 0,9986 | 1,5E-05 |
| Pee5 | 0,00016 | 181 | 75 | 0,00 | 0,4767 | 0,9986 | 7,5E-05 |
| PE5  | 0,00001 | 211 | 75 | 0,00 | 0,3767 | 0,9986 | 4,0E-06 |
| PL5  | 0,00002 | 94  | 75 | 0,00 | 0,7665 | 0,9986 | 1,5E-05 |
| Re5  | 0,00078 | 84  | 75 | 0,01 | 0,7998 | 0,9986 | 6,2E-04 |
| Red5 | 0,00009 | 72  | 75 | 0,00 | 0,8398 | 0,9986 | 7,6E-05 |
| Ter5 | 0,00003 | 86  | 75 | 0,00 | 0,7931 | 0,9986 | 2,4E-05 |

P – permeabilidade do solo; Dec - declividade em porcentagem; iA – índice de área; iP – índice de permeabilidade; iD - índice de declividade; iUSD – índice da unidade de solo e declividade.

Os resultados deste cenário, incluindo o índice combinado das características de área, permeabilidade e declividade, foram confrontados com os obtidos da configuração usando apenas a fração de área, como ilustrado na Figura 26. Como se podem observar os resultados das duas análises são bastante semelhantes, com valores, em geral, discretamente inferiores para o cenário que considera os índices combinados. Os resultados desta análise comparativa reforçam a afirmativa de que a análise estatística multivariada usando apenas os percentuais de área das unidades selecionadas pode explicar satisfatoriamente a importância das USDs na geração do escoamento na bacia do Orós.

Figura 26 - Fatores de USD usando área, comparados aos fatores de USD usando índices de permeabilidade do solo e declividade.



#### 4.8.8 Verificação de Variabilidade Temporal de Cargas Fatoriais

Para analisar a variabilidade temporal das cargas fatoriais na bacia do Orós, utilizaram-se dados de precipitação e coeficiente de escoamento anual para o período de 2005 a 2011, incluindo os valores de precipitação e escoamento médio da bacia. A Figura 27A mostra a variação dos pesos das classes de solo, declividade, vegetação, geologia e USD, analisadas individualmente, para cada um dos anos simulados (2005 a 2011, e média). A Figura 27 B, por sua vez, apresenta a variação dos pesos de cada uma dessas classes ao longo dos anos.

No que diz respeito às classes de solo, pode-se observar que a variação dos dados de entrada (precipitação) e nos dados de saída (coeficiente de escoamento) não provoca oscilações significativas nos pesos obtidos para as classes de solo. Podendo-se concluir que a resposta de cada tipo de solo na geração de escoamento é pouco influenciada pela variabilidade do regime pluviométrico.

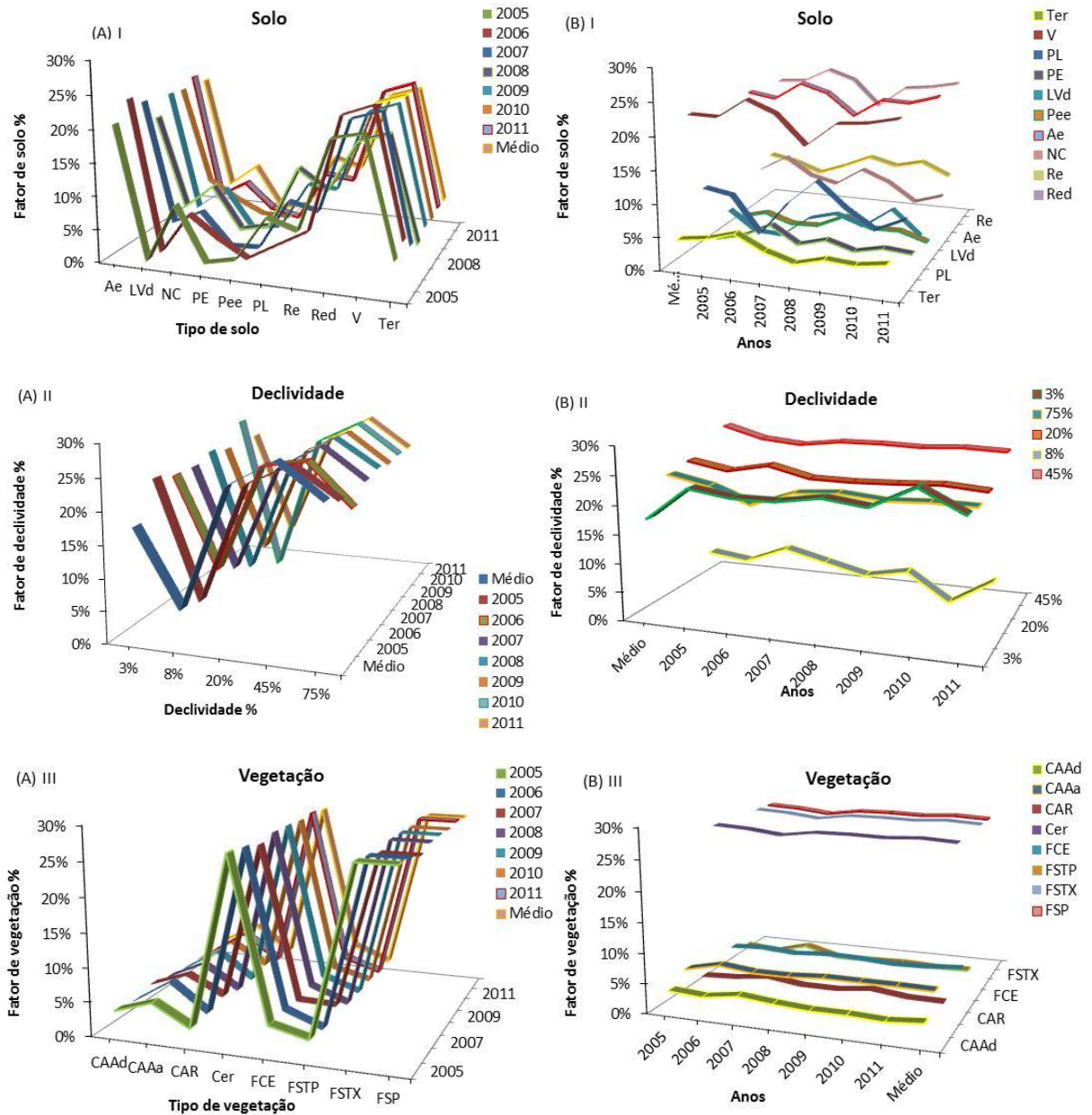
No caso da declividade, observam-se alterações mais expressivas nas cargas fatoriais para as diferentes condições de pluviosidade e resposta hidrológica, mas ainda se comprova que as maiores declividades apresentam maiores cargas fatoriais na geração de escoamento.

Para as demais componentes (vegetação, geologia e USD), observa-se um comportamento bastante uniforme das cargas fatoriais, constatando que a análise das cargas fatoriais destas unidades é pouco influenciada pela variabilidade interanual dos dados de chuva e resposta hidrológica. Pode-se, então, concluir que o uso de características médias da

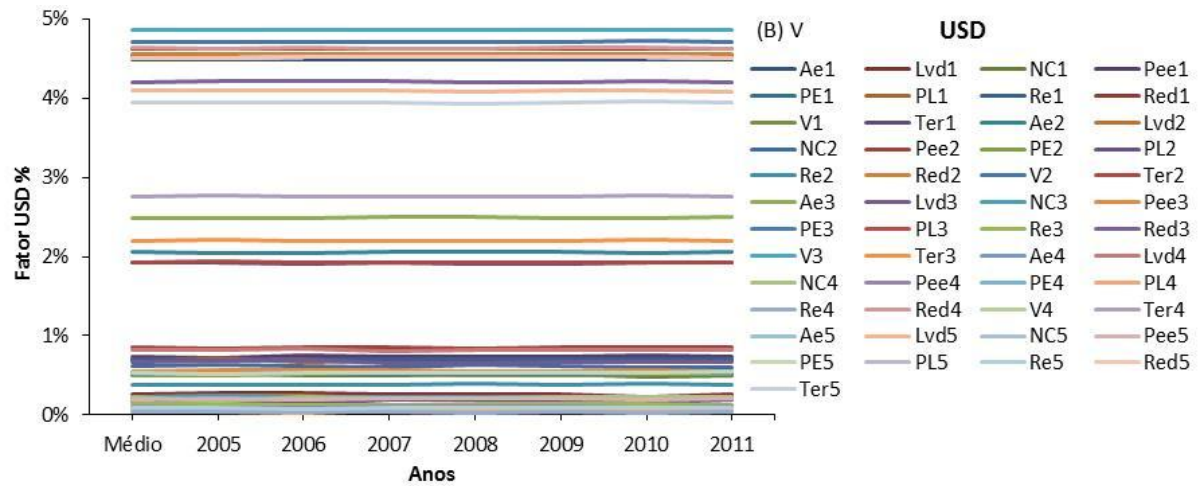
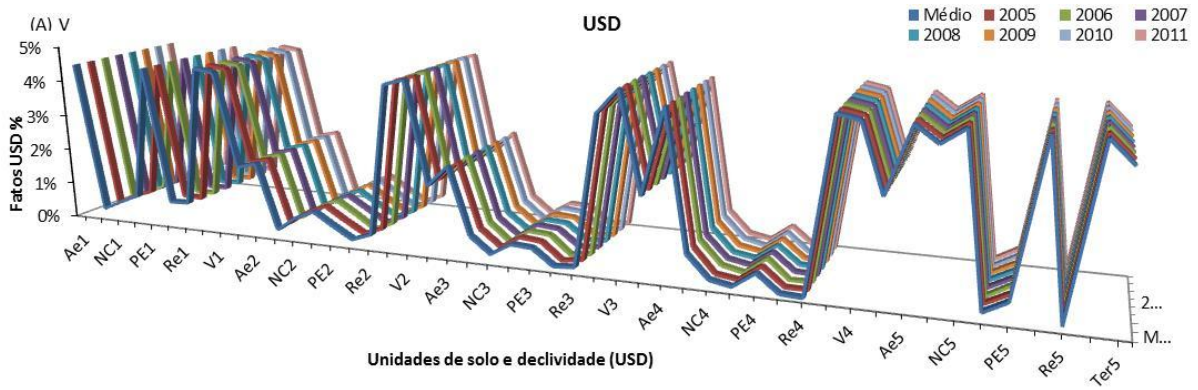
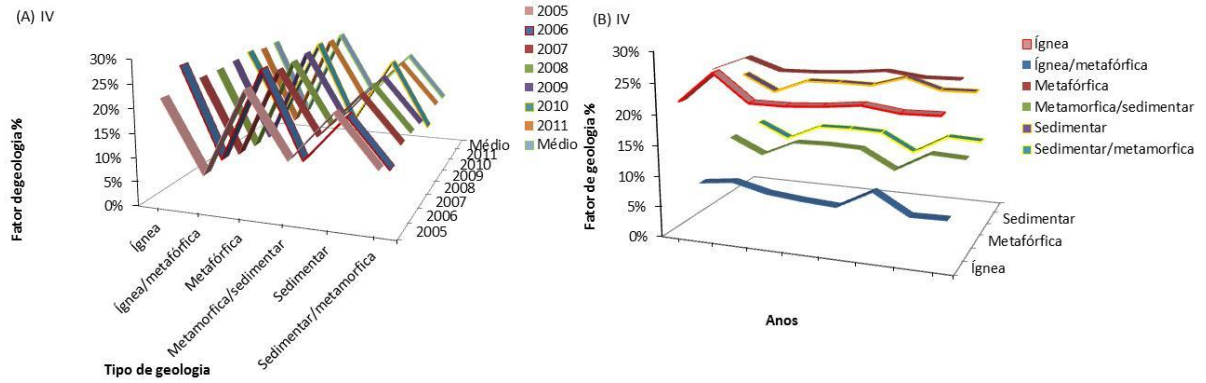


precipitação e coeficiente de escoamento ou dados de um ano qualquer da série pode ser usado para explicar a resposta hidrológica, sem prejuízos.

Figura 27 - Comportamento dos fatores de solo, declividade, vegetação, geologia e USD com a variação do coeficiente de escoamento anual médio (Gráfico A). Variação do fator de solo, declividade, vegetação e geologia ao longo dos anos (Gráfico B).







## 5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa possibilitou uma melhor compreensão dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica do Orós. Neste estudo foram geradas as séries de vazão afluente em 18 reservatórios da bacia, com base no balanço hídrico. Tais informações possibilitaram uma melhor distribuição espacial da análise da geração de escoamento, dado que há apenas cinco postos fluviométricos na bacia.

A análise de agrupamento da estatística multivariada possibilitou a identificação de quatro grupos de bacias hidrográficas de reservatórios com características homogêneas no que diz respeito às suas características de pluviosidade e resposta hidrológica. Tal informação pode servir de suporte na regionalização de informações das bacias do mesmo grupo.

A análise de fatores da estatística multivariada mostrou ser uma robusta ferramenta para explicar a resposta hidrológica na bacia do Orós, apontando solos menos permeáveis e terrenos mais declivosos como os elementos mais importantes para geração do escoamento.

A resposta dos pesos obtidos através da análise de fator da estatística multivariada depende da resolução espacial do mapa que está sendo utilizado. Em outras palavras, quanto maior a resolução espacial, melhores são os resultados encontrados. Neste estudo, o mapa de vegetação, com baixa resolução espacial, apresentou resultados pouco satisfatórios, com algumas bacias de respostas hidrológicas diferentes representadas por um único e comum tipo de vegetação.

Pode-se concluir, ainda, que a análise estatística multivariada é pouco sensível à variabilidade interanual da precipitação e resposta hidrológica, o que simplifica a verificação das unidades que apresentam maior peso na geração do escoamento, considerando dados de apenas um ano ou valores médios históricos.

## 6 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. **REF-ET Reference Evapotranspiration Software**. Kimberly: University of Idaho 2000. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/>>. Acesso em: 19 maio. 2012.
- ANDERSON, T.W. An introduction to multivariate statistical analysis. 3.ed. New York: **John Wiley**. 2003.
- ANDRADE, E.M.; SILVEIRA, S.S. Análises de componentes principais na investigação da estrutura da evapotranspiração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.2, p.171-177, 2002.
- ANDRADE, A. G; COSTA, G. S.; FARIA, S. M. Deposição e Decomposição da Serapilheira em Povoamentos de Mimosa Caesalpinifolia, AcaciaMangiume AcaciaHolosericeacom Quatro Anos de Idade em Planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, V. p. 24, 777-785. 2000.
- ANGIOLELLA, G.; VASCONCELLOS, V. L. D.; ROSA, J. W. C.; Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia. *In*: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, **Anais...** Goiânia, Brasil, 16-21, 2005.
- ARAÚJO, J.; C.; Assoreamento em reservatórios do semiárido: modelagem e validação. **Revista brasileira de recursos hídricos**. v. 8, n. 2, abr/jun 2003, 39-56.
- BACELLAR, L.A.P. **O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas**. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto - MG,v.1, p.1-43, 2005. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/geobr>>. Acessado em 15 de março de 2012.
- BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y. & MILITISKY, J.. Estudo Sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados a partir das Propriedades Geomecânicas. Teoria e Prática na Engenharia Civil, **Revista brasileira de geologia**. nº 2, maio, p. 9-18. 2001.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F., **Conservação do solo**. Ícone Ed., São Paulo, 3a ed. 355p. 1993.
- BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre: IPAGRO/ Secretaria de Agricultura, 1981. 95p. (**Boletim Técnico**; 7).
- BRAIDA, J. A. & CASSOL, E. A., Erodibilidade em Sulcos e em entres sulcos de um Podzólico Vermelho-escuro Franco-arenoso. Campinas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 20: 127-134. 1996.
- BROOKS, K.N.; FFOLLIOTT, P.F.; GREGERSEN, H.M. & THAMES, J.L. Hydrology and the management of watersheds Ames. **Iowa State University Press**, 1991. 392p.
- CAMARGO, A.P. A água no solo para a agricultura. **O Agrônomo**, Campinas, v.57, n.1,p.1-2, 2005.

CARVALHO, S.M.; STIPP, N.A.F. **Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná - Uma proposta de classificação qualitativa.** Geografia, Londrina, v.13, n.1,2004. Disponível em: <<http://www.geo.uel.br/revista>>. Acessado em de março de 2012.

CHAVES NETO, A. Análise multivariada aplicada à pesquisa. **Notas de aula.** Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

CHIGUTI, M. **Aplicação da análise multivariada na caracterização dos municípios paranaenses segundo suas produções agrícolas.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná. Paraná,. 222 p 2005.

COELHO NETTO, A.L., 2003. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. **Geomorfologia: uma Atualização de Bases e Conceitos**, ed. Bertrand, 5a ed., Rio de Janeiro, Brasil, p. 94-148.

CPRM. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas na escala 1:2.500.000. 4 CD-Rom. Brasília\_DF.

DANTAS, M. E. Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. In: CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Rio de Janeiro: geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, solos, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geo ambiental. Rio de Janeiro: CPRM: Embrapa Solos; [Niterói]: DRM-RJ, 2001. 1 CD-ROM.

DE VENETE, J., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., Van ROMPAEY, A. and Govers, G., 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. **Global and Planetary Change**, 60(3-4): 393-415

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: **Embrapa Produção de informação**; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FAO, 1967. La Erosion del Suelo por el Agua: Algunas **Medidas para Combatirlaenlas Tierras de Cultivo.** Roma, 207p.

FAO, 2001. Conventional Ploughing Erodes The Soil -Zero-Tillage Is An Environmentally-Friendly Alternative. **International Conference on Conservation Agriculture.** Madrid, October, p. 1-5.

FOSTER, G. R.,. Modeling the erosion process. In: Haan, Johnson & Brakensiek (eds.). Hydrology modeling of small watersheds. Monograph n. (5), **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, MI. 1982.

FREITAS, M.M. **Comportamento hidrológico e erosivo de bacias montanhosa sob uso agrícola: estação experimental do rio Boa Vista, Nova Friburgo – RJ.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1998. 104f.

FUJIEDA, M. *et al.* Hydrological procesesat two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Journalo Hydrology**, Amsterdam, v. 196, n. 1-4, p. 26 - 46, 1997.

GALVÍNCIO, J.D. **Balço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa utilizando informações digitais do terreno.** Tese (Doutorado em Recursos Naturais)- Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005. 174p.

GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (org.).**Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 472 p. 2004

GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B., Processos Erosivos nas Encostas. *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos.* Rio de Janeiro. Editora Bertrand, cap. 4, p. 149-209. 1995.

GUERRA, A.J.T., Ravinas: Processo de formação de desenvolvimento. *Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ*, 2, 80-95. (1998).

HAIR, J. F. Jr., *Análise Multivariada de Dados.* Ed Bookman, Porto Alegre, pp. 593. 2005.

HELENA, B. *et al.* Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. *Water Research, Amsterdam*, v. 34, n. 3, p. 807-816, 2000.

JACOMINE, P.K.T.; ALMEIDA, J.C. & MEDEIROS, L.A.R. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 1973. 2v. 830p. (DPP, Boletim Técnico, 28. SUDENE, Série Pedologia, 16)

JOHNSON, R. A; WICHERN, D. W. *Applied multivariate statistical analysis.* 4.ed. **New Jersey:** Prentice-Hall, inc., 1998, 816 p.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

LAL, R., Erodibility and Erosivity.In. LAL, R (editor). *Soil Erosion Research Methods.* Soil p. 141-160. 1988.

LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M., 1997. Develop mentand application of modern Soil Erosion Prediction Technology: the USDA experience. **Eurasian Soil Science.** 30(5):606-615.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera.* Piracicaba: O autor. 497p. 1995.

LIMA, J.E.F.W. ; SILVA, C.L. ; OLIVEIRA, C.A. da S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v.5, n.1, p.33-41, 2001.

LYRA, D. L, SOUSA, D. C. B., MAMEDE, G. L., Impacto das Variações Climáticas sobre a Disponibilidade Hídrica em Reservatórios do Nordeste Brasileiro: Estudo de Caso para a Bacia do Açude Santa Cruz do Apodi-RN. 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in Semi-arid Regions August 16 - 20, 2010, Fortaleza - Ceará, Brazil.

- MEDEIROS, P.H.A.; **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em uma bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 164 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- MEDEIROS, P.H.A.; GUENTNER, A.; FRANKE, T.; MAMEDE, G.L.; ARAÚJO, J.C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, 55, 636-648, 2010.
- MAMEDE, G. L., ARAUJO, J. C., MEDEIROS, P. H. A. (2009) Modelagem hidrossedimentológica de pequenos reservatórios da bacia hidrográfica do Benguê. In: Carlos Nobuyoshi Ide; Luiz Augusto Araújo do Val; Maria Lúcia Ribeiro. Produção de sedimentos e seus impactos ambientais, sociais e econômicos. Campo Grande: Editora Oeste, 2009, v., p. 393-410.
- MAMEDE, G. L., ARAUJO, J. C., MEDEIROS, P. H. A., Bronstert, A. (2008) Modelo Hidrossedimentológico WASA-SED: Aplicação para o Semi-Árido Brasileiro. In: VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Campo Grande.
- MELO, A. D. **Operação de reservatórios no semi-árido considerando critérios de qualidade de água**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Eng<sup>a</sup>. Civil e Ambiental) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- MINGOTI, S. A, Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 297. 2005.
- MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- MORAES, M.F. **Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental/representativa de Santa Maria/Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. 233p.
- MORAIN, Stan (ed.). **GIS Solutions in Natural Resource Management**: Balancing the Technical-Political Equation. Santa Fé, USA: OnWord Press, 364 p., 1999.
- MOSCA, A.A.O. **Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003. 88p.
- NORUSIS, M. J. SPSS Base System User's Guide. Chicago: **SPSS Inc.**, 1990. 520 p.
- PEREIRA, T.P.; CARVALHO, J.C.; LIMA, M.C.. Análise do Desempenho de um Modelo Físico para o Ensaio de Inderbitzen. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO OESTE, **Anais...** Unb, Brasília, DF, p. 109- 115. 2003.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.183p.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Editora **Edgar Blücher**; Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar, 1976. 279p.

RADAMBRASIL (1981) Folhas SB 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia e pedologia. Levantamento de Recursos Naturais, vol. 23. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.

REGO, J.J.V., **Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós – Graduação em Engenharia, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, 125 p. 1978.

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, Planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole,. 478p. 2004.

REIS, E. **Estatística multivariada aplicada**. v. 2, n.1, 106 p.mj Lisboa, 1997.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, 1996.

SANTOS, C. A.; SOBREIRA, F.G.; COELHO NETO, A. L., 2002. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – MG, R. Esc. Minas, Ouro Preto, 55(4): 285-290.

SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N. & LIMA, J.M. Relação entre Parâmetros de Chuva e Perdas de Solo e Determinação da Erodibilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro em Goiânia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:131-137, 1997.

SILVEIRA, S. S., ANDRADE, E. M. de. Análise de componentes principais da estrutura multivariada da evapotranspiração. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 171-177, 2002.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J.. **Ambientes fluviais**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná. 183 p. Il. 1990.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Publications in **Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TOMASELLA, J.T.G.; ROSSATO, L. **Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas – Balanço Hídrico**. INPE, São José dos Campos, 2005.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1993. 943p.

TUCCI, C.E.M., 1993. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade; UFRGS; Edups; ABRH, 943 p.

TUCCI, C.E.M. **Impactos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos do Brasil**. Brasília, ANA, 2002. 70p.

VEGA, M.; PARDO, R.; BARRADO, E.; DEBAN, L. Assessement of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. **Water ResPrch**, Amsterdam, v. 32, n. 12, p. 3581-3592, 1998.

WUNDERLIN, D. A.; DIAZ, M. P.; AMÉ, M. V.; PESCE, S. F.; HUED, A. C.; BISTONI, M. L. A. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquía river basin (Córdoba-Argentina). **Water Reaserch**, Amsterdam, v. 35, n.1, p.2881-2894, 2001.