

RAFAEL PETRUCELI COELHO LIMA

**AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE SEVERIDADE DE SECA NA BACIA DO RIO DOCE
VISANDO AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE
SECAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa – Câmpus Viçosa

T

L732a
2016
Lima, Rafael Petruceli Coelho, 1991-
Avaliação de índices de severidade de seca na bacia do rio Doce visando ao desenvolvimento de sistema de classificação de secas / Rafael Petruceli Coelho Lima. – Viçosa, MG, 2016.
xi, 85f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.64-75.

1. Bacia hidrográfica - Minas Gerais. 2. Doce, Rio, Bacia (MG e ES). 3. Secas - Classificação. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

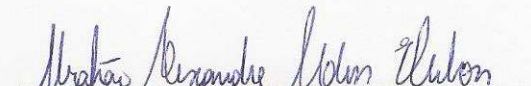
CDD 22 ed. 551.488151


RAFAEL PETRUCELI COELHO LIMA

**AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE SEVERIDADE DE SECA NA BACIA DO RIO DOCE
VISANDO AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE
SECAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de julho de 2016.


Abrahão Alexandre Alden Elesbon


Silvio Bueno Pereira
(Coorientador)


Demetrius David da Silva
(Orientador)

À minha família, por acreditar no meu potencial.

Aos meus pais e irmão, por me motivarem em todos os momentos.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar presente em todas as etapas da minha vida e por me possibilitar saúde e força nesse desafio.

À minha família, que sempre me manteve motivado e que não me deixou desamparado mesmo com a distância de casa.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela orientação, confiança e ensinamentos desde a graduação em Engenharia Ambiental e monitoria de Hidráulica. Agradeço ao professor Silvio Bueno Pereira, por me incentivar e sempre me auxiliar nos momentos de dificuldade. Agradeço também ao professor Eduardo Antônio Gomes Marques, pela amizade e pela disposição em ajudar inúmeras vezes.

À minha namorada Jéssica, que deixou esse desafio mais agradável, com seus conselhos e carinhos, nos momentos de alegria e nos problemas inesperados da vida.

Aos amigos do CRRH, em especial a Micael, Clívia, Luna, Maria Camila, Nívia, Marina, Josi, Deli, pelo excelente relacionamento e contribuição direta na realização desse trabalho.

Aos funcionários do departamento Policarpo, Conceição, Délio, Gil, Chicão, Graça e Rafael, pois, mesmo que indiretamente, em seus postos foram importantes deixar a caminhada mais simples.

Por fim, a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

BIOGRAFIA

RAFAEL PETRUCELI COELHO LIMA, filho de Eufran Ferreira Lima e Sonia Rosa Petruceli Coelho Lima, nasceu em 10 de janeiro de 1991, na cidade de Belo Horizonte – MG.

Em março de 2009 iniciou o curso de graduação em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa – MG, graduando-se em agosto de 2014. Durante sua formação foi monitor da disciplina Hidráulica (ENG – 341) por três períodos.

Em agosto de 2014, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na UFV, em nível de mestrado, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2016.

“Deus é o dono de tudo. Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar aonde cheguei. Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm essa oportunidade. Ele a deu para mim, não sei por quê. Sei que não posso desperdiçá-la.”

Ayrton Senna

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Geral	5
2.2. Específicos.....	5
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
3.1. Definição de seca	6
3.2. Tipos de seca e impactos	7
3.3. Índices de seca	10
3.4. Sistema de alerta de secas	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1. Bacia hidrográfica do rio Doce	20
4.2. Obtenção dos dados hidrometeorológicos da bacia do rio Doce	24
4.2.1. Aquisição e tratamento dos dados pluviométricos	24
4.2.2. Preenchimento de falhas	26
4.2.3. Precipitação média baseada nos polígonos de Thiessen	26
4.3. Obtenção dos índices de seca.....	28
4.3.1. Índice de Porcentagem Normal – IPN.....	28
4.3.2. Método dos Decis – MD.....	28
4.3.3. Índice de Anomalia de Chuva – RAI	29
4.3.4. Índice de Precipitação Padronizada – SPI	29
4.4. Aplicação dos índices em diferentes escalas de tempo	32
4.5. Análise da severidade de seca	33
4.5.1. Classificação da severidade de secas e adaptações para os índices	33
4.5.2. Análise da distribuição dos índices	35
4.6. Classificação global dos índices de seca na escala de tempo anual	35
4.7. Sistema de classificação de secas anuais.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1. Precipitação média das unidades de análise (UAs) da bacia do rio Doce.....	39
5.2. Aplicação dos índices de secas em diferentes escalas de tempo	43
5.2.1. Avaliação da severidade de seca na escala mensal	43

5.2.2. Avaliação da severidade de seca na escala trimestral	47
5.3. Classificação global e sistema de classificação de secas anuais	53
6. CONCLUSÕES	62
7. REFERÊNCIAS	64
APÊNDICES	76
APÊNDICE A	77
APÊNDICE B	80
APÊNDICE C	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Redução da precipitação e sequência de impactos gerados.....	8
Figura 2. Determinação do SPI através da transformação dos valores de precipitação, ajustados à função Gama, em uma distribuição normal.....	14
Figura 3. Distribuição normal com o SPI tendo média igual a 0 e variância de 1.	14
Figura 4. Bacia hidrográfica do rio Doce, com destaque para os principais cursos de água na bacia.....	21
Figura 5. Unidades de análise (UAs) da bacia do rio Doce.	22
Figura 6. Estações pluviométricas da rede hidrometeorológica da ANA selecionadas para o estudo na bacia do rio Doce.	25
Figura 7. Área de influência das estações pluviométricas com base na metodologia dos polígonos de Thiessen.....	27
Figura 8. Precipitações médias mensais para o alto, médio e baixo rio Doce.	42
Figura 9. Distribuição das frequências trimestrais de ocorrências das classes de intensidades de seca para o IPN, no período de 1985 a 2015, nas unidades de análise da bacia do Doce.....	49
Figura 10. Distribuição das frequências trimestrais de ocorrências das classes de intensidades de seca para o RAI, no período de 1985 a 2015, nas unidades de análise da bacia do Doce.....	50
Figura 11. Distribuição das frequências trimestrais de ocorrências das classes de intensidades de seca para o SPI, no período de 1985 a 2015, nas unidades de análise da bacia do Doce.....	51
Figura 12. Condição climática dos anos hidrológicos 1994/1995, 2000/2001 e 2014/2015 para a bacia hidrográfica do rio Doce.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Unidades de análise (UAs) da bacia do rio Doce e suas respectivas áreas de drenagem	22
Tabela 2. Relação entre os valores de IPN e intensidade de seca.....	34
Tabela 3. Classificação dos decis quanto à severidade de seca usando o índice MD	34
Tabela 4. Relação entre os valores de RAI e intensidade de seca.....	35
Tabela 5. Relação entre os valores de SPI e intensidades de seca	35
Tabela 6. Classificação da intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI e limites de classe propostos e adotados no presente trabalho	36
Tabela 7. Notas para as classes de intensidade de seca visando à classificação global	36
Tabela 8. Sistema de classificação de secas anuais com base nos intervalos de notas globais	37
Tabela 9. Algumas das possíveis combinações das classes de intensidade de seca para determinação da nota e da consequente condição climática	38
Tabela 10. Precipitações médias mensais, trimestrais e anuais, em mm, das unidades de análise (UAs) e da bacia hidrográfica do rio Doce	41
Tabela 11. Número de ocorrências de secas mensais com base nas classes de intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI, no período de 1985 a 2015	44
Tabela 12. Frequência média de ocorrência das classes de intensidade de seca dos índices avaliados, na escala de tempo mensal, para a bacia hidrográfica do rio Doce	46
Tabela 13. Número de ocorrências de secas trimestrais com base nas classes de intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI, no período de 1985 a 2015	48
Tabela 14. Frequência média de ocorrência das classes de intensidade de seca dos quatro índices, na escala de tempo trimestral, para a bacia hidrográfica do rio Doce	52
Tabela 15. Resultados dos índices e relação com as classes de intensidade de seca proposta na classificação global para bacia hidrográfica do rio Doce	55
Tabela 16. Classificação de alerta das unidades de análise da bacia do rio Doce no período de 1985 a 2015 com base na classificação global baseada em notas	56

RESUMO

LIMA, Rafael Petruceli Coelho, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2016. **Avaliação de índices de severidade de seca na bacia do rio Doce visando ao desenvolvimento de sistema de classificação de secas.** Orientador: Demetrius David da Silva. Coorientador: Michel Castro Moreira e Silvio Bueno Pereira.

Visando caracterizar a ocorrência e a intensidade de secas na bacia hidrográfica do rio Doce, assim como desenvolver um sistema de classificação de secas no âmbito da bacia, foram avaliados quatro diferentes índices de seca (Índice de Porcentagem Normal – IPN, Método dos Decis – MD, Índice de Anomalia de Chuva – RAI e Índice de Precipitação Padronizada – SPI). Os índices foram calculados nas escalas de tempo mensal, trimestral e anual, a partir de dados de precipitação de 89 estações pluviométricas da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas. Trabalhou-se com nove unidades de análises (UAs) na bacia do rio Doce, tendo sido utilizado o método dos Polígonos de Thiessen para fins de obtenção da precipitação média nas respectivas áreas de drenagem. Para cada uma das UAs foi avaliado o número de ocorrências das classes de intensidade de seca associada aos quatro índices. Para a escala de tempo anual foi proposta uma classificação global dos índices para posterior uso no sistema de classificação de secas dos 30 anos do período base, compreendido entre 1985 e 2015. Os resultados indicaram alta variabilidade espacial na distribuição das precipitações entre as UAs, com diferenças de até 400 mm nos totais precipitados anuais, fato que pode ser explicado pela extensão territorial e pelos três tipos climáticos identificados na bacia. A região do alto rio Doce apresenta maiores índices pluviométricos no início da estação chuvosa (outubro a dezembro), em relação ao médio e baixo rio Doce. Já no período seco, entre abril e setembro, os totais precipitados são similares nas três regiões da bacia. Os anos hidrológicos mais críticos da bacia do Doce em relação à seca foram 1994/1995, 2000/2001 e 2014/2015, sendo esse último o mais crítico dos últimos 30 anos. O índice de seca IPN, tanto na escala mensal como trimestral, indicou um maior número de eventos de seca em todas as unidades de análise, quando comparado aos índices MD, RAI e SPI. Os resultados obtidos demonstram que, dentre os quatro índices de seca avaliados, os índices RAI e SPI constituem-se nos mais apropriados para a avaliação de secas mensais e trimestrais na bacia hidrográfica do rio Doce. A classificação global dos índices de seca, baseada na escala anual, mostrou-se importante ferramenta de gestão a ser utilizada no sistema de classificação das secas anuais, permitindo verificar que a bacia do rio Doce apresenta uma condição climática grave de seca, em média, a cada sete anos.

ABSTRACT

LIMA, Rafael Petruceli Coelho, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016. **Assessment of drought severity indexes for the Rio Doce basin, in order to develop a classification system for the drought periods.** Adviser: Demetrius David da Silva. Co-adviser: Michel Castro Moreira and Silvio Bueno Pereira.

Aiming to characterize the occurrence and intensity of droughts in the Rio Doce basin, as well as to develop a drought classification system for it, there were evaluated four different drought indexes (Percentage of Normal (IPN), Decis Method (DM), Rainfall Anomaly Index (RAI) and Standardized Precipitation Index (SPI). The indexes were calculated in monthly, quarterly and annual time scales, based on precipitation data from 89 pluviometric stations of the National Water Agency's hydro meteorological network. The work was done in nine units of analysis (UAs) in the Rio Doce basin and the Polygon Thiessen method was used with the purpose of obtaining the rainfall average in the catchment areas. For each UA was evaluated the occurrences of drought intensity classes associated with the four indexes. For the annual time scale was proposed indexes overall rating for later use in the 30-year base period drought classification system, between 1985 and 2015. The upper region of Rio Doce basin has higher rainfall at the beginning of the rainy season (October to December) if compared to the middle and lower regions of the basin. Whereas in the dry season, between April and September, the total precipitates are similar along these three regions. The most critical hydrological years in the Rio Doce basin, with more intense droughts, were 1994/1995, 2000/2001 and 2014/2015, being the last period the most critical of the past 30 years. The IPN index indicated a higher number of drought events in every UA, for both monthly and quarterly scales, when compared to the DM, RAI and SPI indexes. The results has shown that among the four drought indexes evaluated, RAI and SPI constitute the most appropriate for assessing monthly and quarterly the droughts in the Rio Doce basin. These indexes overall ratings, based on the annual scale, is seen as an important management tool to be used in the classification system for annual drought. It was possible to conclude through this tool that the Rio Doce basin has severe climatic conditions of drought every seven years in average.

1. INTRODUÇÃO

Segundo WMO (1986), a seca é entendida como um período de tempo suficientemente longo, com ausência ou deficiência de precipitações, e que gere um desequilíbrio hidrológico elevado. Hayes et al. (2011) definem a seca como sendo o déficit de precipitação em relação às médias históricas de uma determinada região, enquanto Byun e Wilhite (1999) destacam que a seca é uma situação temporária, com duração, magnitude e severidade. Por outro lado, Redmond (2002) afirma que a seca não possui um conceito universal, de modo que sua definição é dependente da temática abordada.

Considerando a variabilidade de definições acerca da seca, HEIM (2002) sugere que uma forma de se caracterizá-la é com base nos seus efeitos, podendo ser classificada em quatro diferentes categorias: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica.

Considera-se que uma região apresente uma seca meteorológica, conhecida também por climatológica, quando a precipitação se mantém inferior aos valores médios relativos a um longo período de tempo. O segundo tipo de seca, a agrícola, pode ser registrada quando existe um déficit de umidade no solo, não sendo possível satisfazer as necessidades hídricas de uma dada cultura, independentemente da fase de crescimento (CAMPOS et al., 2002). A seca hidrológica está diretamente associada ao déficit de precipitação e é capaz de reduzir os níveis de água nos corpos hídricos, comprometendo a disponibilidade hídrica de uma dada região. Por fim, a seca socioeconômica ocorre quando a

escassez de água começa a afetar a sociedade em geral (SANTOS & PORTELA, 2010) e, por isso, essa categoria de seca está diretamente associada as outras três.

Ainda que existam distintas classificações para a seca, todas elas são ocasionadas pela deficiência de precipitação, que gera uma falta de água para o desenvolvimento de múltiplas atividades e que compromete a vida dos seres humanos (WILHITE, 2003).

A seca é um evento natural, o qual não pode ser evitado. Por esse motivo, muitos países, na intenção de preparar a sociedade, vêm desenvolvendo sistemas de alerta contra esse fenômeno (CANAMARY et al., 2015). Para se colocar em prática essa estratégia de governo é de suma importância trabalhar com instrumentos que permitam prever o início, o fim e a severidade de uma seca e que também possibilitem uma análise comparativa das condições hídricas de diferentes áreas (FREITAS, 2005).

A fim de analisar a ocorrência da seca em diferentes regiões, foram desenvolvidos índices padronizados que permitem a quantificação e a comparação do evento de seca nas escalas temporal e espacial (BLAIN & BRUNINI, 2005). A padronização destes índices é essencial, uma vez que eles incorporam dados meteorológicos e hidrológicos de vários anos, como: precipitação, temperatura do ar, evapotranspiração, escoamento superficial, umidade do solo, entre outros e, assim, auxiliam na compreensão mais eficaz no monitoramento e investigação da seca e seus impactos (FERNANDES et al., 2009).

Apesar de existirem inúmeros índices de seca, segundo Quiring (2009), um único índice não pode representar todos os aspectos da seca. Sendo assim, é importante a adoção de diferentes índices de seca, que apresentem distintas metodologias de cálculo, para que dessa forma seja possível fazer uma avaliação de desempenho e identificação de qual índice apresenta melhor resultado para determinada área de estudo (FERNANDES et al., 2010).

Dentro os diversos índices de seca existentes destacam-se o Índice de Porcentagem Normal – IPN; o Método dos Decis – MD (GIBBS & MAHER, 1967); o Índice de Anomalia de Chuva – RAI (*Rainfall Anomaly Index*) (ROOY, 1965); o Índice de Precipitação Padronizada – SPI (*Standardized Precipitation Index*) (McKEE et al., 1993); e o Índice de Severidade de Seca de Palmer – PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) (PALMER, 1965).

A aplicação destes índices requer o levantamento de uma vasta base de dados da região, de modo a se obter resultados confiáveis. Blain e Brunini (2007b) associam a confiabilidade dos resultados dos índices, nos diferentes setores da sociedade, à escolha adequada do intervalo de tempo (1, 3, 6, 12 ou 24 meses) que cada tipo de seca (meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica) está relacionada.

Os índices permitem ainda que sejam realizadas simulações de eventos climáticos que possam ocorrer na região. Segundo IPCC (2007), as simulações climáticas feitas a partir de modelos matemáticos preveem um aumento da temperatura média da Terra de 1,8 a 4°C, até o ano de 2100. Esse aumento pode atingir uma elevação de até mesmo 6,4°C, o que traria consequências desastrosas para todo o planeta.

Além da elevação da temperatura média terrestre, existe a previsão de aumento dos eventos de precipitações intensas, maior frequência de cheias e de eventos de secas mais severas e mais persistentes no tempo (HOUGHTON et al., 1996; KARL et al., 1997).

Essas mudanças climáticas podem causar danos em todo o globo terrestre, assim como nos sistemas físicos, biológicos e na sociedade (MARENGO et al., 2007). REGO et al. (2014) acompanharam as vazões de estiagem na região sudeste para o ano de 2014 e verificaram um estado crítico para as nascentes do rio Doce. Em 70 anos de monitoramento da bacia do rio Doce notou-se que as vazões médias mensais de 2014 indicaram a pior seca já registrada no alto do rio Doce e uma das piores no médio e baixo rio Doce (REGO et al., 2015).

Grande parte dos estudos a respeito da seca no Brasil está em regiões classificadas como semiáridas. É interessante, no entanto, destacar a importância desse tipo de estudo para regiões que, mesmo não tendo essa classificação, sofram também com problemas hídricos advindos desse fenômeno natural, que é o caso da bacia hidrográfica do rio Doce.

Neste contexto, pretende-se avaliar diferentes índices quantitativos para caracterizar a intensidade e a ocorrência de seca na bacia hidrográfica do rio Doce e, com base nas informações obtidas, desenvolver um sistema de classificação de secas no âmbito da referida bacia. A partir desse sistema de classificação será

possível identificar os anos mais críticos na bacia e as regiões que mais sofrem com as consequências dessa anomalia climática.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar índices quantitativos para caracterizar a ocorrência e a intensidade de seca em unidades de análise (UAs) da bacia hidrográfica do rio Doce e desenvolver um sistema de classificação de secas no âmbito da referida bacia.

2.2. Específicos

- Obter os dados hidrometeorológicos da bacia hidrográfica do rio Doce;
- Avaliar a intensidade de secas na bacia hidrográfica do rio Doce com base em quatro diferentes índices;
- Aplicar os índices de seca em três diferentes escalas de tempo: mensal, trimestral e anual;
- Analisar a severidade das secas com base na aplicação dos quatro índices, nas três escalas de tempo;
- Criar uma classificação global para os índices de seca na escala de tempo anual; e
- Desenvolver um sistema de classificação de secas e aplicar tal metodologia na escala de tempo anual visando identificar, principalmente, a seca hidrológica.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Definição de seca

Existe certa dificuldade em se apresentar uma definição geral para a seca, devido à necessidade de especificar qual região, período ou atividade humana está relacionada (BLAIN & BRUNINI, 2005). Conceitualmente, a seca é um fenômeno natural complexo, com uma condição física transitória marcada pela escassez de água, associada aos diferentes períodos de baixa precipitação, sempre repercutindo negativamente nos ambientes naturais e nas atividades humanas (CUNHA, 2008)

Este fenômeno difere dos demais eventos meteorológicos, uma vez que o mesmo apresenta característica de atingir uma ampla extensão espacial e temporal. Geralmente possui uma progressão lenta e imperceptível, dificultando, assim, determinar com exatidão o início e fim e, por conseguinte, quantificar a sua duração (MOLINAS & LIMA, 1999).

Destaca-se que nem sempre a ausência prolongada de precipitação irá determinar obrigatoriamente a existência de um evento de seca. Em relação à agricultura, por exemplo, o solo pode-se encontrar em uma condição de umidade antecedente suficientemente alta, capaz de suportar as necessidades da produção agrícola (CUNHA, 2008). No âmbito urbano, o armazenamento de água superficial ou subterrâneo é uma estratégia frequentemente utilizada para suportar os períodos de falta de chuva.

Vale ressaltar que fatores naturais são os responsáveis pela deficiência da precipitação e, conseqüentemente, ocorrência das secas. No entanto, confirmada essa anomalia climática, esta pode ser agravada por influência antrópica, a partir do crescimento populacional e da degradação da qualidade do solo e da água (CUNHA, 2008).

O êxodo rural e a concentração de pessoas no espaço urbano demandam grandes quantidades de água para abastecimento das cidades e, também, de forma indireta, para a irrigação, produção agropecuária e geração de energia. Além disso, o processo antrópico de urbanização está associado ao aumento das áreas impermeáveis, a partir da retirada da cobertura vegetal para as edificações, e também à degradação da qualidade da água, reduzindo a possibilidade de uso desse recurso para diversos fins (CUNHA, 2008).

Como alternativas para esses problemas, algumas cidades começam a utilizar água subterrânea para o abastecimento urbano durante todo o período do ano. Vale ressaltar que essa fonte é considerada uma reserva estratégica e deveria ser utilizada apenas em momentos e locais específicos com falta d'água (REBOUÇAS et al., 2002).

Visando superar a escassez hídrica, outras alternativas também são normalmente implantadas, como a transposição de água e a criação de reservatórios de armazenamento. No entanto, principalmente a primeira delas, causa grande repercussão social devido ao conflito pelo uso da água (CAPOZZOLI et al., 2015).

3.2. Tipos de seca e impactos

A classificação quanto ao tipo de seca é feita com base nos diferentes impactos provocados por esse fenômeno nos diversos setores usuários de água. Esses setores da sociedade possuem diferentes percepções, que são essenciais na análise tipológica da seca (BLAIN & BRUNINI, 2007b).

De acordo com as diferentes percepções, considera-se que a seca pode ser de quatro tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (WILHITE & GLANTZ, 1985). O que difere um tipo de seca do outro são os estágios de evolução do processo. Inicialmente, o déficit de precipitação dá origem a uma seca e a

continuidade do período de ausência de chuvas acarreta em prejuízos sobre os vários setores, explicando esses diferentes tipos de seca (BATISTA JÚNIOR, 2012).

Na Figura 1 apresenta-se a ideia sequencial dos tipos de seca, indicando que com a persistência de tal fenômeno, os conflitos e impactos aumentam progressivamente. Percebe-se que os tipos de seca não ocorrem todos ao mesmo tempo, destacando-se que o déficit de precipitação atinge, inicialmente, o setor agrícola e, por fim, o setor consumidor produtivo (seca socioeconômica).

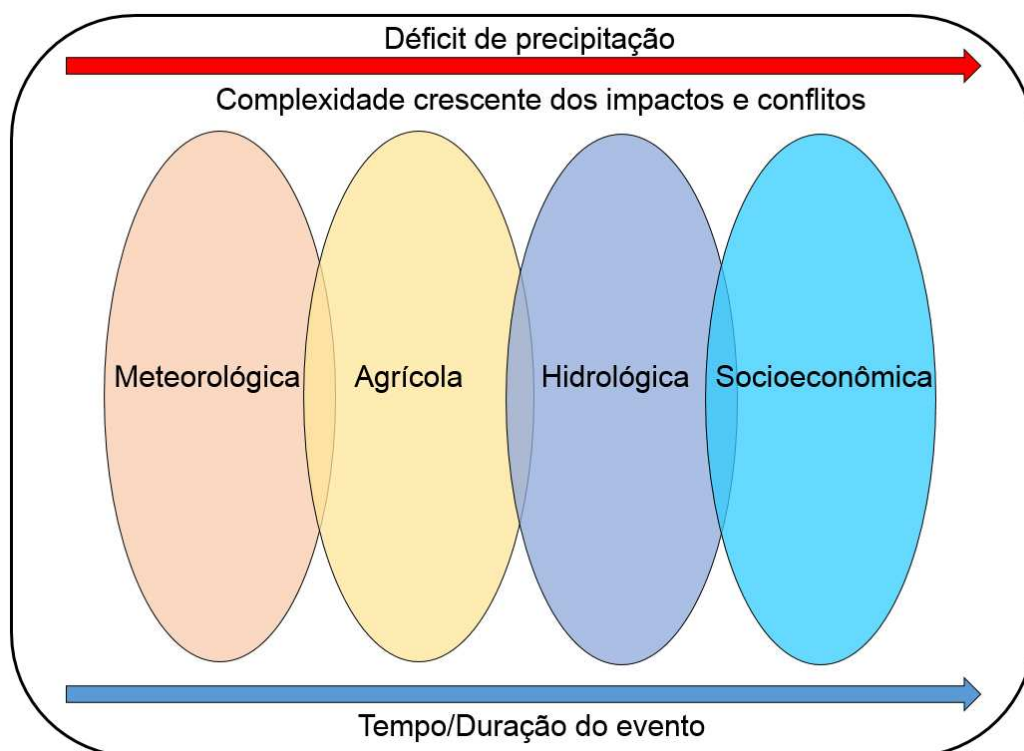


Figura 1. Redução da precipitação e sequência de impactos gerados.

Fonte: adaptado de NDMC, 2016.

A seca meteorológica é caracterizada a partir da comparação entre a precipitação atual e a precipitação normal ou média de um longo período de tempo em um determinado local. Se, com base nessa comparação, verificar-se a existência de um déficit em relação ao valor médio, é então considerada a presença de uma seca meteorológica na região em estudo. É bem específica de uma região, ao passo que as condições atmosféricas que acarretam a falta de precipitação variam, expressivamente, de região para região (IPMA, 2016).

A seca agrícola é aquela que ocorre quando o déficit de precipitação conduz a uma redução de água disponível no solo, impedindo, conseqüentemente, que sejam

atendidas as necessidades hídricas das culturas (WILHITE & GLANTZ, 1985). Dessa maneira, a biomassa vegetal e a produção agrícola irão reduzir consideravelmente em volume e renda, respectivamente.

Já a seca hidrológica é associada aos déficits de precipitação que causam comprometimento no abastecimento dos reservatórios de águas superficiais e subterrâneas. As escalas de microbacia ou bacias hidrográficas são utilizadas para definir a frequência e a severidade dessa seca. Geralmente as secas hidrológicas ocorrem em um período de tempo maior que as secas meteorológicas e agrícolas, uma vez que os componentes do sistema hidrológico, como a umidade do solo, vazões dos rios e níveis dos reservatórios e águas subterrâneas apresentam maior tempo de resposta em relação à deficiência de precipitação (NDMC, 2016).

Wilhite (1993) define, ainda, que essa seca está diretamente associada aos valores inferiores à média histórica dos rios, reservatórios e águas subterrâneas. Durante o evento de seca hidrológica a concorrência pela água dos sistemas de armazenamento, como rios e reservatórios, aumenta, e o número elevado de usuários consumidores causa o surgimento de conflitos entre os múltiplos e concorrentes fins.

Por fim, tem-se o conceito de seca socioeconômica, que se associa à ideia de oferta e demanda do bem econômico água, englobando os impactos dos outros três tipos de seca. Nesse caso, o início da seca é considerado a partir do momento em que as reservas de água disponíveis já não são mais suficientes para satisfazer as necessidades humanas básicas e a produção de bens e serviços (WILHITE & GLANTZ, 1985).

Considerando a integração do sistema hidrológico, pode-se dizer que uma seca a montante da bacia pode gerar consequências negativas a jusante. Outras alterações e atividades a montante, tais como desmatamento, mineração, práticas agrícolas inadequadas e barramentos podem alterar o escoamento superficial e as taxas de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, afetar a frequência e o grau de intensidade de secas a jusante (IPMA, 2016).

O crescimento populacional força o incremento da utilização de água nas diversas atividades humanas (industrial, agrícola, abastecimento, etc.), gerando assim um maior consumo per capita e maior pressão sobre os recursos hídricos. Em

momentos de seca, locais onde já existe uma alta concorrência pelo uso da água podem passar por graves crises econômicas e sociais (CUNHA, 2008).

Os eventos de seca resultam em impactos expressivos em diversos setores, sendo esses impactos individualizados em diretos e indiretos. Ainda, esses impactos podem ser classificados em econômicos, sociais e ambientais, conforme os danos causados pela seca nos diferentes setores da sociedade (ROSSI et al., 2007).

Os impactos diretos estão relacionados com a falta de água para abastecimento urbano, prejuízos na produção agrícola, industrial e na geração de energia hidrelétrica, diminuição da vazão dos rios e, por conseguinte, redução do volume diluidor da poluição, depreciando assim o nível da qualidade da água do corpo receptor (CUNHA, 2008). Já os efeitos indiretos contemplam inúmeros impactos negativos, tais como o êxodo populacional, aumento da concentração de substâncias poluidoras nos rios, aumento dos custos do tratamento de água para abastecimento urbano, dentre outros.

Do ponto de vista econômico, os impactos são presentes na agricultura, na produção florestal, industrial, pesca, agropecuária e geração de energia, no setor de turismo e navegação. No aspecto social, podem resultar em implicações como aumento da taxa de desemprego, riscos à saúde pública e, até mesmo, emigração. Já os impactos ambientais vinculam-se à redução da água superficial e subterrânea, redução da biodiversidade e da qualidade do solo, água e ar (CUNHA, 2008).

3.3. Índices de seca

Barra (2000) descreve que várias metodologias vêm sendo desenvolvidas por inúmeros pesquisadores em busca de caracterizar e quantificar a seca. Dentre elas, destaca-se a utilização de índices de seca, que se baseiam, geralmente, em variáveis climatológicas e métodos estatísticos, possibilitando determinar o grau de intensidade, duração e a frequência com que essa anomalia ocorre.

A padronização desses índices é essencial para permitir a comparação de um dado evento de seca em diferentes escalas de tempo e espaço (BLAIN & BRUNINI, 2005). Vale ressaltar que os dados de entrada podem variar de acordo com o índice, ou seja, a depender do índice podem ser necessários apenas os dados de precipitação ou, até mesmo, dados de temperatura do ar, umidade do solo,

evapotranspiração, dentre outras variáveis. Dessa forma, diferentes índices podem fornecer diferentes resultados sobre a intensidade da seca em uma mesma região.

Destaca-se que os mesmos vem sendo aplicados há mais de 40 anos, com vasta utilização por todo o mundo e, também, no Brasil. Países dos cinco continentes empregam índices para o monitoramento de seca (ALTAMIRANO, 2010).

Na literatura mundial, os índices mais utilizados para caracterizar a seca são: o Índice de Severidade de Seca de Palmer – PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) (PALMER, 1965); o Índice de Seca de Bhalme e Mooley – BMDI (*Bhalme & Mooley Drought Index*) (BHALME & MOOLEY, 1980); o Índice de Desvio de Chuva de Lamb – LRDI (*Lamb Rainfall Departure Index*) (LAMB et al., 1986); o Índice de Porcentagem Normal – IPN; o Método dos Decis – MD (GIBBS & MAHER, 1967); o Índice de Anomalia de Chuva – RAI (*Rainfall Anomaly Index*) (ROOY, 1965); e o Índice de Precipitação Padronizada – SPI (*Standardized Precipitation Index*) (McKEE et al., 1993).

Apesar da existência de vários outros índices, a grande utilização desses índices se deve a diversos fatores positivos que os mesmos proporcionam. Os índices SPI e PDSI mostraram-se bastante úteis no monitoramento de secas nos EUA (HAYES et al., 1999), destacando a simplicidade de cálculo do SPI e a credibilidade de mais de 30 anos de uso do PSDI. O índice IPN é facilmente calculado e se adequa bem às necessidades dos meteorologistas e dos setores interessados da sociedade (FERNANDES et al., 2009). O Método dos Decis – MD e o índice RAI são de fácil utilização, graças à possibilidade de emprego de recursos computacionais (planilhas eletrônicas). O índice BMDI assume apenas a precipitação nos cálculos e é bastante eficaz para análises feitas em regiões tropicais (BHALME & MOOLEY, 1980). Já o índice LRDI apresenta a vantagem de poder ser utilizado mesmo que as séries de dados apresentem falhas (LAMB et al., 1986).

Dentre os índices de seca mencionados anteriormente destacam-se: Índice de Porcentagem Normal – IPN; Método dos Decis – MD (GIBBS & MAHER, 1967); Índice de Anomalia de Chuva – RAI (*Rainfall Anomaly Index*) (ROOY, 1965); e Índice de Precipitação Padronizada – SPI (*Standardized Precipitation Index*) (McKEE et al., 1993).

Tais índices têm a vantagem de exigir apenas dados de precipitação em suas equações, o que permite potencializar a utilização destes para as condições brasileiras, nas quais se tem uma grande dificuldade de obtenção de séries históricas de outras variáveis climatológicas com pelo menos 30 anos de dados.

O Índice de Porcentagem Normal (IPN) apresenta simplicidade em seus cálculos e pode ser utilizado para diferentes escalas temporais, variando geralmente entre um mês ou um conjunto de meses até um ano. Seus resultados, no entanto, podem ser erroneamente interpretados, uma vez que os dados normais utilizados nos cálculos podem apresentar variabilidade ao longo do tempo na área de estudo (NDMC, 2016).

O Método dos Decis (MD) segue o raciocínio de cálculo dos quartis e percentis de uma amostra. Essa divisão em amostras é utilizada para determinar a probabilidade de ocorrência de um evento e também para definir de forma qualitativa a anomalia climática.

Gois (2005) avaliou os índices IPN, MD, SPI e PSDI para algumas regiões do estado de Minas Gerais, verificando que os índices IPN e MD apresentaram comportamento semelhante ao longo dos anos avaliados. Destacou-se, ainda, a potencialidade do IPN em detectar maior número de eventos de seca nas áreas de estudo. Além disso, observou-se que o índice MD, juntamente com o SPI, são os mais adequados para serem utilizados em Minas Gerais em estudos de seca. O autor ressalta, também, que apesar da maior detecção de eventos de seca pelo IPN, isso já era esperado devido à sua escala de classificação, que avalia pequenas variações em relação à normal como sendo evento de seca.

O Índice de Anomalia de Chuva (RAI), desenvolvido por Rooy (1965), é capaz de classificar e ordenar as anomalias de precipitação em relação à condição normal, podendo essas anomalias serem negativas ou positivas. Oliapo (1985) verificou que apesar da simplicidade do cálculo do RAI, o mesmo apresenta diferença não significativa em comparação aos índices mais complexos, como o índice de Palmer (PALMER, 1965) e o índice de Bhalme e Mooley (BHALME & MOOLEY, 1980). Em outro estudo realizado na Grécia, o índice RAI apresentou alta correlação com o índice SPI (LOUKAS et al., 2003).

Marcuzzo et al. (2012) aplicaram o RAI na escala mensal, no estado de Tocantins, e concluíram que o índice é recomendado para acompanhar a

precipitação interanual do Estado, podendo assim verificar mudanças no regime de chuvas. O índice RAI possibilitou, ainda, em trabalho realizado por Gonçalves et al., (2006), determinar a predominância de secas em áreas que tem igual vulnerabilidade a eventos extremos máximos e mínimos no Estado de Pernambuco.

McKee et al. (1993) desenvolveram o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), que é um dos índices mais utilizados no mundo. Tadesse (2006) verificou que o SPI é utilizado em mais de 50 países. Num primeiro momento, os autores utilizaram tal índice para o monitoramento das secas do Estado do Colorado, EUA. Entretanto, devido à sua versatilidade em permitir a comparação entre regiões com climas distintos e em várias escalas de tempo, o SPI tem sido empregado em vários outros países (ALTAMIRANO, 2010). Outro ponto favorável para sua ampla utilização é que os resultados do índice não são afetados negativamente por fatores topográficos (LANA et al., 2001).

Conceitualmente, o SPI representa o comportamento da precipitação em função de valores de desvios padrão. Para uma determinada série de tempo, esses valores se afastam da média, criando assim a ideia de precipitação padronizada do índice. Como as séries históricas de precipitação não seguem uma distribuição normal, e sim uma distribuição assimétrica (não distribuída uniformemente em torno do valor médio), para se calcular este índice é necessário um tratamento inicial das séries de dados, de tal forma que os valores tenham a distribuição normal desejada. O tratamento inicial consiste em ajustar a série de dados de precipitação em uma função de distribuição de probabilidade, que posteriormente é transformada em uma distribuição normal. Na Figura 2 exemplifica-se essa transformação a partir de uma análise gráfica.

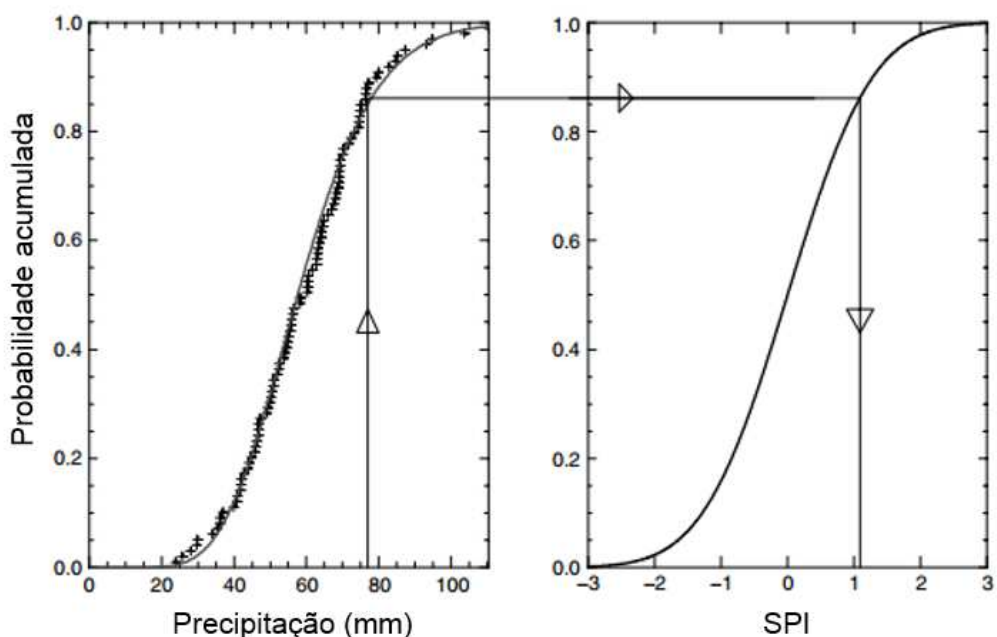


Figura 2. Determinação do SPI através da transformação dos valores de precipitação, ajustados à função Gama, em uma distribuição normal.
 Fonte: adaptado de Hughes et al. (2002).

Por definição, a distribuição normal apresenta média com valor zero e variância unitária e, assim, valores positivos de SPI indicam precipitações maiores do que a média, enquanto valores negativos indicam precipitações abaixo da média (Figura 3).

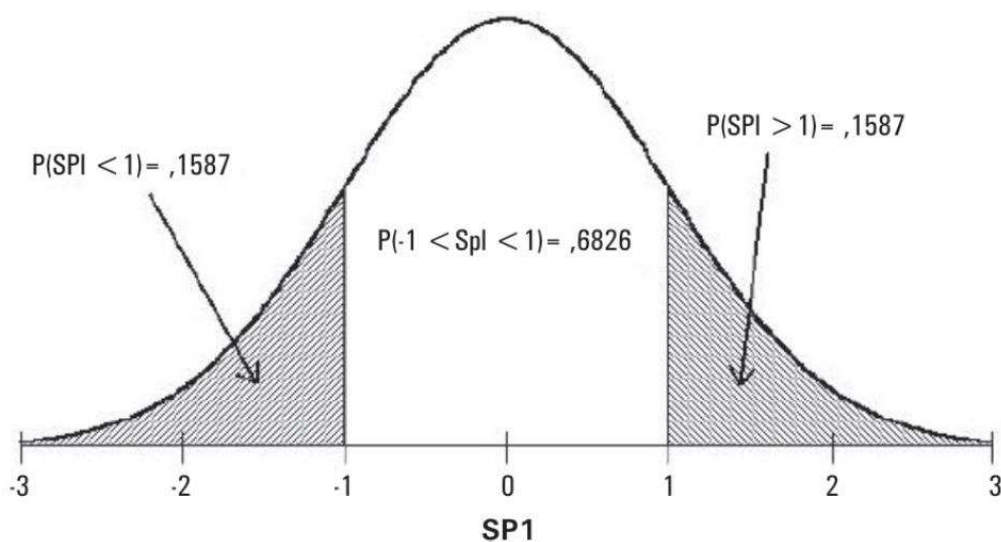


Figura 3. Distribuição normal com o SPI tendo média igual a 0 e variância de 1.
 Fonte: Fernandes et al. (2009).

Hayes et al. (1999) afirmam que, por se ajustar à uma distribuição normal, é de se esperar, em uma longa série histórica de registros, que cerca de 68% dos valores do SPI estejam entre -1 e 1, que 95% dos valores estejam entre -2 e 2 e que em 99% dos casos o índice tenha valor entre -3 e 3. Obtendo o resultado do índice, fica evidente a possibilidade de determinar tanto eventos de seca quanto eventos chuvosos em uma escala de tempo escolhida para qualquer lugar do mundo.

A aplicação do SPI pode originar resultados enganosos, positivos ou negativos, quando se aplica o índice em curta escala de tempo (1, 2 ou 3 meses) para regiões de baixa precipitação sazonal (ALTAMIRANO, 2010). Guttam (1994) investigou o efeito da extensão da série de dados sobre a distribuição da precipitação e verificou que são necessários pelo menos 40 a 60 anos de dados para a estabilidade de parâmetros na parte central das distribuições probabilísticas. Além disso, resultados contraditórios podem ser obtidos para um mesmo local de estudo quando diferentes durações de séries de registros de dados são utilizadas para calcular o índice (Wu et al., 2005).

Em locais onde a estação seca é bem distinta, o SPI não é capaz de avaliar uma condição de seca, especialmente para curtos períodos de tempo (Wu et al. 2007). Existindo uma alta frequência de precipitação igual a zero, compromete-se a transformação equiprobabilística das distribuições de precipitação e, por isso, o SPI não será distribuído normalmente. Por esta razão, Hayes et al. (1999) recomendam um conhecimento da climatologia da região para que assim seja possível uma melhor interpretação e possível crítica dos resultados.

As escalas de tempo mais frequentemente utilizadas para aplicação dos índices de seca são 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses (ALTAMIRANO, 2010). Essas diferentes escalas temporais permitem uma análise dos impactos que a seca tem nas diferentes fases do ciclo hidrológico e, também, nos diferentes setores da sociedade.

Em um curto prazo de tempo (um mês) a aplicação está estreitamente relacionada com a umidade do solo. Para três meses consegue-se ter uma ideia da sazonalidade da precipitação e com seis ou nove meses podem-se verificar as tendências e padrões de precipitação, importantes para o monitoramento do período de transição entre a estação seca e chuvosa. Em 12 meses é possível verificar os padrões de precipitação de longo prazo, normalmente vinculados a níveis de

reservatórios e mananciais hídricos. Para períodos ainda maiores, 24 e 48 meses, tem-se a capacidade de monitorar o impacto de secas em aquíferos subterrâneos que, devido à sua resiliência, possuem uma capacidade de resposta mais lenta à seca (NDMC, 2016).

SIMS et al. (2002) verificaram uma forte relação entre o SPI em escalas de tempo curto e as variações temporais de umidade do solo, determinando assim a água disponível para a produção agrícola. Pereira (2004) e Batista Júnior (2012) afirmam que a escala de tempo trimestral é adequada para avaliar secas meteorológicas. Já Szalai et al. (2000) indicam que as secas hidrológicas são melhores identificadas a partir de SPIs aplicados a escalas de tempo mais longas. Sendo assim, a identificação das anomalias de seca em diferentes escalas de tempo permite direcionar as ações mitigadoras para os setores específicos como agricultura, produção agroindustrial e consumo humano.

Os índices de seca são ferramentas bastante utilizadas para auxiliar o planejamento e a tomada de decisões em muitos países, com destaque para Estados Unidos (KEYANTASH & DRACUP, 2002), Canadá (AKINREMI et al., 1996), Argentina (ROTONDO et al., 2001), Itália (BONACCORSO et al., 2003), Turquia (TOUCHAN et al., 2005), Irã (MORID et al., 2006), China (WU et al., 2001), Austrália (KOTHAVALA, 1997), Brasil (BLAIN & BRUNINI, 2007b), assim como na África (NTALE & GAN, 2003) e Europa (BRIFFA et al., 1994).

Além da pesquisa nesses diversos locais, alguns países possuem entidades e órgãos que fazem o uso de índices de seca para caracterizar anomalias de precipitação, como o Centro Nacional de Mitigação de Seca (NDMC), nos Estados Unidos, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), em Portugal, e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no Brasil. Além disso, o Estado de São Paulo conta com o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), através do Centro de Monitoramento e Mitigação de Seca e Adversidades Climáticas, para monitorar as secas em seu território (ALTAMIRANO, 2010), assim como o Estado do Ceará conta com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME (BANA E COSTA & CORREA, 2000).

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) desenvolveu o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) visando atuar de forma preventiva na bacia do Doce e outras bacias hidrográficas do país. Desde abril de 2014 o CPRM, em parceria com

a Agência Nacional de Águas (ANA), publica periodicamente em seu site uma série de relatórios atualizados sobre a real situação das vazões dos principais cursos d'água da região sudeste (CPRM, 2016).

Os Estados do nordeste brasileiro sofrem constantemente com eventos de seca e, por isso, no final da década de 90, o Governo Federal iniciou um plano de combate aos efeitos da seca na região (SUDENE, 2016). Como resultado, vários trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos nessa região, muito embora outros locais também tenham sido estudados.

Blain e Brunini (2007a) avaliaram o índice SPI e adaptaram o PDSI às condições climáticas do Estado de São Paulo. Barra (2000) analisou a seca no Estado do Ceará a partir do índice PDSI, correlacionando-o com dados de temperatura da superfície do mar e do índice de oscilação sul. Alencar et al. (2006) monitoraram as precipitações do alto sertão da Paraíba, a partir da avaliação de desempenho dos métodos dos quantis e SPI. O índice SPI também foi utilizado no monitoramento de seca para o Estado de Pernambuco (SANTOS & ANJOS, 2001).

Alguns trabalhos também foram desenvolvidos em nível municipal. Silva Júnior et al. (2003) identificaram os períodos secos e chuvosos a partir dos Métodos dos Quantis para a cidade de Viçosa – MG. O método se mostrou bastante eficaz para identificação de anos chuvosos, quando relacionados com anos de El Niño e Oscilação Sul. Silva et al. (2002) utilizaram o índice de tendência de aridez nas cidades de Petrolina – PE, Campina Grande e João Pessoa – PB, destacando que os resultados obtidos devem ser vistos de maneira cautelosa, uma vez que as estações climatológicas utilizadas no trabalho estão rodeadas por edifícios, o que pode ter provocado a formação de “ilhas de calor”, influenciando diretamente nas medições de parâmetros climáticos.

3.4. Sistema de alerta de secas

A ocorrência da seca tem um efeito silencioso, diferentemente de outros desastres naturais como enchentes, terremotos e furacões. O fenômeno da seca, no entanto, não é menos grave que esses outros, pois seu comportamento é lento e pode persistir por longos períodos de tempo (NEVES, 2010).

Mesmo com os inúmeros impactos negativos observados, as políticas públicas muitas vezes são de caráter corretivo e reativo, ou seja, são colocadas em prática

somente após o início da ocorrência dessa anomalia climática. Agindo dessa maneira, torna-se necessário um maior investimento comparativamente à adoção de possíveis medidas preventivas para minimizar os danos associados a esse evento natural que não pode ser evitado (CANAMARY et al., 2015)

Por não se conseguir evitar a seca, muitos países utilizam sistemas de alerta precoce para melhor gestão das fases de desenvolvimento da seca. Para essa estratégia de governo são utilizados índices que permitem identificar o início, o fim e a severidade do fenômeno. A partir da classificação do evento de seca, segundo os índices, níveis de alerta podem ser estabelecidos e medidas adequadas de intervenção podem ser colocadas em prática, a cada fase de agravamento da seca.

Cunha (2008) definiu três níveis de alerta para a bacia de Guadiana, em Portugal, a partir da análise conjunta de classificação da intensidade de seca definida com base em três índices (IPN, MD e SPI). Tais níveis foram denominados de pré-alerta, alerta e emergência, além do estado de normalidade.

O nível de normalidade é a situação em que não se verifica a ocorrência de seca. O estágio de pré-alerta é aquele em que sinais iniciais de seca (seca moderada) são evidenciados e que a disponibilidade hídrica começa a reduzir. Agravando ainda mais no tempo (seca severa), surge então a necessidade de restringir certos usos da água e, por isso, considera-se o nível de alerta. No caso de secas extremas, entra em vigor o nível de emergência, uma vez que a água se torna escassa e, com isso, o conflito pelo uso da água se torna constante entre os usuários.

ONU (2007) considera o sistema de alerta uma ferramenta essencial e eficiente para reduzir os impactos dos desastres naturais. Para manter a eficácia do sistema é necessária a composição de quatro vertentes: o conhecimento do risco; o monitoramento e alerta; a divulgação e comunicação; e a capacidade de resposta.

O caráter preventivo e gradual possibilita o planejamento de ações de mitigação dos efeitos das secas, evitando atingir estágios avançados do problema, como crises no setor agropecuário e calamidade pública por falta de água para consumo humano (BATISTA JÚNIOR, 2012).

Parry e Carter (1987) apresentaram em seu trabalho políticas governamentais pré-impacto e pós-impacto em relação ao período de secas, na tentativa de amenizar os possíveis danos e implementar ações de caráter emergencial,

respectivamente. Como exemplo de ações que antecedem a seca tem-se: o desenvolvimento de um sistema de alerta, aumento das reservas hídricas e redução da demanda. Para as políticas de pós-impacto têm-se a transposição de água, a perfuração de poços profundos e o aumento de subsídios e créditos aos produtores agropecuários.

Logo, devido ao seu alto nível de importância e a capacidade de mitigar danos gerados por eventos de seca, os sistemas de alerta são essenciais para a sociedade de modo geral. Vale lembrar que para se ter um sistema de alerta consolidado é indispensável o desenvolvimento de um sistema de classificação de secas para diagnosticar os níveis de intensidades de seca existentes na área de interesse.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Bacia hidrográfica do rio Doce

A bacia do rio Doce está localizada na região sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W (Figura 4). A maior parte dos 86.710 km² de sua área está compreendida no Estado de Minas Gerais (86% da área) e o restante no Estado do Espírito Santo, abrangendo 230 municípios ao todo (PIRH DOCE, 2010).

Em Minas Gerais, a bacia é dividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs), às quais correspondem aos comitês estaduais de bacia:

- DO1 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Piranga;
- DO2 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba;
- DO3 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio;
- DO4 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Suaçuí;
- DO5 – Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Caratinga; e
- DO6 – Comitê de Bacia Hidrográfica Águas do rio Manhuaçu.



Figura 4. Bacia hidrográfica do rio Doce, com destaque para os principais cursos de água na bacia.
 Fonte: PIRH DOCE (2010).

A parte capixaba da bacia do rio Doce não é dividida em UPGRHs, no entanto, existe também a presença de comitês estaduais (Figura 5), formando as seguintes unidades de análise (UAs):

- UA Guandu;
- UA Santa Maria do Doce; e
- UA São José.

Assim, de modo a conduzir o estudo de forma mais organizada e eficiente, o trabalho foi desenvolvido a partir da subdivisão da bacia do rio Doce em nove unidades de análise (UAs), sendo seis UPGRHs em Minas Gerais e três UAs no Espírito Santo, conforme apresentam-se na Tabela 1.

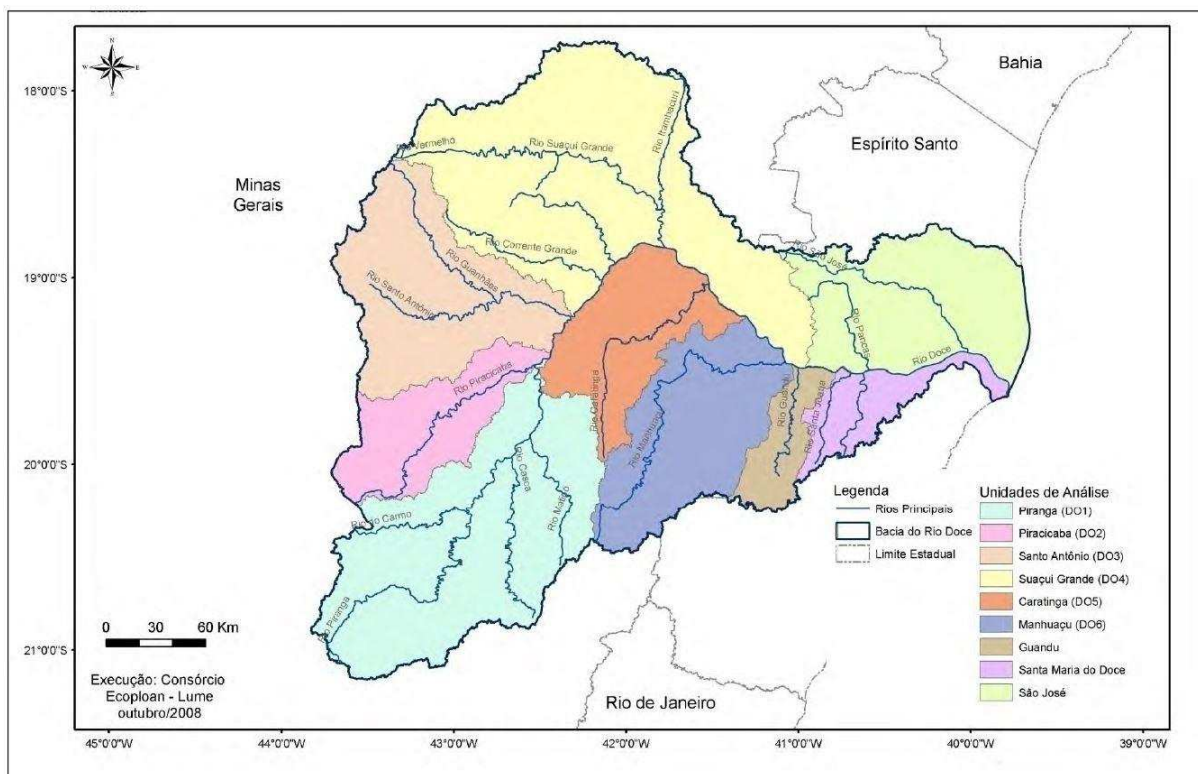


Figura 5. Unidades de análise (UAs) da bacia do rio Doce.
Fonte: PIRH DOCE (2010).

Tabela 1. Unidades de análise (UAs) da bacia do rio Doce e suas respectivas áreas de drenagem

Estado	Subdivisões da bacia do rio Doce	Área de drenagem (km ²)	Total (km ²)
MG	Bacia do rio Piranga	6.606,57	17.571,37
	Bacia do rio Casca	2.510,63	
	Bacia do rio do Carmo	2.277,95	
	Bacia do rio Matipó	2.549,74	
	Bacia Incremental (DO1)	3.626,48	
	Bacia do rio Piracicaba	5.465,38	
Bacia Incremental (DO2)	216,13		
MG	Bacia do rio Santo Antônio	10.429,46	10.756,89
	Bacia Incremental (DO3)	327,43	
MG	Bacia do rio Suaçuí Grande	12.412,99	21.555,33
	Bacia do rio Suaçuí Pequeno	1.719,39	
	Bacia do rio Corrente Grande	2.478,20	
MG	Bacia Incremental (DO4)	4.944,75	6.677,62
	Bacia do rio Caratinga	3.228,70	
MG	Bacia Incremental (DO5)	3.448,92	9.189,06
	Bacia do rio Manhuaçu	8.826,37	
MG	Bacia Incremental (DO6)	362,68	9.189,06
	Bacia do rio Manhuaçu	8.826,37	

ES	UA Guandu (UA7)	Rio Guandu	2.144,88	2.471,61
		Incremental Guandu	326,73	
	UA Santa Maria do Doce (UA8)	Rio Santa Maria do Doce	934,65	3.063,40
		Rio Santa Joana	891,4	
		Incremental	1.237,35	
	UA São José (UA9)	Rio São José	2.406,67	9.743,80
		Rio Pancas	1.181,44	
		Incremental	6.155,69	
	Total geral			86.710,59

Fonte: PIRH DOCE (2010).

Em relação ao regime pluviométrico anual, existe distinção entre os períodos seco e chuvoso na bacia hidrográfica do rio Doce. O primeiro é compreendido entre os meses abril e setembro e o segundo entre outubro e março, com maiores índices pluviométricos em dezembro. Considerando as normais climatológicas de 1961 a 1990, têm-se a precipitação média anual variando de 1.000 a 1.500 mm, sendo que no período chuvoso a precipitação total varia entre 800 a 1.300 mm e no período seco entre 150 a 250 mm (PIRH DOCE, 2010).

Essa variação se deve ao fato da bacia do Doce possuir três tipos climáticos, segundo a classificação de Köppen, sendo eles: tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos (*Cwb*); tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes (*Cwa*); e clima quente com chuvas de verão (*Aw*), presentes, respectivamente, na Serra da Mantiqueira e nascentes do rio Doce; nascentes de seus rios afluentes; e nos trechos médio e baixo rio Doce (PIRH DOCE, 2010).

O PIRH DOCE (2010) delimita a bacia do Doce em três trechos, o alto, o médio e o baixo rio Doce, tendo essa divisão sido realizada com base nas características fisiográficas e climáticas da bacia. O alto Doce compreende a drenagem desde as cabeceiras até a foz do rio Matipó; o médio Doce desde essa confluência até a divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e o baixo Doce desde a divisa dos estados até a foz em Regência, no município de Linhares – ES.

Dessa forma, foi estabelecido, para fins desse trabalho, que a bacia do rio Piranga (UA1) representa o alto Doce; que as bacias do rio Piracicaba (UA2), do rio Santo Antônio (UA3), do rio Suaçuí (UA4), do rio Caratinga (UA5) e do rio Manhuaçu (UA6) representam o médio Doce; e que as demais unidades de análise (UA7, UA8 e UA9) situam-se no baixo rio Doce.

4.2. Obtenção dos dados hidrometeorológicos da bacia do rio Doce

Para fins de aplicação, na bacia hidrográfica do rio Doce, dos quatro índices de determinação de seca (Índice de Porcentagem Normal – IPN, Método dos Decis – MD, Índice de Anomalia de Chuva – RAI e Índice de Precipitação Padronizada – SPI), os quais dependem exclusivamente de dados de precipitação, foi necessária a aquisição, tratamento e processamento das séries históricas de registros pluviométricos disponíveis, conforme detalhado na sequência.

4.2.1. Aquisição e tratamento dos dados pluviométricos

Para o cálculo dos índices IPN, MD, RAI e SPI foram utilizadas séries históricas mensais de precipitação das estações pluviométricas localizadas dentro e no entorno da bacia do rio Doce.

Em um primeiro momento, foram selecionados 165 postos pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – HydroWeb, da Agência Nacional de Águas – ANA, os quais foram submetidos a uma análise em seus registros de dados, levando-se em consideração a existência de um mínimo de 30 anos contínuos de dados mensais de precipitação, a disponibilidade de dados recentes e a existência de poucas falhas nos registros históricos (até 5% de falhas).

Ao final dessa avaliação, selecionaram-se 89 estações que se enquadravam dentro dos requisitos mínimos estabelecidos, as quais são apresentadas na Figura 6. A listagem com nome, código e demais informações das 89 estações selecionadas podem ser encontradas no APÊNDICE A.

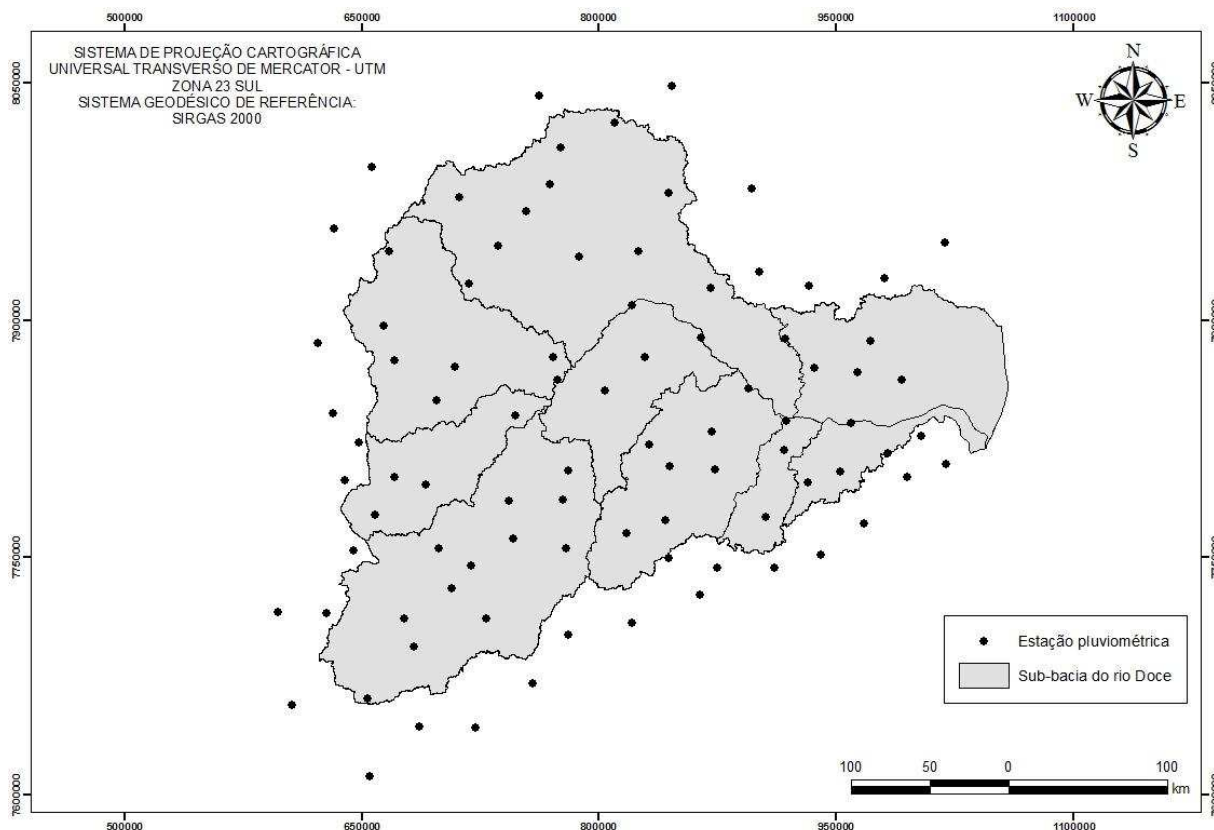


Figura 6. Estações pluviométricas da rede hidrometeorológica da ANA selecionadas para o estudo na bacia do rio Doce.

Considerando que o dado pluviométrico mensal mais recente disponibilizado pela ANA no sistema Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br>) foi o de setembro de 2015, e com o objetivo de se trabalhar com dados mais atuais, adotou-se, em todas as 89 estações pluviométricas selecionadas, o período base de outubro de 1985 a setembro de 2015, de modo a satisfazer o critério de se utilizar, no mínimo, 30 anos para o cálculo dos índices.

Destaca-se, ainda, que, segundo Marques (2010), o ano hidrológico na bacia do rio Doce tem início em outubro e final em setembro e, por essa razão, adotou-se o início do período base em outubro de 1985 e o término em setembro de 2015.

Os dados mensais disponibilizados pela ANA estavam consistidos apenas até o ano de 2005, sendo que a partir desta data, ou seja, de 2006 a 2015, foram disponibilizados apenas os dados brutos. Como se tinha a necessidade de trabalhar com dados mais recentes e, mesmo considerando que a situação ideal seria se trabalhar apenas com a base de dados consistida, decidiu-se por trabalhar também com o período de dados de 2006 a 2015.

De modo a evitar inconsistências nas análises, foi realizada a checagem de toda a base de dados desse período, visando identificar a existência de erros grosseiros ocasionados por falhas nos equipamentos ou por digitação equivocada das leituras pluviométricas.

4.2.2. Preenchimento de falhas

Adotou-se o método da regressão linear simples para o preenchimento de falhas nas 89 estações pluviométricas utilizadas. A estimativa dos dados nas estações com falhas em seus registros foi feita por meio de regressões lineares entre essas e as respectivas estações de apoio.

Na seleção de cada uma das estações de apoio utilizada para fins de preenchimento adotou-se como critério selecionar apenas estações de apoio que não apresentavam falhas no mesmo período a ser preenchido na estação com falhas em seus registros. Além disso, adotou-se um coeficiente de determinação (R^2) maior ou igual a 0,70 para fins de seleção das estações de apoio, de modo a garantir maior confiabilidade à metodologia (BARBOSA et al., 2005; PRUSKI et al., 2004).

Destaca-se que o preenchimento de falhas foi realizado para dados mensais, sendo adotado apenas nas estações que apresentavam uma porcentagem máxima de 5% de falhas, o que representa um total de 18 meses na série de dados de 30 anos.

No APÊNDICE B pode-se verificar a estação de apoio adotada para fins de preenchimento em cada uma das estações que apresentavam falhas em seus registros, além do valor de R^2 , da equação de regressão linear e da porcentagem de falhas existentes.

4.2.3. Precipitação média baseada nos polígonos de Thiessen

De forma a avaliar a seca em toda a área de estudo, utilizou-se a precipitação média para cada uma das UAs da bacia do rio Doce. Para obter a precipitação média foi utilizada a espacialização dos registros de chuvas segundo o método dos polígonos de Thiessen (THIESSEN, 1911).

O método dos polígonos de Thiessen atribui um peso aos totais precipitados em cada uma das estações, diretamente proporcional à área de influência de cada uma delas. As áreas de influência dos postos pluviométricos, traçadas com o auxílio do software ArcGIS 10.2® da *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, foram estabelecidas ao se unir pontos adjacentes por linhas retas e ao traçar as mediatrizes dessas retas, formando polígonos (Figura 7).

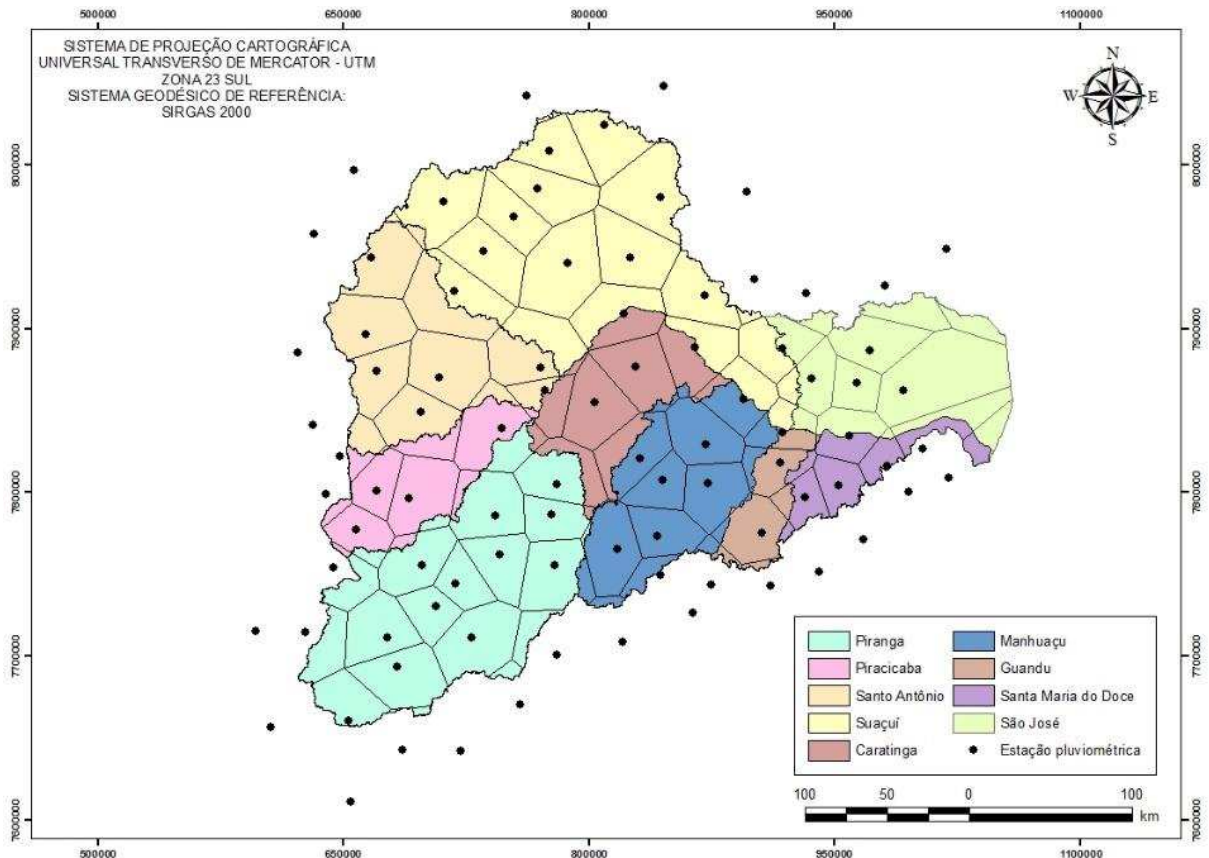


Figura 7. Área de influência das estações pluviométricas com base na metodologia dos polígonos de Thiessen.

Cunha (2008) e Marques (2006) também aplicaram a ponderação dos polígonos de Thiessen para obter a precipitação média na bacia hidrográfica de estudo. Tal ponderação é obtida a partir da Equação 1.

$$P = \sum_{i=1}^n \left(P_i \frac{S_i}{S} \right) \quad (1)$$

em que,

P = precipitação média na área de estudo (mm);

P_i = precipitação média na área do polígono (mm);

S_i = área da região inserida no polígono i (km²); e

S = área total da região considerada (km²).

No APÊNDICE C apresentam-se as estações pluviométricas utilizadas para fins de obtenção da precipitação média em cada UA de estudo, bem como suas áreas de influência.

4.3. Obtenção dos índices de seca

Obtidas as séries históricas para cada uma das nove UAs da bacia do rio Doce, utilizou-se planilhas eletrônicas para a organização das séries de precipitação e realização dos cálculos dos quatro índices de seca. Especificamente para o cálculo do SPI, também foi utilizado o programa *SPI Program*, o qual está disponível gratuitamente no endereço eletrônico do NDMC dos Estados Unidos (<http://drought.unl.edu>) (NDMC, 2016).

4.3.1. Índice de Porcentagem Normal – IPN

Para o cálculo do IPN, que expressa, em porcentagem, a razão entre a precipitação atual e a precipitação normal (média de 30 anos) de uma região, utilizou-se a Equação 2.

$$IPN = \frac{P_{atual}}{P_{normal}} \quad (2)$$

em que,

P_{atual} = precipitação em um dado local na escala de tempo adotada (mm); e

P_{normal} = precipitação média do local para o período de 1985 a 2015 (mm).

Os valores obtidos para o índice IPN foram relacionados a classes de severidades de seca, conforme apresentadas no item 4.5.1.

4.3.2. Método dos Decis – MD

Para o cálculo desse índice, agrupou-se os valores de precipitação em decis (décimos da distribuição dos dados), dividindo-se a série em dez partes iguais, em ordem crescente, da menor precipitação até a precipitação mais elevada, de forma a gerar uma distribuição de frequências acumuladas.

Por definição o quinto decil é igual à mediana, ou seja, equivale ao valor de precipitação associado à frequência de 50%. O primeiro decil corresponde aos registros de precipitação que são superados em 90% das vezes, ou seja, existe uma probabilidade de ocorrência dessa precipitação em 10% dos eventos. O segundo decil corresponde aos valores que são superados em 80% dos casos e, assim, sucessivamente.

Essa divisão de classes foi importante para determinar a probabilidade de ocorrência de um dado evento de seca, com base na classificação de intensidades, apresentada no item 4.5.1.

4.3.3. Índice de Anomalia de Chuva – RAI

O cálculo do RAI foi realizado utilizando-se as Equações 3 e 4 (ROOY, 1965).

$$RAI = 3 \left[\frac{(p - \bar{p})}{(\bar{m} - \bar{p})} \right] \quad (3)$$

$$RAI = -3 \left[\frac{(p - \bar{p})}{(\bar{x} - \bar{p})} \right] \quad (4)$$

em que,

p = precipitação atual (mm);

\bar{p} = precipitação média do local para o período de 1985 a 2015 (mm);

\bar{m} = média das dez maiores precipitações (mm); e

\bar{x} = média das dez menores precipitações (mm).

As anomalias positivas, com valores acima da média histórica de precipitações, foram calculadas pela Equação 3. Para as anomalias negativas, as quais estão relacionadas aos períodos de déficit de chuvas, aplicou-se a Equação 4. Os valores obtidos foram posteriormente classificados conforme a metodologia apresentada no item 4.5.1.

4.3.4. Índice de Precipitação Padronizada – SPI

Para fins de obtenção do SPI, o primeiro passo foi o ajuste da série de dados pluviométricos a uma distribuição probabilística. Para tanto, conforme recomendações de Blain e Brunini (2007a), Castro (1996), Gois (2005), Santos e

Sansigolo (2010), Thom (1966) e Wilks (1990), procedeu-se ao ajuste dos dados à distribuição Gama, devido ao fato de a mesma conseguir descrever adequadamente o comportamento da chuva, de maneira flexível, envolvendo apenas dois parâmetros (forma e escala).

Com base na distribuição probabilística Gama, a relação entre a probabilidade de ocorrência e os valores de precipitação, pode ser expressa pela Equação 5.

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (5)$$

em que,

α = parâmetro de forma da distribuição gama, $\alpha > 0$ (adimensional);

β = parâmetro de escala da distribuição gama, $\beta > 0$ (mm);

x = total de precipitação, $x > 0$ (mm);

$\Gamma(\alpha)$ = função gama; e

$g(x)$ = distribuição gama.

Os parâmetros α e β foram estimados para cada local, para cada escala de tempo e para cada mês do ano. A função gama foi obtida por meio da Equação 6.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (6)$$

A máxima probabilidade aproximada dos parâmetros α e β foi calculada pelas Equações 7, 8 e 9. Essa aproximação é conhecida como método da máxima verossimilhança de Thom (1966).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (8)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (9)$$

em que,

\bar{x} = média aritmética da precipitação pluvial (mm); e

n = números de observações da série de precipitação (adimensional).

Os resultados dos parâmetros foram utilizados para calcular a probabilidade cumulativa de um evento de precipitação para a escala de tempo considerada. A probabilidade cumulativa foi calculada pela Equação 10.

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (10)$$

Substituindo t por x/β na Equação 9 obteve-se a função gama incompleta, apresentada na Equação 11.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (11)$$

A distribuição é indefinida para x = 0, no entanto, é possível que a série histórica de registros tenha valores iguais a zero de precipitação, tornando-se necessário definir a função para esses valores (Equação 12).

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (12)$$

em que,

$H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa; e

q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);

m = número de observações com chuva igual a zero (adimensional); e

n = número de observações de chuva maior do que zero (adimensional).

Se m é o número de zeros em uma série de precipitações, Thom (1966) indica que q pode ser estimado por $m/n+1$.

O próximo passo consistiu em transformar a distribuição de probabilidade cumulativa $H(x)$ em uma variável aleatória normalizada (Z), com média zero e desvio padrão igual a unidade, que corresponde ao valor de SPI.

Como não há a necessidade de reproduzir vários gráficos para cada localidade e em todas as escalas temporais possíveis e para cada mês do ano, o valor de Z ou SPI foi obtido mais facilmente pela aproximação matemática desenvolvida por

Abramowitz e Stegun (1965), que é capaz de converter a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal da variável Z, sendo essa variável definida pelas Equações 13 e 14.

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (13)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (14)$$

Sendo t definido pelas Equações 15 e 16.

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (15)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (16)$$

Sendo os coeficientes utilizados nas Equações 13 e 14 correspondentes a:

$$C_0 = 2,515517; C_1 = 0,802853; C_2 = 0,010328;$$

$$d_1 = 1,432788; d_2 = 0,189269; d_3 = 0,001308.$$

4.4. Aplicação dos índices em diferentes escalas de tempo

No presente trabalho, todos os índices foram aplicados nas escalas de tempo mensal, trimestral e anual.

A escala mensal, por ser uma escala de tempo curta, com baixos valores de precipitação, pode gerar resultados enganosos para os índices (ALTAMIRANO, 2010). Para a escala trimestral adotou-se trimestres fixos, sendo o primeiro deles composto por outubro, novembro e dezembro, no início do ano hidrológico, e o último em julho, agosto e setembro, finalizando o ano hidrológico da bacia do rio Doce. Seguindo o mesmo raciocínio, a escala anual foi estudada com base no ano hidrológico, com início em outubro e fim no mês de setembro do ano seguinte.

É importante mencionar que as precipitações não tem distribuição uniforme em torno da média, principalmente nas escalas de tempo reduzida (CUNHA, 2008). Assim, buscou-se trabalhar com várias escalas de tempo de modo a evitar que essa condição pudesse gerar grandes interferências nos resultados dos índices e de

modo a permitir a comparação dos resultados dos índices nas diferentes escalas de tempo.

4.5. Análise da severidade de seca

Considerando que a análise dos resultados numéricos dos diversos índices de seca é muitas vezes de difícil compreensão, procurou-se avaliar o grau de severidade da seca com base nas classificações propostas para cada um dos índices avaliados. A utilização das classificações visou permitir verificar a frequência das diferentes intensidades de seca dos índices quando aplicados na bacia do Doce.

4.5.1. Classificação da severidade de secas e adaptações para os índices

Os índices são elementos-chave para a determinação do início, fim e severidade da seca, embora também possam ser aplicados para analisar o comportamento espacial e temporal de excessos de chuva. Como o foco deste trabalho foi verificar a escassez de precipitação, será apresentada apenas a classificação das intensidades para os eventos de seca.

Todos os quatro índices sofreram adaptações em suas classes e intervalos de classificação, por meio de uma padronização no sistema de classificação em quatro intensidades: normal (N), seca moderada (SM), seca severa (SS) e seca extrema (SE). Os intervalos numéricos das classes sofreram modificações a fim de adequar a utilização dos índices na região de estudo, pois a maior parte destes índices foi desenvolvida para regiões semiáridas, com precipitação média anual abaixo de 500 mm, distante das condições pluviométricas médias da bacia do Doce.

Na Tabela 2 apresenta-se a classificação do IPN sugerida por Cunha (2008) e a classificação proposta no presente trabalho, na qual foram adotados diferentes intervalos numéricos para cada uma das quatro classes de intensidade de seca. Essa nova faixa de intervalos proposta visa adaptar a classificação às condições de precipitação da bacia do Doce, uma vez que a classificação apresentada por Cunha (2008) foi aplicada para a bacia hidrográfica do rio Guadiana, que tem uma média anual de 500 a 600 mm. Nota-se que o volume de chuvas é bem menor e, por isso, os intervalos são diferentes (maiores), de modo a identificar adequadamente as anomalias climáticas para a dada região.

Tabela 2. Relação entre os valores de IPN e intensidade de seca

Cunha (2008)		Proposto	
IPN	Intensidade da seca	IPN	Intensidade da seca
$0,85 \leq \text{IPN} < 1,10$	Normal	$0,90 \leq \text{IPN} < 1,10$	Normal
$0,75 \leq \text{IPN} < 0,85$	Seca Moderada	$0,81 \leq \text{IPN} < 0,90$	Seca Moderada
$0,50 \leq \text{IPN} < 0,75$	Seca Severa	$0,75 \leq \text{IPN} < 0,81$	Seca Severa
$\text{IPN} < 0,50$	Seca Extrema	$\text{IPN} < 0,75$	Seca Extrema

O Método de Decis divide a série histórica de dados em 10 partes iguais. O primeiro decil corresponde aos valores de precipitação que não superam os 10% dos valores mais baixos da série, o segundo decil corresponde a 20% e, assim, sucessivamente. Na Tabela 3 apresenta-se a classificação das secas segundo Gibbs e Maher (1967) e, também, a proposta.

Tabela 3. Classificação dos decis quanto à severidade de seca usando o índice MD

Gibbs e Maher (1967)		Proposto	
Decis	Intensidade da seca	Decis	Intensidade da seca
10-9	Muito Úmido	5 e 6	Normal
8-7	Úmido	3 e 4	Seca Moderada
6-5	Próximo ao Normal	2	Seca Severa
4-3	Seco	1	Seca Extrema
2-1	Muito Seco		

Como se pode observar, a classificação original divide a série de dados em uma frequência de 20% para cada uma das classes. Ao verificar as classes, nota-se que isso nem sempre isso acontece na realidade, ou seja, a frequência de ocorrência de eventos normais tende a ser maior do que para eventos extremos mínimos e máximos.

Assim, visando levar esse fator em consideração na classificação do índice MD, as classes mais extremas de intensidade seca terão suas frequências reduzidas pela metade, ou seja, o segundo decil referente apenas à classe de seca severa e o primeiro decil à classe de seca extrema.

De forma a manter a padronização das classes de intensidade de seca nos quatro índices adotados, a classificação feita por Rooy (1965) foi modificada, agregando a classe “Seca suave” à classe “Normal” na classificação proposta no presente trabalho (Tabela 4).

Tabela 4. Relação entre os valores de RAI e intensidade de seca

Rooy (1965)		Proposto	
RAI	Intensidade da seca	RAI	Intensidade da seca
$-0,50 < \text{RAI} < 0,50$	Normal	$-2,00 < \text{RAI} \leq 2,00$	Normal
$-2,00 < \text{RAI} \leq -0,50$	Seca Suave	$-3,00 < \text{RAI} \leq -2,00$	Seca Moderada
$-3,00 < \text{RAI} \leq -2,00$	Seca Moderada	$-4,00 < \text{RAI} \leq -3,00$	Seca Severa
$-4,00 < \text{RAI} \leq -3,00$	Seca Alta	$\text{RAI} \leq -4,00$	Seca Extrema
$\text{RAI} \leq -4,00$	Extremamente Seca		

Na Tabela 5 resume-se a classificação do SPI, proposta por McKee et al. (1993) e por Agnew (2000), essa última adotada no presente trabalho. Vários trabalhos propõem alterações na classificação desse índice, uma vez que McKee et al. (1993) obtiveram esses valores de classificação para um região extremamente seca do Colorado – EUA, com uma precipitação média da ordem de 400 mm/ano. Apesar de Agnew (2000) também ter utilizado a metodologia SPI em regiões secas, a mesma consegue detectar melhor as classes iniciais de seca nas condições da bacia do rio Doce.

Tabela 5. Relação entre os valores de SPI e intensidades de seca

McKee et al. (1993)		Agnew (2000)	
SPI	Intensidade da seca	SPI	Intensidade da seca
$-1,00 < \text{SPI} \leq 0,00$	Seca Suave	$-0,84 < \text{SPI} \leq 0,84$	Normal
$-1,50 < \text{SPI} \leq -1,00$	Seca Moderada	$-1,28 < \text{SPI} \leq -0,84$	Seca Moderada
$-2,00 < \text{SPI} \leq -1,50$	Seca Severa	$-1,65 < \text{SPI} \leq -1,28$	Seca Severa
$\text{SPI} \leq -2,00$	Seca Extrema	$\text{SPI} \leq -1,65$	Seca Extrema

4.5.2. Análise da distribuição dos índices

Com o propósito de analisar a distribuição dos quatro índices de seca nas distintas UAs da bacia do rio doce, calculou-se o número de ocorrência das classes de intensidades de seca para cada um dos índices. Assim, foi possível identificar a frequência das classes e caracterizar os eventos como recorrentes ou esporádicos.

4.6. Classificação global dos índices de seca na escala de tempo anual

Após calcular todos os quatro índices de seca, criou-se uma classificação global para avaliação do fenômeno de seca nas nove UAs da bacia do rio Doce, na escala de tempo anual. Essa classificação global leva em consideração as classificações de grupos de intensidades que foram previamente padronizados, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Classificação da intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI e limites de classe propostos e adotados no presente trabalho

Intensidade	Intervalo de valores dos índices			
	IPN	MD	RAI	SPI
Normal	$0,90 \leq \text{IPN} < 1,10$	5 e 6	$-2,00 < \text{RAI} \leq 2,00$	$-0,84 < \text{SPI} \leq 0,84$
Seca Moderada	$0,81 \leq \text{IPN} < 0,90$	3 e 4	$-3,00 < \text{RAI} \leq -2,00$	$-1,28 < \text{SPI} \leq -0,84$
Seca Severa	$0,75 \leq \text{IPN} < 0,81$	2	$-4,00 < \text{RAI} \leq -3,00$	$-1,65 < \text{SPI} \leq -1,28$
Seca Extrema	$\text{IPN} < 0,75$	1	$\text{RAI} \leq -4,00$	$\text{SPI} \leq -1,65$

Foram analisados os resultados de cada um dos índices, segundo a classificação de severidade de seca, em cada ano do período base (1985-2015), de forma a transformar essa classificação qualitativa em uma classificação quantitativa. Dessa forma, cada ano possui uma nota global que é utilizada para a o sistema de classificação de secas, o qual está descrita no item 4.7.

Na Tabela 7 apresenta-se as classes de intensidade e suas respectivas notas que um dado índice pode receber.

Tabela 7. Notas para as classes de intensidade de seca visando à classificação global

Intensidade	Nota
Normal	0
Seca Moderada	1
Seca Severa	2
Seca Extrema	3

De acordo com essa nova classificação, cada índice receberá uma nota conforme a intensidade de seca e, ao final, esses valores serão somados gerando uma nota global. Dessa forma, a classificação global pode variar de 0, se todos os índices obtiverem intensidade “Normal”, até 12, no caso de um certo ano ter intensidade “Seca Extrema” para os quatro índices. Esse mesmo raciocínio pode ser

aplicado para a escala mensal e trimestral, porém os resultados são de difícil interpretação.

4.7. Sistema de classificação de secas anuais

Apesar da possibilidade de estudar e classificar a seca utilizando índices, existe uma grande dificuldade em interpretar os resultados na escala de tempo trimestral e, principalmente, mensal. Conforme destacado anteriormente, a precipitação em escalas mensais ou trimestrais não seguem a distribuição normal e isso implica que os valores de média e mediana não sejam os mesmos, podendo gerar resultados enganosos para os índices quando aplicados nessas curtas escalas de tempo (NDMC, 2016). Sendo assim, aplicou-se a seguinte classificação apenas na escala de tempo anual, a qual está diretamente associada a eventos de seca hidrológica.

Para criar o sistema de classificação de secas, levou-se em consideração que todos os índices possuem o mesmo peso sobre a nota final, conforme explicado no item 4.6. Esse valor global foi utilizado para determinar a condição climática de todos os anos do período base adotado no trabalho, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8. Sistema de classificação de secas anuais com base nos intervalos de notas globais

Condição climática	Nota
Normalidade	0 - 2
Atenção	3 - 6
Alerta	7 - 9
Emergência	10 -12

As notas para as condições climáticas foram estabelecidas com base nos possíveis somatórios de notas. Na Tabela 9 podem ser observadas algumas combinações de classes de intensidade de seca. As demais combinações, embora não apresentadas, tiveram suas notas levadas em consideração da mesma maneira para estabelecer a condição climática de um dado ano avaliado.

Tabela 9. Algumas das possíveis combinações das classes de intensidade de seca para determinação da nota e da consequente condição climática

IPN	MD	RAI	SPI	Nota	Condição climática
N	N	N	N	0	Normalidade
N	N	N	SM	1	
N	N	SM	SM	2	
N	SM	SM	SM	3	Atenção
SM	SM	SM	SM	4	
SM	SM	SM	SS	5	
SM	SM	SS	SS	6	
SM	SS	SS	SS	7	Alerta
SS	SS	SS	SS	8	
SS	SS	SS	SE	9	
SS	SS	SE	SE	10	Emergência
SS	SE	SE	SE	11	
SE	SE	SE	SE	12	

N = Normal; SM = Seca Moderada; SS = Seca Severa; e SE = Seca Extrema.

Ao aplicar o sistema de classificação de secas anuais buscou-se verificar a periodicidade das anomalias mais extremas e um possível padrão existente na série temporal.

O objetivo do sistema de classificação proposto foi permitir examinar as condições climáticas de todos os anos e avaliar se as secas mais severas se tornaram mais recorrentes ou não nos últimos anos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Precipitação média das unidades de análise (UAs) da bacia do rio Doce

A análise da precipitação média na bacia do rio Doce segue apresentada de duas formas, sendo a primeira com base nas nove UAs e considerando os três períodos de tempo estudados (mensal, trimestral e anual), e a segunda baseada nas seções correspondentes ao alto, médio e baixo rio Doce e considerando apenas o período mensal.

As precipitações médias mensais, trimestrais e anuais de longa duração das nove UAs, bem como de toda a bacia do rio Doce são apresentadas na Tabela 10. O período base levado em consideração nos cálculos foi de outubro de 1985 a setembro de 2015, contemplando assim 360 dados mensais para cada região estudada.

A bacia do rio Piracicaba (UA2) apresentou a maior precipitação média mensal (327,9 mm) na bacia do rio Doce, sendo o mês de dezembro o mais chuvoso. Na UA2 verificou-se ainda a maior média trimestral (661,7 mm), registrada no período de outubro/novembro/dezembro, assim como a maior média anual (1.436,5 mm).

As menores médias mensais e trimestrais de precipitação ocorrem na bacia do rio Caratinga (UA5), sendo o mês de julho (8,3 mm) e o trimestre julho/agosto/setembro (54,9 mm) os períodos de menor precipitação na bacia do rio Doce.

Os totais anuais médios na bacia do rio Doce variaram de 1.031,3 mm, na bacia do rio São José (UA7), a 1.436,5 mm, na bacia do rio Piracicaba (UA2), sendo o valor médio para toda a bacia do rio Doce de 1.175,2 mm. A partir desses valores é possível verificar que existe uma grande variabilidade espacial da chuva dentro da bacia do Doce, correspondendo a mais de 400 mm de amplitude entre os valores extremos.

Cupolillo et al. (2008) estudaram a climatologia da bacia do rio Doce e sua relação com a topografia local no período de 1973 a 2002, verificando que as maiores precipitações médias anuais ocorreram na bacia do rio Santo Antônio (UA3) e na bacia do rio Piracicaba (UA2) e a menor na bacia do rio Caratinga (UA5).

Tabela 10. Precipitações médias mensais, trimestrais e anuais, em mm, das unidades de análise (UAs) e da bacia hidrográfica do rio Doce

UAs	P mensal (mm)												P trimestral (mm)				P anual (mm)
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J/F/M	A/M/J	J/A/S	O/N/D	
UA1	244,4	133,6	153,3	68,5	36,3	13,7	10,3	15,0	51,8	100,2	213,2	279,6	531,3	118,6	77,1	592,9	1.319,9
UA2	258,7	143,9	170,3	74,8	38,5	14,7	9,7	15,5	48,7	99,9	233,9	327,9	572,9	128,0	73,9	661,7	1.436,5
UA3	215,6	126,3	158,5	75,6	31,4	13,1	9,8	13,8	36,4	97,2	229,8	306,7	500,3	120,1	60,0	633,7	1.314,2
UA4	160,9	96,1	126,1	57,2	30,6	14,6	13,0	16,1	30,5	88,2	203,3	243,9	383,1	102,4	59,6	535,4	1.080,4
UA5	166,4	93,1	118,9	55,6	30,1	13,4	8,3	13,2	33,4	78,5	200,8	257,1	378,5	99,1	54,9	536,4	1.068,9
UA6	185,5	95,4	128,9	61,6	33,7	15,9	9,6	15,7	40,6	89,1	197,2	270,0	409,9	111,2	65,9	556,3	1.143,2
UA7	151,5	82,0	131,9	57,5	37,3	18,9	13,4	18,1	30,4	83,8	184,2	222,2	365,5	113,7	61,9	490,3	1.031,3
UA8	136,5	84,0	132,2	69,3	39,8	30,4	25,0	30,0	35,6	98,9	191,8	214,7	352,7	139,6	90,7	505,5	1.088,4
UA9	135,8	84,7	135,3	71,1	35,9	30,9	30,4	36,8	37,2	95,0	191,9	209,0	355,8	137,8	104,5	495,8	1.093,9
Doce	183,9	104,4	139,5	65,7	34,8	18,4	14,4	19,4	38,3	92,3	205,1	259,0	427,8	118,9	72,1	556,4	1.175,2

Legenda: J = janeiro; F = fevereiro; M = março; A = abril; M = maio; J = junho; J = julho; A = agosto; S = setembro; O = outubro; N = novembro; D = dezembro; UA1 = bacia do rio Piranga; UA2 = bacia do rio Piracicaba; UA3 = bacia do rio Santo Antônio; UA4 = bacia do rio Suaçuí; UA5 = bacia do rio Caratinga; UA6 = bacia do rio Manhuaçu; UA7 = bacia do rio Guandu; UA8 = bacia do rio Santa Maria do Doce; UA9 = bacia do rio São José; e Doce = bacia do rio Doce.

No presente estudo, que utilizou série histórica de dados mais recente (1985 a 2015), a bacia do rio Caratinga (UA5) apresentou a segunda menor precipitação média dentre todas as UAs e, conforme destacado anteriormente, a bacia do rio Piracicaba (UA2) foi a que obteve as maiores médias anuais. Dessa forma, os resultados do trabalho apresentado por Cupolillo et al. (2008) corroboram, em grande medida, os resultados obtidos no presente trabalho.

Na Figura 8 são apresentados os dados de precipitação média mensal para o alto, médio e baixo rio Doce, onde se comprova que o regime de precipitações mensais das três regiões da bacia do rio Doce segue uma mesma tendência. Nos três primeiros meses do ano existe superioridade de precipitações no alto Doce, seguido do médio Doce e com menores valores no baixo Doce.

Cupolillo et al. (2008) também obtiveram resultados semelhantes, com maiores médias mensais de precipitação na estação chuvosa no alto Doce e menores médias no baixo Doce. Os autores afirmam que fatores topográficos influenciam diretamente no volume e distribuição das chuvas na bacia, bem como a atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul.

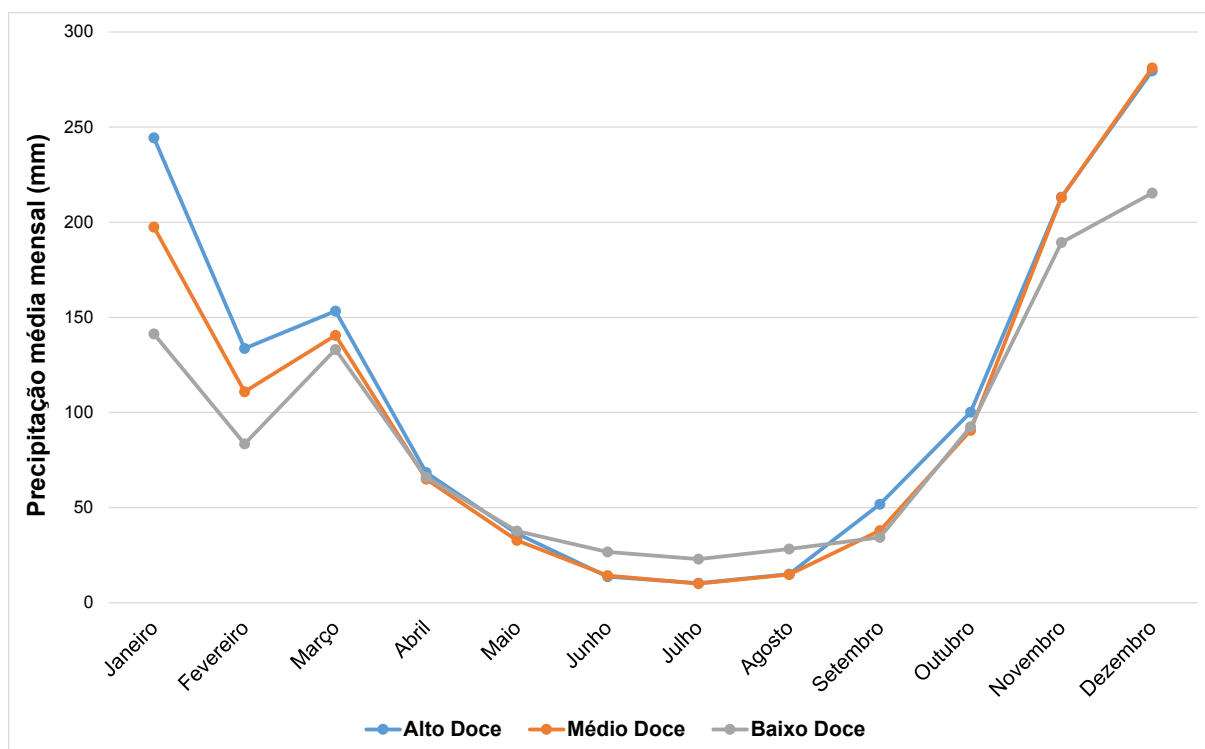


Figura 8. Precipitações médias mensais para o alto, médio e baixo rio Doce.

O semestre seco, compreendido entre os meses de abril a setembro, possui médias variando, aproximadamente, entre 10 mm e 70 mm. No período de abril a junho as regiões passam por um período de recessão de chuvas, voltando a ter uma leve melhoria dos índices pluviométricos nos meses de agosto e setembro.

Ainda analisando o período seco, percebe-se uma leve superioridade do regime de chuvas no baixo Doce. Cupolillo et al. (2008) associam esse comportamento à influência das correntes oceânicas nesse período do ano.

A partir de outubro inicia-se o período das chuvas na bacia do rio Doce, com valores médios de precipitação ultrapassando 90 mm em todas as regiões. Nos meses de novembro e dezembro as regiões do alto e médio rio Doce possuem praticamente as mesmas médias de precipitação, com valores de 213,0 e 281,0 mm, respectivamente, enquanto que no baixo Doce esse valor é um pouco menor, ficando próximo de 200 mm para ambos os meses.

Os sistemas frontais e a convecção tropical são os principais fatores de formação das chuvas na bacia do Doce, e a topografia faz com que ela se distribua desigualmente entre as regiões (CUPOLILLO et al., 2008).

5.2. Aplicação dos índices de secas em diferentes escalas de tempo

Os resultados dos índices IPN, MD, RAI e SPI são apresentados em três diferentes escalas de tempo (mensal, trimestral e anual) para as nove UAs da bacia hidrográfica do rio Doce.

Para melhor apresentar os resultados, foi abordado o número de ocorrências das classes de intensidade de seca para as escalas de tempo mensal e trimestral. Por fim, foi apresentado o sistema de classificação de secas para todos os anos do período base, de acordo com a classificação global.

5.2.1. Avaliação da severidade de seca na escala mensal

Na Tabela 11 apresenta-se o número de ocorrências de secas mensais com base nas classes de intensidade de seca (N, SM, SS, SE) dos índices IPN, MD, RAI e SPI, no período de 1985 a 2015. É possível observar que o número de ocorrências não totaliza 360 dados (meses) em nenhum momento, uma vez que, nesse trabalho,

apenas as classes de intensidades para as secas e a intensidade normal foram levadas em consideração, excluindo as classes de intensidades de eventos úmidos.

O número de ocorrências de classes de intensidades de seca obtido na escala mensal variou muito nos índices de seca utilizados, em função dos mesmos serem calculados de diferentes formas e terem distintos limites numéricos para as classes de intensidade de seca, conforme proposto no item 4.5.1.

Tabela 11. Número de ocorrências de secas mensais com base nas classes de intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI, no período de 1985 a 2015

UAs	IPN				MD				RAI				SPI			
	N	SM	SS	SE	N	SM	SS	SE	N	SM	SS	SE	N	SM	SS	SE
UA1	49	14	10	151	72	72	36	36	157	61	50	10	206	42	18	19
UA2	43	13	16	137	72	72	36	36	167	57	51	11	207	39	19	22
UA3	39	24	12	148	72	72	36	36	167	57	50	10	200	45	25	14
UA4	32	18	12	154	72	72	36	36	162	64	49	10	217	37	20	16
UA5	40	23	8	156	72	72	36	36	158	70	46	10	209	45	15	18
UA6	40	27	10	151	72	72	36	36	169	60	45	11	212	34	19	20
UA7	33	19	16	160	72	72	36	36	167	58	56	7	211	38	19	19
UA8	51	27	19	145	72	72	36	36	171	62	45	9	205	48	15	16
UA9	32	24	16	155	72	72	36	36	172	57	46	11	214	37	14	21

Legenda: N = normal; SM = seca moderada; SS = seca severa; SE = seca extrema; UA1 = bacia do rio Piranga; UA2 = bacia do rio Piracicaba; UA3 = bacia do rio Santo Antônio; UA4 = bacia do rio Suaçuí; UA5 = bacia do rio Caratinga; UA6 = bacia do rio Manhuaçu; UA7 = bacia do rio Guandu; UA8 = bacia do rio Santa Maria do Doce; e UA9 = bacia do rio São José.

Para o IPN verifica-se um alto número de ocorrências de seca extrema (SE) em todas as UAs da bacia do rio Doce. Isso se deve ao fato de que neste índice basta se ter um valor de IPN < 0,75 para que se classifique a seca como extrema, ou seja, basta que a precipitação seja menor que 75% da média de longo período de um certo mês para o evento ser classificado como seca extrema.

Neste caso, o número de ocorrências de seca moderada (SM) e severa (SS) é menor devido à pequena variação entre os limites inferiores e superiores de cada classe, que são $0,81 \leq \text{IPN} < 0,90$ e $0,75 \leq \text{IPN} < 0,81$, respectivamente.

As três UAs do baixo rio Doce apresentaram os maiores números de ocorrências de secas segundo o índice IPN. A UA7 (bacia do rio Guandu) e a UA9 (bacia do rio São José) tiveram 195 meses de seca, seguidas da UA8 (bacia do rio Santa Maria do Doce) com 191 meses.

Esses números estão relacionados ao fato de as três UAs (7, 8 e 9) possuírem as menores médias mensais de precipitação entre todas as unidades de análise, na maioria dos meses. Como os limites de classes do índice são os mesmos, independentemente da área de aplicação, é de se esperar que essas UAs tenham realmente maior número de ocorrências de seca em relação às demais unidades de análise. A análise gráfica das precipitações médias do baixo rio Doce apresentada na Figura 8 auxilia o entendimento deste comportamento.

O MD teve o número de ocorrências das classes de intensidades de seca constante, independente da UA de estudo. Isso acontece porque o método dos decis divide a amostra em 10 partes iguais e, assim, cada decil corresponde a uma frequência de 10%. Por isso a classe SE, bem como a classe SS, apresentaram 36 eventos de seca, que correspondem a 10% dos menores eventos (decil 1) e a 10% menores subsequentes (decil 2), respectivamente. A classe SM apresentou 72 casos em cada UA, pois tal intensidade é relacionada aos decis 3 e 4, compreendendo 20% do total dos meses da série histórica.

Os valores de ocorrências das intensidades de seca, por meio do RAI, seguem a mesma tendência em todas as UAs, com números de eventos superior de SM, seguidos de SS e, por fim, SE. Explica-se tal comportamento a partir da análise dos cálculos do índice, pois conforme apresentado na metodologia, são levados em consideração apenas os 10 menores valores de precipitação e a média de um dado mês para o cálculo do RAI. Além disso, para atingir a classificação de seca extrema (SE) o índice RAI precisa ser menor ou igual a $-4,0$, o que é pouco provável de acontecer, explicando assim a menor ocorrência dessa classe. Essa probabilidade aumenta à medida que as intensidades de seca se tornam mais brandas.

Segundo o índice RAI, a UA5 (bacia do rio Caratinga) foi a que apresentou mais meses em estado de seca, com 126 casos. Tal resultado está diretamente relacionado ao regime de precipitações da bacia. A UA5 possui a segunda menor média precipitada anual e, também, o mês de julho com a menor média entre todas as UAs.

Percebe-se que, com exceção da UA5 para SM, o número de ocorrências das três classes de seca em todas as UAs foi relativamente homogêneo, com variação de 57 a 64 na classe SM, de 45 a 51 na classe SS e de 7 a 11 na classe SE.

Os valores de ocorrências das classes de intensidade de seca do índice SPI seguem a mesma tendência em todas as UAs, ou seja, a classe SM apresenta maior número de ocorrências em todas as UAs, seguida pelas classes SS e SE. Os valores de SM variam de 34 a 45, os de SS de 14 a 25 e os de SE de 14 a 22. Nota-se uma maior variação para as duas primeiras classes em relação à classe SE, decorrente da forma como o índice é calculado.

Vale lembrar que os resultados obtidos no índice SPI representam a variação do evento, em desvios padrão, sobre o valor médio a partir de uma distribuição normalizada. Logo, é de se esperar que exista uma probabilidade de ocorrência sequencial decrescente, partindo da classe de seca moderada (SM) até a classe de seca extrema (SE).

Por meio do SPI a UA3 (bacia do rio Santo Antônio) foi identificada como sendo a unidade de análise com maior número de ocorrências de seca mensais, totalizando 84 eventos. Esse grande número de eventos de seca, no entanto, se concentra nas duas primeiras classes, com 45 eventos de SM e 25 eventos de SS, sendo os maiores valores dentre todas as UAs.

Essas classes foram mais detectadas no semestre seco do ano, no qual a UA3 apresentou médias sempre inferiores à média da bacia, com exceção do mês de abril que teve uma pequena superioridade em relação à média do mês na bacia do Doce. Os 14 eventos de SE constituem-se no menor número de ocorrências para essa classe nas UAs, o que mostra que a UA3 tem menor probabilidade de passar por momentos críticos de seca, segundo o SPI.

De modo a avaliar a seca mensal na bacia do rio Doce durante os anos de 1985 a 2015, apresenta-se na Tabela 12 uma análise de frequência média de ocorrência das classes de intensidade de seca para os quatro índices avaliados. Esses valores de frequências médias foram obtidos a partir das ocorrências médias das classes dos índices nas nove UAs.

Tabela 12. Frequência média de ocorrência das classes de intensidade de seca dos índices avaliados, na escala de tempo mensal, para a bacia hidrográfica do rio Doce

Índice de seca	Eventos de seca			
	SM (%)	SS (%)	SE (%)	Total (%)
IPN	5,8	3,7	41,9	51,4
MD	20,0	10,0	10,0	40,0

RAI	16,9	13,5	2,7	33,1
SPI	11,3	5,1	5,1	21,4

Ao verificar a frequência média total das classes de intensidade de seca SM, SS e SE para o IPN, nota-se que em mais de 50% dos meses avaliados a bacia do Doce sofreu com algum nível de seca. Esse valor é expressivamente menor para os índices MD, RAI e SPI, com valor mínimo de 21,4% para o SPI.

Trabalhar com a escala mensal requer muito cuidado na hora de interpretação dos resultados, uma vez que estes podem ter sofrido com o problema dessa escala de tempo, em que a média de precipitação mensal é muito superior ao valor da mediana, principalmente nos meses do semestre seco, o que indica que a média nem sempre pode ser considerada uma medida adequada para descrever a variação das chuvas mensais. Barra (2000) também verificou este comportamento para a escala mensal na sua região de estudo.

Analisando os resultados dos quatro índices de seca, considera-se que os índices RAI e SPI são os mais adequados para descrever o comportamento das secas mensais na bacia hidrográfica do rio Doce. Ambos mostram valores de ocorrência/frequência das classes de intensidade de seca moderada, severa e extrema, decrescentes na maioria das UAs. Tal comportamento é considerado semelhante as condições hidroclimáticas esperadas de ocorrer na bacia e por isso tais índices são considerados os mais apropriados. Loukas et al. (2003) também observaram que os índices SPI e RAI apresentaram os melhores resultados quando aplicados para as condições climáticas da Grécia. No entanto, por apresentar simplicidade de cálculo e resultados semelhantes ao do SPI, o índice RAI apresenta maior potencial de uso para monitoramento de secas mensais na bacia do rio Doce.

5.2.2. Avaliação da severidade de seca na escala trimestral

Na Tabela 13 tem-se o número de ocorrências de secas trimestrais com base nas classes de intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI, no período de 1985 a 2015. Assim como na escala mensal, eventos úmidos não foram levados em consideração para o período de tempo trimestral, e por isso, em nenhuma UA o somatório dos valores de ocorrência atingiu 120 meses, que se referem ao total de trimestres avaliados no período base.

Os resultados do número de ocorrências das intensidades de seca na escala trimestral foram semelhantes aos da escala mensal. No entanto, a escala trimestral minimiza os problemas presentes na escala mensal, além dos resultados serem de mais fácil interpretação.

Tabela 13. Número de ocorrências de secas trimestrais com base nas classes de intensidade de seca dos índices IPN, MD, RAI e SPI, no período de 1985 a 2015

UAs	IPN				MD				RAI				SPI			
	N	SM	SS	SE	N	SM	SS	SE	N	SM	SS	SE	N	SM	SS	SE
UA1	31	10	3	31	24	24	12	12	60	12	12	6	68	13	7	6
UA2	21	14	7	32	24	24	12	12	56	11	10	9	64	8	7	9
UA3	25	8	5	36	24	24	12	12	58	14	13	7	65	10	8	9
UA4	25	11	9	34	24	24	12	12	59	15	15	4	70	11	7	5
UA5	23	8	8	35	24	24	12	12	54	15	18	3	64	7	15	5
UA6	16	8	5	41	24	24	12	12	53	17	16	4	64	14	9	5
UA7	23	8	7	38	24	24	12	12	57	18	15	4	67	14	10	4
UA8	19	10	9	35	24	24	12	12	60	15	13	6	66	15	9	5
UA9	23	14	6	34	24	24	12	12	65	14	13	6	75	17	2	6

Legenda: N = normal; SM = seca moderada; SS = seca severa, SE = seca extrema.

As principais diferenças dos resultados, comparativamente à escala mensal, foi que no caso do RAI as classes SM e SS tiveram praticamente os mesmo valores, enquanto a classe SE manteve com o menor número de ocorrências, e que para o SPI houve maior número de eventos de SS do que SE, mas prevalecendo ainda a classe SM em relação às outras duas.

Trabalhando com uma escala de tempo cada vez maior é de se esperar que os registros de precipitação se aproximem cada vez mais de uma distribuição normal, ou seja, com uma distribuição uniforme em torno do valor médio. Por isso, índices de determinação de seca que dependem da média, tendem a apresentar melhores resultados para escala de tempo cada vez maiores.

Altamirano (2010) verificou uma diminuição da intensidade de seca ao aumentar a escala de tempo, corroborando assim com os resultados obtidos nesse trabalho para o índice SPI. Para escalas de tempo mais curtas as secas são mais frequentes e para escalas de tempo mais longas os eventos secos se tornam menos frequentes, muito embora são mais duradouros no tempo (ALTAMIRANO, 2010). Os resultados obtidos para a escala de tempo curta variam muito no tempo e no

espaço, por isso a necessidade de analisar os índices em unidades de análise e não na totalidade da bacia do Doce, como um única região de estudo.

De modo a auxiliar no entendimento dos resultados foram criados gráficos com a distribuição de frequência de ocorrência das classes nas UAs para cada um dos índices avaliados, com exceção do MD, pois o mesmo apresenta frequência constante para as distintas UAs. Vale destacar que a análise gráfica concentrou-se apenas nas três intensidades de seca e não retratou a classe de normalidade, uma vez que a real intenção é comparar os três níveis de seca para as distintas UAs.

Na Figura 9 é apresentada a distribuição de frequências de ocorrência das classes de intensidade de seca para o IPN. Nota-se que a seca moderada (SM) foi mais frequente nas UAs 2 e 9, ambas com 11,7% de frequência. A seca severa (SS) apresentou maior frequência (7,5%) nas UAs 4 e 8, enquanto que a intensidade de seca extrema (SE) foi maior na UA6, com 34,2% dos trimestres. Em todas as unidades a SE se mostrou mais frequente, seguida da classe SM e, por fim, da SS, tal qual ocorrido para a escala de tempo mensal. Outra ponto comum para as duas escalas de tempo foi que o baixo Doce (UA7, 8 e 9) continuou sendo a região com maior frequência de secas. Uma possível causa desse fato é que o baixo doce tem a média dos dois trimestres chuvosos bem abaixo da média da bacia, o que contribui para as maiores frequências de SM na UA9 e de SS na UA8, além da segunda maior frequência de SE para UA7.

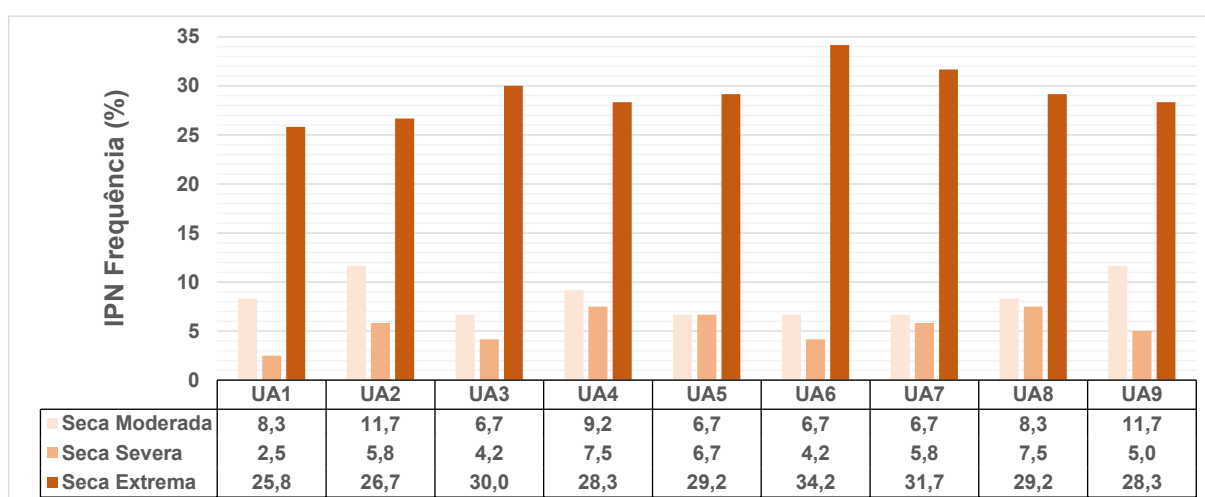


Figura 9. Distribuição das frequências trimestrais de ocorrências das classes de intensidades de seca para o IPN, no período de 1985 a 2015, nas unidades de análise da bacia do Doce.

A distribuição de frequência de ocorrências de intensidade de seca para o RAI pode ser observada na Figura 10. É possível perceber que a frequência de intensidade de seca extrema (SE) para esse índice é sempre menor que para as outras duas classes. A explicação para esse resultado segue o mesmo raciocínio da probabilidade de ocorrência de classes do índice RAI apresentado na escala mensal. A maior frequência de SM está associada à UA7, com 15% dos trimestres avaliados. No caso de SS a maior frequência ocorre na UA5, também com 15%, e para SE na UA2, com 7,5% de frequência. Alguns fatores podem ser associados a esses resultados: a UA7 apresenta todas as médias trimestrais abaixo da média da bacia; a UA5 tem a segunda maior frequência de ocorrência de secas, com valor de 30%, além da menor média trimestral da bacia, presente nos meses de julho, agosto e setembro com valor de (54,9 mm); e a UA2 tem menor frequência de secas (25%), no entanto grande parte das ocorrências está associada a eventos de seca extrema (7,5%).

Com 30,8 % de frequência, a UA6 (bacia do rio Manhuaçu) também é a que mais sofre com eventos de seca, de modo geral, segundo o RAI. Além dessa unidade de análise, a UA7 (bacia do rio Guandu) apresentou os mesmos valores de frequência totais. Na sequência vem a UA5, com valor de 30% de frequência. A semelhança dos valores pode ser explicado pela proximidade físicas entre as UAs.

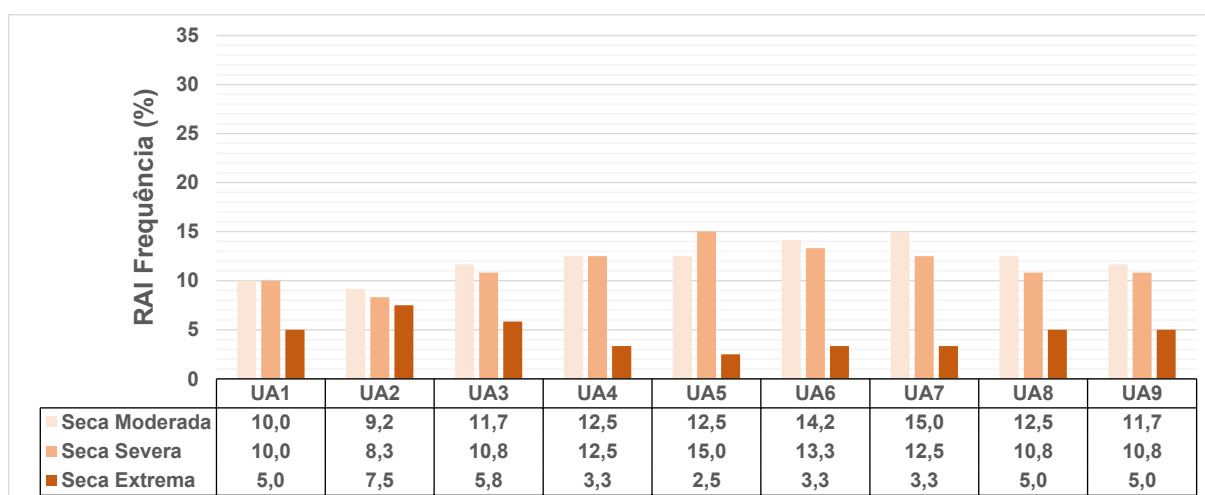


Figura 10. Distribuição das frequências trimestrais de ocorrências das classes de intensidades de seca para o RAI, no período de 1985 a 2015, nas unidades de análise da bacia do Doce.

Ao verificar as frequências de ocorrência obtidas com o uso do índice SPI (Figura 11), percebe-se que a SM esteve mais presente na UA9, com 14,2% dos trimestres. A SS apresentou maior frequência na UA5, com 12,5% dos dados, e a SE foi confirmada em 7,5% dos trimestres nas UAs 2 e 3.

Percebe, ainda, que o baixo Doce, composto pelas UAs 7, 8 e 9, possui as maiores frequências de seca moderada da bacia, com 11,7, 12,5 e 14,2%, respectivamente, e média de 12,8%. Além disso, essa seção tem a menor frequência média de seca extrema, com valor de 4,2%. Tal região merece destaque pelos valores médios inferiores aos da bacia no período chuvoso e, também, pela maior influências das correntes oceânicas no período da estiagem.

Segundo o SPI, a UA8 (bacia do rio Santa Maria do Doce) é a unidade de análise com maior frequência de ocorrências de intensidades de seca, com 24,2%, seguida das UAs 6 e 7, com 23,4 e 23,3% dos trimestres avaliados no período de 1985 a 2015, respectivamente.

Ao final da análise de frequência das classes dos três índices, verificou-se que as maiores frequências de seca se concentraram nas UA5, UA6 e no baixo Doce (UAs 7, 8 e 9), ou seja, na parte oeste da bacia, o que pode ter grande relação com a proximidade do litoral e interferência das correntes marítimas.

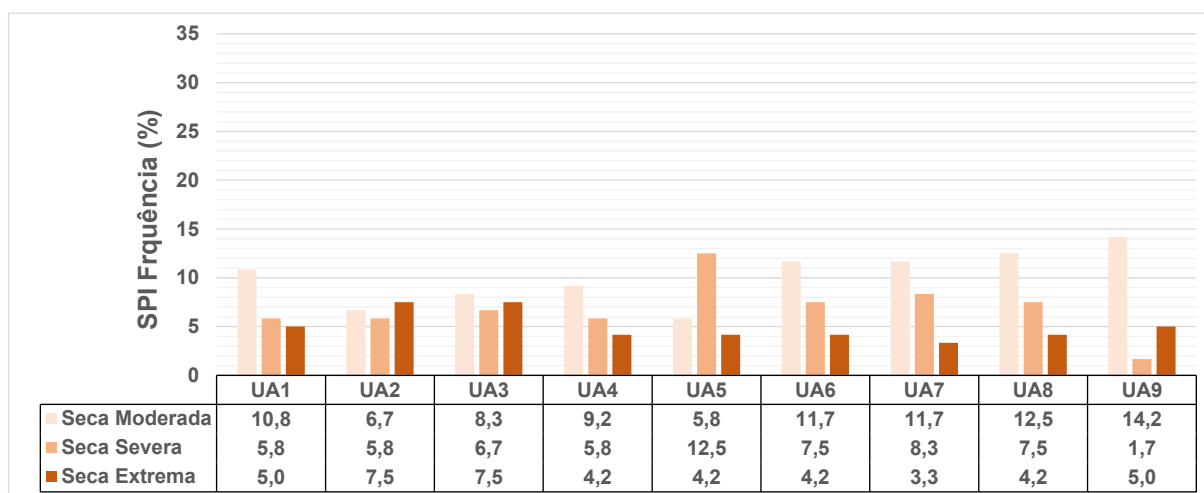


Figura 11. Distribuição das frequências trimestrais de ocorrências das classes de intensidades de seca para o SPI, no período de 1985 a 2015, nas unidades de análise da bacia do Doce.

Assim como foi realizado para a escala de tempo mensal, apresenta-se na Tabela 14 a frequência média de ocorrência das classes de intensidades de seca, para o período trimestral, nos quatro índices avaliados.

Tabela 14. Frequência média de ocorrência das classes de intensidade de seca dos quatro índices, na escala de tempo trimestral, para a bacia hidrográfica do rio Doce

Índice de seca	Eventos de seca			
	SM (%)	SS (%)	SE (%)	Total (%)
IPN	8,4	5,5	29,3	43,1
MD	20,0	10,0	10,0	40,0
RAI	12,1	11,6	4,5	28,2
SPI	10,1	6,9	5,0	21,9

O IPN continuou sendo o índice com maior frequência de eventos de seca na bacia do rio Doce, com 43,1% de ocorrências. O MD, assim como para a escala mensal, apresentou 40% de frequência de eventos de seca, sendo 20% de SM e 10% para as classes SS e SE. Os índices RAI e SPI se comportaram de maneira semelhante, com maior frequência dos casos para SM, seguido de SS e SE. Destaca-se, ainda, que o SPI foi o índice com menor frequência média de ocorrência de eventos de seca na bacia do rio Doce, confirmando o comportamento observado para a escala de tempo mensal.

O IPN teve queda de frequência na classe SE na escala trimestral em relação a escala mensal, visto que existe a tendência da seca diminuir de intensidade ao aumentar a escala de tempo. O MD, segundo sua classificação de intensidades, sempre apresentará os mesmos valores de frequência, independente do período avaliado. Conforme explicado na escala mensal, as precipitações não seguem uma distribuição normal para curta escala de tempo. Ao avaliar maiores escalas, os registros de chuva tendem a ter um comportamento simétrico em torno do valor médio e, assim, maiores frequências são esperadas para seca moderada (SM) e menores valores para seca extrema (SE).

Assim como na escala mensal, os índices RAI e SPI também representaram de forma mais apropriada o comportamento das secas na bacia hidrográfica do rio Doce na escala trimestral. Portanto, recomenda-se, dentre os quatro índices avaliados, a utilização dos índices RAI e SPI para o avaliação das secas nas unidades de análise da bacia, tanto na escala mensal quanto na escala trimestral,

sobressaindo o índice RAI por ter simplicidade de cálculos e resultados também satisfatórios.

5.3. Classificação global e sistema de classificação de secas anuais

Visando obter o sistema de classificação de secas para todos os anos da série histórica utilizada no trabalho, considerou-se a classificação global dos índices, que tem como base as diferentes intensidades de seca que um dado índice pode receber a partir do seu valor calculado.

Os resultados dos índices e as correspondentes classes de intensidades de seca estão apresentados na Tabela 15.

Observa-se na Tabela 15 que a análise numérica dos resultados dos índices é de difícil interpretação e, por isso, torna-se mais interessante a avaliação em função de suas classificações, que são: normal (N), seca moderada (SM), seca severa (SS) e seca extrema (SE).

Nota-se, apesar das diferentes metodologias, que os índices têm a capacidade de indicar a ocorrência de eventos de seca no mesmo período quando se trabalha na escala anual. Esse aspecto é observado principalmente nos anos hidrológicos 1986/1987, 1994/1995, 1997/1998, 2000/2001, 2002/2003, 2007/2008 e 2014/2015. Dentre esses anos, o ano 2014/2015 claramente foi o mais severo de todos.

A classe SS, quando presente, está sempre acompanhada de, pelo menos, a classe SM, nunca somente da classe N. Ou seja, quando um dos índices detectou SS todos os outros detectaram, pelo menos, SM. Tal constatação mostra que os índices conseguem detectar de forma mais homogênea a ocorrência de seca, quanto mais intensa for essa anomalia climática.

Esse aspecto também pode ser observado ao avaliar a classe de intensidade SE. Sempre que um índice resulta nessa classificação, pelo menos um outro índice apresenta a classe SS e os demais, no mínimo, a classe SM. Em nenhum momento a classe SE esteve acompanhada da intensidade N. Sendo assim, observa-se que quanto mais intensa for a anomalia climática, maior será a concordância entre os índices avaliados.

Vale lembrar que um dado índice recebe as notas 0, 1, 2 ou 3 para as intensidades normal (N), seca moderada (SM), seca severa (SS) e seca extrema (SE), respectivamente. Após estabelecer a nota para cada índice, somou-se então

todas as notas para se ter a nota global, que foi o critério adotado neste trabalho para classificar um ano em condição de: “Normalidade”, “Atenção”, “Alerta” e “Emergência”, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 15. Resultados dos índices e relação com as classes de intensidade de seca proposta na classificação global para bacia hidrográfica do rio Doce

Ano hidrológico	UA1				UA2				UA3				UA4				UA5				UA6				UA7				UA8				UA9						
	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI	SPI	IPN	MD	RAI
1985/1986	0,97	5	-0,50	-0,13	0,93	5	-1,31	-0,43	0,95	5	-0,99	-0,30	0,93	4	-1,22	-0,40	0,88	3	-1,95	-0,68	0,85	2	-2,59	-0,91	0,92	5	-1,24	-0,34	0,87	3	-1,88	-0,66	0,92	5	-1,01	-0,30			
1986/1987	0,93	4	-1,19	-0,38	0,89	3	-2,20	-0,76	0,81	1	-3,98	-1,41	0,79	2	-3,60	-1,37	0,81	2	-3,20	-1,18	0,92	4	-1,37	-0,44	0,99	6	-0,08	0,04	0,88	3	-1,84	-0,64	0,82	3	-2,19	-0,77			
1987/1988	1,01	6	0,09	0,09	1,04	6	0,78	0,34	1,00	6	-0,10	0,01	1,07	7	1,02	0,45	1,08	7	1,19	0,50	0,99	6	-0,22	-0,03	0,83	2	-2,58	-0,82	0,90	4	-1,52	-0,51	0,90	4	-1,29	-0,41			
1988/1989	0,94	4	-1,17	-0,37	0,89	3	-2,21	-0,76	0,90	4	-2,08	-0,69	0,88	3	-1,98	-0,70	0,90	3	-1,69	-0,57	0,93	4	-1,16	-0,37	0,91	4	-1,27	-0,36	0,96	5	-0,62	-0,17	0,82	3	-2,26	-0,80			
1989/1990	0,85	3	-2,63	-0,94	0,93	4	-1,36	-0,45	1,00	7	0,03	0,06	0,91	4	-1,59	-0,55	0,88	3	-2,01	-0,70	0,81	2	-3,22	-1,16	0,86	3	-2,02	-0,62	0,93	5	-1,09	-0,35	0,83	3	-2,04	-0,71			
1990/1991	1,08	7	1,33	0,56	1,00	6	0,01	0,05	0,94	5	-1,17	-0,36	1,21	9	3,30	1,29	1,24	10	3,81	1,41	1,13	8	1,98	0,81	1,06	7	0,77	0,35	1,22	9	3,25	1,20	1,20	8	2,29	0,93			
1991/1992	1,10	8	1,58	0,66	1,12	8	2,22	0,87	1,19	9	3,29	1,33	1,23	10	3,53	1,37	1,13	8	2,09	0,82	0,98	6	-0,29	-0,05	0,85	3	-2,20	-0,68	1,11	8	1,55	0,62	1,17	8	1,92	0,80			
1992/1993	0,98	6	-0,33	-0,07	1,09	8	1,65	0,67	1,05	8	0,86	0,40	1,12	8	1,85	0,76	1,02	6	0,35	0,19	0,96	5	-0,65	-0,18	0,87	3	-2,00	-0,61	0,91	4	-1,37	-0,45	0,97	6	-0,34	-0,05			
1993/1994	1,00	6	0,02	0,06	1,07	7	1,25	0,52	0,89	3	-2,37	-0,80	1,06	7	0,92	0,41	0,99	5	-0,25	-0,03	0,98	6	-0,43	-0,10	1,10	8	1,27	0,53	1,03	6	0,38	0,20	0,99	6	-0,16	0,02			
1994/1995	0,82	2	-3,33	-1,22	0,83	1	-3,40	-1,23	0,85	2	-3,26	-1,13	0,84	2	-2,67	-0,98	0,79	1	-3,43	-1,28	0,74	1	-4,58	-1,73	0,52	1	-7,15	-2,78	0,76	2	-3,56	-1,36	0,66	1	-4,14	-1,63			
1995/1996	0,93	4	-1,27	-0,41	0,99	6	-0,19	-0,02	1,03	7	0,50	0,25	0,97	5	-0,55	-0,15	0,98	5	-0,27	-0,04	0,94	4	-0,96	-0,29	0,81	1	-2,90	-0,94	1,04	6	0,61	0,29	0,92	5	-0,97	-0,29			
1996/1997	1,26	10	4,20	1,59	1,27	10	4,92	1,80	1,26	10	4,58	1,79	1,27	10	4,13	1,57	1,24	9	3,76	1,39	1,35	10	5,39	1,98	1,51	10	6,63	2,23	1,33	10	4,73	1,67	1,16	7	1,76	0,74			
1997/1998	0,94	5	-1,10	-0,35	1,07	7	1,27	0,53	0,94	5	-1,25	-0,39	0,81	2	-3,24	-1,22	0,99	6	-0,14	0,00	0,85	3	-2,55	-0,89	0,90	4	-1,54	-0,45	0,78	2	-3,32	-1,26	0,67	1	-4,10	-1,61			
1998/1999	0,88	3	-2,25	-0,79	0,85	2	-2,95	-1,05	0,90	3	-2,16	-0,72	0,89	4	-1,82	-0,64	0,83	2	-2,79	-1,01	0,83	2	-2,93	-1,05	0,92	5	-1,17	-0,32	0,78	2	-3,24	-1,22	0,78	2	-2,71	-0,99			
1999/2000	1,12	8	1,96	0,80	1,13	8	2,41	0,94	1,08	8	1,32	0,58	1,10	7	1,59	0,67	1,03	7	0,46	0,23	1,06	8	0,92	0,41	1,10	8	1,31	0,54	1,10	7	1,51	0,61	1,19	8	2,08	0,86			
2000/2001	0,84	2	-2,87	-1,03	0,79	1	-4,10	-1,51	0,85	2	-3,27	-1,14	0,76	1	-4,03	-1,56	0,73	1	-4,53	-1,75	0,88	3	-2,01	-0,69	0,81	2	-2,84	-0,92	0,91	4	-1,39	-0,46	1,02	6	0,21	0,16			
2001/2002	1,16	9	2,67	1,06	1,15	9	2,66	1,03	1,18	9	3,10	1,26	1,28	10	4,26	1,62	1,25	10	3,94	1,45	1,16	8	2,42	0,96	1,28	10	3,64	1,32	1,30	10	4,35	1,55	1,42	10	4,67	1,73			
2002/2003	1,03	7	0,51	0,25	1,09	7	1,55	0,63	1,00	6	0,03	0,06	0,87	3	-2,26	-0,82	0,99	5	-0,21	-0,02	1,05	7	0,74	0,34	0,91	4	-1,33	-0,38	0,68	1	-4,68	-1,87	0,65	1	-4,32	-1,72			
2003/2004	1,23	9	3,67	1,41	1,22	10	3,97	1,48	1,19	9	3,37	1,36	1,18	8	2,71	1,08	1,15	8	2,41	0,93	1,23	9	3,55	1,36	1,10	7	1,27	0,53	1,14	8	2,06	0,80	1,36	10	4,00	1,51			
2004/2005	1,25	10	4,02	1,53	1,15	9	2,81	1,08	1,24	10	4,26	1,68	1,22	9	3,38	1,31	1,30	10	4,70	1,70	1,33	10	5,15	1,90	1,41	10	5,23	1,81	1,35	10	5,12	1,79	1,32	9	3,57	1,37			
2005/2006	0,82	1	-3,33	-1,22	0,92	4	-1,60	-0,53	0,92	4	-1,61	-0,52	1,02	6	0,27	0,16	0,91	4	-1,49	-0,50	0,86	3	-2,36	-0,82	0,95	6	-0,71	-0,17	0,97	5	-0,50	-0,12	0,91	4	-1,07	-0,32			
2006/2007	1,08	7	1,22	0,52	0,95	5	-1,01	-0,32	1,05	7	0,83	0,39	1,15	8	2,24	0,91	1,08	8	1,26	0,52	1,19	9	2,98	1,16	1,21	9	2,74	1,03	1,10	7	1,51	0,61	1,22	9	2,47	1,00			
2007/2008	0,95	5	-0,92	-0,28	0,90	3	-2,04	-0,70	0,84	1	-3,47	-1,21	0,78	1	-3,76	-1,44	0,81	2	-3,13	-1,15	0,78	1	-3,84	-1,42	0,81	2	-2,86	-0,93	0,74	1	-3,86	-1,50	0,73	2	-3,37	-1,28			
2008/2009	1,35	10	5,66	2,07	1,27	10	4,90	1,80	1,32	10	5,67	2,18	1,20	9	3,01	1,19	1,23	9	3,63	1,35	1,24	10	3,71	1,42	1,27	9	3,44	1,26	1,15	9	2,22	0,86	1,24	9	2,64	1,06			
2009/2010	0,84	2	-2,80	-1,01	0,95	5	-1,01	-0,31	0,94	4	-1,34	-0,42	0,94	5	-1,04	-0,33	0,91	4	-1,56	-0,52	0,95	5	-0,82	-0,24	1,05	7	0,67	0,32	1,02	6	0,32	0,18	0,97	5	-0,36	-0,06			
2010/2011	1,12	8	1,97	0,80	0,89	2	-2,22	-0,77	0,98	6	-0,49	-0,12	0,95	5	-0,90	-0,28	1,20	9	3,21	1,20	1,20	9	3,10	1,21	1,17	8	2,18	0,85	1,14	8	2,04	0,79	1,08	7	0,87	0,41			
2011/2012	1,18	9	2,94	1,15	1,16	9	2,91	1,12	1,16	8	2,72	1,12	1,05	6	0,71	0,33	1,00	6	-0,06	0,03	1,05	7	0,80	0,37	1,02	6	0,20	0,14	1,09	7	1,24	0,51	1,08	7	0,84	0,40			
2012/2013	0,87	3	-2,38	-0,84	0,83	2	-3,33	-1,20	0,87	3	-2,65	-0,90	0,86	3	-2,27	-0,82	0,94	4	-0,93	-0,29	0,97	5	-0,51	-0,13	0,95	5	-0,76	-0,18	0,84	3	-2,32	-0,84	0,85	4	-1,89	-0,65			
2013/2014	0,74	1	-4,72	-1,81	0,91	4	-1,88	-0,64	0,85	2	-3,14	-1,09	0,97	6	-0,51	-0,14	1,04	7	0,65	0,30	1,03	7	0,54	0,27	1,18	9	2,28	0,88	1,22	9	3,18	1,18	1,41	10	4,60	1,70			
2014/2015	0,75	1	-4,42	-1,68	0,72	1	-5,68	-2,19	0,83	1	-3,61	-1,27	0,74	1	-4,37	-1,71	0,66	1	-5,70	-2,29	0,74	1	-4,55	-1,72	0,74	1	-3,92	-1,34	0,74	1	-3,79	-1,46	0,76	2	-2,99	-1,11			

Legenda de intensidade: N = Normal □; SM = Seca Moderada □; SS = Seca Severa □; Seca Extrema □.

Tabela 16. Classificação de alerta das unidades de análise da bacia do rio Doce no período de 1985 a 2015 com base na classificação global baseada em notas

Ano hidrológico	Nota								
	UA1	UA2	UA3	UA4	UA5	UA6	UA7	UA8	UA9
1985/1986	0	0	0	1	2	5	0	2	0
1986/1987	1	3	8	8	7	1	0	2	3
1987/1988	0	0	0	0	0	0	4	2	2
1988/1989	1	3	2	2	2	1	1	0	3
1989/1990	4	1	0	1	3	6	3	0	3
1990/1991	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1991/1992	0	0	0	0	0	0	3	0	0
1992/1993	0	0	0	0	0	0	2	1	0
1993/1994	0	0	3	0	0	0	0	0	0
1994/1995	6	7	6	5	8	12	12	8	11
1995/1996	1	0	0	0	0	1	7	0	0
1996/1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997/1998	0	0	0	7	0	4	2	7	11
1998/1999	3	5	3	2	5	5	0	7	6
1999/2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000/2001	5	10	6	10	12	3	6	1	0
2001/2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002/2003	0	0	0	3	0	0	1	12	12
2003/2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004/2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005/2006	7	1	1	0	1	3	0	0	1
2006/2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007/2008	0	3	7	9	6	9	6	10	8
2008/2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009/2010	5	0	1	0	1	0	0	0	0
2010/2011	0	4	0	0	0	0	0	0	0
2011/2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012/2013	4	6	4	3	1	0	0	3	2
2013/2014	12	1	6	0	0	0	0	0	0
2014/2015	11	12	7	12	12	12	10	10	6

Legenda de condição climática: Normalidade ■, Atenção ■, Alerta ■ e Emergência ■.

Essa classificação global, aplicada ao sistema de classificação de secas, serviu para mostrar que, de maneira geral, a bacia do rio Doce, no período de 1985 a 2015, teve a seca como uma anomalia de variabilidade interanual e de caráter não permanente, ou seja, mantendo-se constante ao longo dos anos da série histórica avaliada.

Na Tabela 16 é possível notar que não ocorreram eventos de seca na maior parte dos anos nas distintas UAs. Por outro lado, é importante ressaltar que quando presente, a seca abrangeu várias UAs na bacia, como por exemplo os anos 1986/1987, 1989/1990, 1994/1995, 1997/1998, 1998/1999, 2000/2001, 2002/2003, 2007/2008, 2012/2013 e 2014/2015.

Em 10 anos da série estudada classificaram-se todas as UAs em condições de “Normalidade”, sendo que esses anos não foram consecutivos, com exceção dos anos de 2003/2004 e 2004/2005 em que as nove UAs mantiveram tal condição climática. No restante do período, sempre que um ano esteve em condição de “Normalidade” em toda a bacia, no ano seguinte pelo menos uma UA recebeu alguma classificação mais agravante.

A condição “Emergência” esteve presente em pelos menos dois anos dos registros de dados de uma das UAs, salvo o caso da UA3 que não possuiu nenhum ano com essa classificação. No entanto, a UA3 e a UA8 foram as únicas que apresentaram três anos em condições de “Alerta”.

Como o sistema de classificação de secas foi baseado na classificação global e, por conseguinte, nas intensidades dos índices, os mesmos detectaram secas nos anos 1986/1987, 1994/1995, 2000/2001, 2007/2008 e 2014/2015. Tais anos apresentaram várias UAs em condições climáticas relevantes. Esses anos também foram indicados com elevado número de ocorrências de seca por todos os índices na Tabela 15, mostrando que a sistematização se mostrou adequada. Os anos que não se repetiram foram os anos de 1997/1998 e 2002/2003, os quais apresentaram secas em locais bem específicos, como as UAs 4, 8 e 9.

Nota-se que a cada sete anos, aproximadamente, a bacia do rio Doce apresenta uma condição climática de destaque em relação à eventos de seca para grande parte das UAs, ressaltando que durante esse intervalo de tempo existem outras condições adversas importantes a serem mencionadas como os anos de 1997/1998, 1998/1999, 2001/2002 e 2012/2013. Observa-se, também, que a condição climática das UAs foi mais severa na segunda metade do período de análise, ou seja, as secas se tornaram mais intensas nos últimos 15 anos.

Vale destacar que o regime de precipitação é influenciado diretamente por fenômenos atmosféricos de nível global, tais como El Niño, La Niña e oscilação dos oceanos (GARCIA, 2006). Moreiras (1999) afirma que o El Niño promove um menor

volume de chuvas e a La Niña promove menores temperaturas, alterando consideravelmente o regime de chuvas da região sudeste do Brasil.

Um grande evento de El Niño foi evidenciado para o ano de 1997/1998, com impactos sobre diversas partes do país. Minuzzi et al. (2005) conseguiram verificar que o El Niño de 1997/1998 ocasionou chuvas abaixo da média no Estado de MG, além de notarem um intervalo de El Niño a cada 4 anos aproximadamente. Além desse evento, outros episódios aconteceram nos anos 1986/1987 e 1993/1994 (DE OLIVEIRA, 1998). Tais estudos corroboram com os resultados obtidos nesse presente trabalho.

Destaca-se que nos anos de 1994/1995, 2000/2001 e 2014/2015 a seca atingiu praticamente toda a bacia do rio Doce e, por isso, apresenta-se na Figura 12 um detalhamento da condição climática nas distintas UAs nesses anos.

Sistema de classificação de secas para a bacia do rio Doce

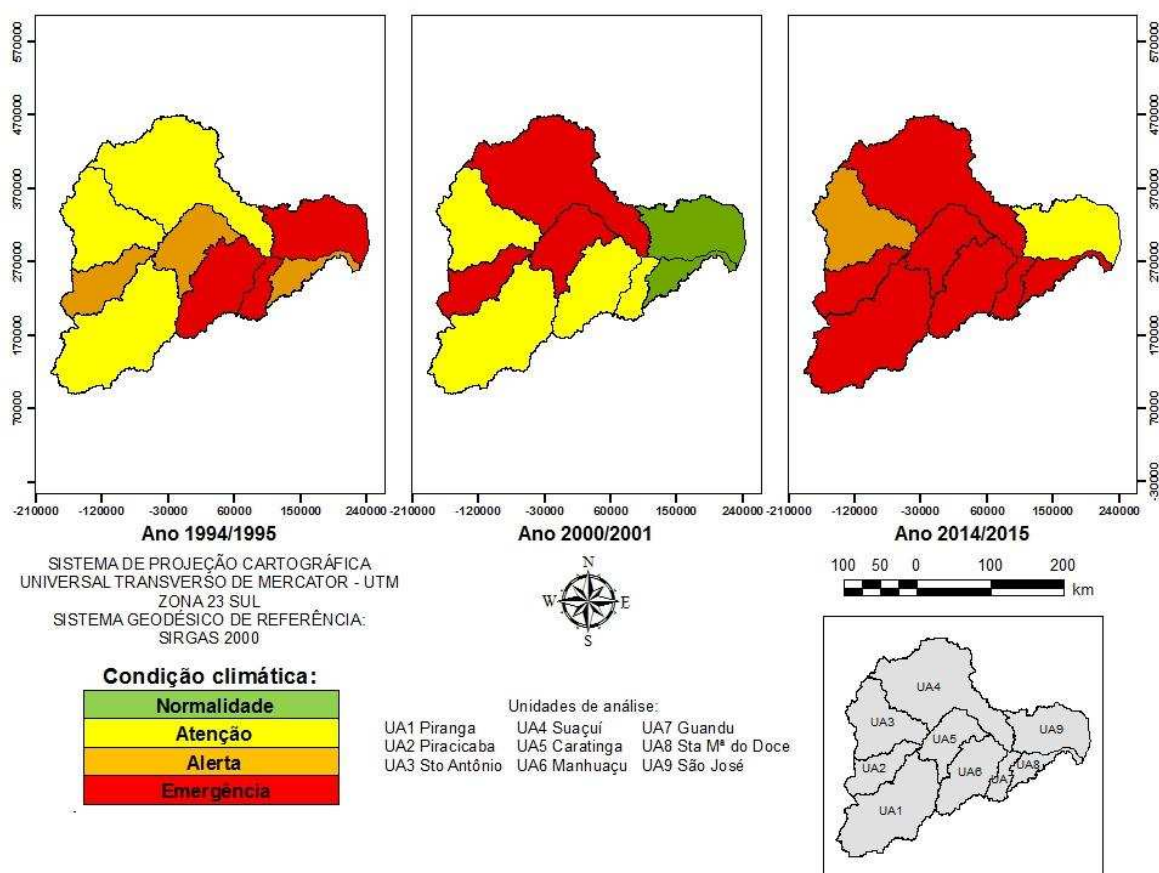


Figura 12. Condição climática dos anos hidrológicos 1994/1995, 2000/2001 e 2014/2015 para a bacia hidrográfica do rio Doce.

O ano hidrológico 1994/1995 foi um dos anos mais críticos para a bacia do Doce. Nesse período, todas as UAs sofreram com a seca, sendo três delas em condições de “Atenção” (UA1, UA3 e UA4), três em “Alerta” (UA2, UA5 e UA8) e as outras em “Emergência” (UA6, UA7 e UA9). Fica claro que no ano 1994/1995 o problema foi mais grave no baixo Doce comparativamente às áreas de cabeceira da bacia (alto e parte do médio Doce). O evento de El Niño de 1994/1995, apesar de ser de intensidade moderada, mostrou-se significativo para algumas regiões de Minas Gerais (MINUZZI et al., 2005) e pode ter influenciado nesse comportamento.

Em 2000/2001 a seca também tomou grande parte da bacia, na qual sete das nove UAs apresentaram períodos críticos de falta de chuva. Embora na maioria das UAs tenham sido verificados eventos de seca, duas UAs (UA8 e UA9) não sofreram com essa anomalia climática nesse período. Esse fato mostra a importância de se avaliar a seca em unidades de análise e não apenas na bacia hidrográfica como um todo. Ainda no ano 2000, o Brasil passou sérias dificuldades devido à falta de chuvas e consequente crise de abastecimento de energia elétrica (GRÜN, 2005). A baixa ocorrência de chuvas fez com que os níveis d’água acumulados nos reservatórios não fossem suficientes para geração de energia hidrelétrica por um longo período de tempo, estabelecendo assim um “apagão” em diversas partes do país.

O período de 2014/2015 foi, incontestavelmente, o pior ano de seca evidenciado na bacia do rio Doce nos últimos 30 anos. Em sete das nove UAs a condição climática atingiu nível de “Emergência”. Rego et al. (2015) verificaram que a estiagem do ano hidrológico 2014/2015 foi responsável pelas menores vazões médias mensais em 70 anos de monitoramento do alto rio Doce.

Ao atingir uma condição climática como a do ano 2014/2015, as UAs, no ano hidrológico seguinte (2015/2016), mesmo que não sofram com escassez de chuvas poderão sentir as consequências do ano crítico anterior. Um ano crítico como o de 2014/2015 é capaz de produzir reflexos por vários anos, uma vez que os níveis dos reservatórios ficaram comprometidos, a recarga dos aquíferos foi inadequada e, conseqüentemente, a vazão dos cursos de água, destacadamente no período de seca, reduziu consideravelmente.

Vários municípios da bacia, desde o ano 2014, vêm adotando medidas de racionamento e controle do consumo d’água, como: implantação de rodízio de

abastecimento urbano, aumento da fiscalização contra o desperdício, manutenção das redes de distribuição de água e proibição do uso d'água para fins menos nobres, como lavagem de automóveis e passeios.

Conforme já destacado, a seca é uma anomalia que não pode ser evitada e, por isso, deve-se sempre agir de forma preventiva. Em função disso, o monitoramento constante dos índices de seca e a aplicação do sistema de classificação de secas anuais podem se constituir em uma ferramenta-chave para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia.

Uma estratégia de gestão a ser tomada é a aplicação do sistema de classificação de secas anuais em séries sintéticas futuras. Tais séries podem ser obtidas a partir de modelos climáticos capazes de gerar dados futuros de precipitação. Desse modo, pode-se prever o comportamento das chuvas a partir de séries sintetizadas e, a partir disso, tentar propor medidas de mitigação que antecedem o evento de seca.

A utilização de séries sintéticas pode auxiliar na criação de um sistema de alerta de secas para a bacia. Esse sistema de alerta deve ser utilizado para acionar medidas preventivas e, também, restringir certos usos d'água dependendo do estado de alerta verificado.

Outra possível alternativa é vincular o sistema de alerta de secas à eventos de El Niño incidentes sobre a bacia. Ou seja, sempre que o fenômeno de El Niño se mostrar incipiente, deve alertar a população e as autoridades públicas da possibilidade de períodos de seca, os quais tendem a ser mais severos quanto mais intenso for o fenômeno do El Niño.

Vale lembrar que um sistema de alerta capaz de atingir resultados satisfatórios vai além do monitoramento de índices de seca. Existe uma série de fatores que devem ser levados em consideração, como: níveis de armazenamento de água em reservatórios e rios, conflitos pelo uso da água, suspensão e negação de outorgas e decaimento da qualidade da água nos cursos d'água.

Dessa forma, como proposta de trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do sistema de classificação de secas com base em índices de determinação de seca que necessitam além de séries de precipitação outros dados climáticos como: temperatura, umidade do solo e evapotranspiração, para que, posteriormente, essa

classificação possa ser relacionada com valores de vazão e/ou índices socioeconômicos da bacia do rio Doce.

6. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos chegou-se às seguintes conclusões:

- A bacia do rio Doce apresenta alta variabilidade espacial na distribuição das precipitações, com diferenças de até 400 mm nos totais precipitados anuais em suas unidades de análise;

- A região do alto rio Doce apresenta maiores índices pluviométricos no início da estação chuvosa (outubro a dezembro) comparativamente ao médio e baixo rio Doce. No período seco, entre abril e setembro, os totais precipitados são similares nas três regiões da bacia;

- O índice de seca IPN, tanto na escala mensal como trimestral, indicou um maior número de eventos de seca em todas as unidades de análise, quando comparado aos índices MD, RAI e SPI;

- Os resultados obtidos demonstram que, dentre os quatro índices de seca avaliados, os índices RAI e SPI constituem-se nos mais apropriados para a avaliação de secas mensais e trimestrais na bacia hidrográfica do rio Doce;

- Devido à sua maior simplicidade de cálculo e por apresentar resultados semelhantes ao do SPI, o índice RAI apresenta maior potencial de uso para monitoramento de secas;

- Os anos hidrológicos mais críticos da bacia do Doce em relação à seca foram 1994/1995, 2000/2001 e 2014/2015, sendo esse último o mais crítico dos últimos 30 anos;

- A classificação global dos índices de seca, baseada na escala anual, constituiu-se numa importante ferramenta de gestão a ser utilizada no sistema de classificação das secas anuais, permitindo verificar que a bacia do rio Doce apresenta uma condição climática grave de seca, em média, a cada sete anos.

7. REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. Handbook of mathematical function, Dover: Editora, 1965, 1046p.

AGNEW C.T. Using the SPI to identify drought. Drought Network News 12:6–12. 2000.

AKINREML O. O., MCGINN, S.M.. BARR. A.G. Evaluation of the Palmer Drought Index on the Canadian Praires. Journal of Climate, n.5, v.9, p.897-905, 1996.

ALENCAR, R.; BARBOSA, J.; SOARES, J. Desempenho dos métodos dos quantis e SPI para o monitoramento da precipitação no Alto Sertão da Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Fortaleza. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

ALTAMIRANO, R. J. A. Climatologia dos eventos chuvoso e secos severos, extremos e muito extremos usando o Índice de Precipitação Normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil. 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil.

ANA (AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – Hidroweb. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 9 de março de 2016.

BARBOSA, S. E. S.; BARBOSA JUNIOR, A. R.; SILVA, G. Q.; CAMPOS, E. N. B.; RODRIGUES, V. C. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a Bacia do Rio Carmo, Minas Gerais. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.10, n.1, p.64-71, 2005.

BARRA, T. S. Análise climatológica das secas do estado do Ceará. Viçosa – MG, UFV/DEA, 2000. 97 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola.) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BANA E COSTA, C. A.; CORREA; E. C. O processo de construção do índice FUNCEME de vulnerabilidade à seca. Centro de Gestão (CEG-IST), Artigo de Investigação/Research Paper, n- 16, 2000.

BATISTA JÚNIOR, Walter. Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do rio Guandu – Espírito Santo. 2012. Doutorado em Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil.

BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. Monthly Weather Review, Boston, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo. Revista Brasileira de Meteorologia, Piracicaba, v. 22, n. 1, p. 105-111, 2007a.

BLAIN, G. C; BRUNINI, O. Análise da Escala Temporal de Monitoramento das Secas Agrícolas e Meteorológicas no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso), v. 22, p. 255-261, 2007b.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. *Bragantia*, v. 64, n. 4, p. 695-705, 2005.

BONACCORSO, B.; BORDI, I.; CANCIELLIERE, A.; ROSSI, A.; SUTERA, A. Spatial variability of drought an analysis of the SPI in Sicily. Kluwer Academic Publishers. *Water Resources Management, Netherlands*, v. 17, p. 273-296, 2003.

BRIFFA, K., JONES, P., HULME. M. Summer moisture availability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer drought severity index. *Int. J. of Climatology*, n.14. p.457-506. 1994.

BYUN, H. R. & WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate, Boston*, v. 12, p. 2747-2756, 1999.

CAMPOS, J.N.B. & STUDART, T.M.C. Secas no nordeste do Brasil: Origens, Causas e Soluções. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, (CD-ROM). Foz do Iguaçu, PR, 2002.

CANAMARY, E. A.; REIS JUNIOR, D. S.; MARTINS, E. S. P. R. Avaliação dos índices SPI e SPEI no monitoramento de secas no nordeste setentrional do Brasil. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015.

CAPOZZOLI, C. R.; ALMEIDA, R. G. B. Período de Retorno da Estiagem de 2013-2014 na Bacia do Rio Paraíba do Sul. In: XV Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2015, Bento Gonçalves. Anais do XV Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2015.

CASTRO, R. Distribuição probabilística de precipitação na região de Botucatu – SP. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 88 p., 1996.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Sistema de Alerta de Eventos Críticos – SACE. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/sace/>. Acesso em julho de 2016.

CUNHA, R. L. A. Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas. 2008. 147f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

CUPOLILLO, F.; DE ABREU, M. L.; VIANELLO, R. L. Climatologia da Bacia do Rio Doce e sua relação com a topografia local. Revista Geografias, v. 4, n. 2, p. 45-60, 2008.

CUPOLILLO, F.; ABREU, M. L.; CASTRO, F. V. F. Climatologia do Regime Pluviométrico na Bacia do Rio Doce. In: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV, 2006, Florianópolis. Anais. Florianópolis, 2006.

DE OLIVEIRA, G. S.; SATYAMURTY, P. O El Niño de 1997/98: evolução e impactos no Brasil. 1998.

FREITAS, M.A.S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. Revista Tecnologia, v. Suplem, p. 84-95, 2005.

FERNANDES, D. S. et al. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 45, p. 771-779, 2010.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. F. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. Índices para a Quantificação da Seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. (Documento Técnico).

GARCIA, S. R. Variabilidade do sistema de monção da América do Sul: relações com a oscilação decadal do Pacífico. 142 p. Dissertação (Mestrado em

Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

GIBBS, W. J.; MAHER, J. V. Rainfall deciles as drought indicators. Melbourne: Commonwealth of Australia, 1967. 84 p. (Bureau of Meteorology. Bulletin, 48).

GOIS, G. Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura do milho para as diferentes regiões do Estado de Minas Gerais. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola.) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GONÇALVES, W. A.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, L. E.; DA SILVA, D. F.; ARAÚJO, H. A. Vulnerabilidade Climática do Nordeste Brasileiro: Uma análise de eventos extremos na Zona Semiárida da bacia hidrográfica do São Francisco, XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Anais. Florianópolis, 2006.

GRÜN, Roberto. Apagão cognitivo: a crise energética e sua sociologia. Dados, v. 48, n. 4, p. 891-928, 2005.

GUTTMAN, N.B. On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climatology, v.34, p.113-121, 1994.

HAYES, J. M.; SVOBODA, M.D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O.V. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999.

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL N., WIDHALM, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. Bulletin of the American Meteorological Society, 92. pp. 485–488.

HEIM, R.R. A review of twentieth: century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorology Society, v.83, p.1149-1163, 2002.

HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L.C.; CALLANDER, B.A.; HARRIS, N.; KATTERBERG, A.; MASKELL, K. (Ed.). Climate change 1995: the science of climate change: contribution of working group I to the second assesment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (Inglaterra): Cambridge University Press, 1996. 584p.

HUGHES, B., SAUNDERS, M. A Drought climatology for Europe. International Journal of Climatology 22, pp. 1571-1592, 2002.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contributions to the Fourth Assessment Reporto of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary. 2007.

IPMA – INSTITUTO PORTUGUES DO MAR E DA ATMOSFERA. Definições de seca. Disponível em <https://www.ipma.pt>. Acesso em abril de 2016.

KARL, T. R.; NICHOLLS, N.; GREGORY, J. The Coming Climate. Scientific American, Vol. 276, pp. 79-83. 1997.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. The quantification of drought na evaluation of drought índices. Bull. American Meteorology Society, v. 83, p. 1167-1180, 2002.

KOTHAVALA, Z. Extreme precipitation events and their applicability of global climate models to the study of floods and droughts. Mathematics and Computers in Simulation, n.43, p.261-268. 1997.

LAMB, P. J.; PEPPLER, R. A.; HASTENRATH, S. Interannual variability in the tropical atlantic. Nature, London, v. 322, n. 6076, p. 238-240, Jul. 1986.

LANA, X.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Patterns of monthly rainfall shortage and exceso in terms of the SPI for Catalonia (NE Spain). International Journal Climatology, v. 21, p. 1669-1691, 2001.

LOUKAS, A.; VASILIADES, L.; DALEZIOS, N. R. Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece, International Conference on Environmental Science and Technology Lemnos island, Greece, 2003.

MARCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; ROCHA, H.M. Distribuição Espaço- temporal e Sazonalidade das Chuvas no estado do Mato Grosso. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T.; NOBRE, C., ALVES, L.M. Atlas de Cenários Climáticos Futuros para o Brasil (Versão 1.0) Projeções climáticas (precipitações e temperatura) para o Brasil durante a segunda metade do Século XXI usando modelos regionais, nos cenários de baixas emissões (otimistas IPCC-B2) e de altas emissões (pessimista (IPCC-A2). 2007 (Relatório Técnico).

MARQUES, F. A. Sistema de controle dinâmico para a gestão dos usos múltiplos da água. 2010. Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil.

MARQUES, F. A. Sistema multi-usuário de gestão de recursos hídricos. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola.) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim, CA. Proceedings. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

MOLINA, P. A & LIMA, L. C. T. M. Estudo de secas agrícolas no Nordeste Brasileiro. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS: ÁGUA EM QUANTIDADE E QUALIDADE – O DESAFIO DO PRÓXIMO MILÊNIO. (CD-ROM). Belo Horizonte, MG, 1999.

MOREIRA, A. A. M. A influência da circulação de macroescala sobre o clima de Belo Horizonte: Estudo sobre as possíveis influências do fenômeno El Niño sobre o clima local. Belo Horizonte: UFMG, 1999. 186p. Dissertação Mestrado.

MORID, S.; SMAKHTIN, V.; MOGHADDASI, M. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, v. 26, p. 971-985. Abr. 2006.

MINUZZI, R. B. et al. El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005.

NEVES, J.A. Um índice de susceptibilidade ao fenômeno da seca para o semiárido nordestino. 2010. Doutorado em Matemática Computacional. Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Brasil.

NTALE, H. K.; GAN, T. Drought indices and their application to East Africa. *International Journal of Climatology*, v. 23, p. 1335-1357, 2003.

NDMC – National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, EUA. <http://drought.unl.edu>. Acesso em maio de 2016.

OLADIPO, E. O. A comparative performance analysis of three meteorological drought indices. *Journal of Climatology*, Chichester, v. 5, n. 6, p. 655–664, Nov./Dec. 1985.

ONU/UNCCD – Convención de Lucha contra La Desertificación. Informe de La Quinta Reunión del Grupo de Expertos del Comité de Ciencia y Tecnología. Madrid, España. 2007. 14p.

PALMER, W. C. Meteorological drought. Washington: U. S. Department of Commerce, 1965. 65 p. (Research paper, 45).

PARRY, M. L. & CARTER, T. R. Climate impact assessment: A review of some approaches, Capítulo 13, em D. A. Wilhite and W. E. Easterling (eds.), Planning for Drought: Toward a Reduction of Societal Vulnerability, Westview Press, Boulder, Colorado, EUA, 1987.

PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE – PIRH Doce, v. 1, relatório final, Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.

PEREIRA, L. S.; PAULO, A. A. Indicadores de Escassez de Água: Índices de Secas, Conf. Conv. Workshop Indicadores y Tecnologias de Uso del Agua en las Tierras secas de Iberoamérica (Proyecto CYTED XVII-1) CYTED, Mendoza, Argentina. 2004.

PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.8, n.2/3, p.247-253, 2004.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B. P. F.; TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. Escrituras, 2002.

REDMOND, K.T. The depiction of drought: a commentary. Bulletin of the American Meteorological Society, v.83, p.1143-1147, 2002.

REGO, F.S.; CASTILHO, A. S.; PINTO, E. J. A.; DAVIS, E. G.; CANDIDO, M. O. Monitoramento da estiagem nos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 na região sudeste do Brasil. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015.

REGO, F.S.; CASTILHO, A. S. ; PINTO, E. J. A. ; OLIVEIRA, M. C. ; DAVIS, E. G. . Acompanhamento da estiagem na região sudeste do Brasil em 2014 - Minas Gerais, Espírito Santo e sul da Bahia. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal. Anais XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014.

ROOY, M. P. van. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*, Pretoria, v. 14, p. 43-48, 1965.

ROSSI, G.; CASTIGLIONE, L.; BONACCORSO, B. Guidelines for planning and implementing drought mitigation measures. In: *Methods and tools for drought analysis and management*. Springer Netherlands, 2007. p. 325-347.

ROTONDO, V. H & SEILER, R. A. Ocorrência de sequias em el sur de la provincia de Córdoba-Argentina. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA E III REUNIÃO LATINO AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. 2001, Fortaleza, Ceará. *Anais... Fortaleza-Ceará: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia*, 2001, v.1, p. 317-318.

SANTOS, F. A. S; ANJOS, R. Utilização do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) no monitoramento da seca no Estado de Pernambuco. In: *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia 12.*, Fortaleza, *Anais... [S.l.]: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia*, 2001. p. 121-122.

SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M. Caracterização de secas em bacias hidrográficas de Portugal Continental: aplicação do índice de precipitação padronizada, SPI, a séries de precipitação e de escoamento. 2010.

SANTOS, T. S; SANSIGOLO, C. A. Frequência de eventos secos e chuvosos na Amazônia usando o Índice de Precipitação Normalizada (SPI). In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2010. Belém. *A Amazônia e o Clima Global*, 2010.

SILVA JÚNIOR, J.L.C., LYRA, G.B., SANTOS, S.N.M., SILVA, W.C.M., NETO, D. E., Identificação dos Períodos Secos e chuvosos pelo Método dos Quantis para a cidade de Viçosa – MG. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, (CD-ROM). Santa Maria, RS, 03 a 07 de agosto de 2003.

SILVA V.P.R., FILHO, A.F.B., DANTAS, R.T., BARACUY, J.H. Estudo de mudança climática em três localidades do Nordeste do Brasil. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, (CD-ROM). Foz do Iguaçu, PR, 04 a 09 de agosto de 2002.

SIMS, A.; NIYOGI, D.; RAMAN, S. Adopting drought indices for estimating soil moisture: A North Carolina case study. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 8, 1183, 2002.

SUDENE, Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste, O FENÔMENO DAS SECAS. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br/>. Acesso em maio de 2016.

SZALAI, S.; SZINELLI, C. S.; ZOBOKI, J. Drought monitoring in Hungary. In *Early warning systems for drought preparedness and drought management*. World Meteorological Organization, p. 182-199, Lisboa, 2000.

TADESSE T. Drought Indices: Overview and application. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, USA. 2006.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, v. 39, n. 7, p. 1082-1089, 1911

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. Geneva: World Meteorological Organization, 1966, 53 p. (WMO. Technical note, 81).

TOUCHAN, R.; FUNKHOUSER, G.; HUGHES, M.; ERKAN, N. SPI reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change*, v. 72, p. 339-353, 2005.

WILHITE, D.A. Drought. In: HOLTON, J.A.; PYLE, C.; CURRY, J.A. (Ed.). *Encyclopedia of atmospheric science*. New York: Elsevier, 2003. p.650-658.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water international*, v. 10, n. 3, p. 111-120, 1985.

WILHITE, D.A. Drought assessment, management and planning: Theory and case studies, Kluwer Acad. Publ., Boston, Mass. 1993.

WMO. 1986. Report on drought and countries affected by drought during 1974—1985. Tech. rept. World Meteorological Organization, Geneva.

WU, H.; HAYES, M.J.; WILHITE, D.A.; SVOBODA, M.D. The effect of the length of record on the Standardized Precipitation Index calculation. *International Journal of Climatology*, v.25, p.505-520, 2005.

WILKS, D. S. Maximum likelihood estimation for the gamma distribution using data containing zeros. *Bull. American Meteorological Society*, v. 3, p. 1495-1501. Dez, 1990.

WU, H.; SVOBODA, M.D.; HAYES, M.J.; WILHITE, D.A.; WEN, F. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, v.27, p.65-79, 2007.

WU, H.; HAYES, M.; WEISS, A.; HU, Q. An evaluation of the SPI, the China-Z index and the statistical Z-score. *International Journal Climatology*, v. 21, p. 745-758, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A. Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1741006	LADAINHA (EFBM)	-17,6294	-41,7372	430
1742014	CAPELINHA	-17,6917	-42,5261	890
1742017	MALACACHETA	-17,8456	-42,0756	-
1742019	ÁGUA BOA	-17,9922	-42,3939	600
1840003	ITAUNINHAS	-18,4894	-40,0906	90
1840004	BARRA DE SÃO FRANCISCO	-18,7536	-40,8936	192
1840019	CÓRREGO DA BOA ESPERANÇA	-18,7006	-40,4419	80
1841001	VILA MATIAS - MONTANTE	-18,5747	-41,9178	174
1841003	CAMPANÁRIO	-18,2386	-41,7486	240
1841006	VARGEM GRANDE	-18,6811	-41,1967	360
1841007	FIDELÂNDIA - MONTANTE	-18,2031	-41,2483	210
1841019	DIVINO DAS LARANJEIRAS	-18,7769	-41,4828	535
1841020	GOVERNADOR VALADARES	-18,8831	-41,9503	150
1842004	SÃO PEDRO DO SUAÇUÍ	-18,3583	-42,5956	498
1842005	COROACI	-18,6119	-42,2786	530
1842007	GUANHÃES	-18,7722	-42,9311	808
1842008	SANTA MARIA DO SUAÇUÍ	-18,2011	-42,4553	420
1842020	SÃO JOÃO EVANGELISTA	-18,5528	-42,7642	532
1843002	GOUVEIA	-18,4656	-43,7431	1200
1843003	MENDANHA - MONTANTE	-18,1133	-43,5203	803
1843011	SERRO	-18,5928	-43,4125	940
1843012	RIO VERMELHO	-18,2797	-43,0006	720
1940000	ITARANA	-19,8744	-40,8744	165
1940001	SÃO JOÃO DE PETRÓPOLIS	-19,8053	-40,6789	149
1940003	RIACHO	-19,7497	-40,0431	5
1940005	CAVALINHO	-19,6922	-40,3981	50
1940006	COLATINA-CORPO DE BOMBEIRO	-19,5308	-40,6231	40
1940009	PANCAS	-19,2203	-40,8533	135
1940013	NOVO BRASIL	-19,2375	-40,5914	170
1940016	BARRA DE SÃO GABRIEL	-19,0578	-40,5164	70
1940021	ARACRUZ	-19,8300	-40,2722	58
1940022	JACUPEMBA	-19,5886	-40,1981	50
1940023	RIO BANANAL	-19,2742	-40,3208	95
1941000	IPANEMA	-19,7989	-41,7061	260
1941003	BAIXO GUANDÚ	-19,5236	-41,0142	70
1941004	RESPLENDOR - JUSANTE	-19,3431	-41,2461	130
1941005	BARRA DO CUIETÉ - JUSANTE	-19,0617	-41,5328	-
1941006	ASSARAI - MONTANTE	-19,5947	-41,4581	172
1941009	IBITUBA	-19,6911	-41,0200	160
1941011	SANTO ANTÔNIO DO MANHUAÇU	-19,6783	-41,8361	290
1941012	ALTO RIO NOVO	-19,0592	-41,0275	500

Continua...

Tabela 1A. Continuação

Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1941018	ITANHOMI	-19,1758	-41,8703	255
1941019	MUTUM	-19,8111	-41,4378	0
1942002	BOM JESUS DO GALHO	-19,8336	-42,3178	505
1942006	VERMELHO VELHO	-19,9989	-42,3475	420
1942008	DOM CAVATI	-19,3736	-42,1050	355
1942029	MARIO DE CARVALHO	-19,5247	-42,6442	232
1942030	CENIBRA	-19,3164	-42,3961	-
1942032	NAQUE VELHO	-19,1886	-42,4228	240
1943001	RIO PIRACICABA	-19,9228	-43,1778	623
1943002	CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	-19,0167	-43,4442	675
1943003	FERROS	-19,2503	-43,0144	470
1943004	JABOTICATUBAS	-19,5206	-43,7444	716
1943008	SANTA MARIA DO ITABIRA	-19,4419	-43,1178	538
1943010	CAETÉ	-19,9006	-43,6675	840
1943024	JOSÉ DE MELO	-19,6897	-43,5856	825
1943025	MORRO DO PILAR	-19,2175	-43,3742	560
1943027	USINA PETI	-19,8808	-43,3675	1110
1943042	FAZENDA CARAIBAS	-19,1197	-43,8375	700
2040010	SANTA LEOPOLDINA	-20,1003	-40,5278	160
2040015	PEROBINHA (DNOS)	-20,2836	-40,7831	640
2041005	CAIANA	-20,6939	-41,9219	747
2041008	DORES DO MANHUMIRIM	-20,1081	-41,7283	458
2041017	SANTA CRUZ - CAPARÃO	-20,3228	-41,7042	920
2041018	USINA FORTALEZA	-20,3714	-41,4089	580
2041019	ITAICI	-20,5283	-41,5114	380
2041020	ARACE (DNOS)	-20,3667	-41,0611	1075
2041023	AFONSO CLÁUDIO - MONTANTE	-20,0786	-41,1214	300
2041048	FAZENDA VARGEM ALEGRE	-20,1825	-41,9611	-
2042011	RIO CASCA	-20,2261	-42,6500	330
2042014	BICUIBA	-20,7694	-42,3011	630
2042016	SÃO MIGUEL DO ANTA	-20,6825	-42,8067	583
2042017	MATIPÓ	-20,2772	-42,3256	595
2042018	PONTE NOVA - JUSANTE	-20,3847	-42,9028	350
2042031	FAZENDA CACHOEIRA D'ANTAS	-20,0114	-42,6742	-
2043005	CONSELHEIRO LAFAIETE	-20,6650	-43,7778	996
2043010	PIRANGA	-20,6906	-43,2994	620
2043025	USINA DA BRECHA	-20,5167	-43,0167	529
2043026	BRAZ PIRES	-20,8475	-43,2419	632
2043027	FAZENDA OCIDENTE	-20,2856	-43,0989	462
2043056	FAZENDA ÁGUA LIMPA - JUSANTE	-20,3053	-43,6164	965
2043059	COLÉGIO CARAÇA	-20,0969	-43,4881	1300
2044007	ENTRE RIOS DE MINAS	-20,6611	-44,0706	885

Continua...

Tabela 1A. Continuação

Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
2142000	ASTOLFO DUTRA	-21,3069	-42,8606	231
2142004	FAZENDA UMBAÚBAS	-21,0503	-42,5156	490
2143000	USINA ITUERÊ	-21,3094	-43,2022	512
2143003	DESTERRO DO MELO	-21,1492	-43,5200	780
2143006	BARROSO	-21,1872	-43,9800	881
2143020	CHAPEU D'UVAS	-21,5942	-43,5053	702

APÊNDICE B

Tabela 1B. Estações pluviométricas com falhas, estações de apoio e equações para o preenchimento de falhas

Est. com falha (Y)	Est. de apoio (X)	Equação	R ²	Porcentagem de falhas (%)
1741006	1742017	$y = 0,7687x + 19,081$	0,80	0,8
1840019	1940016	$y = 0,765x + 11,974$	0,74	0,3
1841003	1841001	$y = 0,8762x + 11,893$	0,78	0,3
1841019	1841006	$y = 0,9655x + 3,8663$	0,77	0,8
1841020	1941018	$y = 0,9355x + 6,2877$	0,85	0,3
1842004	1842020	$y = 0,8644x + 6,5701$	0,80	1,4
1842020	1843012	$y = 0,922x + 5,6581$	0,84	0,6
1843002	1843011	$y = 0,8034x + 10,87$	0,81	1,9
1843003	1842020	$y = 0,9691x + 0,891$	0,84	4,2
1843012	1842020	$y = 0,9077x + 10,731$	0,84	0,3
1940005	1940021	$y = 0,8959x + 11,439$	0,79	0,3
1940013	1940009	$y = 0,8916x + 4,7445$	0,84	0,3
1940021	1940005	$y = 0,8783x + 12,616$	0,79	1,7
1940023	1940013	$y = 0,9108x + 15,348$	0,80	0,3
1941000	1941019	$y = 0,9833x + 9,7299$	0,85	0,6
1941003	1941009	$y = 0,9266x + 2,5557$	0,85	0,6
1941005	1841020	$y = 0,8275x + 8,8594$	0,79	0,6
1941018	1841020	$y = 0,9071x + 6,4255$	0,85	0,3
1942002	1942008	$y = 0,9149x + 10,732$	0,82	0,8
1942006	2042031	$y = 0,9193x + 11,539$	0,81	0,3
1942029	1943003	$y = 0,9739x + 8,0313$	0,82	3,1
1942030	1942008	$y = 0,9461x + 10,363$	0,82	3,6
1942032	1942008	$y = 1,0108x + 11,123$	0,82	3,6
1943004	1943024	$y = 0,8316x + 1,587$	0,86	3,1
1943008	1943027	$y = 0,7649x + 12,311$	0,80	1,1
1943024	1943027	$y = 0,9485x + 6,6682$	0,88	0,6
1943027	2043027	$y = 0,993x + 6,676$	0,88	2,5
1943042	1943024	$y = 0,7483x + 8,1635$	0,80	1,4
2040010	1940021	$y = 0,9306x + 21,69$	0,70	0,3
2040015	2041020	$y = 0,7505x + 16,096$	0,76	0,3
2041005	2042014	$y = 0,8168x + 15,026$	0,74	0,8
2041018	2041020	$y = 0,8718x + 15,915$	0,79	0,8
2041023	1941006	$y = 0,8683x + 14,565$	0,74	0,8
2041048	2042017	$y = 0,9636x + 7,7669$	0,75	0,6
2042011	2042018	$y = 1,1272x + 2,7739$	0,82	0,8
2042014	2142004	$y = 0,888x + 10,833$	0,82	0,8
2042016	2043025	$y = 0,7975x + 11,737$	0,81	0,3
2042017	1942006	$y = 0,8719x + 9,3394$	0,80	0,3

Continua...

Tabela 1B. Continuação

Est. com falha (Y)	Est. de apoio (X)	Equação	R²	Porcentagem de Falhas (%)
2042018	2043025	$y = 0,8592x + 9,8234$	0,87	0,3
2043005	2044007	$y = 0,9441x + 9,1187$	0,85	0,6
2043010	2043026	$y = 1,0126x + 10,697$	0,87	0,3
2043026	2043010	$y = 0,8588x + 5,3944$	0,87	1,4
2043059	2043056	$y = 1,4685x + 2,6692$	0,84	1,1
2142000	2143003	$y = 0,7667x + 11,216$	0,81	0,3
2142004	2042014	$y = 0,9211x + 12,604$	0,82	2,5
2143003	2143000	$y = 1,0496x + 8,7999$	0,82	0,6
2143006	2143003	$y = 0,7667x + 11,821$	0,81	4,4
2143020	2143003	$y = 0,7286x + 19,006$	0,72	0,8

APÊNDICE C

Tabela 1C. Estações dominantes em cada unidade de análise da bacia do rio Doce

Unidade de Planejamento (Área total)	Código	Área de influência (km ²)	Porcentagem da área total
UA1 Piranga (17.585,5 km ²)	1942002	1.059,1	6,0
	1942006	912,8	5,2
	1942029	517,7	2,9
	1942030	3,1	0,1
	1943001	118,5	0,7
	2041048	30,7	0,2
	2042011	1.188,6	6,8
	2042014	408,3	2,3
	2042016	1.801,5	10,2
	2042017	1.400,2	8,0
	2042018	836,2	4,8
	2042031	1.439,2	8,2
	2043005	793,9	4,5
	2043010	1.403,2	8,0
	2043025	843,6	4,8
	2043026	1.597,4	9,1
	2043027	1.277,8	7,3
	2043056	623,8	3,5
	2043059	142,4	0,8
	2142004	127,7	0,7
	2143000	62,6	0,4
2143003	997,3	5,7	
UA2 Piracicaba (5.686,1 km ²)	1942029	1.228,8	21,6
	1942030	39,1	0,7
	1943001	1.541,8	27,1
	1943003	2,0	0,0
	1943008	480,5	8,5
	1943010	134,9	2,4
	1943024	187,9	3,3
	1943027	875,6	15,4
	2042031	196,2	3,5
	2043027	112,5	2,0
	2043056	42,4	0,7
	2043059	844,4	14,9

Continua...

Tabela 1C. Continuação

Unidade de Planejamento (Área total)	Código	Área de influência (km²)	Porcentagem da área total
UA3 Santo Antônio (10.756,5 km ²)	1842007	1.361,8	12,6
	1843011	1.426,5	13,3
	1843012	95,4	0,9
	1942029	231,2	2,1
	1942030	349,6	3,2
	1942032	1.033,2	9,6
	1943002	1.625,2	15,0
	1943003	1.832,7	17,0
	1943004	0,1	0,1
	1943008	1.235,4	11,5
	1943024	394,9	3,7
	1943025	1.160,8	10,8
	1943027	16,4	0,2
	1943042	2,3	0,1
UA4 Suaçuí (21.595,5 km ²)	1741006	11,1	0,1
	1742014	32,9	0,2
	1742017	1.291,1	6,0
	1742019	1.184,8	5,5
	1841001	1.793,5	8,3
	1841003	1.938,2	9,0
	1841006	78,4	0,4
	1841019	1.319,0	6,1
	1841020	1.074,0	5,0
	1842004	1.171,5	5,4
	1842005	2.285,5	10,5
	1842007	1.038,6	4,8
	1842008	1.439,2	6,7
	1842020	1.445,3	6,7
	1843011	39,0	0,2
	1843012	1.734,2	8,0
	1940009	213,9	1,0
	1941003	242,9	1,1
	1941004	592,4	2,7
	1941005	793,4	3,7
	1941012	819,3	3,8
1942030	1,3	0,1	
1942032	1.056,0	4,9	

Continua...

Tabela 1C. Continuação

Unidade de Planejamento (Área total)	Código	Área de influência (km²)	Porcentagem da área total
UA5 Caratinga (6.693,4 km ²)	1841020	643,2	9,6
	1941004	123,7	1,8
	1941005	808,9	12,1
	1941006	10,9	0,2
	1941011	654,4	9,8
	1941018	1.500,9	22,4
	1942002	598,7	8,9
	1942006	41,7	0,6
	1942008	1.551,7	23,2
	1942029	127,0	1,9
	1942030	554,0	8,3
	1942032	61,0	0,9
	2041048	17,4	0,3
UA6 Manhuaçu (9.215,7 km ²)	1941000	893,6	9,7
	1941003	270,6	2,9
	1941004	669,7	7,3
	1941005	50,9	0,6
	1941006	1.397,7	15,2
	1941009	196,7	2,1
	1941011	934,5	10,1
	1941018	78,2	0,8
	1941019	1.262,4	13,7
	1942002	1,4	0,1
	1942006	6,7	0,1
	2041005	110,0	1,2
	2041008	1.102,9	12,0
	2041017	352,9	3,8
	2041018	112,3	1,2
	2041023	104,5	1,1
	2041048	1.458,5	15,8
2042017	212,3	2,3	
UA7 Guandu (2.481,4 km ²)	1940000	186,5	7,5
	1940006	9,9	0,4
	1941003	282,4	11,4
	1941009	647,1	26,1
	1941019	7,8	0,3
	2041018	95,9	3,9
	2041020	79,8	3,2
	2041023	1.171,9	47,2

Continua...

Tabela 1C. Continuação

Unidade de Planejamento (Área total)	Código	Área de influência (km²)	Porcentagem da área total
UA8 Santa Maria do Doce (3.079,4 km ²)	1940000	573,6	18,6
	1940001	756,4	24,6
	1940003	199,3	6,5
	1940005	448,5	14,6
	1940006	517,4	16,8
	1940022	376,1	12,2
	1941003	1,9	0,1
	1941009	142,5	4,6
	2041023	63,7	2,1
	UA9 São José (9.800,3 km ²)	1840003	404,0
1840004		198,7	2,0
1840019		700,4	7,1
1940003		338,3	3,5
1940005		35,7	0,4
1940006		594,1	6,1
1940009		864,1	8,8
1940013		769,6	7,9
1940016		1.343,1	13,7
1940022		683,0	7,0
1940023		3.149,6	32,1
1941003		178,3	1,8
1941012		541,3	5,5