

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL**

CARLA FERREIRA JOSEF

**REGIME HIDROLÓGICO DAS NASCENTES NA BACIA DO RIBEIRÃO DAS
POSSES, EXTREMA, MG.**

**SÃO PAULO
2020**

CARLA FERREIRA JOSEF

Regime hidrológico das nascentes na bacia do Ribeirão das Posses, Extrema, MG.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciência Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha

SÃO PAULO
2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Josef, Carla Ferreira.

Regime hidrológico das nascentes na Bacia do Ribeirão das Posses, Extrema, MG. / Carla Ferreira Josef; orientador: Humberto Ribeiro da Rocha. – São Paulo, 2020.

151 f.: il; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Recursos hídricos. 2. Nascentes. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: JOSEF, Carla Ferreira

Título: **Regime hidrológico das nascentes na bacia do Ribeirão das Posses, Extrema, MG.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciência Ambiental.

Aprovada em:

Banca Examinadora

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Presidente: _____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Ao meu SUPER Orientador Humberto (e à sua visão além do alcance). Quem desde o 1º dia mostrou que para fazer ciência é com a cabeça nas nuvens, mas com os pés no chão (essa foi a frase da nossa primeira conversa). Quero, sinceramente, agradecer todo apoio, conversas, discussões e todo aprendizado conduzido durante todo o processo! Sou eternamente grata por tudo!

À Mari Chitolina! Que além de ter feito meus campos mais divertidos, também descobri uma grande amiga, que durante esses anos mostrou ser uma pessoa que sabe respeitar a pluralidade dos seres, além de ser uma talentosa e humilde pesquisadora, que nunca poupa esforços para ajudar qualquer um ao seu lado. Orgulho e gratidão por tê-la ao meu lado!

A todos do LCB: Rainny, Léo, Emília, Duda, Thomas, Eduardinho, Rodolfo, Anderson, Pati, Miriam, Rafael, Iza, Helber, Pierre... Sem vocês essa tese definitivamente não teria acontecido! Obrigada por todos os ensinamentos, tanto técnico, como de vida! Cada café com discussões políticas e psicológicas, a convivência com nossas diferenças me ensinou muito. Decididamente nosso “Laboratório de Café e Bolo” é o melhor! A vocês, meus sinceros agradecimentos! Vocês certamente fizeram essa jornada mais leve! “Você é bem louco” vai entrar para a vida!

Ao pessoal SMA de Extrema: Gerson, Francisco, seu Elias, Alessandro, Aline, Luiz Gustavo, Arlindo e Paulinho! Sem o constante e incondicional apoio de vocês essa tese não teria saído!

Ao André e ao Anderson, que além de fazerem o campo mais divertido, trouxeram valiosas contribuições para essa pesquisa.

Aos amigos (não vou citar nomes para não correr o risco de esquecer alguém) de fora do lab, que entenderam minha ausência, mas que estiveram ao meu lado para desabafar, apoiar e discutir em momentos tão valiosos!

Ao pessoal do IAG (desde a portaria, secretárias, pessoal da informática), sempre colaborando com muita disposição e simpatia.

Aos funcionários e professores do PROCAM.

À família Projeto Liberdade Capoeira (sem citar nomes, pois foi tanta gente!). Com quem eu recarreguei minhas energias nos momentos mais difíceis! Vocês foram parte fundamental para esse processo.

À FAPESP, pelo apoio financeiro, aos projetos nº 2015/50682-6 -“Investimentos Pro Climáticos Inteligentes em Bacias de Montanhas Tropicais da América do Sul /*Climate-Smart Watershed Investments in the Montne Tropics of South America*” e nº: 2012/51872-5: Fapesp/NERC (*Natural Environment Research Council*) “ECOFOR: Biodiversidade e funcionamento de ecossistemas em áreas alteradas pelo homem nas Florestas Amazônica e Atlântica”;

À CAPES pela bolsa concedida sob o código 001.

Aos meus grandes amores: Nedy, Henrique, Thiago, Priscila, Gabriela, Bruna e Giulia! Vocês são o grande sentido disso tudo!

*Água que nasce na fonte, serena do mundo e que abre um profundo grotão,
Água que faz inocente, riacho e deságua na corrente do ribeirão,
Águas escuras dos rios que levam a fertilidade ao sertão
Águas que banham aldeias e matam a sede da população
Águas que caem das pedras no véu das cascatas, ronco de trovão
E depois dormem tranquilas no leito dos lagos, no leito dos lagos...*

*Água dos igarapés onde Iara, a mãe d'água é misteriosa canção
Água que o sol evapora, pro céu vai embora, virar nuvens de algodão.*

*Gotas de água da chuva, alegre arco-íris, sobre a plantação
Gotas de água da chuva tão tristes, são lágrimas na inundação.*

*Águas que movem moinhos são as mesmas águas que encharcam o chão
E sempre voltam humildes pro fundo da terra.*

Terra! Planeta Água...

Guilherme Arantes

*Dedico essa tese a todos os que acreditam na
educação, ciência e a preservação dos ecossistemas
como único caminho para um mundo melhor.*

RESUMO

JOSEF, Carla Ferreira. **Regime hidrológico das nascentes na bacia do Ribeirão das Posses, Extrema, MG.** 153 f. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2020.

Este trabalho investigou os padrões hidrológicos de um conjunto de medidas diretas de vazão de água superficial em locais com surgência de nascentes na bacia do Ribeirão das Posses (Extrema, MG), localizada na Serra da Mantiqueira, e buscou definir modos de variabilidade do regime hidrológico das nascentes no espaço e no tempo, e a influência decorrente de fatores fisiográficos como a topografia, a vegetação e o solo. Foi utilizado um amplo conjunto de medições de campo, com medidas de vazão na base mensal com método manual de 39 nascentes desde janeiro/2016 até outubro/2019, estações meteorológicas automáticas (Vaisalla WXT) e estações pluviométricas convencionais (ANA) para estimativa de precipitação, nível automático do aquífero em poços piezométricos dispostos na faixa ripária e próximos de nascentes, e de vazão no exutório da bacia com estimativa do escoamento básico. Foi estimado um conjunto de séries temporais das nascentes desagregado na base diária, utilizando-se métodos estatísticos de Regressão Linear simples (RL) e Múltipla (RLM) e Análise de Componentes Principais (ACP). Para uma análise de influência de características biofísicas da bacia (declividade, vegetação, solo) com parâmetros hidrológicos foi utilizado Análise de Componentes Principais Rotacionadas (ACPR). O regime de vazão em todas as nascentes sem exceção mostrou características sazonais em coerência com o regime de chuvas e de escoamento básico na bacia. O regime piezométrico na faixa ripária e nas áreas de encosta foram úteis na explicação de um modelo de base diária para desagregação da vazão das nascentes. Determinou-se um padrão de vazões máximas e mínimas (em Ls^{-1}) em função da área de contribuição de todas as nascentes que levou à identificação de dois grupos funcionais de vazão específica (em $mm d^{-1}$): o primeiro definido como de nascentes de alta produtividade, com regime de vazão específica na amplitude de $0,50 mm d^{-1}$ (mínima) a $2,6 mm d^{-1}$ (máxima), e o segundo de baixa produtividade, com regime de vazão específica na amplitude de $0,02 mm d^{-1}$ (mínima) a $0,76 mm d^{-1}$ (máxima). O grupo de baixa produtividade foi dominante nas nascentes de menor área de contribuição, na maioria $< 10 ha$. No grupo de nascentes de alta produtividade mostrou-se ser mais bem estabelecida uma relação de proporção inversa do coeficiente de recessão com as vazões mínimas, o que sugere caracterizar este grupo com uma capacidade de armazenamento suficiente para prover regimes de descarga suaves ao longo da estiagem. No grupo de nascentes de baixa produtividade o regime de descarga sugere ser limitado e de características possivelmente heterogêneas comparando-se as nascentes. As análises com RL e ACPR sugeriram de forma geral que os parâmetros hidrológicos de vazão específica mínima (Q5%) e do coeficiente de recessão (α) foram bastante sensíveis à variabilidade do índice de declividade a 50 m. Isto sugere a noção de que as nascentes operam durante a estiagem em uma faixa de dependência de zonas de contribuição muito próximas e especialmente sensíveis à declividade nas cercanias, possivelmente desconectadas da área de contribuição total. Pela RL as nascentes do grupo de alta produtividade foram em especial as mais sensíveis à esta dependência, enquanto pela ACPR não foi possível distinguir os grupos, uma vez que a análise não discriminou os grupos no conjunto amostral. As análises de RL e ACPR dos parâmetros hidrológicos com os índices de vegetação não se mostraram conclusivas. Não se pode estipular que a ausência de

conclusão fosse devido à não-causalidade, ou à relativa baixa variabilidade de vegetação arbórea no grupo amostral. De forma modesta pela RL, mas significativamente pela ACPR, indicou-se que o amortecimento da depleção hidrológica aumenta com a proporção de solo PVNV. O trabalho mostra pioneiramente o conjunto mais amplo de medidas de vazão em nascentes e variáveis hidroclimatológicas em uma bacia na Serra da Mantiqueira, e possivelmente no Brasil segundo nosso conhecimento até então, com a explicação de grupos funcionais de nascentes e sua dependência de fatores fisiográficos. Este trabalho poderá auxiliar na identificação de áreas preferenciais para implantação de projetos de manejo da vegetação visando à otimização da disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: nascentes; regime hidrológico; Ribeirão das Posses; padrões hidrológicos de nascentes

ABSTRACT

JOSEF, Carla Ferreira. **Hydrologic regime of springs at Ribeirão das Posses watershed, Extrema, MG**. 153 f. Doctorate Thesis (Environmental Science) – Institute of Energy and Environment of University of São Paulo, São Paulo, 2020.

This research has investigated the hydrological pattern of a spring flow measures at Ribeirão das Posses watershed (Extrema, MG, Brazil), located at *Serra da Mantiqueira*. We sought to define modes of variability of the springs hydrological regime in space and time, and the (its) influence of physiographic factors such as topography, vegetation and soil. A wide range of field measurements were used based on monthly measures, using a manual method to measure 39 springs, from January 2016 to October 2019. To estimate rainfall it were used automatic weather stations (Vaisalla WXT) and conventional rainfall stations (ANA). The aquifer levels were estimated by piezometric wells disposed in the riparian strip and near springs, and outflow in the basin were used to estimate baseflow. A set of time-series of the disaggregated springs on a daily basis was estimated using statistical methods of simple Linear Regression (LR) and multiple (MR) and Principal Component Analysis (PCA). To analyse the influence of biophysical features of the basin (slope, vegetation, soil) on the hydrological parameters was used Rotated Principal Component Analysis (RPCA). The spring flow regime without exception showed seasonal characteristics consistent with the watershed rainfall and baseflow regime. The piezometric regime in the riparian strip and in hillside was useful explaining a daily basis model of spring flow disaggregation. A maximum and minimum flow pattern (in Ls^{-1}) was determined as a function of the contribution area of all springs that led to the identification of two functional groups (in $mm d^{-1}$): the first one defined as high productivity springs, with specific flow regime in the range of 0.50 $mm d^{-1}$ (minimum) to 2.6 $mm d^{-1}$ (maximum), and a second group of low productivity, with specific flow rate in the range of 0.02 $mm d^{-1}$ (minimum) to 0.76 $mm d^{-1}$ (maximum). The low productivity group was dominant in the springs with the smaller contribution area, the majority <10 ha. The high-yielding spring group shows an inverse ratio of recession coefficient with the minimum flow rates, suggesting that this group should be characterized with sufficient storage capacity to provide gentle discharge regimes along the drought. In the group of low productivity, the discharge regime suggests to be limited and possibly heterogeneous characteristics, when comparing the springs. Analyzes with LR and ACPR generally suggested that the hydrological parameters of minimum specific flow (Q5%) and recession coefficient (α) were very sensitive to the variability of the slope at 50 m, what suggests the notion that springs operate during drought in a range of contribution zones that are very close and especially sensitive to slopes in the close areas, possibly disconnected from the full contribution area. Using the LR, the high-yielding springs were especially sensitive to this dependence, while the RPCA could not distinguish the groups, since the analysis did not discriminate the groups in the sample set. The LR and RPCA analyzes of hydrological parameters with vegetation indices were not conclusive. It cannot be stipulated that the absence of conclusion was due to non-causality or the relatively low variability of arboreous vegetation in the sample group. Modestly by LR, but significantly by RPCA, it was indicated that hydrological depletion damping increases with the proportion of PVNV soil. The research is pioneered in the broadest set of spring flow measurements and hydroclimatological variables in a basin in the *Serra da Mantiqueira*, and possibly in Brazil, as our knowledge so far, explaining functional groups of springs and their dependence on physiographic factors. This work may assist in the identification of preferred areas for the implementation of vegetation management projects, aiming the optimization of water availability.

Key-words: Springs, hydrological regime, Ribeirão das Posses, springs hydrological pattern.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Variação do volume útil total (em %) do sistema Cantareira e da precipitação diária.....	19
Figura 1.2: Definição do período de recessão hidrológica.	27
Figura 2.1: (a) Localização de Extrema, MG; (b) Área de estudo: bacia do Ribeirão das Posses.	30
Figura 2. 2: Mapa precipitação do Estado de Minas Gerais (mm/ano)	31
Figura 2. 3: (a) Estações automáticas WXT1520 do Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/Usp e pluviométricas da ANA (b) Estação WXT1520 (Vaisala, Finland) (pressão atmosférica, umidade do ar, precipitação, temperatura do ar e velocidade do vento) instalada na bacia.	34
Figura 2. 4: Sistema de medição de nível de água de poço piezométrico. (a) exemplo de piezômetro instalado; (b) sensor automático Solinst Levelogger Edge dentro de um poço, com medição da pressão absoluta, e Barologger utilizado para compensar oscilação barométrica atmosférica (c) Localização dos poços piezométricos na bacia do Ribeirão das Posses	34
Figura 2. 5: Localização dos pontos monitorados.	35
Figura 2.6: Exemplo de nascentes e abordagem de medição manual.....	36
Figura 2. 7: Precipitação diária (mm d^{-1}) na bacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2017 e 2018, para definição dos intervalos de recessão (linha tracejada entre setas).	38
Figura 2. 8: Pontos nos quais foram efetuadas medidas diárias no ano de 2019. (a) Localização na bacia; (b) delimitação da área.	39
Figura 2. 9: Informações de elevação de terreno obtidos com ARP.....	41
Figura 2. 10: MDT e curvas de nível geradas com ARP.	41
Figura 2. 11: Delimitação das áreas contribuição das nascentes geradas com ARP.....	42
Figura 2. 12: Contorno dos limites da sub-bacia: (a): Aeronave Remotamente Piloto (ARP) usada para fotografias aéreas; (b): Os dados obtidos.....	43
Figura 2. 13: Distribuição das classes de solo	45
Figura 3. 1: variância explicada por cada componente principal (PC) dos grupos 1 a 6 (G1 a G6).	46
Figura 3.2: pesos (<i>loadings</i>) das variáveis de cada grupo G1 a G6.....	47
Figura 3.3: <i>Scores</i> das CPs do grupo G1, composto pelas medidas dos poços piezométricos P2 ao P6 e escoamento básico do Ribeirão das Posses. Falhas na série decorrentes de ausência de medição foram preenchidas através de modelo linear com os dados do grupo 5.	48

Figura 3.4: Scores das CPs do grupo G2, composto pelas medidas dos poços piezométricos P2 ao P6, escoamento básico e precipitação.....	48
Figura 3.5: Scores das CPs do grupo G3, composto pelas medidas dos poços piezométricos P1/N15, P2/N15e escoamento básico.....	48
Figura 3.6: Scores das CPs do grupo G4 (medidas dos poços piezométricos P1/N15, P2/N15, escoamento básico e precipitação), preenchidas com modelo linear com grupo 5.	49
Figura 3.7: Scores das CPs do grupo G5, composto por escoamento básico e precipitação	49
Figura 3.8: Scores das CPs do grupo G3, composto pelas medidas dos poços piezométricos P2/Q4, P3/Q4 e escoamento básico.....	49
Figura 3.9: (a) exemplo de modelo ajustado com bom desempenho (Nascente N2, com $R^2 = 0,97$ e $p = 3,4 \cdot 10^{-16}$), (b) regressão linear indicando o desempenho do modelo.....	51
Figura 3.10: (a) exemplo de modelo ajustado com bom desempenho intermediário (Nascente R8, com $R^2 = 0,65$ e $p = 3,4 \cdot 10^{-6}$).	51
Figura 3.11: (a) exemplo de modelo ajustado com baixo desempenho (Nascente N15, com $R^2 = 0,6$ e $p = 1,3 \cdot 10^{-5}$)	51
Figura 3.12: Série histórica da vazão das nascentes.	52
Figura 3.13: Distribuição da frequência da vazão ($L s^{-1}$) de todo conjunto amostral.....	53
Figura 3.14: Histograma da vazão específica de todos os dados (teste Kolmogorov–Smirnov: (a) $p = 2.461e^{-10}$; (b) $p < 2.2e^{-16}$)......	54
Figura 3.15: Distribuição da vazão em ordem crescente por nascente, incluindo-se o escoamento básico da bacia (calculado no mesmo intervalo modelado das 39 nascentes).	56
Figura 3.16: Coeficiente de variação das nascentes (em %) disposto segundo ordem hierárquica da vazão específica na Fig. 3.15.....	58
Figura 3.17: Relação vazão versus área de contribuição.	59
Figura 3.18: Relação entre vazões máximas ($p_{95\%}$ em L/s) das nascentes e suas áreas de contribuição (ha), com regressões lineares (linha tracejada) indicando dois grupos distintos:	61
Figura 3.19: Relação entre vazões máximas ($p_{05\%}$ em L/s) das nascentes e suas áreas de contribuição (ha), com regressões lineares (linha tracejada) indicando dois grupos distintos:.....	61
Figura 3.20: diagrama indicando subgrupos funcionais. Com nascentes de alta e baixa produção de água. As azuis indicam as vazões máximas (95%) e as cores salmão indicam as vazões específicas mínimas.....	63

Figura 3.21: <i>Boxplot</i> das médias do escoamento e da chuva na bacia.....	64
Figura 3.22: Escoamento básico específico (mm mês ⁻¹) (linha azul sólida) e precipitação acumulada (mm mês ⁻¹) (barra vertical) da bacia do Ribeirão das Posses no intervalo dos anos 2010 a 2019.	64
Figura 3.23: (a) Precipitação, vazão e escoamento básico. (b) Coeficiente de escoamento e índice de escoamento básico.....	65
Figura 3.24: (a) Vazão específica: Escoamento básico diário na foz da bacia (linha azul); Média específica temporal de todas as nascentes pesquisadas, calculada através do modelo (linha preta); Média da vazão específica diária das nascentes medidas (círculos vermelhos) e precipitação (barras azuis claras). Todos em mm dia ⁻¹	66
Figura 3.25: regressão entre o escoamento básico da bacia e a média de todas as nascentes (em mm d ⁻¹); (b) para a vazões diárias e (c) medidas mensais.	66
Figura 3. 26: Foto aérea com (a) localização do sistema 1 na bacia do Posses; (b) pontos de nascentes N8, N14, N15, R1, R2, R3 e R4 com áreas de contribuição individuais (linha em tons de vermelho) e linha do talvegue (em azul); (c) conexão hidrológica superficial dos pontos; (d) foto panorâmica das áreas.....	69
Figura 3.27: Correlação entre os pontos monitorados do sistema 1. (a) medidas mensais. (b) diárias.....	70
Figura 3. 28: vazão específica média mensal das nascentes que fazem parte do sistema 1 e escoamento básico.....	71
Figura 3.29: (a) Localização dos sistemas 2 e 3 na bacia; (b) Foto aérea com aproximação dos sistemas e respectivos delineamentos das áreas de contribuição de cada ponto; (c) conexão hidrológica superficial dos pontos.....	72
Figura 3. 30: Correlação entre os pontos monitorados dos sistemas 2 e 3	73
Figura 3. 31: vazão específica média mensal das nascentes que fazem parte do sistema 2 e escoamento básico.....	74
Figura 3. 32: vazão específica média mensal das nascentes que participam do sistema 3 e escoamento básico.....	74
Figura 3. 33: (a) Localização dos sistemas 4 e 5 na bacia. (b) Foto aérea com aproximação dos sistemas e respectivos delineamentos das áreas de contribuição de cada ponto.	75
Figura 3. 34: correlação de Pearson calculada entre a vazão modelada das nascentes que compõe os sistemas 4 e 5.....	76
Figura 3. 35: média mensal da vazão modelada para as nascentes que compõem o sistema 4.	77

Figura 3.36: média da vazão mensal modelada para as nascentes que compõem o sistema 5.	77
Figura 3.37: (a) Localização dos pontos médios diariamente na bacia do Ribeirão das Posses. (b) Foto aérea aproximando os pontos e respectivos delineamentos das áreas de contribuição de cada ponto.....	78
Figura 3.38: Série histórica da vazão das nascentes medidas diariamente (de 11 de junho a 30 de outubro de 2019), (a) com vazão máxima de 7 Ls ⁻¹ ; (b) com vazão máxima de 1,2 Ls ⁻¹	78
Figura 3.39: correlação de Pearson entre a vazão de 5 pontos monitorados..	79
Figura 3.40: Escoamento básico (linha tracejada azul), precipitação diária (barra vertical) e a média de todas as nascentes modeladas, em (a) em 2017 e (b) em 2018.....	81
Figura 3.41: coeficiente de recessão da vazão das nascentes..	82
Figura 3.42: Relação do coeficiente de recessão ($\alpha \cdot 10^4$, em dia ⁻¹) das nascentes individuais calculado nos anos 2017 e 2018.....	83
Figura 3.43: Relação do coeficiente de recessão ($\alpha \cdot 10^4$, em dia ⁻¹) das nascentes individuais com as vazões máximas das nascentes (p95%) nos anos (a) 2017 e (b) 2018.....	84
Figura 3.44: Relação do coeficiente de recessão ($\alpha \cdot 10^4$, em dia ⁻¹) das nascentes individuais com as vazões mínimas das nascentes (p05%) nos anos (a) 2017 e (b) 2018.	84
Figura 4. 1: Índice de declividade (50m) e respectivos quartis de distribuição 25%, 50% e 75%	87
Figura 4. 2: Índice de declividade para 400m e respectivos quartis de distribuição 25%, 50% e 75%	87
Figura 4. 3: Índice de solo (% PV e NV) e respectivos quartis de distribuição.....	87
Figura 4. 4: Porcentagem de cobertura de área de dossel arbóreo (CADA, em %) e respectivos quartis de distribuição.	88
Figura 4. 5: Coeficientes de recessão nos anos de 2017 e 2018 ($\alpha \cdot 10^4$ em dia ⁻¹) e respectivos quartis de distribuição.	88
Figura 4. 6: Vazão máxima (p95%) em função do índice de declividade (<i>Slope index</i>) calculado nas distâncias horizontais da surgência de (a) 50m e (b) 400m, para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis.....	91
Figura 4.7: Vazão mínima (p5%) em função do índice de declividade (<i>Slope index</i>) calculado nas distâncias horizontais da surgência de (a) 50m e (b) 400m, para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis.....	92
Figura 4. 8: (a) Experimento com técnica de eletroresistividade no solo com transectos horizontais (fonte: André Kowalski e Carlos Mendonça/Depto Geofísica/IAG/Usp, 2019, com. pessoal) para a nascente N15	

no Ribeirão das Posses, realizadas em Setembro, 2019; (b) estimativa preliminar do campo bidimensional de condutividade elétrica (mS/m) com a profundidade (m) no transecto ERT02.....	92
Figura 4. 9: Vazão máxima (p95%) e vazão mínima (p05%), em função do índice da porcentagem de vegetação (CADA e CADA 50) na área de contribuição inteira e 50 m a montante da surgência. para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis:	94
Figura 4. 10: (a) Vazão máxima (p95%) e (b) vazão mínima (p05%) em função da porcentagem de ocorrência de solo PVNV na área de contribuição para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis:	96
Figura 4. 11: Coeficiente de recessão em função do índice de declividade a 400m de distancia da surgência.	97
Figura 4. 12: Coeficiente de recessão em função do índice de declividade a 50m de distancia da surgência.	98
Figura 4. 13: Coeficiente de recessão em função da porcentagem de argissolo vermelho e nitossolo vermelho (PVNV) a 400m de distancia, para (a) 2017 e (b) 2018. 2017:	99
Figura 4. 14: Coeficiente de recessão (α) em função do porcentagem de PVNV 50 m a montante (PVNV: 50m)	100
Figura 4. 15: Coeficiente de recessão em função da porcentagem de CADA (toda área de contribuição) para as nascentes de alta e baixa produtividade de água:	101
Figura 4. 16: Coeficiente de recessão (α) em função do índice de vegetação 50 m a montante (CADA: 50m)	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 : Identificação dos poços piezométricos que compuseram cada grupo para análise das componentes principais.	37
Tabela 2. 2 Porcentagem e tipos de Solo na bacia do Ribeirão das posses.....	44
Tabela 3. 1. Identificação dos elementos que compõe os grupos G1 a G2, sendo P: Poços; BF: Escoamento básico na foz da bacia e PT: Precipitação.....	47
Tabela 3. 2. Grupo e principal componente (CP) utilizada para reconstrução da série da nascente com respectivo coeficiente angular e R2 da regressão.	50
Tabela 3. 3. Conjunto amostral das vazões absolutas e específicas, tanto medidas mensais, como respectiva comparação das vazões calculadas diárias.	55
Tabela 3.4: Valores médios anuais de precipitação, vazão total na foz do Ribeirão das Posses, escoamento básico e respectivos coeficientes de escoamento e índice de escoamento básico.....	67
Tabela 3. 5: Media das vazões mensais e diárias das nascentes que compõe o sistema 1.	71
Tabela 3.6: Media das vazões mensais e diárias das nascentes que compõe o sistema 2 e 3.	74
Tabela 3.7: Media das vazões mensais e diárias das nascentes que compõe o sistemas 4 e 5.	76
Tabela 4. 1: Variáveis hidrológicas e variáveis biofísicas investigadas por nascentes; percentagem de cobertura de área de dossel arbóreo a 50m de distância e em toda a área de contribuição respectivamente (CADA50 e CADA, em %), coeficiente de recessão (2017 e 2018), percentagem de ocorrência dos tipos Argissolo vermelho e Nitossolo vermelho, a 50m e em toda a área de contribuição respectivamente (PVNV50 e PVNV, em %), e o índice de declividade a 50 m e a 400 m de distância da surgência respectivamente (HL50 e HL400, em m/m).....	89
Tabela 4.1. 1: Pesos (<i>loadings</i>) das componentes principais rotacionadas (RCs) calculadas com as PCs das variáveis brutas Q1%, Q5%, Q50% Q95% e Q99% no conjunto de nascentes.....	104
Tabela 4.1. 2: Pesos (<i>loadings</i>) das componentes principais rotacionadas (RCs) calculadas com as PCs das variáveis brutas CADA, CADA50m, PVNV, PVNV50m, declividade 400m (slope400) e de declividade 50m (slope50m) no conjunto de nascentes. Valores hachurados mostram os pesos relevantes resultantes da maximização.....	104

Tabela 4.1. 3: Matriz de correlação linear (superior) e nível de significância estatístico (inferior) entre as componentes principais rotacionadas RC-h e RC-bio (nesta última indicada na 1ª linha a variável biofísica bruta destacada individualmente por componente). 105

Tabela 4.1. 4: Pesos (*loadings*) das componentes principais rotacionadas (RCs) calculadas com as PCs das variáveis estatísticas hidrológicas brutas Q5%, Q50%, Q95% e os coeficientes de recessão α_{2017} e α_{2018} no conjunto de nascentes 106

Tabela 4.1. 5: Matriz de correlação linear (superior) e nível de significância estatístico (inferior) entre as componentes principais rotacionadas RC-h e RC-bio (nesta última indicada na 1ª linha a variável biofísica bruta destacada individualmente por componente). 107

SIGLAS

SE – Serviços Ecológicos

PSA – Pagamento por Serviços Ambientais

RLM - Regressão Linear Múltipla

ACP - Análise de Componentes Principais

ARP - Aeronaves Pilotadas Remotamente

MDT - Modelo Digital de Terreno

MDE – Modelo Digital de Elevação

SRTM - Missão Topográfica de Radares Shuttle (Shuttle Radar Topography Mission)

BHRP – Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Posses

GNSS - Sistema Global de Navegação por Satélite

CADA - Cobertura de Área de Dossel Arbóreo

PVNV - Argissolo Vermelho e Nitossolo Vermelho

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	19
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 OBJETIVO	21
1.3 REVISÃO DA LITERATURA	21
<i>Processos hidrológicos e balanço hídrico</i>	21
<i>Nascentes</i>	23
<i>Classificação de Nascentes</i>	25
<i>Coefficiente de Recessão</i>	26
<i>Serviço Ecológico Hídrico de Florestas</i>	28
<i>Contextualização Social</i>	29
CAPÍTULO 2	30
MATERIAL E MÉTODOS	30
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
2.2. MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS	33
<i>Medição de vazão nas nascentes</i>	35
<i>Desagregação da vazão para resolução diária</i>	36
<i>Coefficiente de recessão hidrológica (α)</i>	38
<i>Medidas diárias de vazão nas nascentes</i>	39
<i>Estatísticas das vazões mensais e diárias</i>	39
2.3. VARIÁVEIS DA PAISAGEM	40
<i>Área de contribuição das nascentes</i>	40
2.4 PROPRIEDADES BIOFÍSICAS DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO	43
<i>Índice de cobertura vegetal</i>	43
<i>Índice de declividade</i>	44
<i>Índice de solo</i>	44
CAPÍTULO 3	46
PADRÕES HIDROLÓGICOS DO FLUXO DE NASCENTE NA SERRA DA MANTIQUEIRA NO SUDESTE DO BRASIL	46
3.1 ESTIMATIVA DA VAZÃO DIÁRIA DAS NASCENTES	46
3.2 DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL DA VAZÃO DE NASCENTES	52
3.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DO REGIME DE VAZÃO	56
<i>Variabilidade espacial da média e dos extremos de vazão</i>	56
<i>Vazão específica e área de contribuição</i>	59
<i>Variabilidade temporal de precipitação e vazão</i>	63
3.4 SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE NASCENTES	67
<i>Sistema 1</i>	67
<i>Sistemas 2 e 3</i>	72
<i>Sistema 4 e 5</i>	75
3.5 MEDIDAS DIARIAS	77
3.6 PADRÃO DE RECESSÃO HIDROLÓGICA	79
CAPÍTULO 4	85
CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO E CONTROLE NA VAZÃO DAS NASCENTES	85
<i>VAZÃO MÁXIMA E MÍNIMA</i>	90
<i>COEFICIENTE DE RECESSÃO</i>	96
4.1. CORRELAÇÃO DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E BIOFÍSICAS UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	103
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA O FUTURO	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÊNDICES	117

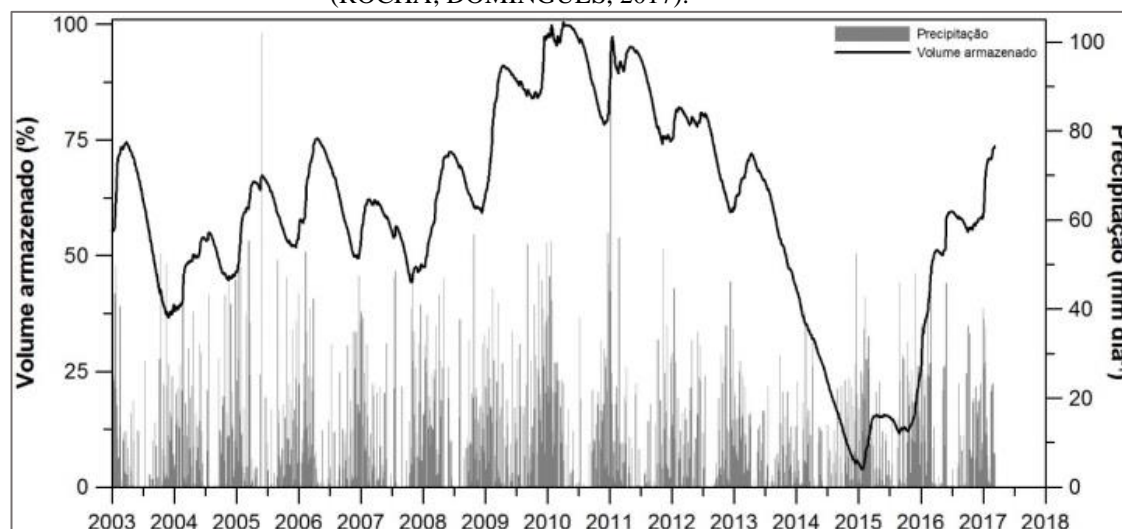
CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A criticidade hídrica traz sérios problemas sociais e ambientais mundiais. A utilização de água aumentou mais de sete vezes entre 1900 e 2000, no último século (SHIKLOMANOV; RODDA, 2003). Os dados de 2010 da Organização Mundial da Saúde indicam que 884 milhões de pessoas não têm acesso à água potável (KFOURI; FAVERO, 2011). Estima-se que mais de 2 bilhões de pessoas residam em países com alto estresse hídrico e que 4 bilhões de pessoas sofrem severa escassez de água por no mínimo um mês por ano. Em decorrência dos efeitos da mudança climática e intensificação da demanda de água, estes níveis de estresse hídrico tendem a aumentar.

O Brasil é um dos países mais ricos em água doce mas teve um sério evento de escassez hídrica em 2014 na região sudeste, onde encontra-se a maior densidade da sua população (ALVARENGA, 2015). O rio Jaguari é um dos rios que abastece o Reservatório do Sistema Cantareira, responsável por abastecer mais de 8.8 milhões de pessoas na Região Metropolitana de São Paulo, com um suprimento médio de $31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ou $2,7$ milhões $\text{m}^3\text{dia}^{-1}$. As bacias da cabeceira do Rio Jaguari, localizadas no estado de MG próximo à divisa com SP, são áreas estratégicas para o Sistema Cantareira (CRUZ *et al.*, 2017; NOBRE *et al.*, 2016).

Figura 1. 1: Variação do volume útil total (em %) do sistema Cantareira e da precipitação diária. Fonte: (ROCHA; DOMINGUES, 2017).



O sistema Cantareira apresentou alguns eventos extremos nos últimos 10 anos, tais como as inundações de 2010 ou as secas severas em 2014 (Figura 1.1). Entre o final de

2013 e meados de 2015, o sudeste do Brasil teve a pior seca dos últimos em 55 anos (NOBRE *et al.*, 2016), quando a disponibilidade de água do sistema Cantareira atingiu seu nível mais baixo desde o início da operação do sistema na década de 1970 (BREMER *et al.*, 2015).

O cenário do déficit hídrico em casos extremos pode ser atribuído a uma série de fatores, possivelmente os principais são os eventos climáticos anômalos e o dimensionamento insuficiente da capacidade do sistema de abastecimento para acompanhar o crescimento do consumo. Não se descarta que fatores como o uso da terra tenham contribuído para estas situações, uma vez que a capacidade de infiltração e o armazenamento de água no sistema solo-aquífero das áreas de captação à montante dependem do sistema solo-vegetação, o qual por sua vez tem sido recorrentemente alterado há décadas na região (BREMER *et al.*, 2015). As áreas florestais têm importante função na produção de água superficial, uma vez que proporcionam proteção do solo contra erosão, filtragem de sedimentos, resíduos de adubação e defensivos para os riachos e aumento da infiltração de água no solo. Dessa forma, ressalta-se a relevância de se compreender a dinâmica hidrológica de uma bacia estratégica, as respostas das transformações feitas pelo homem, com a potencialidade de melhorar o suprimento de água tanto em qualidade como em quantidade, além da regulação do escoamento superficial (CALDER *et al.*, 2007). As atividades antrópicas nas bacias, em especial nas áreas de recarga das nascentes, podem causar um desequilíbrio e como resultado, diminuir a quantidade e a qualidade da água (LIMA, 2010), mas a previsão dos efeitos não pode ser generalizada devido à diversidade de fatores envolvidos nos processos hidrológicos (CALDATO E SCHUMACHER, 2013).

A bacia do Ribeirão das Posses, em Extrema (MG), é a área pioneira no Brasil dedicada às iniciativas de pagamento por serviços ambientais (PSA), com restauração de áreas de preservação permanente (RICHARDS *et al.*, 2015). A área está incluída em agendas federais desde o início do Programa Produtor de Águas, da Agência Nacional de Águas (ANA), que promove estas atividades de PSA em várias localidades brasileiras, com uma colaboração estreita com o Programa Conservador de Águas do município de Extrema que executa as atividades de implementação e manutenção da restauração. Neste sentido foi reconhecida a importância de se mensurar a vazão e outros atributos para se avaliar a eficácia do programa:

“avaliar e monitorar um programa de PSA é tão importante quanto implementá-lo. Não conduzir e não acompanhar é fadá-lo ao fracasso”

(ANA, 2016, p.50).

Dessa forma, para uma adequada gestão e planejamento dos recursos hídricos, destaca-se a necessidade de realizar o monitoramento hidroclimatológico em áreas de cabeceira de sistemas de abastecimento, para que seja possível entender a sua funcionalidade hídrica, auxiliando por exemplo, na compreensão da relação entre água e cobertura florestal e suas respectivas particularidades espaciais, devido ao terreno e influenciadas pela topografia, geologia e uso da terra, como as atividades de restauração florestal e agropecuária, entre outras.

Os resultados descritos estão dispostos em dois capítulos que mostram respectivamente:

Capítulo 3: Padrões hidrológicos do fluxo de nascente na Serra da Mantiqueira no sudeste do Brasil, onde se discutiu os diferentes padrões encontrados na vazão de 39 nascentes na bacia de cabeceira do Ribeirão das Posses (Extrema/MG), entre 2015 a 2019;

Capítulo 4: Características biofísicas das áreas de contribuição e controle na vazão das nascentes, que busca relacionar os padrões funcionais do regime de vazão de nascentes (discutido no capítulo 3) para comparar com os fatores biofísicos que influenciam os processos hidrológicos que atuam nas áreas.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta tese é investigar o padrão hidrológico de um conjunto de nascentes na Serra da Mantiqueira por meio de medidas observacionais no intervalo de 2 anos, com o fim de interpretar sua variabilidade hidrológica no espaço e no tempo, e a potencial influência de fatores fisiográficos como topografia, vegetação e solo.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

Processos hidrológicos e balanço hídrico

O balanço hídrico na superfície é representado pelos fluxos de entrada e saída de água em um sistema de fronteiras na extensão do solo, aplicável para uma bacia com uma

área de contribuição na superfície definida, e um ponto de saída da água superficial no exutório, expresso de forma simplificada (Best *et al.*, 2003) como:

$$Q = P - ET - D - \Delta S + T \quad (1),$$

onde

Q é a vazão;

P é a precipitação sobre a área da bacia;

ET é a evapotranspiração real média;

D é a recarga de água subterrânea para o aquífero abaixo do solo;

ΔS é o armazenamento de água do solo;

T é o fluxo resultante de água subterrâneas lateral ao divisor geográfico.

e a entrada de água na bacia é precipitação; a evapotranspiração e a vazão são as saídas, o armazenamento da água no sistema é representado principalmente pela recarga do aquífero e pelo armazenamento de água no solo. O termo T pode ser uma entrada ou saída (líquida) do sistema, e pode ser expressivo em pequenas bacias, onde a área de contribuição é pequena, os divisores topográficos de pequena magnitude, e os fluxos laterais com ordem de grandeza não muito inferior aos demais termos do balanço.

A precipitação atinge a superfície e pode ser redistribuída de algumas formas: interceptada pela vegetação e reevaporada, infiltrada no solo ou escoada sobre a superfície para infiltrar em outra área ou atingir o rio. A interceptação da precipitação corresponde a parcela da chuva que fica retida nas na vegetação e na serapilheira. Geralmente a perda de água por interceptação é maior em florestas do que em áreas de pastagens (BEST *et al.*, 2003). A infiltração é o processo pelo qual a água penetra nos espaços porosos do solo a partir da superfície, promovendo o armazenamento de água do solo, que poderá evoluir até tornar-se um fluxo recarga do aquífero se houver drenagem vertical profunda e tem uma relação inversa com o escoamento superficial. Neste contexto, a serapilheira das florestas exerce um papel de atenuar a velocidade das gotas de chuva, protegendo o solo contra a compactação (BALBINOT *et al.*, 2008; TAMBOSI *et al.*, 2015), além disso, um solo com maior quantidade de matéria orgânica e maior porosidade pode aumentar a capacidade de infiltração de água.

A umidade do solo absorvida pelas raízes das plantas e distribuída pelo caule até às folhas retorna à atmosfera por meio da transpiração, sendo o mecanismo mais importante de transferência da água do solo para a atmosfera (CALDATO; SCHUMACHER, 2013). O termo evapotranspiração representa o processo de transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, onde os dois processos - de transpiração e de evaporação, ocorrem

simultaneamente, desde que não haja restrições específicas de um ou outro. A evapotranspiração (ET) é um processo complexo, relacionado com as características da vegetação e influenciado por uma diversidade de fatores, a partir da energia disponível (solar e infravermelho), turbulência mecânica do ar, área foliar verde, limitantes de nutrientes, umidade do solo, umidade e temperatura do ar e, na escala de bacia outros fatores como declividade e aspecto (ZHANG *et. al.*, 1999).

De forma geral, contribuem para a vazão dos rios e riachos os escoamentos de água nos tipos superficial, sub-superficial e básico (subterrâneo), sendo os dois últimos os principais responsáveis pela perenidade dos rios (BACELLAR, 2005).

O escoamento superficial hortoniano é considerado o mais rápido e representa perda de grandes volumes de água, responsáveis pela erosão hídrica, que acontece quando a capacidade de infiltração do solo é menor que a intensidade da chuva; o escoamento superficial por saturação ocorre quando o solo está saturado devido à elevação do lençol freático, resultando em um escoamento superficial da precipitação (BACELLAR, 2005). A água também pode chegar aos rios pelo escoamento sub-superficial, que ocorre na zona aerada do solo próxima à superfície, no sentido lateral conforme a declividade do terreno (GROPPO, 2010), geralmente mais lento do que o superficial porém mais rápido do que o básico. O escoamento básico ocorre nos níveis mais profundos do solo e no aquífero, resultante de um sistema saturado que encontra-se geralmente acima de uma camada impermeável de rocha ou argilas, cuja fronteira superior é denominada nível ou lençol freático. O escoamento básico é mais lento, mas varia na escala de horas (caso de um lençol freático mais superficial) ou anos (caso de confinamento em um aquífero profundo) (WATANABE, 2008).

A descarga da água subterrânea acontece quando emerge do solo em um ponto de surgência conhecido como nascente. As nascentes efêmeras, intermitentes e perenes são definidas de acordo com o tipo de escoamento que os alimentará. As nascentes efêmeras não recebem água de escoamento abaixo da superfície, as intermitentes são alimentadas pelos escoamentos subsuperficial e básico apenas no período de chuvas; as perenes são aquelas que recebem água continuamente, tanto do escoamento subsuperficial e básico, como do escoamento superficial durante as chuvas.

Nascentes

As definições de nascentes variam de acordo com a perspectiva de cada autor. O conceito oficial de nascente no Brasil é apresentado pela Lei Federal 12.651/2012 (Art. 3º,

XVII) que a considera como o “afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d’água”. Esse conceito substituiu recentemente a definição da Resolução CONAMA 303/2002, embasando a delimitação de Áreas de Preservação Permanente – APP (FELIPPE; MAGALHÃES, 2013)

As nascentes são partes de um sistema hidrológico que capta, armazena, conduz e permite o afloramento ou surgência da água em um determinado local, em que as características ambientais próximas auxiliam a determinar o regime hídrico (SANTANA, 2003). Felipe e Magalhães (2013) discutem que nascentes são sistemas complexos que não apresentam um consenso na literatura, dificultando o estabelecimento de legislação ambiental e proteção dos mananciais, sendo o termo conflituoso entre pesquisadores e gestores. Os autores concluem que as nascentes não são exatamente o local onde “nasce” a água, mas sim devem ser compreendidas como:

“sistemas ambientais que integram processos hidrogeológicos e geomorfológicos subterrâneos e superficiais, os quais podem se configurar, ou não, em uma feição morfológica superficial (...) que culminam na exfiltração da água e na formação de um curso d’água” (FELIPPE E MAGALHÃES; 2013, p.80).

Essa visão consegue integrar os diversos conceitos teóricos sobre as nascentes, considerando a grande diversidade fisiográfica presente. Dessa forma, engloba as diversas características e tipologias que estão presentes nas abordagens, que partem de princípios essenciais, levando-se em consideração tanto a exfiltração natural, como a formação de um canal de drenagem a jusante (FELIPPE, 2013). Grande parte das nascentes encontra-se em regiões montanhosas, denominadas bacias de cabeceira (ALVARENGA, 2004).

O ideal é que a nascente proporcione água de qualidade e de forma abundante e contínua com variação adequada ao longo do ano. Para isso, a água da chuva deverá ser absorvida pelo solo pela infiltração, armazenada no aquífero subterrâneo e drenada aos poucos, mantendo a vazão principalmente durante os períodos de seca, o que é meritório tanto para o uso econômico na escala de pequena agricultura, como para a manutenção do regime hídrico do rio principal e para o abastecimento urbano (CALHEIROS; TABAI, 2009; CALHEIROS *et al.*, 2004).

Classificação de Nascentes

Várias são as classificações de nascentes propostas por diversos autores, podendo ser elas classificadas quanto a perenidade, vazão, tipo de surgência, modo de exfiltração ou quanto ao tipo de aquífero que alimenta a nascente.

Quanto à perenidade, depende das condições locais apropriadas para a surgência, o nível do aquífero raso e a recarga subterrânea. As nascentes perenes geralmente envolvem processos hidrológicos com excedentes de água durante o ano. As nascentes podem ser classificadas como perenes, possuindo fluxo contínuo ao longo do ano, mesmo durante períodos secos, indicando que estas são alimentadas pelo escoamento básico; podem ser temporárias ou intermitentes, apresentado fluxo de água principalmente na estação chuvosa; ou ainda, são chamadas de efêmeras, que são aquelas que surgem apenas durante a chuva e desaparecem depois de alguns dias ou horas (CALHEIROS; TABAI, 2009). A perenidade de uma nascente é garantida pela manutenção do escoamento de base (*baseflow*) durante todo o ano hidrológico. (FELIPPE, 2013).

As nascentes podem ser classificadas também em termos de vazão, que representa o volume de água exfiltrado por unidade de tempo, sendo o parâmetro hidrológico mais comum na literatura (FELIPPE, 2013). De acordo com Meinzer (1927), a vazão das nascentes pode variar de 1ª magnitude (com vazão superior a 2.800 L/s) até a 8ª magnitude (com vazão inferior a 8 mL/s). Outro importante critério é a variação sazonal, onde FELIPPE (2013) discute uma questão metodológica para a medição de vazões de nascentes, pois as técnicas utilizadas comumente em hidrologia muitas vezes inviabilizam a detecção de pequenas vazões, com metodologias duvidosas, como por exemplo medir as nascentes a jusante da surgência, de forma que o volume de água seja suficiente.

Quanto ao tipo de surgência, Linsley e Franzini (1978) subdividem as nascentes em nascentes de encosta, ou sem acúmulo, na qual a descarga do aquífero é concentrada em uma pequena área, o que é comum quando o afloramento ocorre em um terreno de alto declive; ou nas veredas (nascentes difusas), comumente chamadas de brejos, que são espraiadas; ou com acúmulo, que são resultantes quando a camada impermeável fica paralela à superfície do terreno. Neste mesmo contexto, o modo de exfiltração da água também é um ponto relevante na classificação das nascentes, podendo ser consideradas pontuais ou difusas (FARIA, 1997), sendo que nas pontuais a exfiltração ocorre concentrada em um local bem definido; enquanto as nascentes com exfiltração difusa são aquelas que a água aflora em uma área indefinida, resultando no solo encharcado, como

brejos (VALENTE e GOMES, 2005). Felipe (2009) propõe também a existência de nascentes com exfiltração múltipla, que se referem a um mesmo sistema com dois ou mais pontos e/ou áreas de exfiltração (FELIPPE, 2013).

Outra classificação também utilizada é referente à origem das nascentes, as quais podem ser provenientes de aquíferos freáticos ou artesianos, classificando-as de acordo com a transmissividade do aquífero (ZANIN; BONUMÁ; CHAFFE, 2013). As freáticas são àquelas onde o aquífero geralmente é abastecido em áreas próximas, de forma que as nascentes apresentam respostas mais rápidas ao pulso de chuvas em áreas próximas ao local de ocorrência. As nascentes artesianas geralmente podem ser abastecidas por áreas distantes do ponto de surgência, o que muitas vezes é difícil identificar.

Considera-se que a caracterização do meio físico das microbacias, principalmente nas regiões que influenciam as áreas de recarga do aquífero, determina o sucesso do manejo para a conservação dos recursos hídricos. O uso adequado da terra e práticas conservacionistas nas áreas de recarga aumentam a captação das águas das chuvas e favorecem a alimentação das nascentes (PINTO *et al.*, 2005). A infiltração nas áreas de recarga depende de características como a cobertura vegetal e propriedades físicas dos solos, que resultam da quantidade de matéria orgânica, da boa estruturação e atividade biogênica, por sua vez sujeitas às variações e uso intensivo do solo (PRIMAVESI, 1982). O manejo adequado de bacias hidrográficas resulta em menores oscilações das vazões das nascentes ao longo do ano. A produção de água nas nascentes depende de condições satisfatórias de recarga, que por sua vez refletem a manutenção do escoamento subterrâneo.

Coefficiente de Recessão

Os estudos da curva de recessão hidrológica são úteis para modelos matemáticos de resposta precipitação/escoamento superficial, estimativa do escoamento básico e capacidade de armazenamento de áreas de captação (VASHISHT; BAM, 2013). Maillet (1905, *apud* MALÍK, P.; VOJTKOVÁ, S., 2012) reportou pioneiramente o modelo exponencial de depleção do escoamento básico, descrevendo a variação da vazão com o tempo controlada por um parâmetro de amortecimento (coeficiente de recessão α) na forma:

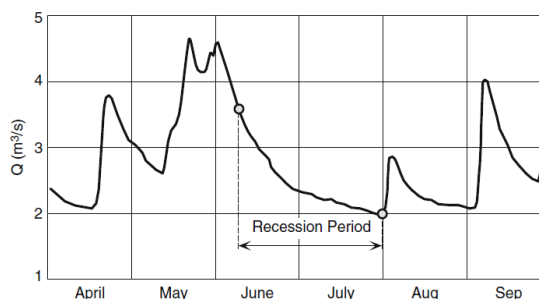
$$Q_t = Q_{t_0} \cdot e^{-\alpha (t-t_0)}$$

onde Q_t (em L/s) é a vazão no instante t ; Q_{t_0} (L/s) é a vazão no início da depleção e α é o coeficiente de recessão (dia^{-1}).

A vazão de uma nascente não é constante, mas atinge o pico durante o período de chuvas e vai decrescendo, com algumas alterações, até a próxima estação chuvosa (VASHISHT; BAM, 2013). A vazão na nascente provem da drenagem dos aquíferos por meio do escoamento básico resultante tanto da quantidade de água armazenada nos aquíferos, quanto das suas propriedades de condutividade hidráulica, e sua resposta decresce exponencialmente com o tempo, como uma memória também das precipitações ocorridas no período chuvoso, como da capacidade do aquífero em manter o escoamento subterrâneo que depende em última instância de sua recarga e descarga (OLIVEIRA; FIOREZE, 2011).

Para se investigar a vazão de uma nascente é necessário analisar o padrão temporal da vazão (VASHISHT; BAM, 2013) durante um determinado intervalo de tempo (SILVA, 2009a), que pode ser representada como uma descarga temporal. A curva de recessão sazonal (Fig. 1.2) geralmente é suave por não haver recarga no aquífero (VASHISHT; BAM, 2013), mas as condições ideais de recessão, com um longo período sem precipitação, são raras em climas úmidos, de forma que a precipitação causa oscilações na curva de recessão que não podem ser removidos sem ambiguidade durante a análise (KRESIC & STEVANOVIC, 2010).

Figura 1.2: Definição do período de recessão hidrológica. Fonte: (KRESIC & STEVANOVIC, 2010)



O coeficiente de recessão (α), expresso em dia^{-1} , corresponde à inclinação da curva de recessão em um gráfico semilogarítmico (BERTOL, 2007), e representa o resultado de propriedades que controlam a descarga do aquífero (ROSA FILHO, 1993), sendo característico de cada bacia de drenagem, variando com a capacidade do aquífero, geologia, geomorfologia, características físicas do solo, relevo, cobertura vegetal e tipo de solo (CASTANY, 1971). Este coeficiente é proporcional à transmissividade e inversamente proporcional à capacidade de armazenamento dos aquíferos da bacia, ou seja, quanto maior o valor do coeficiente de recessão, menor a capacidade da manter a vazão dos rios por intervalos maiores (SILVA, 2009b).

Serviço Ecossistêmico Hídrico de Florestas

Uma das grandes preocupações das sociedades atuais refere-se aos impactos positivos e negativos relacionados à disponibilidade de água superficial, tanto ao excesso quanto a escassez (CALDATO; SCHUMACHER, 2013), devido ao controle das florestas, de forma que sempre que ocorrem eventos extremos (tanto enchentes quanto grandes secas) o tema desmatamento é fortemente discutido (ANDRÉASSIAN, 2004). Se por um lado a remoção da floresta pode aumentar o escoamento superficial anual nos rios, por outro lado as florestas são fundamentais para a integridade dos processos hidrológicos. Tundisi & Tundisi (2010) argumentam que a remoção da vegetação florestal e a expansão da área agrícola e urbana podem comprometer a recarga dos aquíferos, a qualidade da água, e problemas causados pela ausência da vegetação próxima às nascentes e pequenos riachos devido ao acúmulo de sedimentos e assoreamento das nascentes (SAAD *et al.*, 2011).

A literatura mostra que na maioria dos casos de reflorestamento de grandes extensões de áreas agrícolas se reduz a vazão dos rios, no entanto alguns trabalhos de revisão sobre reflorestamento e a água (ANDRÉASSIAN, 2004; BROWN *et al.*, 2005; VAN DIJK e KEENAN, 2007; SALEMI *et. al.*, 2011; CALDATO; SCHUMACHER, 2013) restringe este impacto ao clima, condições do local, espécies plantadas e, principalmente, práticas de manejo adotadas. Vários fatores podem interferir no consumo de água da restauração segundo (SALEMI *et. al.*, 2011): espécies de rápido crescimento e florestas densas utilizam mais água do que as de crescimento lento; indivíduos novos e jovens inicialmente aumentam rapidamente a utilização de água e depois diminuem gradualmente com a idade; a localização e o desenho espacial das árvores podem influenciar a quantidade de água utilizada, pois solos tendem a ficar mais profundos em regiões preferenciais da bacia, e pequenas bacias não mostraram mudança significativa na vazão quando a cobertura foi alterada em menos de 15-20% do total.

Van Dijk e Keenan (2007) reportam que no caso de reflorestamento de áreas antes usadas para agricultura geralmente há uma redução na vazão média e na recarga dos aquíferos. O oposto ocorreria se a introdução de árvores restaurar as funções hidrológicas em conjunto com o solo, de forma que a vazão pode aumentar na estiagem, caso os ganhos de água pelo aumento da infiltração e armazenamento de água no solo e no aquífero aumentem, a ponto de compensarem as maiores perdas por evapotranspiração. Por

exemplo, em áreas agrícolas com solos expostos e compactados, baixa capacidade de infiltração e pouca capacidade de retenção de água.

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica está intrinsecamente relacionado com as propriedades e profundidade do solo, de maneira que os resultados hídricos desejados pelo reflorestamento dependem muito do solo e da geologia dos aquíferos. No entanto, as melhorias hídricas não ocorrem imediatamente após o restauro, uma vez que a regeneração apresenta características muito distintas da floresta original (FERRAZ *et al.*, 2014) e os atributos do uso da terra são conservados no solo (MORAES *et al.*, 2006; ZIMMERMANN *et al.*, 2006). O tempo exato para a restauração dos processos hidrológicos não está claramente definido (BROWN; ZARIN, 2013). Dessa forma, a quantificação dos serviços ecossistêmicos é importante em várias situações socioeconômicas atuais, como por exemplo as atividades de pagamento por serviços ecossistêmicos, o que por sua vez seria mais rigorosamente realizada se comprovada cientificamente.

Contextualização Social

No contexto social há no município de Extrema (MG) a Lei nº 2.100 em 2005, que criou o Projeto “Conservador das Águas”, apoiado pelo Programa “Produtor das Águas” da Agência Nacional das Águas (ANA), com o objetivo promover a proteção hídrica a partir da política de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (PEREIRA *et al.*, 2010). Foi a primeira iniciativa brasileira PSA, desenvolvida pela parceria entre governo local, diversas ONGs e a ANA (KFOURI; FAVERO, 2011). O “Conservador das Águas” é um programa PSA que recompensa financeiramente os proprietários rurais que contribuam para a conservação dos recursos hídrico, através da adoção de práticas sustentáveis. (ZOLIN *et al.*, 2011; PAGIOLA *et al.*, 2013; ROSA *et al.*, 2014). O principal objetivo do programa é, através da restauração florestal e recuperação de áreas de preservação permanente, melhorar as condições dos solos, promover a redução da erosão e do assoreamento no meio rural, visando a longo prazo aumentar a vazão de nascentes e riachos e melhorar a qualidade da água (ZOLIN *et al.*, 2011; PAGIOLA *et al.*, 2013; ROSA *et al.*, 2014). Com esta iniciativa, o município de Extrema é pioneiro na restauração de bacias hidrográficas, e desde 2005 contribuiu para restaurar mais de 3000 ha de Mata Atlântica (RICHARDS *et al.*, 2015).

CAPITULO 2

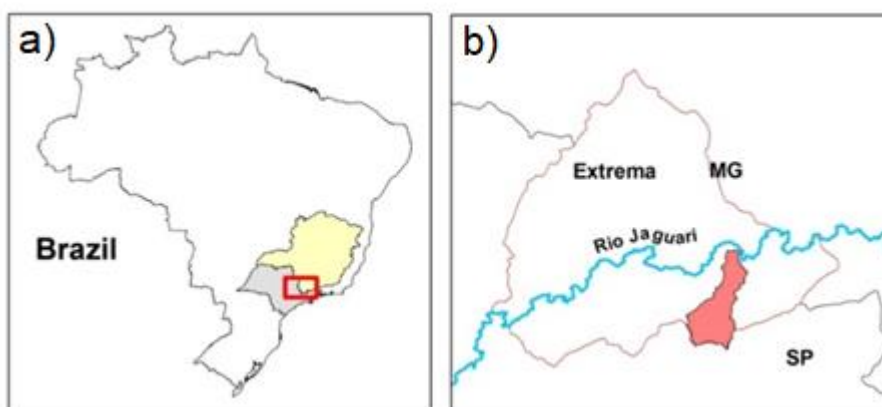
MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho desta tese foi desenhado conceitualmente e apoiado materialmente com recursos do projeto “Investimentos Pro Climáticos Inteligentes em Bacias de Montanhas Tropicais da América do Sul /*Climate-Smart Watershed Investments in the Montane Tropics of South America*” (Projeto Temático FAPESP 2015/50682-6).

2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

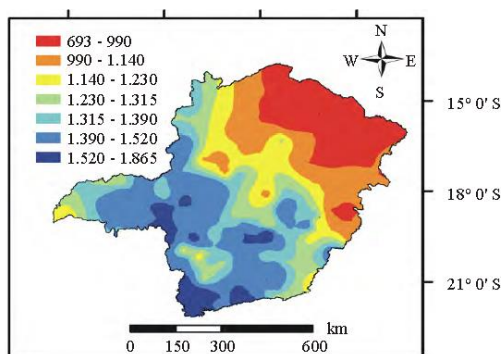
O município de Extrema está localizado na cadeia de montanhas da Serra da Mantiqueira, no extremo sul de Minas Gerais (Fig. 2.1), com área de 243,7 km². A economia do município é baseada na agropecuária desde sua origem em 1901. Inicialmente o café foi a cultura mais importante para a cidade, sucedida pela pecuária bovina, até a atual paisagem (AZEVEDO, 2008). A área de Extrema está inserida na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos dos Rios Piracicaba e Jaguari (UPGRH - PJ1) (KFOURI; FAVERO, 2011), com alto índice pluviométrico, sendo uma das regiões com maior disponibilidade hídrica superficial do estado de MG (IRRIGART, 2013) (Fig. 2.2).

Figura 2.1: (a) Localização de Extrema, MG; (b) Área de estudo: bacia do Ribeirão das Posses (vermelho).



Elaborado pela autora

Figura 2. 2: Mapa precipitação do Estado de Minas Gerais (mm/ano) Fonte: (VIOLA et al., 2010)

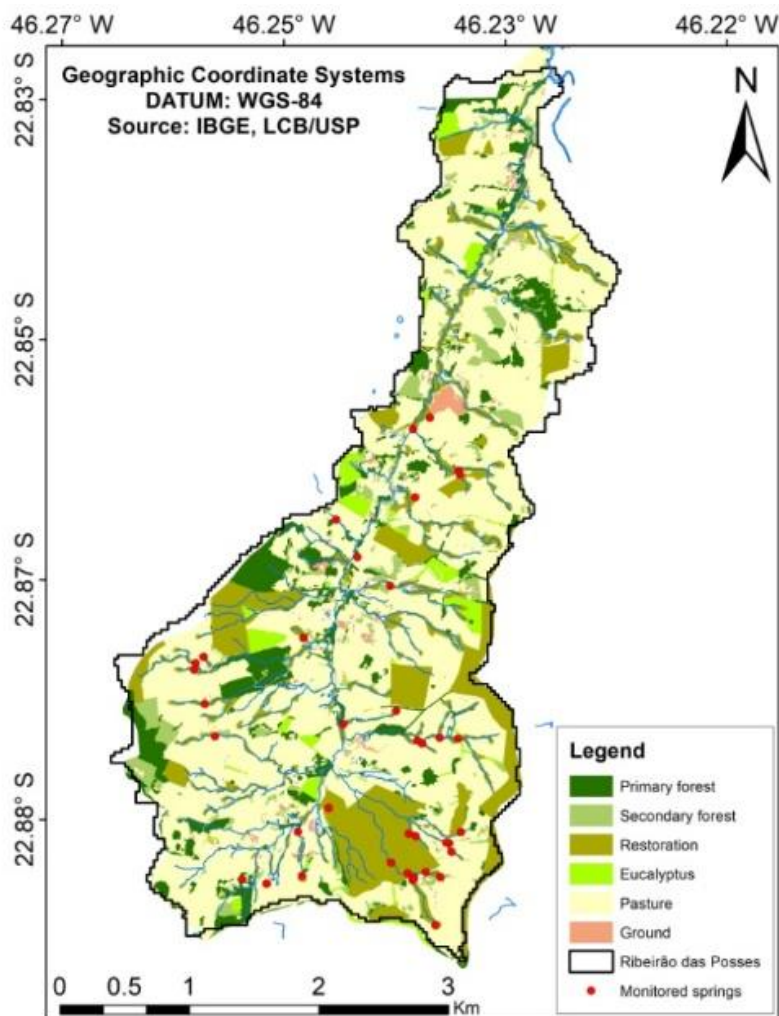


O município de Extrema está no bioma Mata Atlântica, com formações de Floresta ombrófila densa, Floresta ombrófila mista, e Floresta estacional semidecidual (MELLO, 2012). A Serra da Mantiqueira apresenta um mosaico de formações vegetacionais composto por florestas altimontanas, florestas de araucária, campos de altitude e afloramentos rochosos (MEIRELES; KINOSHITA; SHEPHERD, 2014). Durante o séc. 19, o ciclo do café e a expansão ferroviária intensificaram a alteração da vegetação natural entre o sul de MG e a região de Campinas, SP, de forma que atualmente a paisagem predominante é agrícola de pastagens, complementada por plantações de eucalipto, e remanescentes florestais nativos secundários e primários.

O clima na região é do tipo Cwb (Köppen) tropical de altitude, com dois períodos anuais bem característicos em relação à precipitação: verão chuvoso (outubro a março) com média de 1.207 mm; e estação seca (abril a setembro) com média de 406 mm (IRRIGART, 2013). A temperatura média anual é 18°C, nos meses mais quentes e frios temperaturas médias de 25,6°C e 13,1°C, respectivamente, e precipitação média anual de 1.477 mm (LIMA *et. al.*, 2013).

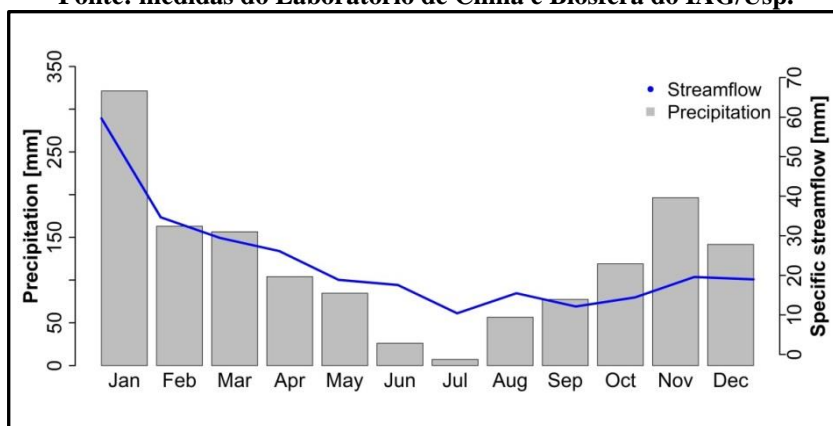
A pesquisa deste trabalho foi desenvolvida na bacia do Ribeirão das Posses, uma sub-bacia do Rio Jaguari localizada em Extrema (MG), que tem um gradiente de topografia acentuado (940-1440 m) e considerada uma sub-bacia de cabeceira (LIMA *et. al.*, 1013). O Ribeirão das Posses abrange uma área de contribuição de aproximadamente 12 km², com uso predominante do solo por pastagens manejadas (MOTA DA SILVA, 2014) (Fig. 2.3). Lima (2010) descreve que as características fisiográficas da bacia propiciam a recarga de água, devido a rede de drenagem bem ramificada, mas por outro lado uma certa parcela da bacia tem baixo potencial de recarga de água, em função do relevo e acentuada declividade.

Figura 2. 3: Mapa de uso da terra na Bacia do Ribeirão das Posses, atualizado em 2019 neste trabalho.



As informações de temperatura do ar na bacia das Posses medida com um conjunto de estações automáticas mostrou variação da média diária de 21° C na estação chuvosa a 17° C na estação seca (Martin et al. 2018). As medidas de precipitação e vazão na foz da bacia do Posses medidas desde 2014 a 2018 (Fig. 2.4) mostram o regime sazonal de chuva característico da região com estiagem entre Junho e Agosto, e máximos de vazão em Janeiro.

**Figura 2. 4: Média mensal de precipitação e vazão na foz do Ribeirão das Posses, Extrema/MG.
Fonte: medidas do Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/Usp.**



2.2. MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS

O Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/USP (LCB) fez um amplo conjunto de medidas hidrometeorológicas na bacia do Ribeirão das Posses desde julho de 2014 até o presente, tendo sido utilizadas nesta tese os dados das seguintes medições:

- 13 estações meteorológicas automáticas (Vaisalla WXT) (Fig. 2.5) com medidas a cada 2 minutos de temperatura, umidade do ar, velocidade do vento, precipitação e radiação solar, descritas em Martin et al. (2018);
- o nível do aquífero em 10 poços piezométricos, em parte dispostos em uma linha transversal na faixa ripária do Ribeirão das Posses, e demais poços isolados próximos de nascentes específicas, com medições automáticas feitas por sensor de nível de água (*Solinst Levelogger Edge Modelo 3001* e *barologger* para compensação barométrica) (Figura 2.6);
- medidas de nível de água do rio no exutório da bacia para estimativa da vazão, e estimativa do escoamento básico segundo o método de filtragem recursiva (Lynie & Holick *apud* Nathan & McMahon, 1990) feito no algoritmo computacional EcoHydRology em R.

Figura 2. 3: (a) Estações automáticas WXT1520 do Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/Usp, ver Martin et al. (2018) e pluviométricas da ANA (b) Estação WXT1520 (Vaisala, Finland) (pressão atmosférica, umidade do ar, precipitação, temperatura do ar e velocidade do vento) instalada na bacia. Fonte: LCB/IAG/Usp

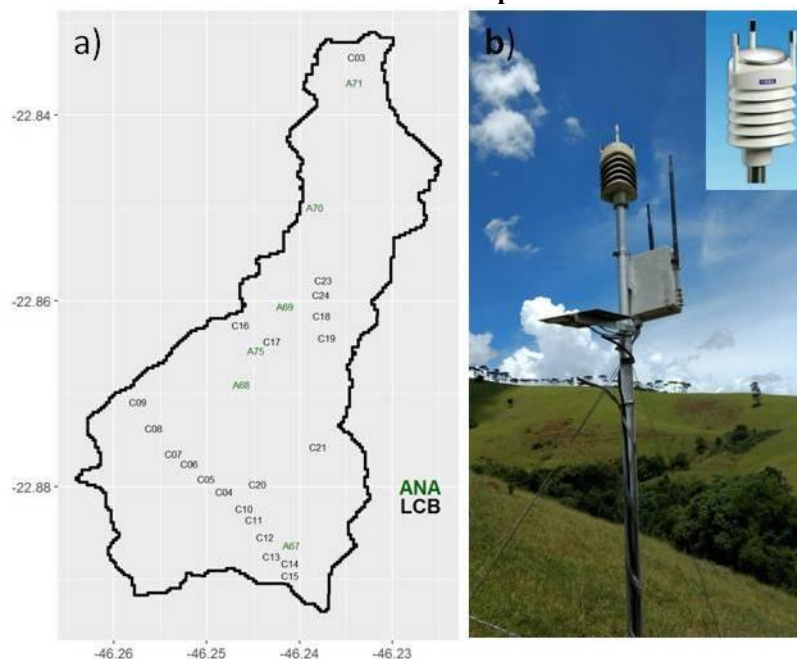
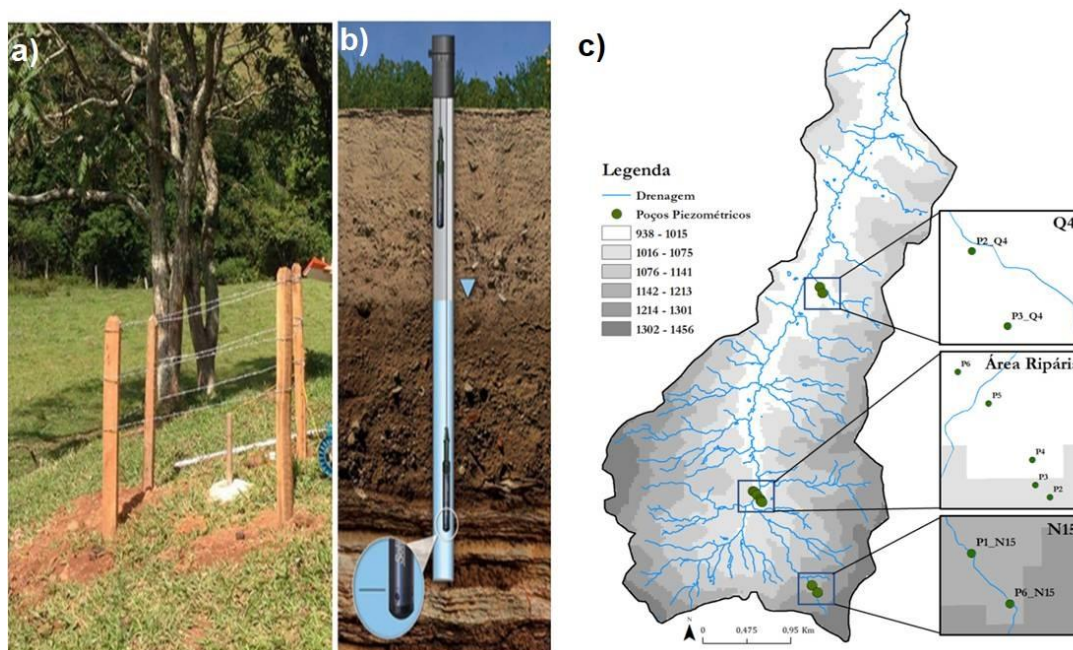


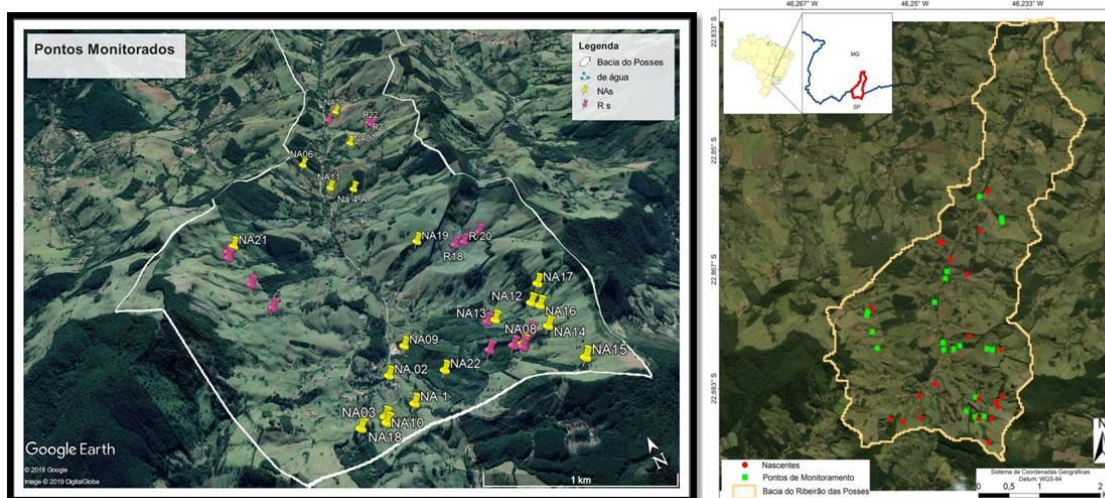
Figura 2. 4: Sistema de medição de nível de água de poço piezométrico. (a) exemplo de piezômetro instalado; (b) sensor automático Solinst Levelogger Edge dentro de um poço, com medição da pressão absoluta, e Barologger utilizado para compensar oscilação barométrica atmosférica (c) Localização dos poços piezométricos na bacia do Ribeirão das Posses. Fonte: Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/Usp



Medição de vazão nas nascentes

As medidas de vazão foram feitas mensalmente com um método manual, geralmente pela autora com o auxílio de um funcionário da Prefeitura Municipal de Extrema. Em cada excursão percorreu-se a bacia durante 2 ou 3 dias para medir a vazão de até 39 nascentes. O local dos pontos de medição (Fig. 2.7) foram georreferenciados com GPS Garmin Oregon 550, resolução 6 m. O procedimento de medição na surgência de água foi (1) medição direta, ou (2) utilização de um tubo plástico para canalizar o escoamento (Fig. 2.8). Nos locais de maior dificuldade para canalizar a água foi feita uma base de cimento e solo compactados para minimizar vazamentos laterais. As medições utilizaram um recipiente calibrado (balde ou proveta) e um cronômetro para contagem do tempo de enchimento, repetidas 3 vezes em sequência, estipulando-se a medição final na média das três avaliações. Dessa forma foi possível medir baixas vazões, sendo a menor vazão medida igual a $0,003 \text{ L s}^{-1}$.

Figura 2. 5: Localização dos pontos monitorados.



O conjunto total de medições iniciou-se de janeiro de 2015 indo até novembro de 2019, com uma medida isolada em agosto de 2014. As amostragens por número de nascentes cresceu durante os anos: nascentes N1 a N11 em agosto/2014 e a partir de Janeiro de 2015; nascentes N12 a R05 a partir de Fevereiro de 2016; nascentes R05 a R22 a partir de Novembro de 2016, nascente R23 a partir de Maio de 2018. Dois locais (N07 e R06), por questões logísticas, foram interrompidos em 2019. Em resumo, em 2015 foram medidas 10 nascentes; em 2016 foram 20 nascentes; entre 2017 e 2018 foram 38 nascentes e em 2019 foram 37 nascentes.

Figura 2.6: Exemplo de nascentes e abordagem de medição manual.



Desagregação da vazão para resolução diária

O esforço de medição manual de vazão das nascentes é grande e dispendioso, mas para priorizar um número elevado de nascentes e aumentar a amostragem estatística espacial, a opção viável foi por fazer medidas na base mensal. Como a variabilidade hidrológica é muito dependente da variabilidade na escala temporal diária, foi realizada uma desagregação de estimativa mensal para diária utilizando-se métodos estatísticos com Regressão Linear Múltipla (RLM) e Análise de Componentes principais (ACP). A desagregação foi feita nas seguintes etapas:

- 1) Calculou-se a ACP das séries históricas diárias de: profundidade de água subterrânea medidas nos poços piezométricos distribuídos na bacia (total de 9 poços), estimativa do escoamento básico na foz da bacia (calculado a partir da vazão medida na foz e métodos analíticos), e medidas de precipitação distribuídas na bacia, segundo procedimentos descritos no item 2.2. A ACP foi feita separadamente de forma combinatória entre eles (Tab. 2.1), em grupos destas medidas respectivamente:
 - grupo 1 (G1) composto por 5 poços (P2, P3, P4, P5 e P6) localizados na área ripária e o escoamento básico (BF);
 - grupo 2 (G2) com os mesmos 5 poços de G1, o escoamento básico e chuva;

- grupo 3 (G3) formado por 2 poços localizados na cabeceira da bacia (P15.1 e P15.6) e o escoamento básico;
- grupo 4 (G4) com mesmo 2 poços da cabeceira de G3, o escoamento básico e a chuva;
- grupo 5 (G5) com escoamento básico e a chuva;
- grupo 6 (G6) com os poços piezométricos Q4.

Os grupos G1 a G4 e G6 foram estabelecidos de forma a priorizar-se áreas funcionais na faixa ripária ou nas encostas, limitadas obviamente aos locais medidos. O grupo G5 é o de maior extensão de medidas e com poucas falhas de medição, tendo sido escolhido como opção também para preenchimento falhas quando não havia dados em outros grupos melhor ranqueados.

Tabela 2. 1 : Identificação dos poços piezométricos que compuseram cada grupo para análise das componentes principais.

Grupo	Medidas	Localização
G1	P2 + P3 + P4 + P5 + P6 + BF	área ripária
G2	P2 + P3 + P4 + P5 + P6 + BF + P	área ripária
G3	P1_N15 + P6_N15 + BF	N 15
G4	P1_N15 + P6_N15 + BF + PT	N 15
G5	BF + PT	Q 4
G6	P2_Q4 + Q3_Q4 + BF	Q 4

- 2) Na segunda etapa da desagregação foi feita a RLM da vazão de cada nascente com as componentes principais (CPs) de cada grupo (G1 a G6), grupo a grupo separadamente, selecionando-se as melhores relações, por nascente, estimadas segundo o critério de maior coeficiente de determinação R² e melhor significância (p-valor) dos coeficientes individuais da RLM para cada CP. Para a RLM foram removidos os episódios mensais de vazão zero nas nascentes que secaram.

A estimativa diária de vazão por nascente foi consolidada pela RLM da vazão mensal com as CPs estimadas no dia da medida da nascente, priorizando-se o grupo melhor ranqueado por nascente. Na evidência de falhas temporais do melhor grupo, o modelo utilizou a RLM do segundo grupo ranqueado e assim sucessivamente. Nas nascentes com medida mensal igual a zero (nascente seca), optou-se no modelo diário por atribuir vazão nula sempre que houvesse observações sequenciais mensais da nascente seca.

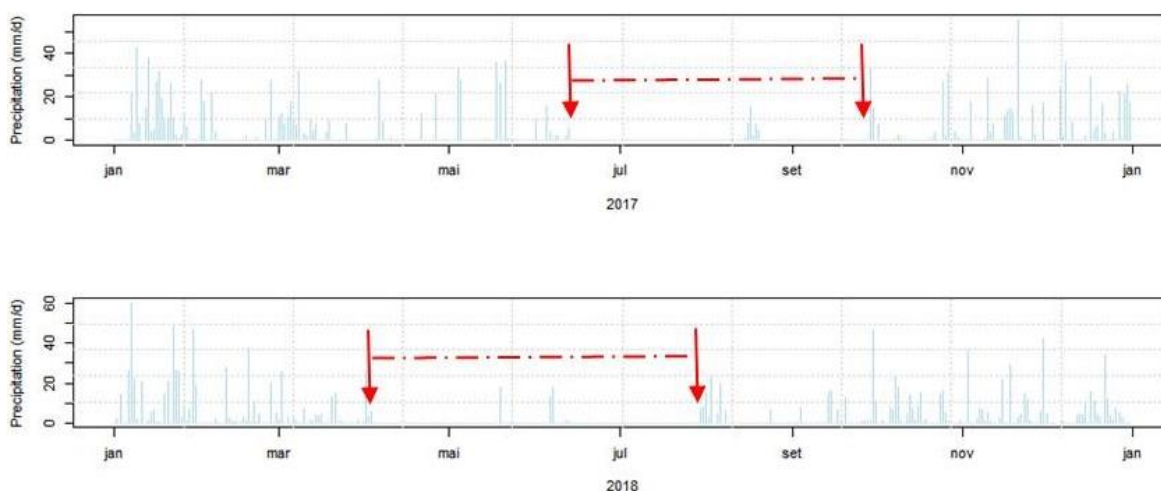
Coefficiente de recessão hidrológica (α)

Para o cálculo do coeficiente de recessão hidrológica (α) foram considerados os intervalos de depleção da vazão de cada ano nos meses de estiagem, nos anos de 2017 e 2018, utilizando-se as estimativas desagregadas na base diária. A vazão inicial (Q_{t_0}) corresponde ao pico da cheia seguido pelo período de recessão, contado em dias desde $t_0 = 1$ até o último dia considerado.

Para a escolha dos intervalos de recessão observou-se a precipitação diária, priorizando-se os intervalos sem chuva, ou com pouca chuva e poucos episódios (Figura 2.9). Apesar da estimativa ideal ser definir o coeficiente de recessão em intervalos de alguns meses de estiagem total (KRESIC & STEVANOVIC, 2010), nestas regiões subtropicais esta situação é incomum, o que inviabiliza qualquer tentativa de exercício. Dessa forma optou-se por uma aproximação, considerando-se o intervalo entre 15 de junho a 28 de setembro de 2017 (acumulado de precipitação de 37 mm); e entre 05 de abril a 29 de julho de 2018 (50mm de chuva acumulada) (Figura 2.9).

Dentro dos intervalos estabelecidos em cada ano separadamente, com as vazões diárias (em $L \cdot s^{-1}$), foram analisadas as vazões (logarítmicas) em função do tempo por nascente, e calculadas as regressões lineares com obtenção do coeficiente de recessão (α). O procedimento foi feito também para o escoamento básico estimado com medições de vazão na foz da bacia.

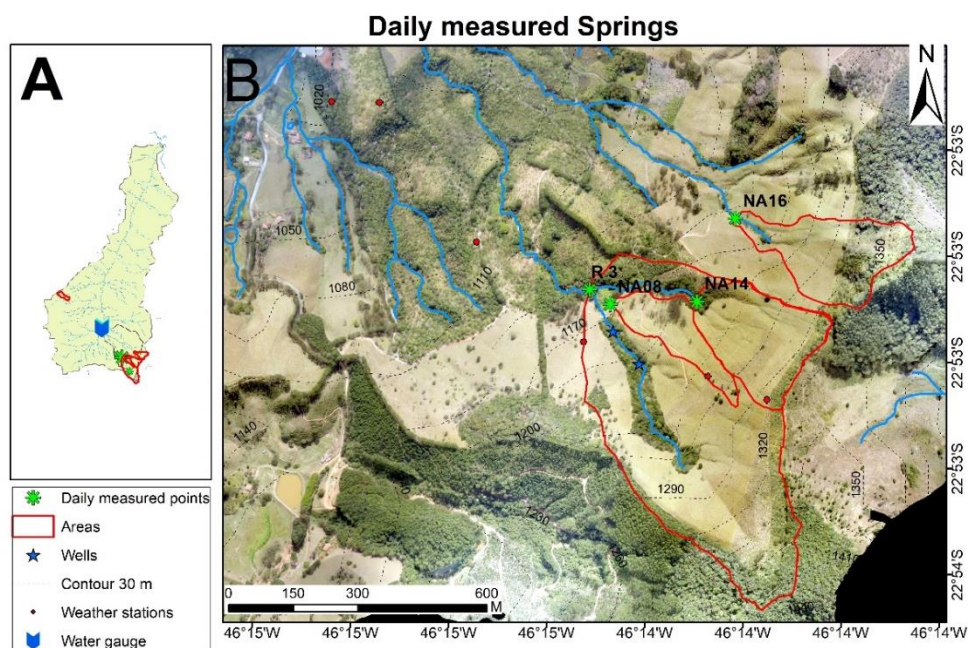
Figura 2. 7: Precipitação diária ($mm \cdot d^{-1}$) na bacia do Ribeirão das Posses, nos anos de 2017 e 2018, para definição dos intervalos de recessão (linha tracejada entre setas).



Medidas diárias de vazão nas nascentes

Entre o intervalo de 11 de junho a 01 de novembro de 2019 foram selecionados 5 locais para serem mensuradas as vazões com frequência na base diária, para auxílio na comparação com os dados e avaliação do método de desagregação. Os pontos selecionados foram N08, N14, N16, N21 e R03 (Fig. 2.10).

Figura 2. 8: Pontos nos quais foram efetuadas medidas diárias no ano de 2019. (a) Localização na bacia; (b) delimitação da área.



Estatísticas das vazões mensais e diárias

Com a série histórica de vazão por nascente tanto nas bases mensal (medida) como na diária (desagregada) foram calculadas as seguintes estatísticas (em L s^{-1} e da vazão específica em mm dia^{-1}) de vazões máximas, médias, mínimas; quantil 1%, 5%, 95% e 99%, entre os anos de 2016 a 2019, considerando envolver o mesmo grupo de nascentes, uma vez que a partir de 2016 acumulou-se o máximo de 39 nascentes amostradas.

2.3. VARIÁVEIS DA PAISAGEM

Área de contribuição das nascentes

Foram estimadas as áreas de contribuição hidrológica superficial de cada nascente utilizando-se duas fontes de dados. A primeira foi com o modelo digital de elevação (MDE) de aproximadamente 30 m de resolução da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), da NASA EODIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation And Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. Os cálculos das áreas de contribuição das nascentes foram estimados com o *software* ArcGIS 10.6, na extensão Arc Hydro Tools. Essa ferramenta possibilita obter dados de direção de fluxo, acumulação de fluxo, definição do curso de água, segmentação do curso de água e delimitação da bacia hidrográfica. Dessa forma são criados vetores de captação de água e linha de drenagem, e delimitar bacia e sub-bacias (SHARP *et al.*, 2014; CONORATH, 2012; MERWADE, 2012, RECH *et al.*, 2011; ESRI, 2009; MAIDMENT, 2004).

Há grande dificuldade de se delimitar pequenas áreas de contribuição utilizando-se o MDE 30 m de resolução, como é o caso de várias nascentes aqui amostradas. Para uma melhor acurácia nessa determinação desenvolveu-se uma segunda fonte de dados, com fotografias a bordo de aeronaves pilotadas remotamente (ARP), de resolução 60 cm (Fig.2.11). Entre os dias 10 e 13 de julho de 2018 a bacia do Ribeirão das Posses foi sobrevoada na altura média de 400m utilizando uma aeronave pilotada remotamente Phantom 3. O sobrevoo resultou no total de 2194 fotos. Os levantamentos com a ARP foram auxiliados por pontos de controle do solo obtidos por meio do posicionamento do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), que levaram a modelos ortofotomosaicos e digitais de elevação (FERREIRA *et al.*, 2018), utilizando o *software* Agisoft Photoscan. Foi gerado um Modelo digital de Terreno (MDT) e com curvas de nível (Fig. 2.12). Este material não pode ser totalmente aproveitado uma vez que a elevação e a declividade das áreas com árvores maiores reduziram a acurácia da informação em várias situações.

Figura 2. 9: Informações de elevação de terreno obtidos com ARP

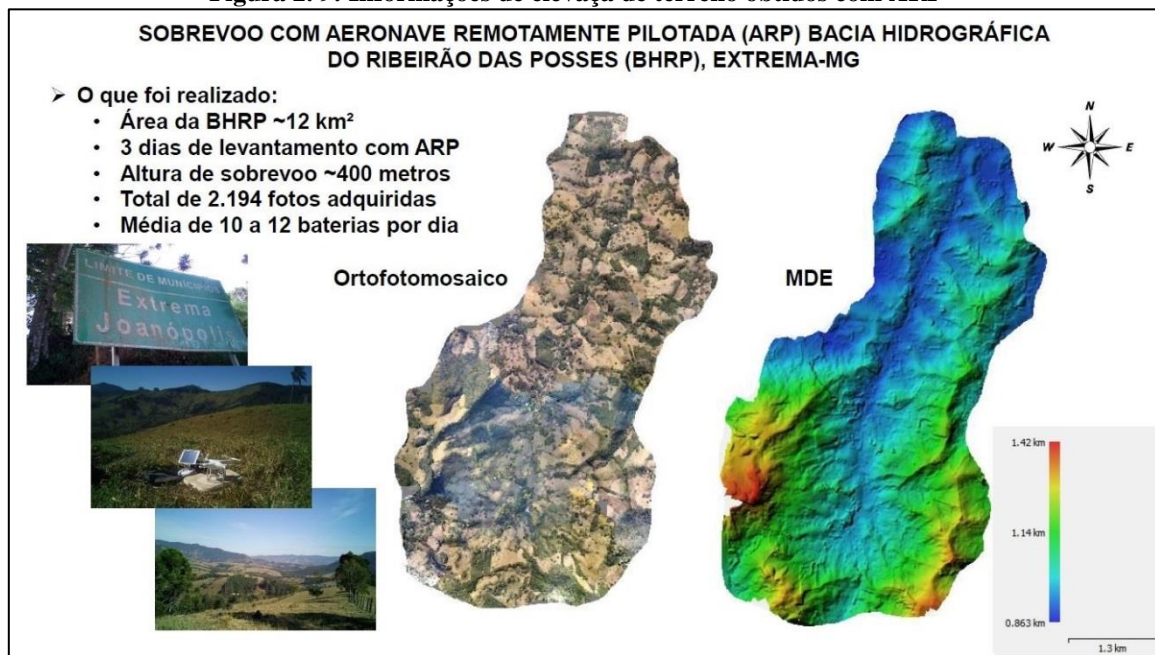


Figura 2. 10: MDT e curvas de nível geradas com ARP.

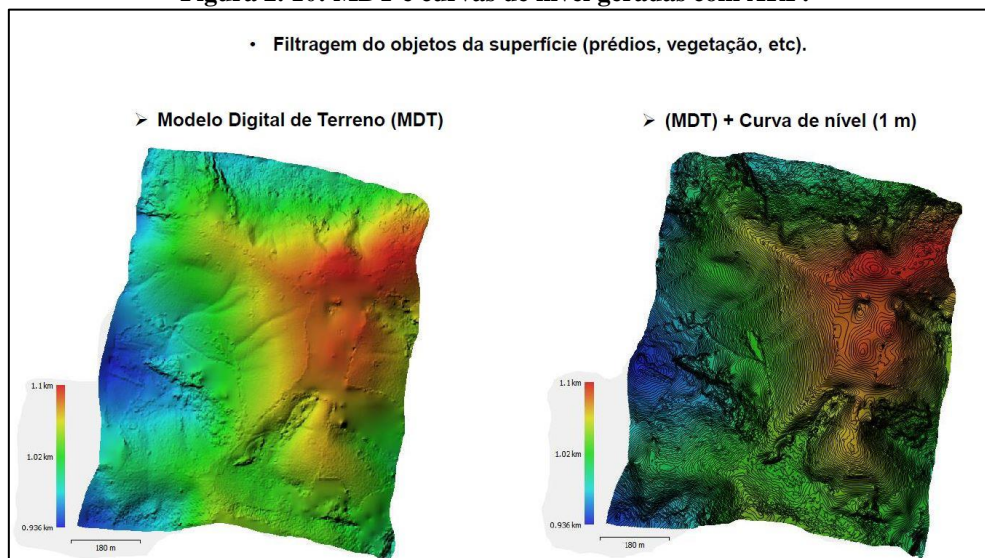
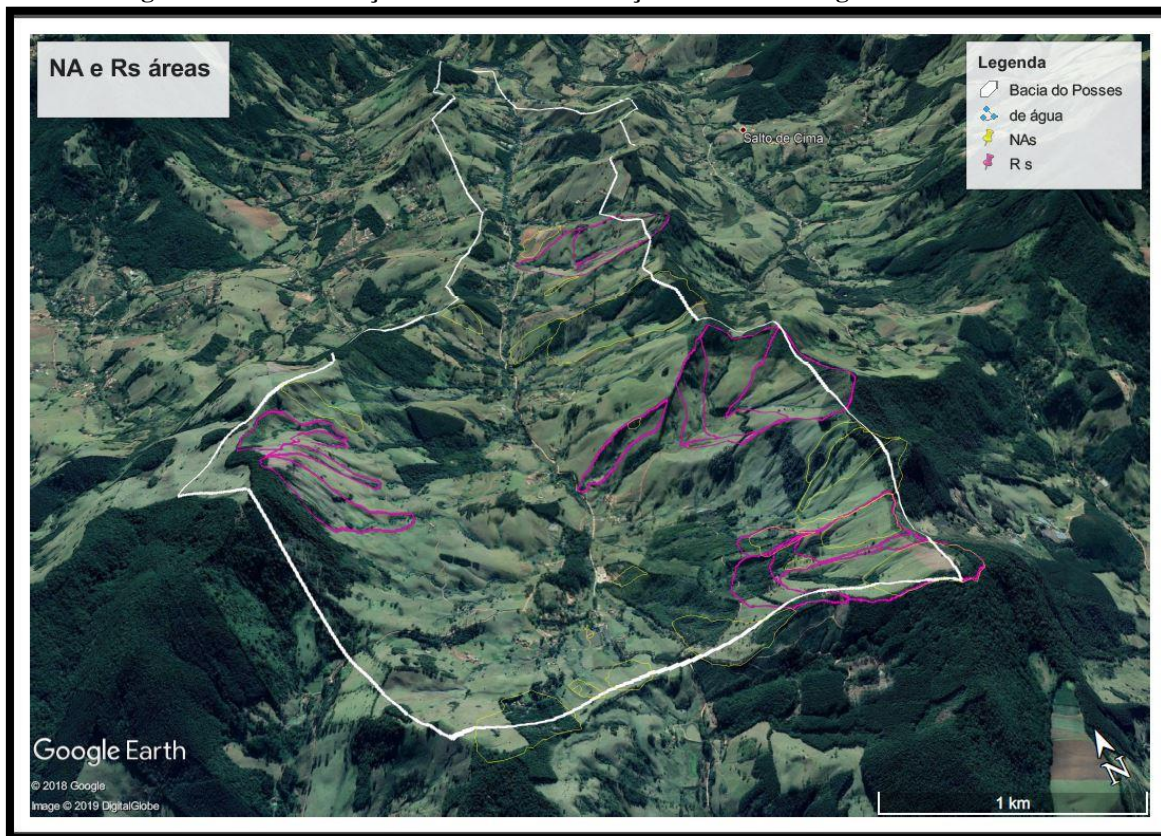
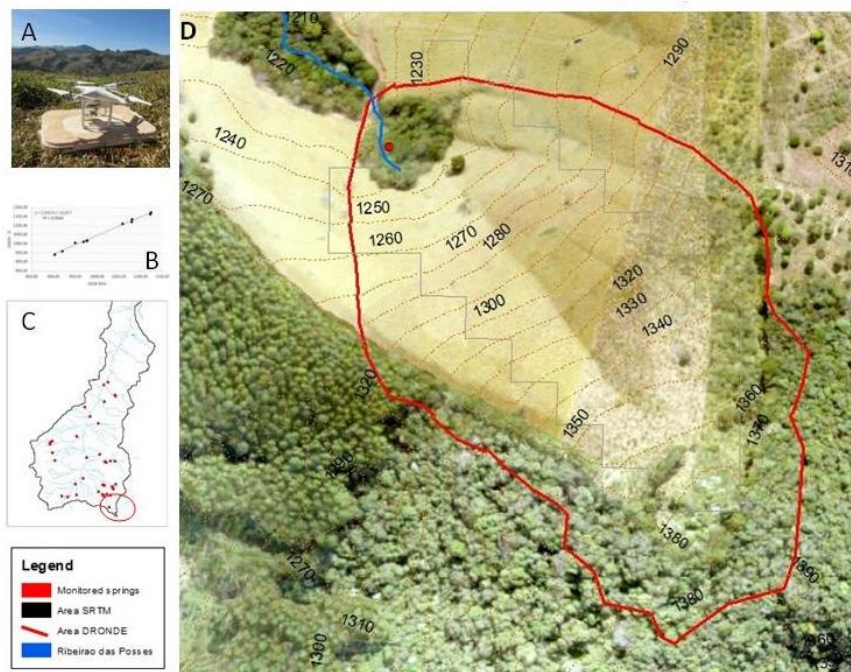


Figura 2. 11: Delimitação das áreas contribuição das nascentes geradas com ARP.



Na Figura 2.14 exemplifica-se a diferença de estimativa da área de contribuição da nascente N15. A imagem refere-se ao ortomosaico gerado com o ARP, e o perímetro em vermelho delimitada com o ARP, em comparação com a área em cinza que refere-se à área gerada automaticamente com o *software* ArcGIS 10.6 baseado no SRTM.

Figura 2. 12: Contorno dos limites da sub-bacia: (a): Aeronave Remotamente Piloto (ARP) usada para fotografias aéreas; (b): Os dados obtidos com o DEM (ARP) foram altamente correlacionados com levantamento realizado com GNSS.



2.4 PROPRIEDADES BIOFÍSICAS DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO

Para se buscar compreender como e se certas características biofísicas da paisagem exercem influência no regime de vazão das nascentes, foram estimadas as seguintes variáveis biofísicas: índice de declividade a 50 m e a 400 m de distância da surgência respectivamente, a percentagem de ocorrência dos tipos Argissolo vermelho e Nitossolo vermelho (SILVA, *et. al.*, 2019) a 50m e em toda a área de contribuição respectivamente (PVNV50 e PVNV), e o índice de cobertura de área de dossel arbóreo a 50m de distância e em toda a área de contribuição respectivamente (CADA50 e CADA).

Índice de cobertura vegetal

Para a caracterização da cobertura vegetal definiu-se um índice igual à porcentagem de Cobertura de Área de Dossel Arbóreo (CADA) em relação à área total de contribuição da nascente. Foram contabilizados apenas fragmentos com área superior a aproximadamente 500 m², avaliadas por inspeção visual simples na imagens aéreas com RPA, no *software* ArcGis, posteriormente conferidas no campo (as imagens da porcentagem de CADA de cada área de contribuição encontram-se no Apêndice 1).

Índice de declividade

O Índice de declividade foi calculado pela razão H/L, com H igual a altitude diferencial de um ponto na área de contribuição em relação ao ponto de surgência da nascente, avaliada na distância horizontal L entre eles. Utilizando a ferramenta *buffer* do *software* ArcGis foram delimitadas áreas a montante do ponto de surgência com raios de 50 m, 100 m, 200m e 400 m, tendo sido escolhidos nas discussões, por simplicidade, os índice na distância L em 50 m e 400 m, respectivamente, o primeiro caracterizando a declividade na escala das imediações da surgência da nascente, e o segundo representando mais a integralidade da área de contribuição.

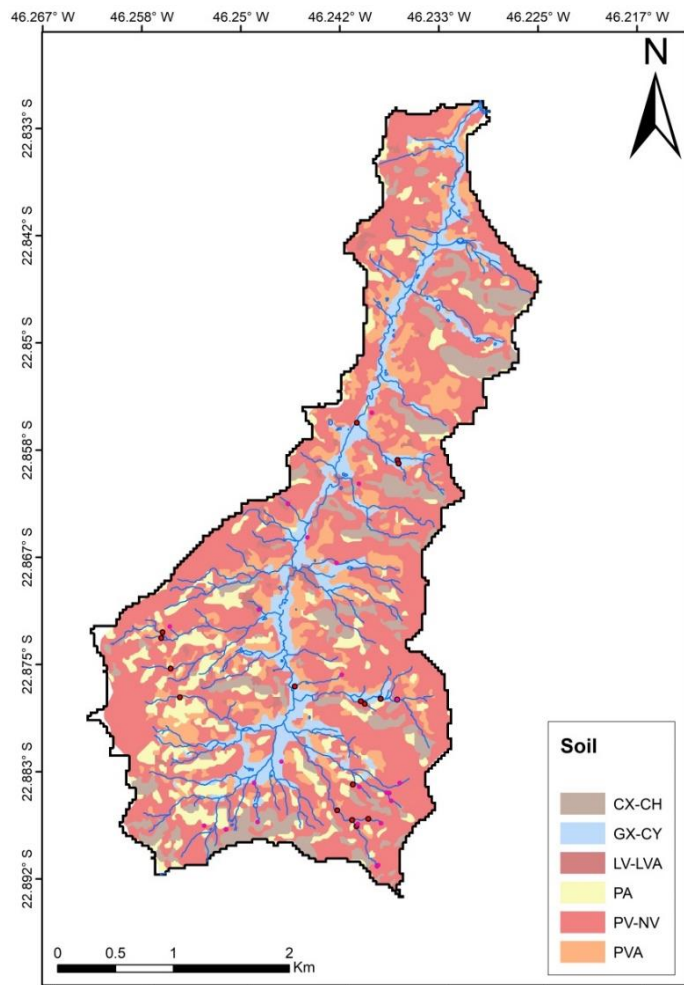
Índice de solo

As classes dos tipos de solo e suas respectivas porcentagens e distribuição na sub-bacia do Ribeirão das Posses, descritas na Tabela 2.2 e Figura 2.15, mostraram a predominância da classe PV-NV (argissolo vermelho e nitossolo vermelho) em toda a bacia (de aproximadamente 56%) (Silva, 2019), e optou-se por definir aqui um índice de solo simples, igual à percentagem de ocorrência desta classe por área de contribuição de cada nascente.

Tabela 2. 2 Porcentagem e tipos de Solo na bacia do Ribeirão das posses. Fonte: (Silva *et al.*, 2019).

Soil Type	Area (ha)	%
Cambissolo háplico e Cambissolo Húmico	121.7	10.1
Gleissolo háplico e Cambissolo Flúvico	121.7	10.1
Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo	19.4	1.6
Argissolo Amarelo	115.2	9.5
Argissolo Vermelho e Nitossolo Vernelho	675.2	55.9
Argissolo Vermelho - Amarelo	155.4	12.9
TOTAL	1208.5	100

Figura 2. 13: Distribuição das classes de solo (Fonte: Silva *et al.*, 2019)



UNIDADES DE MAPEAMENTO

CX-CH	Cambissolo háplico e Cambissolo Húmico
GX-CY	Gleissolo háplico e Cambissolo Flúvico
LV-LVA	Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo
PA	Argissolo Amarelo
PV-NV	Argissolo Vermelho e Nitossolo Vermelho
PVA	Argissolo Vermelho - Amarelo

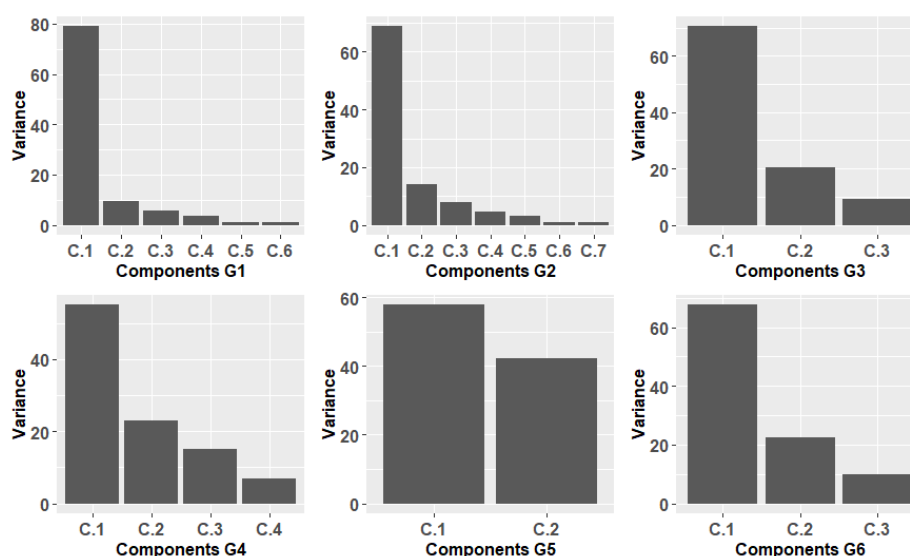
CAPÍTULO 3

PADRÕES HIDROLÓGICOS DO FLUXO DE NASCENTE NA SERRA DA MANTIQUEIRA NO SUDESTE DO BRASIL

3.1 ESTIMATIVA DA VAZÃO DIÁRIA DAS NASCENTES

Foram calculadas as componentes principais para cada grupo de variáveis G1 a G6 (Tab.3.1), indicando-se na figura 3.1 a % da variância explicada por cada CP nos grupos. No grupo G5 houve um equilíbrio entre as CP1 e CP2, enquanto nos demais grupos a 1ª CP foi muito dominante em relação às demais. Os pesos (*loadings*) das combinações das variáveis em cada grupo (chuva, escoamento básico e nível do aquífero nos postos) são mostrados na Figura 3.2, e nas Figuras 3.3 a 3.8 mostram-se os *scores* das PCs.

Figura 3. 1: variância explicada por cada componente principal (PC) dos grupos 1 a 6 (G1 a G6).



A vazão de cada nascente foi correlacionada com as CPs dos grupos prioritários, escolhidos aqueles melhor ranqueados no ajuste estatístico, de forma a estabelecer um modelo de desagregação da série histórica de vazão em resolução diária. Nas Tabela 3.2 são informados os grupos selecionados para correlação com cada nascente e as CPs efetivamente utilizadas em cada modelo.

Tabela 3. 1. Identificação dos elementos que compõe os grupos G1 a G2, sendo P: Poços; BF: Escoamento básico na foz da bacia e PT: Precipitação.

	P.área Ripária	P. N15	P.s Q4	BF	PT
G1	■			■	
G2					■
G3		■			
G4				■	
G5				■	
G6			■		

Figura 3.2: pesos (loadings) das variáveis de cada grupo G1 a G6 definidos por combinações das seguintes variáveis

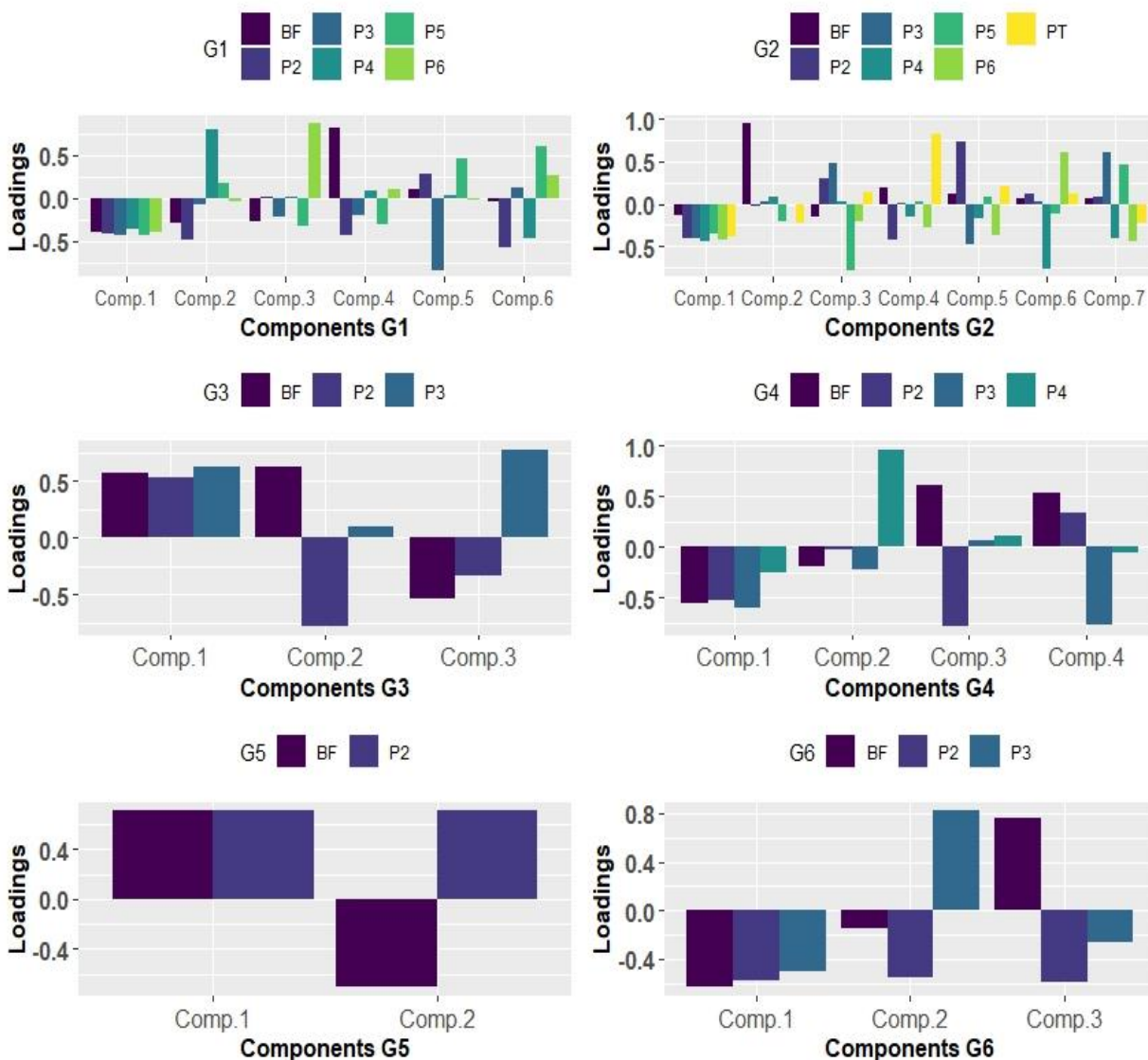


Figura 3.3: Scores das CPs do grupo G1, composto pelas medidas dos poços piezométricos P2 ao P6 e escoamento básico do Ribeirão das Posses. Falhas na série decorrentes de ausência de medição foram preenchidas através de modelo linear com os dados do grupo 5.

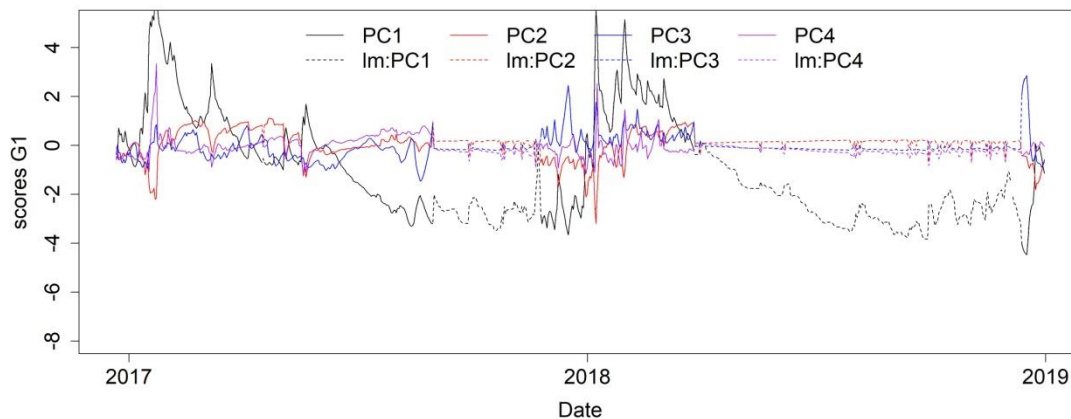


Figura 3.4: Scores das CPs do grupo G2, composto pelas medidas dos poços piezométricos P2 ao P6, escoamento básico e precipitação. Falhas na série são decorrentes de ausência de medição, preenchidas através de modelo linear com os dados do grupo 5.

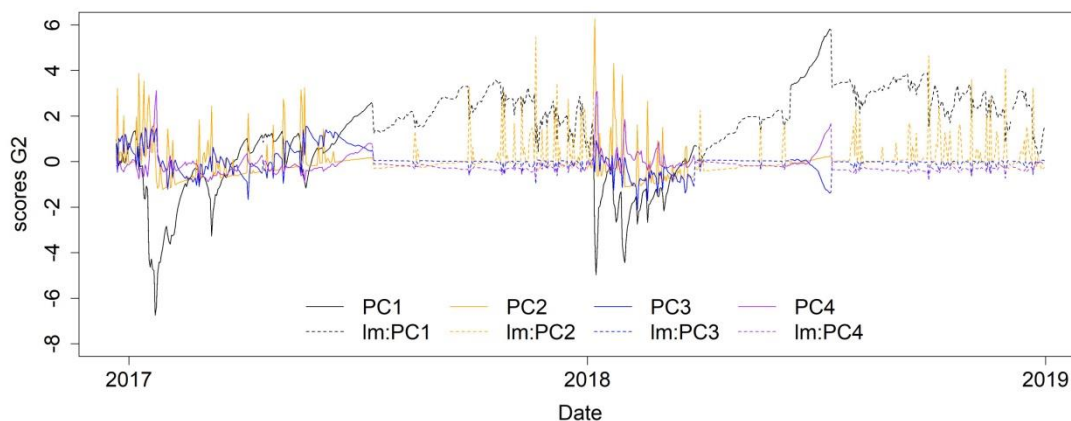


Figura 3.5: Scores das CPs do grupo G3, composto pelas medidas dos poços piezométricos P1/N15, P2/N15e escoamento básico. Falhas decorrentes de ausência de medição foram preenchidas através de modelo linear com os dados do grupo 5.

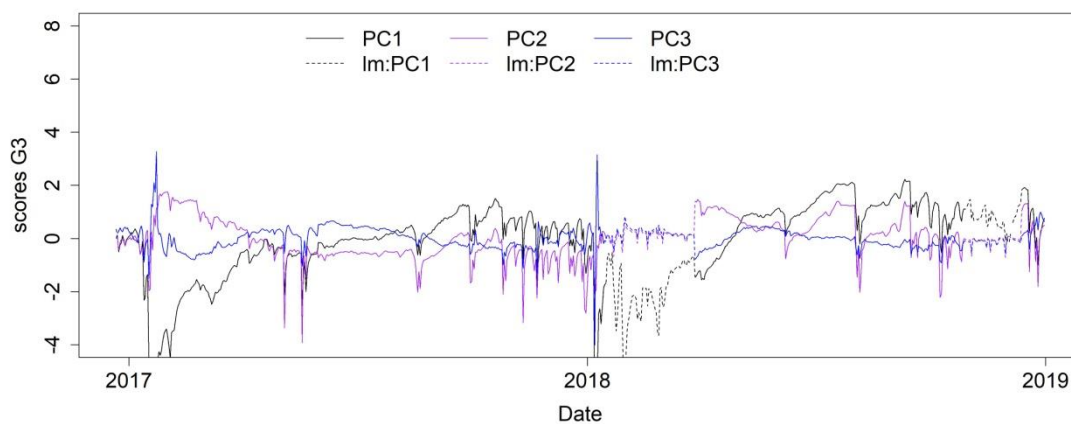


Figura 3.6: Scores das CPs do grupo G4 (medidas dos poços piezométricos P1/N15, P2/N15, escoamento básico e precipitação), preenchidas com modelo linear com grupo 5.

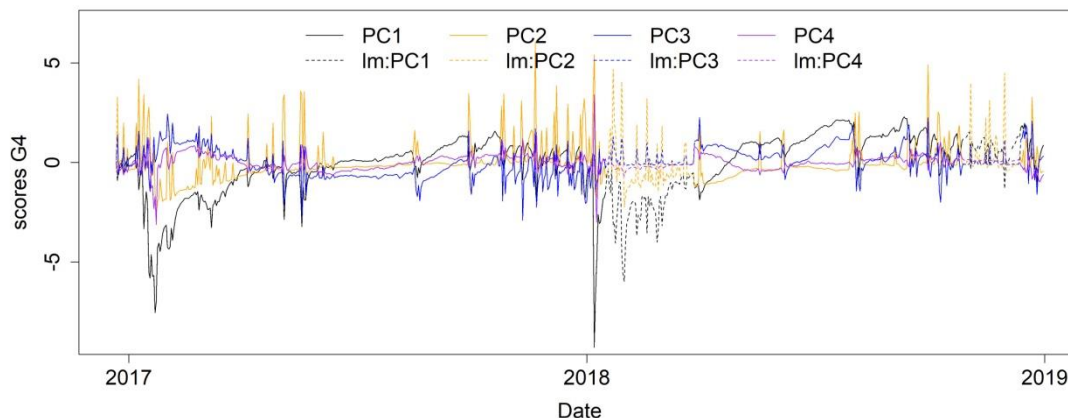


Figura 3.7: Scores das CPs do grupo G5, composto por escoamento básico e precipitação

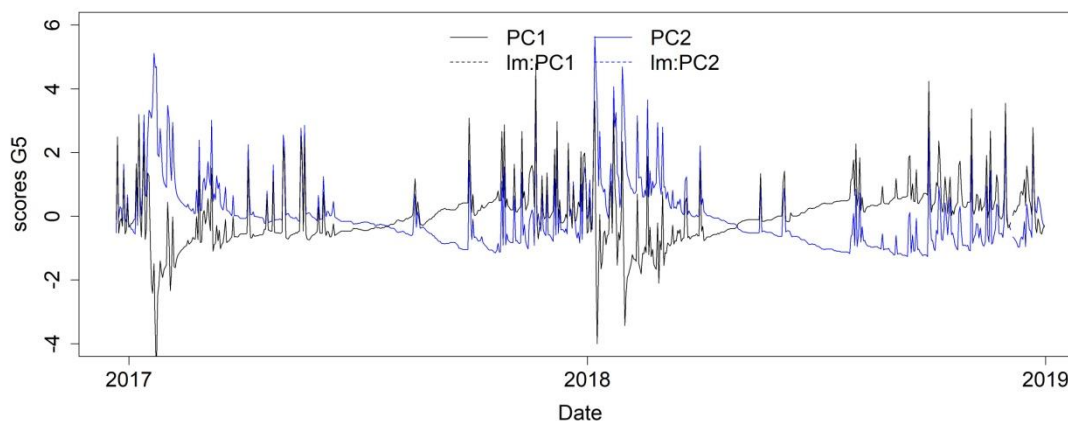


Figura 3.8: Scores das CPs do grupo G3, composto pelas medidas dos poços piezométricos P2/Q4, P3/Q4 e escoamento básico. Falhas decorrentes de ausência de medição foram preenchidas através de modelo linear com os dados do grupo 5.

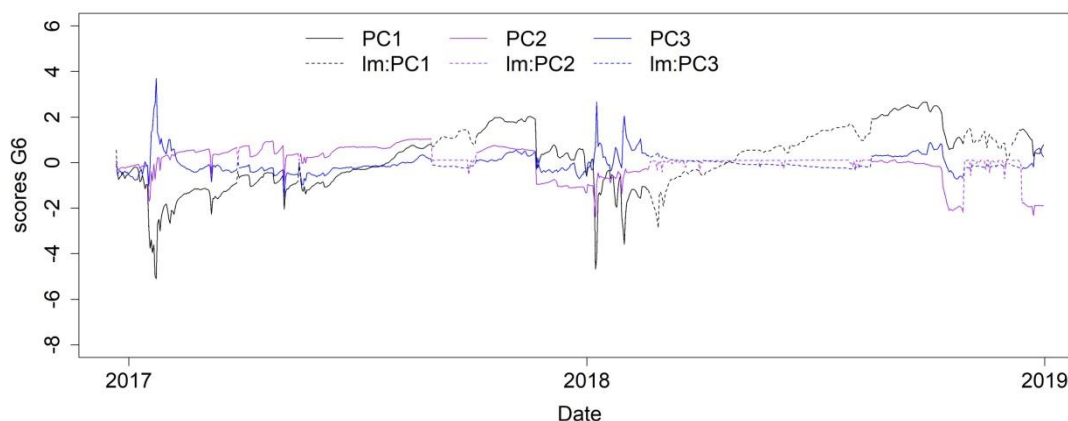


Tabela 3. 2. Grupo e principal componente (CP) utilizada para reconstrução da série da nascente com respectivo coeficiente angular e R2 da regressão.

COD NA	G1 PC (R²)	G2 PC (R²)	G3 PC (R²)	G4 PC (R²)	G5 PC (R²)	G6 PC (R²)
N1			PC 1,2 (0,89)			
N2				PC 1, 2, 3 (0,97)		
N3				Pc 1, 2, 3, 4 (0,96)		
N4						PC 1, 2, 3 (0,83)
N6				PC 1, 3, 4 (0,83)		
N7	PC 1 (0,38)					
N8	PC 1, 2 (0, 65)					
N9				PC 1, 2, 3 (0,91)		
N10				PC 1, 2, 3 (0,93)		
N11				PC 1, 2, 3 (0,94)		
N12	PC 1, 2 (0,90)					
N13				PC 1, 2, 3 (0,91)		
N14						PC 1, 2 (0,65)
N15						PC 1, 2 (0,60)
N16				PC 1, 2, 3 (0,93)		
N17				PC 1, 3 (0,92)		
N18					PC 1, 2 (0,91)	
N19						PC 1, 2 (0,36)
N20		PC 4 (0,22)				
N21			PC 1, 2 (0,90)			
N22			PC 1, 3 (0,66)			
R01	PC 1, 2 (0,74)					
R02		PC 1, 2 (0, 85)				
R03				PC 1, 2, 3 (0,85)		
R04			PC 1, 2 (0,91)			
R05				PC 1, 3 (0,92)		
R06		PC 1, 4 (0,93)				
R07						PC 1, 2 (0,82)
R08						PC 1, 2 (0,79)
R09				PC 1, 2 (0,72)		
R10				PC 1, 3 (0,89)		
R11			PC 1, 2 (0,88)			
R15		PC 1, 2, 3 (0,89)				
R18	PC 1, 2 (0,90)					
R19						PC 1, (0,61)
R20				PC 1, 2 (0,80)		
R21		PC 1, 2, 4 (0,91)				
R22			PC 1 (0,62)			
R23				PC 1, 2, 3, 4 (0,80)		
TOTAL GRUPOS:	6	4	6	15	1	7

Como exemplo da avaliação do desempenho do modelo ajustado de vazão diária, as medidas mensais e o cálculo do modelo são mostrados em alguns locais selecionados, onde se obteve desde bom, intermediário até um ajuste baixo (Fig. 3.9 a 3.11).

Figura 3.9: (a) exemplo de modelo ajustado com bom desempenho (Nascente N2, com $R^2 = 0,97$ e $p = 3,4 \cdot 10^{-16}$). A linha preta representa o modelo ajustado baseado no grupo G4. Em vermelho são as medidas mensais e em azul é a precipitação na bacia. (b) regressão linear indicando o desempenho do modelo.

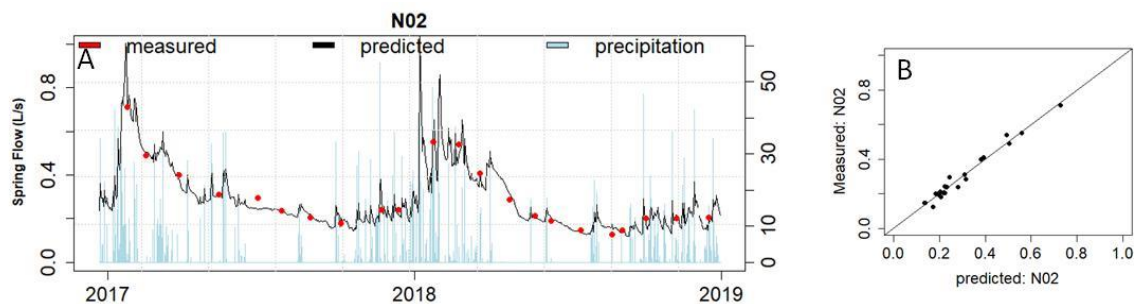


Figura 3.10: (a) exemplo de modelo ajustado com bom desempenho intermediário (Nascente R8, com $R^2 = 0,65$ e $p = 3,4 \cdot 10^{-6}$). A linha preta representa o modelo ajustado baseado no grupo G1. Em vermelho são as medidas mensais e em azul é a precipitação na bacia. (b) regressão linear indicando o desempenho do

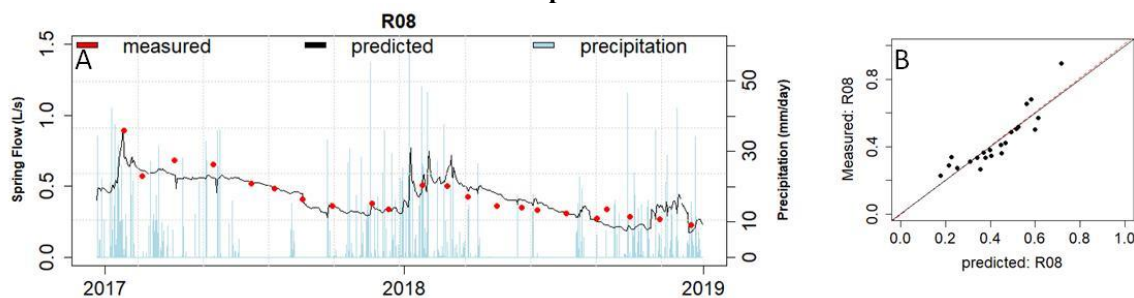
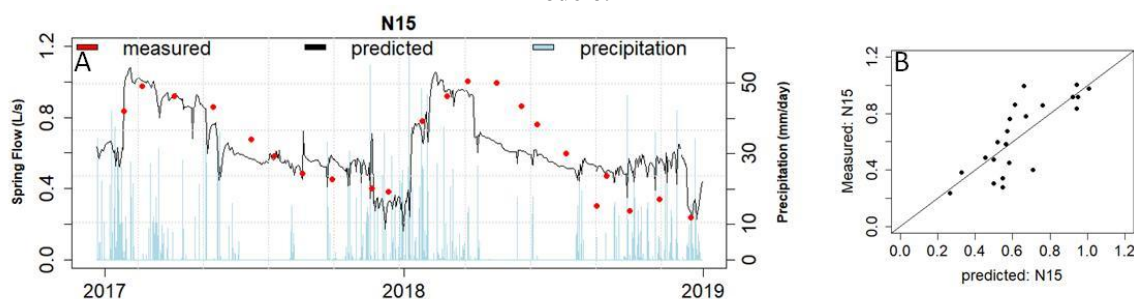


Figura 3.11: (a) exemplo de modelo ajustado com baixo desempenho (Nascente N15, com $R^2 = 0,6$ e $p = 1,3 \cdot 10^{-5}$). A linha preta representa o modelo ajustado baseado no grupo G6. Em vermelho são as medidas mensais e em azul é a precipitação na bacia. (b) regressão linear indicando o desempenho do modelo.



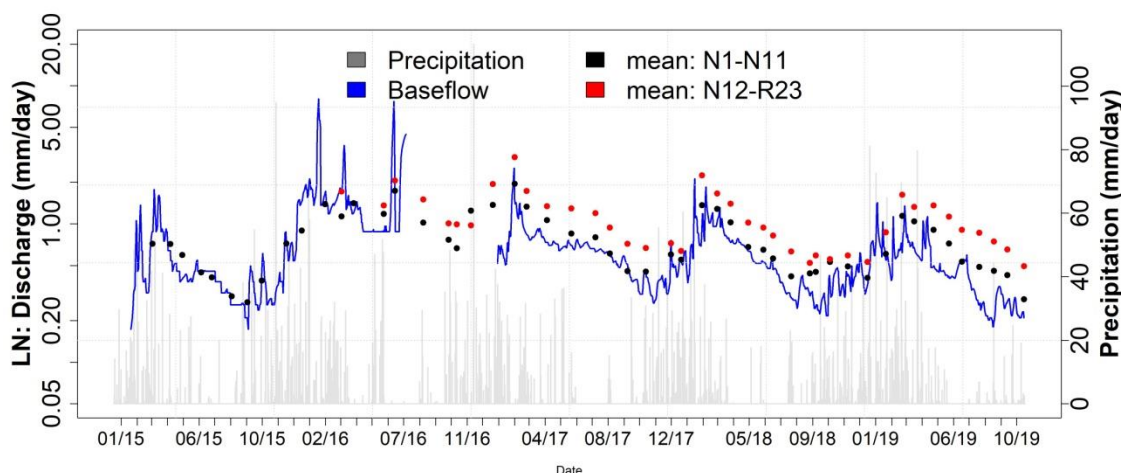
A avaliação da correlação da vazão das nascentes com as PCs é mostrada no Apêndice 1 para todo o conjunto amostral, indicando-se a vazão mensal e o ajuste com a vazão desagregada diária, com significância estatística.

3.2 DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL DA VAZÃO DE NASCENTES

Por simplicidade, as medidas discretas na base mensal serão referidas daqui em diante por medida mensal, e os valores desagregados por modelagem na resolução diária por diário.

O conjunto amostral mensal de 10 nascentes medido antes de Fevereiro/2016 mostrou uma média sistematicamente inferior ao novo conjunto de 29 nascentes adicionado àquele posteriormente (Fig. 3.12). Esta variabilidade foi absolutamente casual, uma vez que o novo conjunto adicionado foi escolhido aleatoriamente na bacia. Por esta razão optou-se por obter um modelo de desagregação na base diária somente com as 39 nascentes medidas simultaneamente.

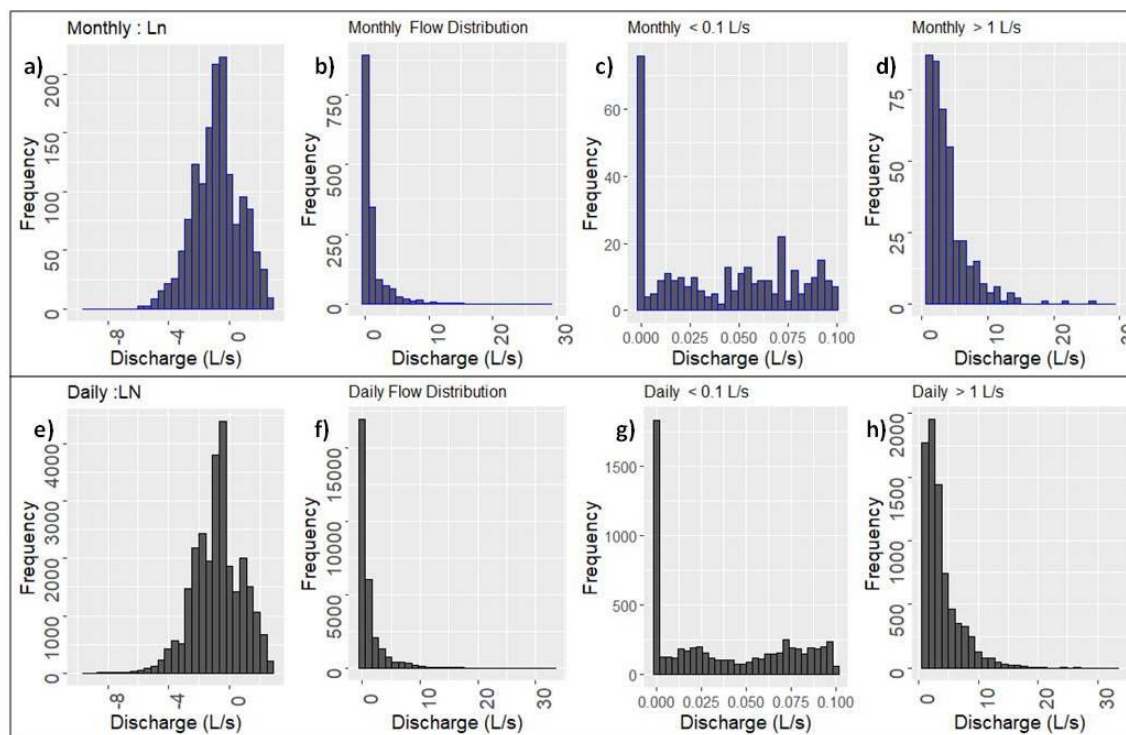
Figura 3.12: Série histórica da vazão das nascentes. Em preto, as nascentes medidas desde janeiro/2015. Em vermelho, as nascentes medidas a partir de fevereiro/2016. A linha azul é o escoamento básico na foz da bacia. As barras cinza representam a chuva.



A Figura 3.13 (a:d) mostra a distribuição das vazões medidas na base mensal, tomando como base medidas mensuradas até novembro de 2019. A Figura 3.13 (e:h), para fins de comparação, indica os valores obtidos através do modelo desagregado para base diária, através do modelo descrito no item anterior, com valores calculados até dezembro de 2018. Para fins de discussão chamaremos os dados medidos mensalmente apenas de “medidos” e aqueles que foram desagregados para base diária serão denominados de “modelados”.

A frequência da vazão em uma distribuição log-normal significativa (Fig. 3.13 (a) e (e), respectivamente) foi testada com o teste Kolmogorov–Smirnov ($p = 0,15$ para valores medidos e $p = 2.2e^{-16}$, para os modelados).

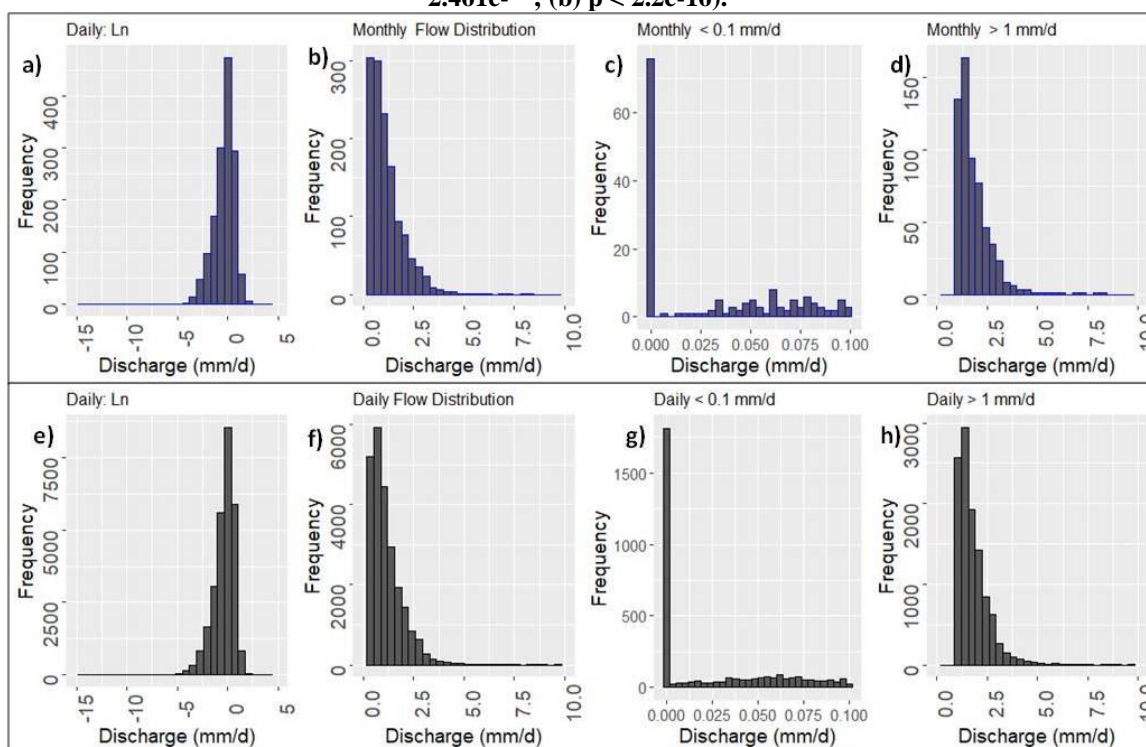
Figura 3.13: Distribuição da frequência da vazão ($L s^{-1}$) de todo conjunto amostral. (a) medidos: log-normal; (b) histograma de valores medidos de vazão; (c) histograma de valores de vazão medidos abaixo de $0,1 L s^{-1}$; (d) histograma de valores de vazão medidos acima de $1 L s^{-1}$; (e) modelados: log-normal; (f) histograma de valores modelados de vazão; (g) histograma de valores de vazão modelados abaixo de $0,1 L s^{-1}$; (h) histograma de valores modelados de vazão acima de $1 L s^{-1}$.



Para os valores medidos, os mínimos absolutos ocorreram nos episódios de nascentes secas (76 eventos, distribuídos entre seis nascentes) e o máximo absoluto foi de $26,2 L s^{-1}$ (R18). Dentre todo o conjunto amostral medido, a mediana foi de $0,42 L s^{-1}$, e os persistis 25% de $0,13 L s^{-1}$ e 75% de $1,04 L s^{-1}$ (Tab. 3.3). Para o modelo calculado, o mínimo foi 0 (em 2191 eventos, em 13 nascentes) e o máximo foi de $33,0 L s^{-1}$ (R18). Considerando todo o conjunto dos dados preditos, a mediana foi $0,45 L s^{-1}$, e os persistis 25% de $0,12 L s^{-1}$ e 75% de $1,16 L s^{-1}$.

Nos valores abaixo de $0,1 L s^{-1}$, tanto para os valores medidos quanto para os modelados, a distribuição foi relativamente uniforme, exceto no segmento abaixo de $0,01 L s^{-1}$ onde se concentraram as vazões muito baixas e que dominou. Nos valores de vazão acima de $1 L s^{-1}$, para os medidos e modelados, as ocorrências tenderam a diminuir com o aumento da vazão de forma sistemática.

Figura 3.14: Histograma da vazão específica de todos os dados (teste Kolmogorov–Smirnov: (a) $p = 2.461e^{-10}$; (b) $p < 2.2e^{-16}$).



Para a vazão específica, a vazão medida apresentou uma distribuição log-normal (Fig. 3.14 a). A vazão máxima específica medida foi de $8,3 \text{ mm d}^{-1}$, observada no ponto de medição N19, o qual apresenta uma área de $0,31 \text{ ha}$. Para o modelo desagregado para base diária, a nascente N18, com área de $0,15 \text{ ha}$, apresentou o maior valor de vazão específica, com $11,3 \text{ mm d}^{-1}$ (Fig. 3.14 b e f).

Assim como para as vazões absolutas, para as vazões específicas para valores abaixo de $0,1 \text{ mm d}^{-1}$ (Fig 3.14, c e g), a distribuição apresentou-se uniforme para ambos os casos (medidos e modelados), exceto no 1º segmento (abaixo de $0,01 \text{ mm d}^{-1}$). Já para as vazões acima de 1 mm d^{-1} , tanto para os medidos como para os valores modelados, apresentou-se uma tendência de diminuição de frequência, conforme aumento da vazão específica (Fig. 3.14, d e h).

O efeito de desagregação das medidas mensais para a resolução diária levou à uma pequena alteração nas médias e extremos.

A tabela 3.3 mostra a comparação entre as vazões absolutas (Ls^{-1}) e específicas (mm d^{-1}) das medidas mensais e diárias. Para as vazões específicas, a média mensal foi de $1,01 \pm 0,5$ e a média diária foi de $0,95 \pm 0,5 \text{ mm d}^{-1}$, representando uma redução de menos de 6%, já os extremos médios mínimos foram iguais ($0,08 \text{ mm d}^{-1}$) e máximos apresentaram uma redução de 11%.

As mínimas medidas mensalmente foram apresentaram uma média de $0,3 \pm 0,3$ enquanto que a desagregação diária calculou $0,28 \pm 0,3 \text{ mm d}^{-1}$ (-7%), já os extremos mínimos permaneceram iguais (0) e extremos das máximas foram superestimados em torno de 35%. Para os valores mínimos p 05%, os valores mensais apresentaram uma média de $0,43 \pm 0,3$ e os valores diários foram de $0,40 \pm 0,4$ (~ -7%), com extremos mínimos iguais (0) e máximos de $1,27 \text{ mm d}^{-1}$ para $1,63$ (+29%).

A diferença entre as vazões máximas específicas medidas mensais e calculadas diárias, foi de $0,64 \text{ mm d}^{-1}$ (~+21%), com extremos mínimos e máximos que variaram +102% e +35%, respectivamente. Tal diferença foi atenuada ao se excluir os valores extremos, ao considerar os valores p95%, de forma que para as médias máximas a diferença passou de $2,11 \pm 1,3$ para $1,93 \pm 1,1 \text{ mm d}^{-1}$ (-8%), sendo que o extremo máximo passou de $6,44$ para $4,78 \text{ mm d}^{-1}$ (-25%).

Considera-se que essas diferenças dos valores medidos (na base mensal) para os valores calculados (base diária) possam representar a realidade, uma vez que, por exemplo, em eventos de chuvas extremas, não foram feitas medidas de campo, enquanto que, as medidas diárias baseadas em instrumentos instalados na bacia, podem ser sensíveis a tais eventos. Por outro lado, as medidas mensais, podem ter deixado de medir períodos de seca acentuada, resultando em uma superestimação das mínimas. Além disso, em muitos casos, essa diferença foi relativamente pequena, de forma a representar a realidade.

Tabela 3. 3. Conjunto amostral das vazões absolutas e específicas, tanto medidas mensais, como respectiva comparação das vazões calculadas diárias, com os respectivos quartis de 05% e 95%.

	Medidas Mensais			Diárias		
	média	min	max	média	min	max
Média (L/s)	1.34 ± 1.9	0.01	8.64	1.27 ± 1.9	0.01	8.56
Mínima (L/s)	0.41 ± 0.7	0.00	2.52	0.29 ± 0.51	0.00	2.07
Quantil 05% (L/s)	0.58 ± 0.9	0.00	3.20	0.47 ± 0.77	0.00	3.17
Máxima (L/s)	3.81 ± 5.6	0.05	26.19	5.00 ± 7.3	0.06	33.08
Quantil 95% (L/s)	2.75 ± 4.1	0.04	20.07	2.61 ± 3.8	0.03	17.47
Média (mm/d)	1.01 ± 0.5	0.08	2.51	0.95 ± 0.5	0.08	2.23
Mínima (mm/d)	0.30 ± 0.3	0.00	1.05	0.28 ± 0.3	0.00	1.42
Quantil 05% (mm/d)	0.43 ± 0.3	0.00	1.27	0.40 ± 0.4	0.00	1.63
Máxima (mm/d)	3.00 ± 1.8	0.20	8.36	3.64 ± 2.3	0.42	11.35
Quantil 95% (mm/d)	2.11 ± 1.3	0.17	6.44	1.93 ± 1.1	0.17	4.78

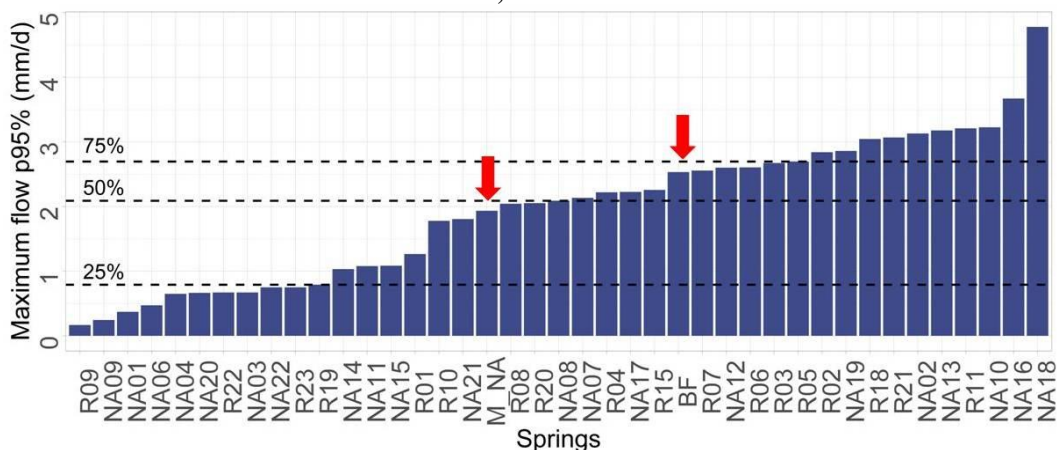
3.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DO REGIME DE VAZÃO

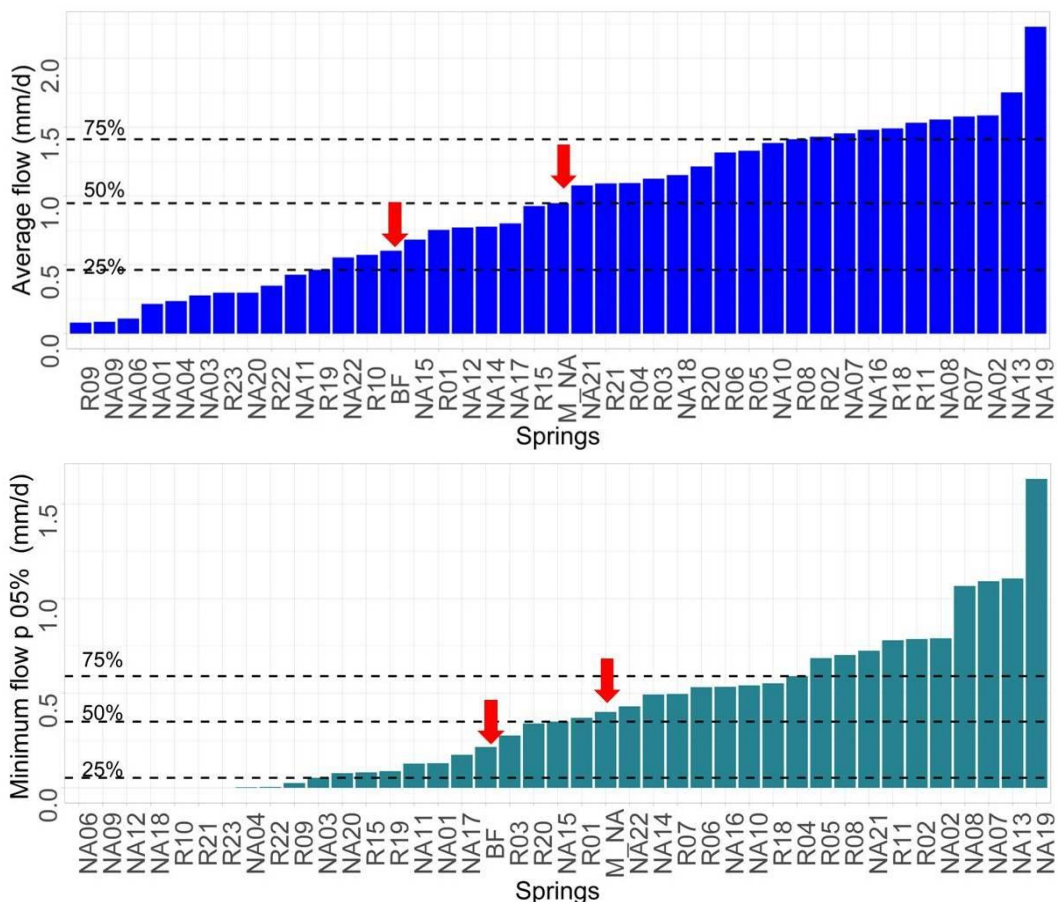
Variabilidade espacial da média e dos extremos de vazão

Para verificar a variabilidade da média e dos extremos de vazão no contexto da variabilidade espacial de todas as nascentes, estimou-se com as séries de vazão diária desagregada, a vazão mínima pela média do percentil 0 a 5% (aqui referenciada p05%) e a vazão máxima pela média do percentil de 95 a 100% (aqui referenciada) p95% da vazão específica, respectivamente para cada nascente. Notou-se assim haver de forma geral uma pronunciada variabilidade entre as nascentes, tanto na média como nos extremos, em que a vazão específica variou nos seguintes intervalos (em mm d^{-1}) aproximadamente (Fig.3.15, a:c).

- Vazões mínimas: 0 a $1,63 \text{ mm d}^{-1}$ (mediana $\approx 0,35$; média espacial $\approx 0,40$).
- Vazões médias temporais: $0,07951$ a $2,23 \text{ mm d}^{-1}$ (mediana $\approx 1,07$; média espacial $\approx 0,95$).
- Vazões máximas: $0,17$ a $4,78 \text{ mm d}^{-1}$ (mediana $\approx 2,09$; média espacial $\approx 1,93$).

Figura 3.15: Distribuição da vazão em ordem crescente por nascente, incluindo-se o escoamento básico da bacia (calculado no mesmo intervalo modelado das 39 nascentes), para (a) máximas específicas; (b) médias; (c) mínimas. Linhas horizontais nos gráficos indicam quartis de distribuição de 25%, 50% e 75%.

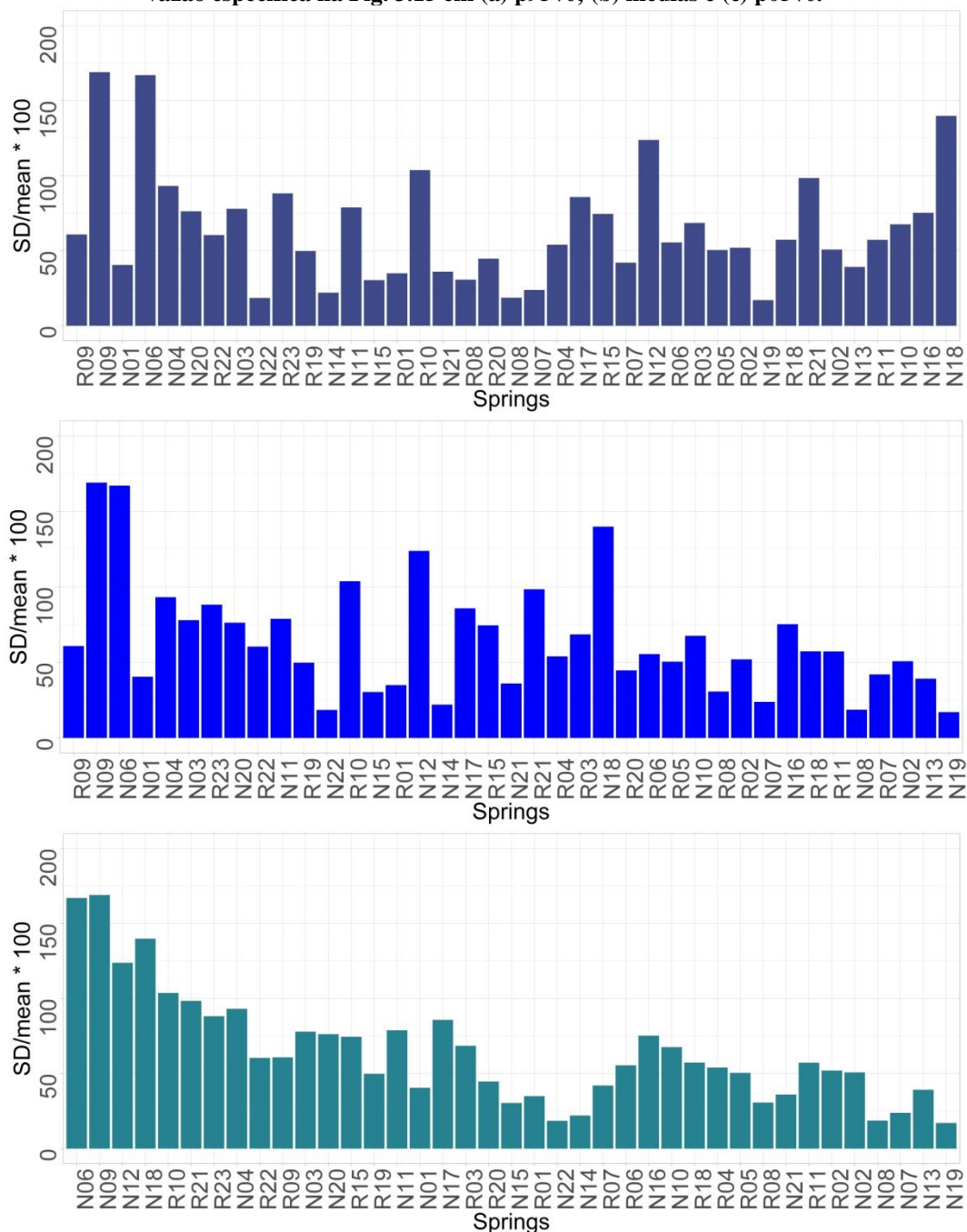




Não houve uma hierarquia rígida das nascentes na ordem das mínimas comparada com a ordem das máximas, ou das médias.

O escoamento básico específico médio na bacia no intervalo de cálculo foi de 0,601 mm d⁻¹, ficando a vazão específica média por nascente ora abaixo ou acima do mesmo. Dessa forma, comparando-se a vazão média específica de cada nascente e escoamento básico específico, 13 nascentes ficaram abaixo e as outras 26 nascentes acima do mesmo (Fig. 3.15b). Já, para as mínimas, 17 ficaram abaixo e 22 acima (Fig. 3.15c); enquanto que para as máximas, 24 abaixo e as outras 15 ficaram acima do escoamento básico (Fig. 3.15 a).

Figura 3.16: Coeficiente de variação das nascentes (em %) disposto segundo ordem hierárquica da vazão específica na Fig. 3.15 em (a) p95%; (b) médias e (c) p05%.



Foi calculado o coeficiente de variação (CV) por nascente em toda a série temporal, que de forma geral variou de 10% a 170% (Fig. 17). Não houve aparentemente relação do CV com a vazão média ou a vazão máxima p95% (Fig. 3.16 a,b), mas uma relação de proporção razoavelmente definida com a vazão mínima p05%. Notou-se aumento pronunciado do CV com a redução da vazão mínima das nascentes (Fig. 3.16 c).

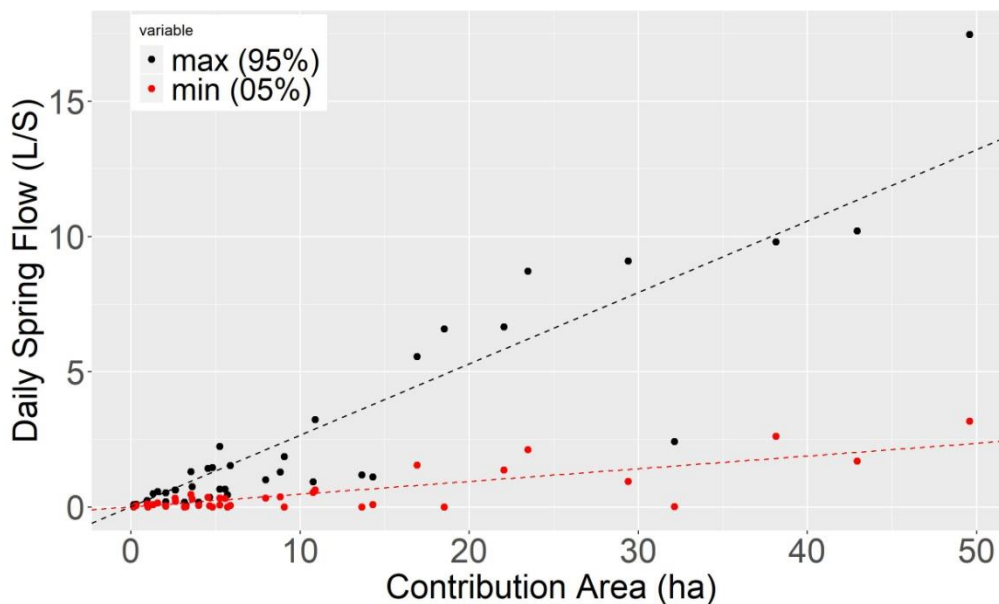
Vazão específica e área de contribuição

A variabilidade da área de contribuição no conjunto amostral foi bastante expressiva, desde 0,15 ha até 49,6 ha. Utilizando-se as vazões máximas (p95%) e mínimas (p5%) das nascentes, notou-se que a relação de dependência proporcional direta da vazão com a área de contribuição individual foi bem definida nos dois casos (Fig. 3.17). Esta proporção é de certa forma esperada, desde que sejam razoavelmente semelhantes, entre todo o conjunto das nascentes, os processos de descarga de água subterrânea e sua concorrente produção de água superficial. Nesta perspectiva notou-se que o padrão de proporção das vazões máximas é significativamente diferente da proporção das vazões mínimas, o primeiro relativamente muito maior que o último. Isto sugere como efetivamente os processos que dominam a geração das máximas sejam marcadamente distintos daqueles que controlam as mínimas, no que diz respeito à sua manifestação no domínio espacial e influência da área de contribuição. Para a vazão mínima a relação foi de 0,40 mm dia⁻¹ e para a máxima foi de 2,3 mm dia⁻¹.

Figura 3.17: Relação vazão versus área de contribuição.

Para mínimas p-05% (pontos em vermelho): $\beta = 0.047$; $R^2 = 0.74$; p-value = $5.82e^{-13}$.

Para máximas p-95%(pontos em preto): $\beta = 0.264$; $R^2 = 0.88$; p-value = $< 2.2e^{-16}$.



Todavia, mais além, notou-se outra característica de divisão na relação da vazão das nascentes com a área de contribuição, em que, tanto as máximas como as mínimas, mostraram cada uma separadamente, dois subgrupos distintos.

Neste sentido, para as vazões máximas, a relação de proporção identificou dois novos subgrupos funcionais significativamente diferentes, um de maior relação e outro de menor (em azul e vermelho, respectivamente, conforme Fig. 3.18 a), em que a vazão específica ajustada foi de 2,6 mm dia⁻¹ na maior e 0,76 mm dia⁻¹ na menor proporção. Optou-se desta forma por simplicidade denominar-se simplesmente de grupos de nascentes de alta produtividade (com subtotal de 23 nascentes) e de baixa produtividade (com subtotal de 16 nascentes) na vazão máxima, respectivamente (Fig. 3.18). O subgrupo de baixa produtividade de vazão máxima foi dominante nas nascentes de menor área de contribuição, na maioria < 10 ha, conforme a Fig. 3.18 (b). A vazão específica média das máximas para todas as nascentes foi muito mais próxima da vazão do grupo de alta produtividade, em grande parte porque a regressão linear é mais enviesada pelas maiores áreas de contribuição.

Obteve-se também a detecção de dois subgrupos funcionais para as vazões mínimas (Fig. 3.19). No subgrupo de alta produtividade das vazões mínimas a vazão específica da regressão foi 0,50 mm d⁻¹, e no de baixa produtividade foi de 0,02 mm d⁻¹. O subgrupo de baixa produtividade de vazão mínima teve subtotal de 17 nascentes, e o de alta produtividade o subtotal de 22 nascentes, este último também dominante nas nascentes de menor área de contribuição ou < 10 ha, conforme a Fig. 3.19 (b). O grupo de baixa produtividade de vazão máxima foi dominante nas nascentes de menor área de contribuição, na maioria < 10 ha, conforme mostrado na Fig. 3.18 (b). A vazão específica média das mínimas para todas as nascentes (0,40mm d⁻¹) foi muito mais próxima da vazão do grupo de alta produtividade, também devido ao enviesamento das menores áreas de contribuição e, analogamente, à vazão máxima. No caso das mínimas, todavia, a vazão específica é muito baixa nas nascentes de baixa produtividade, uma vez que muitas delas secam intermitentemente e assim reduzem muito os percentis 5% individualmente.

Figura 3.18: Relação entre vazões máximas (p95% em L/s) das nascentes e suas áreas de contribuição (ha), com regressões lineares (linha tracejada) indicando dois grupos distintos:

Alta produtividade: $R^2=0.9723$; $\beta=0,303$; $p < 2.2e^{-16}$.

Baixa produtividade: $R^2=0.8819$; $\beta=0,088$; $p=1.448e^{-08}$

Para (a) área até 50 ha e (b) área até 10 ha, com reta tracejada indicando a mesma regressão de (a).

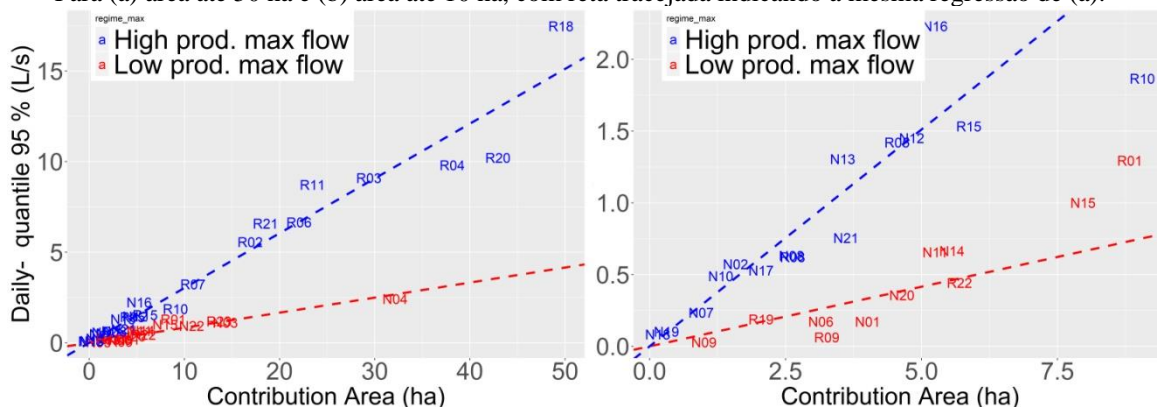
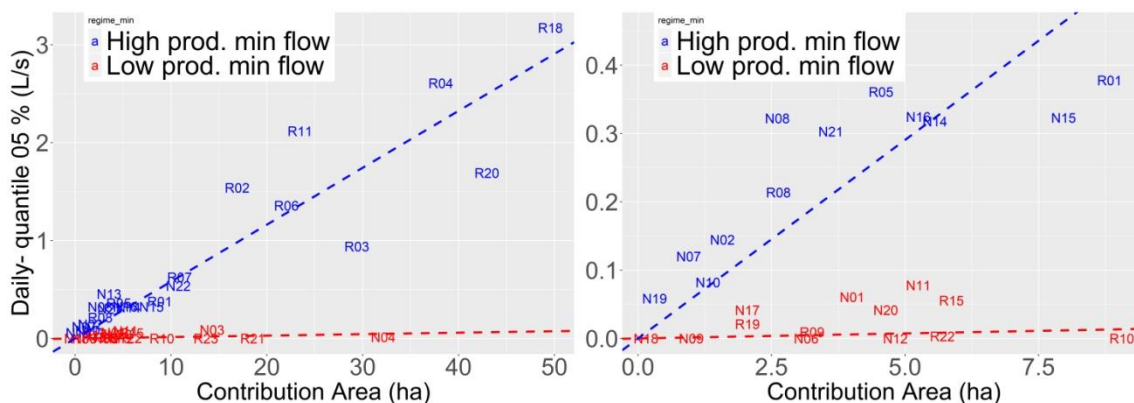


Figura 3.19: Relação entre vazões máximas (p05% em L/s) das nascentes e suas áreas de contribuição (ha), com regressões lineares (linha tracejada) indicando dois grupos distintos:

Alta produtividade: $R^2=0.9151$; $\beta=0.058258$; $p=6.195e^{-13}$.

Baixa produtividade: $R^2=0.06107$; $\beta=0.002676$; $p=0.1661$.

Para (a) área até 50 ha e (b) área até 10 ha, com reta tracejada indicando a mesma regressão de (a).



A identificação significativa de grupos homogêneos para as vazões máximas (p95%) e mínimas (p5%) é de certa forma um fenômeno plausível de entendimento, uma vez que as formas de geração de escoamento nos episódios de estiagem durante a estação seca são presumivelmente diferentes daquelas nos episódios chuvosos durante a estação úmida. Na estiagem espera-se haver apenas controle do escoamento básico, em uma condição do aquífero bem abaixo da saturação, de forma que sua descarga não ocorra sob a máxima pressão. Já, nos episódios chuvosos, com o solo próximo da saturação espera-se que ocorra escoamento direto com bastante recorrência, e que o aquífero esteja muito carregado e sob grande pressão, o que por sua vez produziria maior vazão por unidade de área de contribuição.

Mais além, a identificação de subgrupos de alta e baixa produtividade de água por unidade de área, nas vazões máximas e mínimas separadamente, pode ter várias causas. Esta variabilidade pode supostamente ocorrer parcialmente devido às distintas características dos processos funcionais de geração de escoamento que dominam as vazões nos subgrupos de alta e de baixa, para as máximas e para as mínimas, respectivamente. No caso das mínimas, por exemplo, no subgrupo de baixa produtividade pode haver uma forte limitação da capacidade do aquífero que as suportam individualmente, e que forçam à redução da vazão a valores muito pequenos durante a estação seca, até mesmo secando.

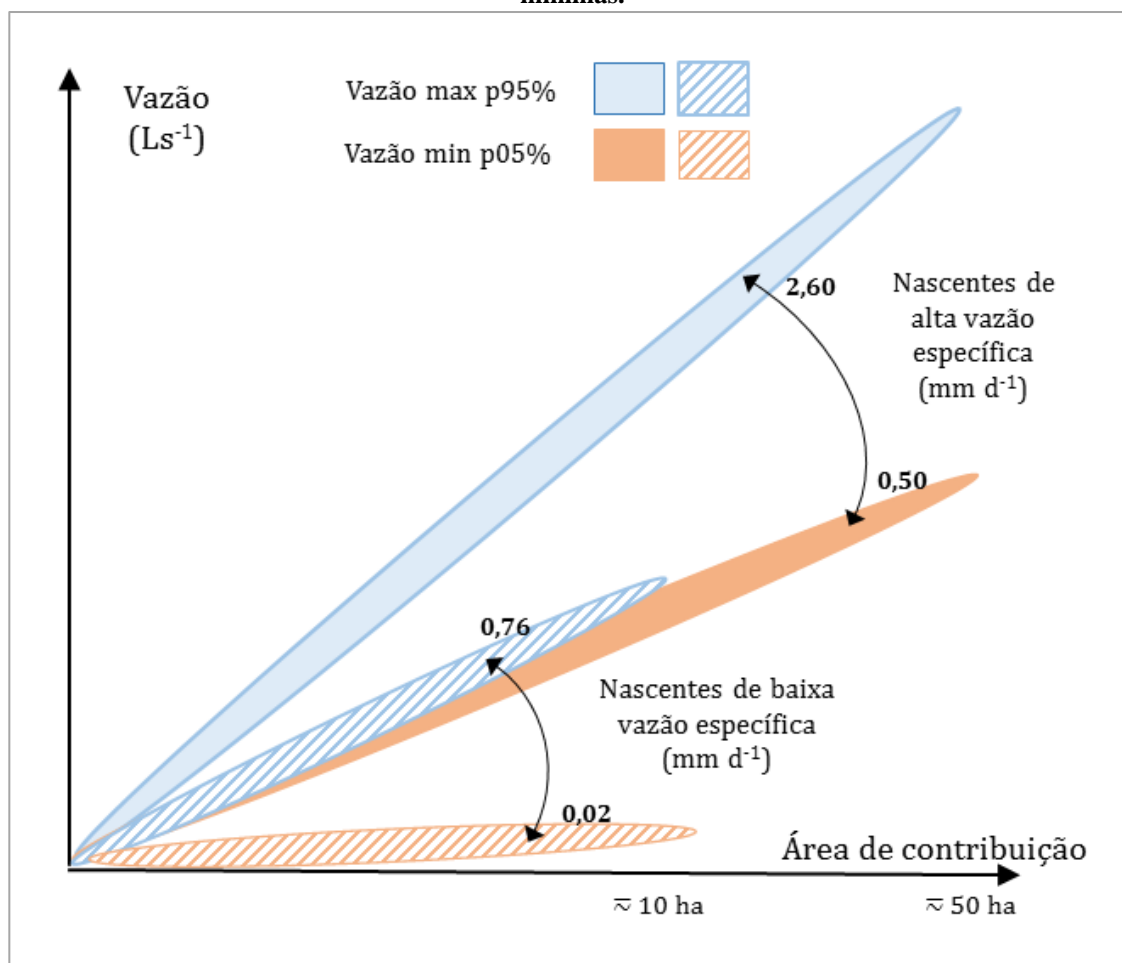
Outra possibilidade de explicação pode ser devido aos erros na estimativa da área de contribuição das nascentes. Por exemplo, supondo-se que a área tenha sido superestimada, no caso das nascentes de baixa produtividade da vazão máxima poderia se estabelecer uma correção por redução nos seus valores, o que deslocaria os pontos de dispersão para o subgrupo de alta produtividade, especialmente porque as ordens de grandeza das áreas são pequenas (como indica a Fig. 3.18, b). Esta correção possivelmente não modificaria o padrão da máxima nas nascentes com área de contribuição maiores.

Adicionalmente, a assertividade da estimativa da área de contribuição é muito incerta para explicar a variabilidade das vazões mínimas das nascentes, uma vez que a água subterrânea não necessariamente está homoganeamente distribuída ao longo da extensão da área superficial. Neste contexto é difícil também se estipular a capacidade do setor dos aquíferos que efetivamente contribuem com cada nascente, mas pode-se supor que a variabilidade espacial da capacidade responda aos diferentes padrões de resposta notados.

Todavia, apesar da possibilidade dos erros de estimativa da área de contribuição e da variabilidade da extensão e capacidade do aquífero a montante dos pontos de surgência de água de cada nascente é interessante e surpreendente que tenham sido detectados dois subgrupos homogêneos para explicar dois regimes de vazão das nascentes, alto e baixo, tanto para as vazões máximas, como para as mínimas. É particularmente útil notar outros dois aspectos: o subgrupo de nascentes de baixa produtividade das máximas é praticamente o mesmo subgrupo de nascentes de baixa produtividade das mínimas, com sete exceções no total (N12, N17, R15, R21 são altas nas vazões máximas e baixas nas mínimas; enquanto as N14, N22 e R1 são baixas nas máximas e altas nas mínimas).

Outro aspecto interessante que deve ser ressaltado é que a vazão específica das nascentes de alta produtividade das mínimas ($0,5 \text{ mm d}^{-1}$) foi muito próxima da vazão específica das nascentes de baixa produtividade das máximas ($0,76 \text{ mm d}^{-1}$). Desta forma propõe-se um diagrama simplificado dos subgrupos funcionais, onde as nascentes de alta e baixa vazão específica funcionam em regime de extremos razoavelmente distintos e excludentes (Fig. 3.20).

Figura 3.20: diagrama indicando subgrupos funcionais. Com nascentes de alta e baixa produção de água. As azuis indicam as vazões máximas (95%) e as cores salmão indicam as vazões específicas mínimas.



Variabilidade temporal de precipitação e vazão

O padrão de variabilidade temporal hidrológica entre os anos 2010 a 2019 mostrou tipicamente a sazonalidade bem definida dos termos do escoamento básico da bacia e da precipitação, com certo atraso do primeiro notado tanto no início da estação chuvosa como no final (Fig. 3.21). Na escala de variabilidade interanual (Fig. 3.22) foram notados alguns episódios extremos, um deles foi o pico do escoamento de grande intensidade em

2011, devido à chuva intensa no dia 21/01/2011, e o outro episódio, mais extenso e devido à seca meteorológica entre 2013/2014, que se manifestou no escoamento entre até 2015, portanto com uma resposta prorrogada além da variação de precipitação na ordem de aproximadamente um ano.

Figura 3.21: Boxplot das médias do escoamento e da chuva na bacia.

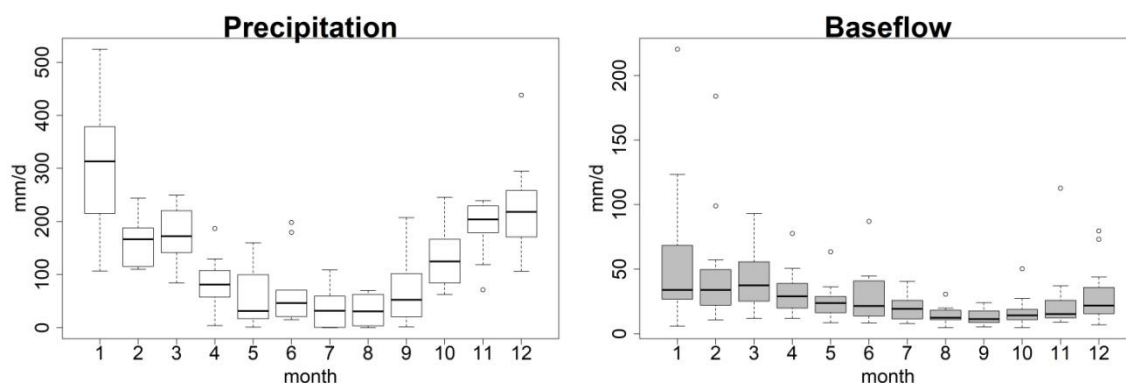
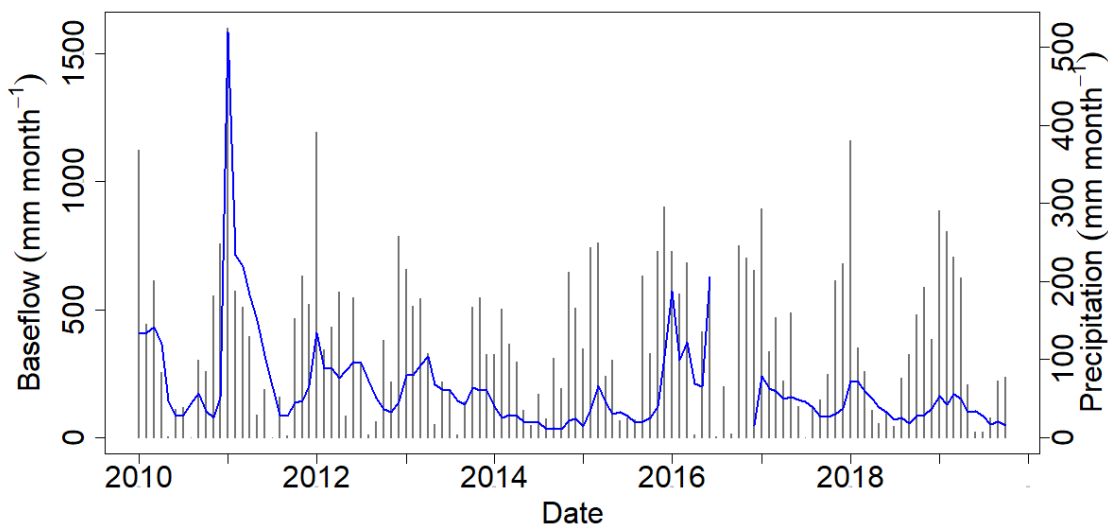


Figura 3.22: Escoamento básico específico (mm mês^{-1}) (linha azul sólida) e precipitação acumulada (mm mês^{-1}) (barra vertical) da bacia do Ribeirão das Posses no intervalo dos anos 2010 a 2019.

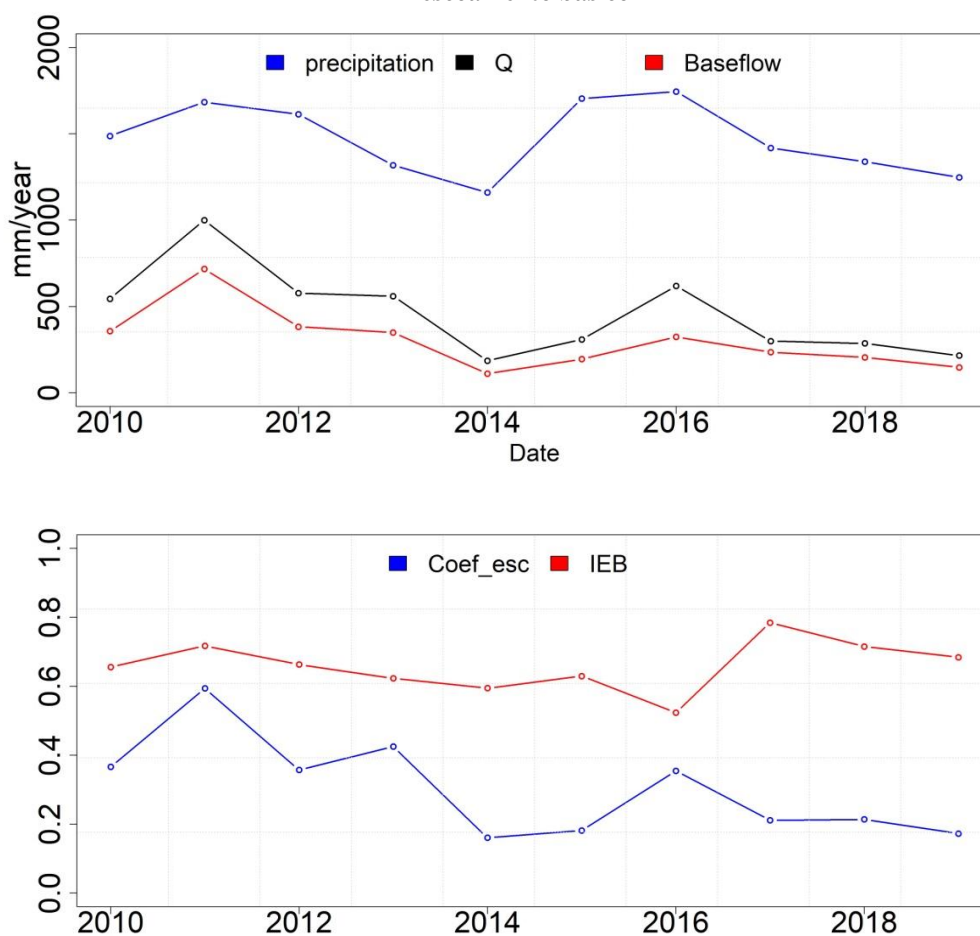


Neste intervalo a chuva anual atingiu dois máximos (Tab. 3.4), o maior em 2011 e um secundário em 2016, com 1680 e 1745 mm ano^{-1} respectivamente, passando neste íterim pelo mínimo de 1160 mm a^{-1} em 2014 durante a seca regional (Fig. 3.22). Tanto a vazão específica quanto o escoamento básico específico anual oscilaram concorrentemente com a chuva inter anualmente naquele intervalo. Ambos acompanharam os máximos e o mínimo de chuva, todavia em 2016 os picos hidrológicos mostraram-se aquém do máximo de 2011, embora a chuva tenha sido até maior (Fig. 3.23a). Este padrão hidrológico na sucessão de picos mostrou que o coeficiente de

escoamento atingiu 69% em 2011 e caiu para 35% em 2016 e, analogamente o índice de escoamento básico atingiu 72% em 2011 e caiu para 52% em 2016 (Fig. 3.23b).

Comparando-se as médias antes e um ano após o final da seca meteorológica, surge o indício de que, após o episódio da seca, a resposta chuva-vazão do sistema da bacia mostrou-se substancialmente diferente, e também assim a eficiência do sistema de água subterrânea como gerador de água superficial. De forma análoga, o coeficiente de escoamento em 2017 e 2018 (igual a 0,21 e 0,22 respectivamente) ainda situou-se em valores muito próximos daqueles notados nos anos da seca hidrológica.

Figura 3.23: (a) Precipitação, vazão e escoamento básico. (b) Coeficiente de escoamento e índice de escoamento básico



Na perspectiva de escala de variabilidade sazonal e sub-sazonal, o escoamento básico específico mostrou um ritmo sazonal concorrente com a precipitação, assim como a média das medidas mensais de vazão nas nascentes (Fig. 3.24 a). Os máximos do escoamento básico e da vazão média mensal das nascentes ocorreram de modo geral

atrasados em relação ao máximo da chuva, como esperado, tanto para as vazões diárias, como as medidas mensais (Fig 3.24, b e c).

Figura 3.24: (a) Vazão específica: Escoamento básico diário na foz da bacia (linha azul); Média específica temporal de todas as nascentes pesquisadas, calculada através do modelo (linha preta); Média da vazão específica diária das nascentes medidas (círculos vermelhos) e precipitação (barras azuis claras). Todos em mm dia^{-1} .

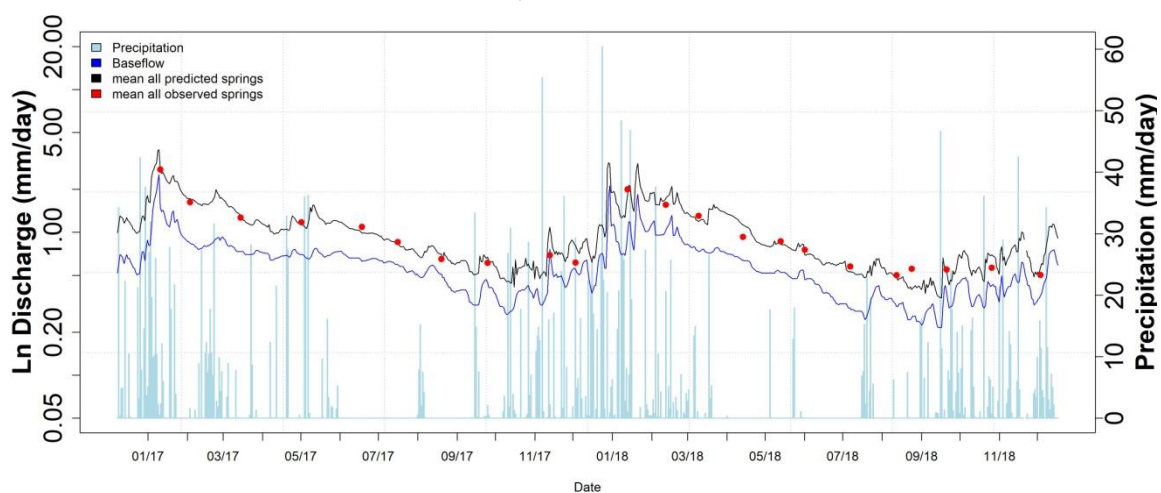


Figura 3.25: regressão entre o escoamento básico da bacia e a média de todas as nascentes (em mm d^{-1}); (b) para a vazões diárias e (c) medidas mensais.

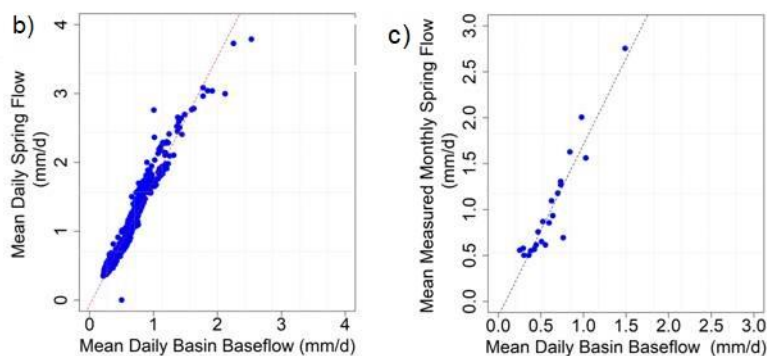


Tabela 3.4: Valores médios anuais de precipitação, vazão total na foz do Ribeirão das Posses, escoamento básico e respectivos coeficientes de escoamento e índice de escoamento básico. A última coluna a soma da vazão média de todas as nascentes nos anos pesquisados.

ano	Precipitação (mm/ano)	Vazão total Posses (mm/ano)	Escoamento básico (mm/ano)	Coef. de escoamento	Índice esc. básico	Soma anual Nascentes (Diário)
2010	1487.3	544.4	356.8	0.37	0.66	NA
2011	1683.4	999.5	716.8	0.59	0.72	NA
2012	1612.5	576.4	382.4	0.36	0.66	NA
2013	1317.7	559.6	348.5	0.42	0.62	NA
2014	1159.8	185.7	110.4	0.16	0.59	NA
2015	1704.1	309.0	194.5	0.18	0.63	NA
2016	1744.6	618.1	323.9	0.35	0.52	NA
2017	1416.9	299.2	234.7	0.21	0.78	371.4
2018	1312.6	286.4	205.0	0.22	0.72	321.4

3.4 SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE NASCENTES

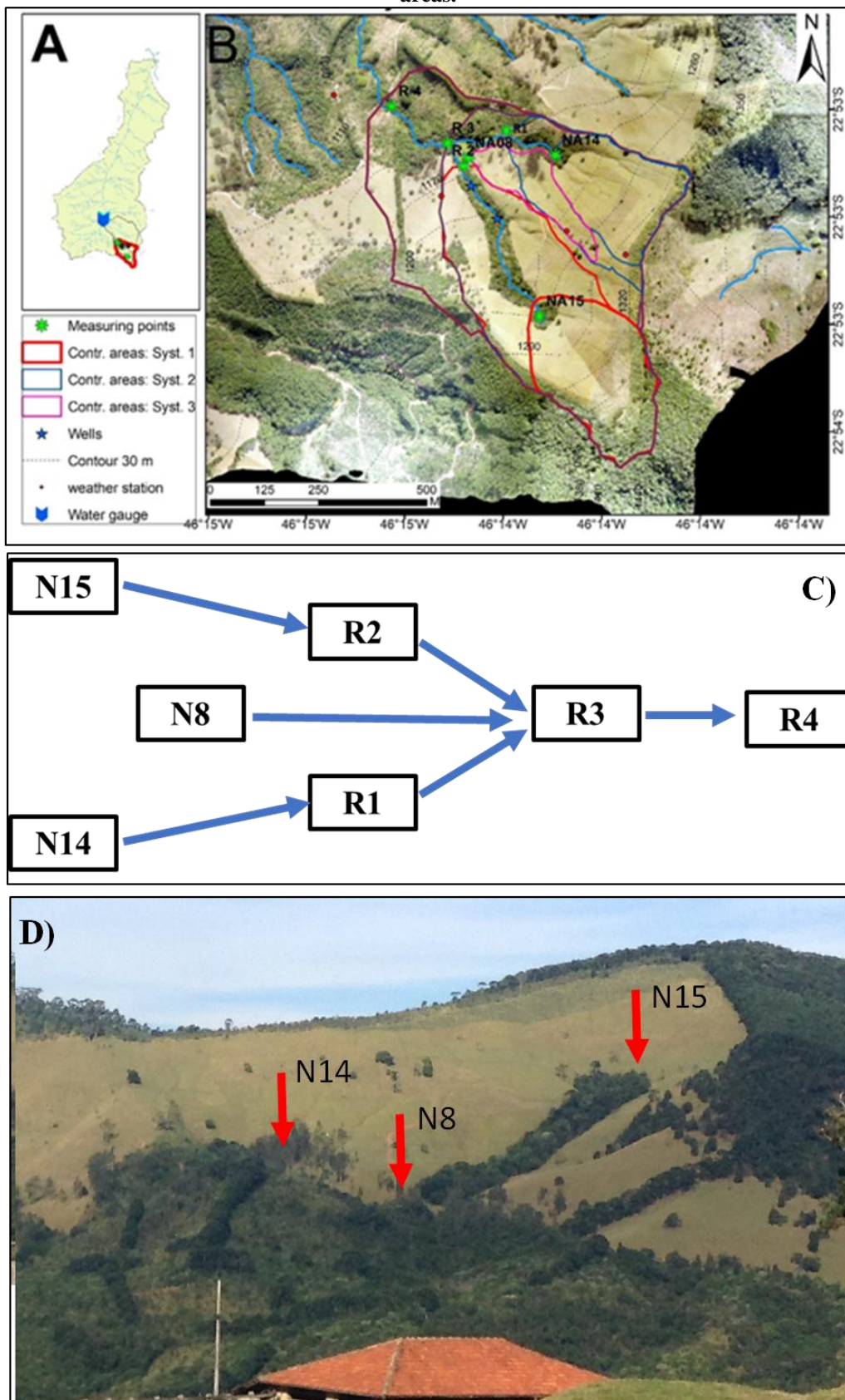
Na bacia do Ribeirão das Posses foram notadas várias sub-bacias com diversas nascentes espalhadas ao longo de sua área de contribuição. Com o conjunto amostral investigado neste trabalho, pergunta-se se é possível, com as medidas obtidas, descrever o padrão de vazão de um sistema de nascentes a partir da descrição simultânea do regime hidrológico das nascentes individualmente. Foram investigados 5 sistemas distintos, entretanto próximos entre si, supondo que as nascentes pertencem a um mesmo sistema hidrológico, de forma que espera-se haver significativa correlação linear amostral. Para isso, comparou-se através do coeficiente de correlação de Pearson, tanto as vazões medidas mensais, como as diárias (descrita no item anterior) das nascentes pertencentes ao mesmo sistema.

Sistema 1

O Sistema 1, localizado na cabeceira à sudeste da bacia (Fig. 3.25a), é composto por um conjunto de 7 pontos que foram monitorados, a saber N8, N14, N15, R1, R2, R3 e R4 (Fig. 3.25b). Nessa área constam três estações meteorológicas automáticas e dois piezômetros (C13, C14 e C15, P1_N15 e P6_N15). A nascente N15 é ordem zero e está na posição mais a montante da bacia, tendo à jusante R2, R3 e R4 sucessivamente (Fig 3.25b). A nascente N14 é ordem zero, tendo à jusante R1, R3 e R4 sucessivamente; e

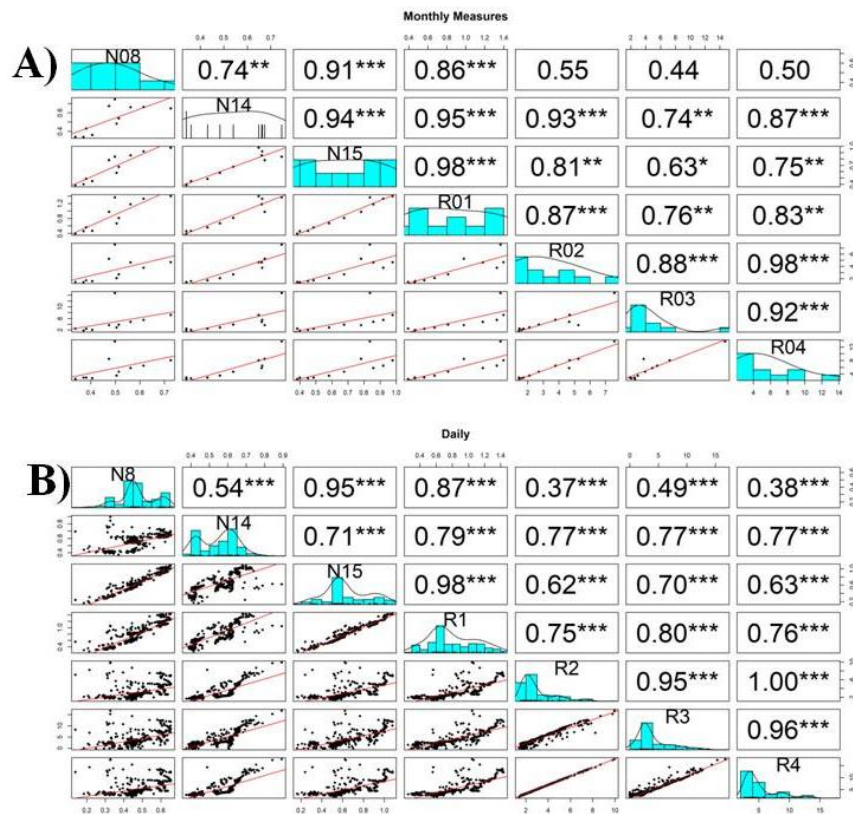
finalmente a nascente R3 recebe contribuição de N8, que tem área de contribuição intermediária à N14 e N15.

Figura 3. 26: Foto aérea com (a) localização do sistema 1 na bacia do Posses; (b) pontos de nascentes N8, N14, N15, R1, R2, R3 e R4 com áreas de contribuição individuais (linha em tons de vermelho) e linha do talvegue (em azul); (c) conexão hidrológica superficial dos pontos; (d) foto panorâmica das áreas.



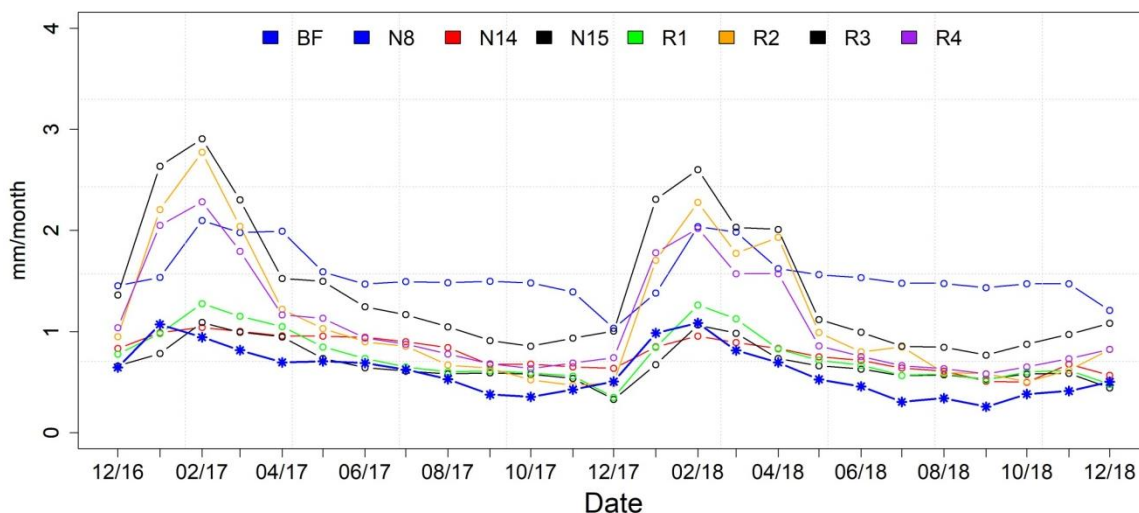
De maneira geral, o padrão da dispersão da vazão mensal medida entre as nascentes do sistema 1 é razoavelmente linear tanto na base medida mensal como para as diárias (Fig. 3.26 a e b), com correlações positivas significativas (sendo que apenas N8 apresentou uma correlação não significativa com R02, R03 e R04, para as medidas mensais).

Figura 3.27: Correlação entre os pontos monitorados do sistema 1. (a) medidas mensais. (b) diárias.



Notou-se, todavia pelo menos duas discrepâncias neste padrão linear, de caráter aparentemente episódico: as nascentes R2, R3 e R4 tiveram suas medidas máximas na série temporal (de 3,86, 4,3 e 3,1 mm d⁻¹, respectivamente para medidas mensais) aparentemente coerente entre elas (conforme Fig. 3.26, veja dispersões entre estas nascentes), mas em confronto com demais nascentes mostraram-se todas como pontos afastados na dispersão (veja Fig. 3.26 dispersões daquelas 3 nascentes com as demais). Em segundo lugar e de forma semelhante, a medida máxima da nascente N14 (de 1,16 mm/d) aparece como ponto afastado na dispersão com todas nascentes. Exceto por aqueles eventos isolados, conclui-se que: R1, R2, R3 e R4 aparecem bem correlacionados entre si e com N4 e N15, mas tem correlação linear apenas modesta com N8, o que é razoável por situarem-se em subsistemas distintos.

Figura 3. 28: vazão específica média mensal das nascentes que fazem parte do sistema 1 e escoamento básico.



Na figura 3.27 percebe-se que a vazão específica das nascentes é superior ao escoamento básico específico na foz da bacia. A tabela 3.5 apresenta a média anual da vazão e vazão específica dos pontos do sistema 1. A correlação entre as nascentes do sistema 1 pode ser visualizada também na série temporal da média mensal da vazão específica, onde notam-se diferentes amplitudes anuais conforme a nascente e uma comum variabilidade sazonal, que se confirmam nos dois anos de medições (Fig. 3.27).

A vazão média das nascentes mostrou-se, sem exceção, crescente conforme a direção a jusante (2ª linha na Tab. 3.5), o que indica a existência de conectividade hidrológica no sistema, conforme esperado. Entretanto, para a vazão específica (4ª linha na Tab. 3.5) há uma variação no fator de 2, de aproximadamente 0,7 até 1,5 mm/d entre as nascentes, o que sugere erro na prescrição da área de contribuição, ou a influência de outros controles particularmente característicos de uma ou outra nascente, de natureza geológica, pedológica ou da superfície. É interessante notar que 3 pontos (R2, R3, R4) mostraram vazão específica média superiores ao escoamento básico médio da bacia, enquanto as 4 demais foram bastante próximas, conforme a Fig. 3.27.

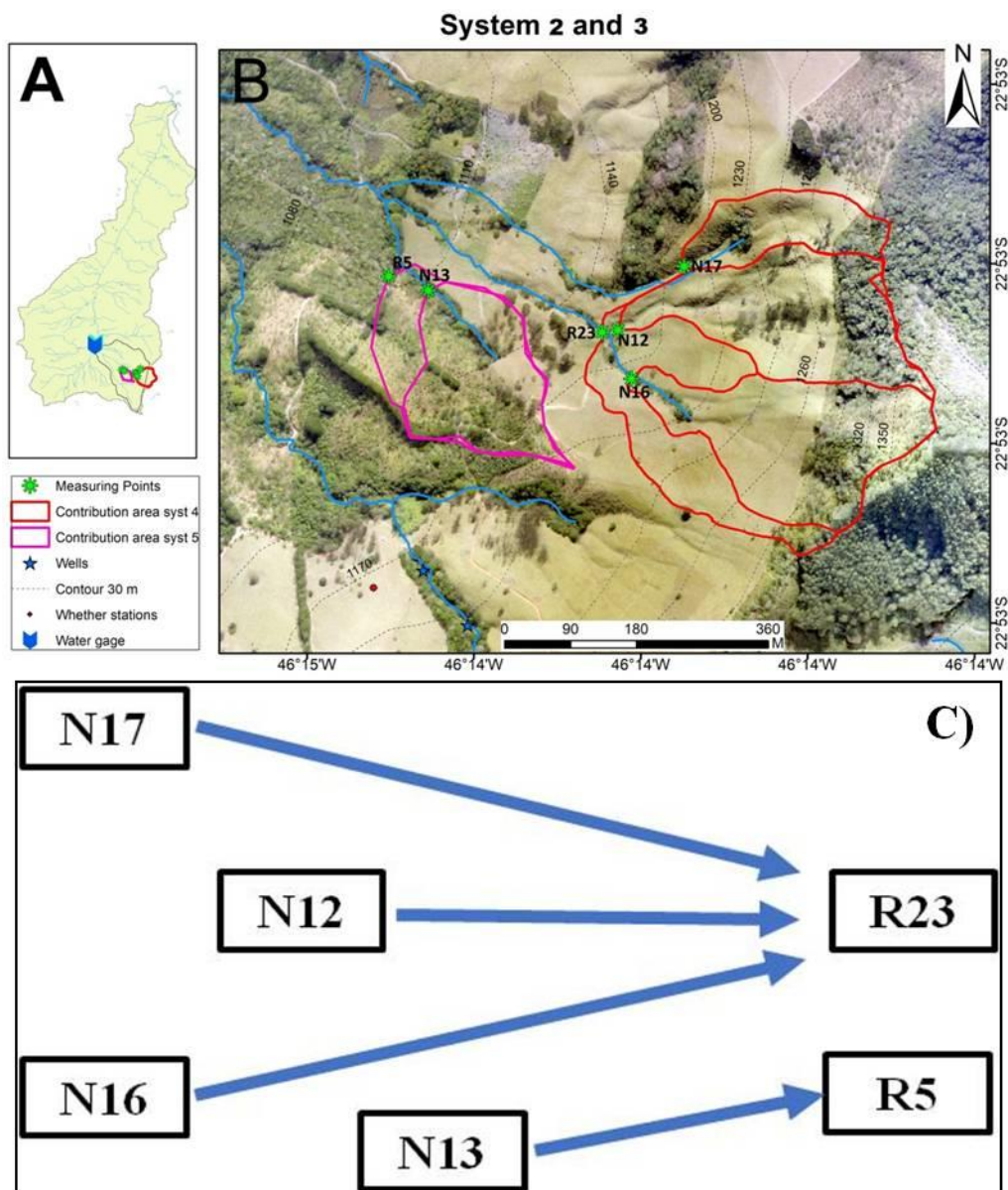
Tabela 3. 5: Media das vazões mensais e diárias das nascentes que compõe o sistema 1, anos referência 2017 e 2018.

SISTEMA 1							
Medidas	N8	N14	N15	R1	R2	R3	R4
área (ha)	2.6	5.6	8.0	8.8	16.9	29.4	38.2
Q mensal medida (L/s)	0.5	0.5	0.7	0.9	3.4	4.7	5.6
Q diária (L/s)	0.5	0.5	0.6	0.8	3.1	4.0	5.3
Q mensal medida esp.	1.6	0.8	0.7	0.9	1.7	1.4	1.3
Q diária (mm/d)	1.6	0.9	0.7	0.8	1.6	1.2	1.2

Sistemas 2 e 3

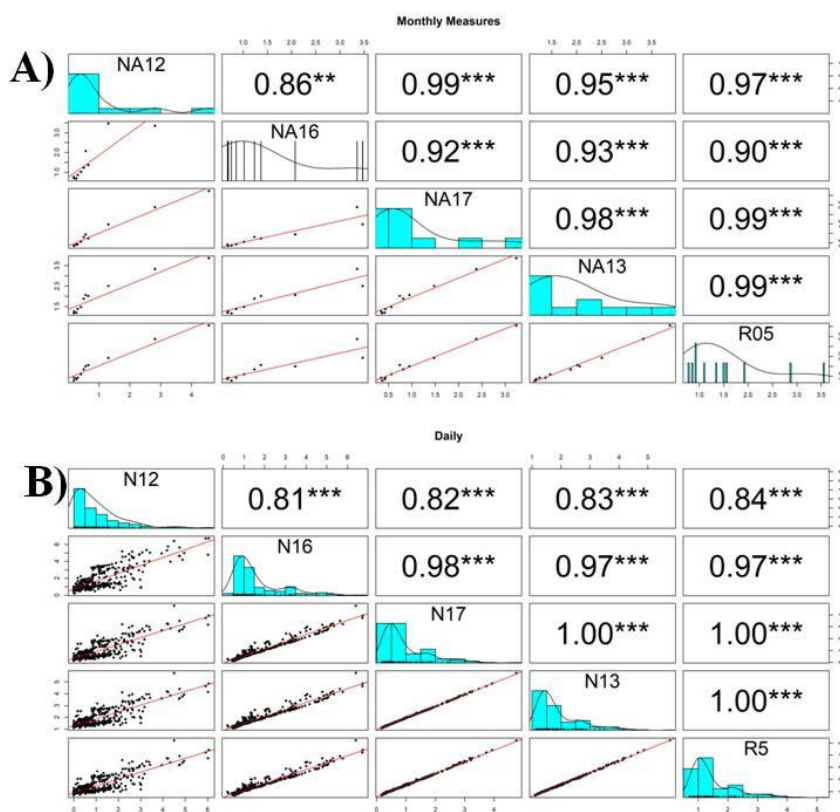
Os Sistemas 2 e 3 estão localizados imediatamente ao norte do Sistema 1 (Figura 3.28 a), onde as nascentes N13 e R05 formam o sistema 2; enquanto N12 N16 e N17 (ordem zero), se juntam no ponto onde se localiza R23, denominado de sistema 3 (Fig. 3.28, em vermelho). Para o sistema 2 (N13/R5) nota-se que tanto a vazão média e média específica são semelhantes. Já para o sistema 3, N16 é o ponto que apresenta a maior produção de água por área (Tab. 3.6 e Fig. 3.31).

Figura 3.29: (a) Localização dos sistemas 2 e 3 na bacia; (b) Foto aérea com aproximação dos sistemas e respectivos delineamentos das áreas de contribuição de cada ponto; (c) conexão hidrológica superficial dos pontos



Nos sistemas 2 e 3 a correlação linear entre as nascentes foram de geral muito altas (Fig 3.29). Esta relação manifesta-se também na série temporal da média mensal da vazão específica (Fig. 3.29, a e b), com amplitudes anuais características de cada nascente notada nos dois anos de medições, e uma comum variabilidade sazonal, exceto na nascente R23 que mostrou-se aparentemente defasada na ordem de 6 meses das demais nascentes, o que ainda não se pode avaliar o porquê, entretanto como o ponto R23 entrou no final das medidas mensais, não foi possível abranger esse ponto para cálculo das medidas diárias, de forma que esse ponto foi excluído das análises de correlação.

Figura 3. 30: Correlação entre os pontos monitorados dos sistemas 2 e 3. (a) medidas mensais. (b) diárias.



A figura 3.29 indica a alta correlação entre as nascentes N12, N16, N17. Excluindo o ponto R23 (em roxo, no gráfico da Fig. 3.31), percebe-se que todos os pontos estão altamente correlacionados, o que corrobora com a hipótese de fazerem parte de um mesmo sistema hidrológico, sugerindo um regime similar entre a vazão das mesmas. Além disso, o ponto R5, e o respectivo ponto a montante, o N13 (sistema 2) também estão altamente correlacionados entre si.

Figura 3. 31: vazão específica média mensal das nascentes que fazem parte do sistema 2 e escoamento básico.

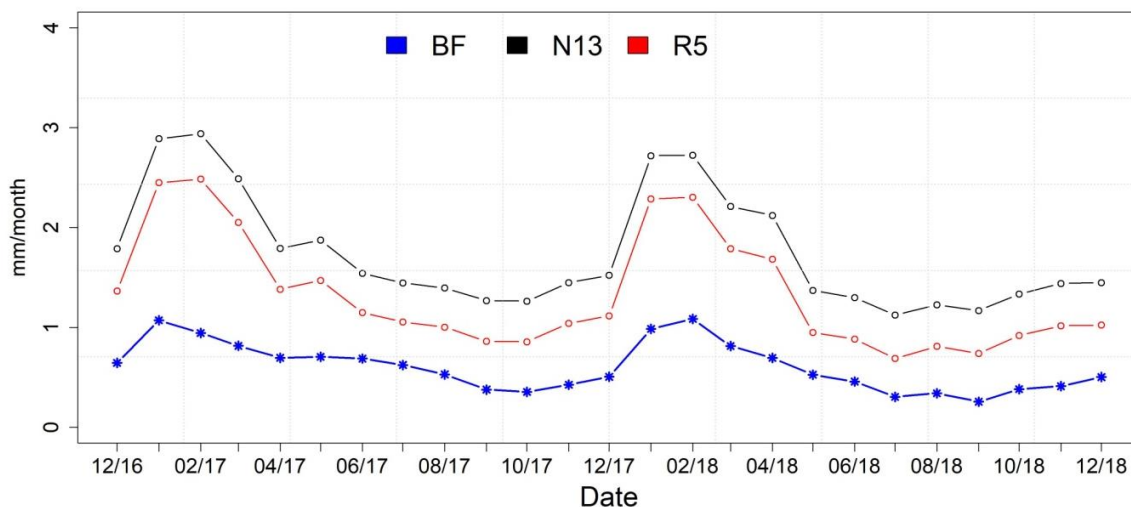


Figura 3. 32: vazão específica média mensal das nascentes que participam do sistema 3 e escoamento básico.

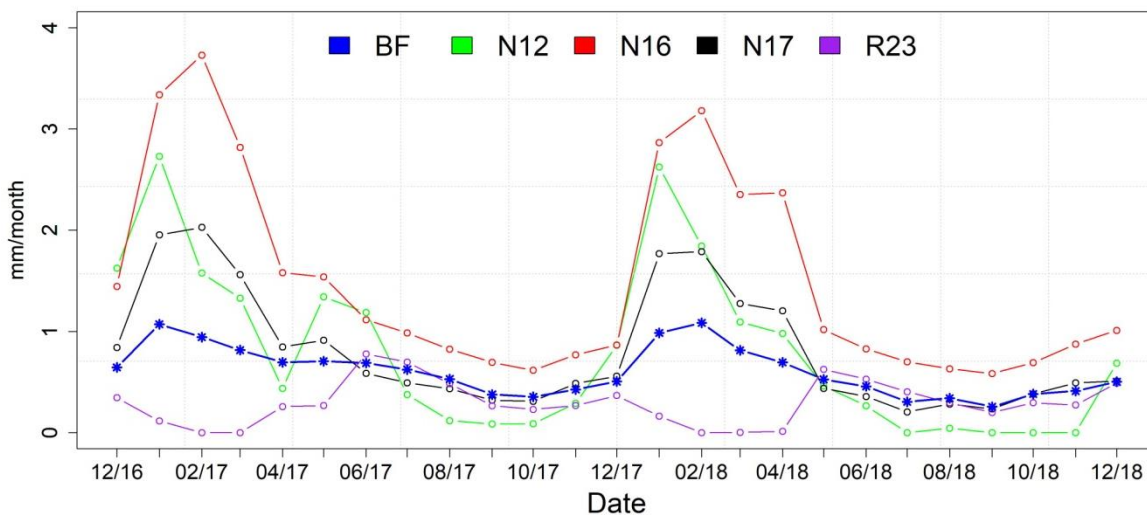


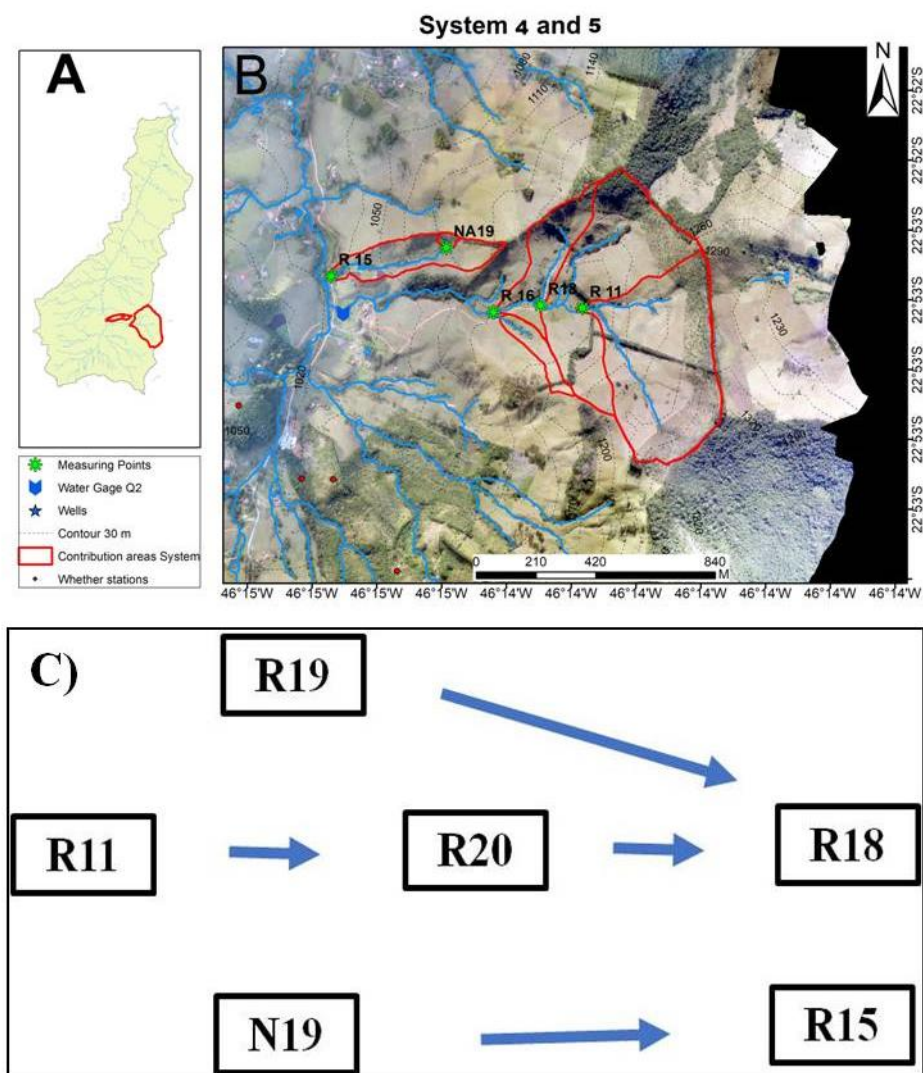
Tabela 3.6: Média das vazões mensais e diárias das nascentes que compõe o sistema 2 e 3, anos referência 2017 e 2018.

	mm/d		L/s	
	2017	2018	2017	2018
N12	0.87	0.66	0.48	0.37
N16	1.56	1.41	0.95	0.86
N17	0.87	0.74	0.21	0.18
R23	0.31	0.28	0.49	0.44
N13	1.82	1.68	0.75	0.69
R5	1.40	1.25	0.74	0.66

Sistema 4 e 5

Os Sistemas 4 e 5 estão localizados imediatamente ao norte do Sistema 2 e 3 (Figura 3.32 a), o sistema 4 composto por um conjunto de 3 nascentes R11 à montante, com R20 e R18 a jusante sucessivamente, e o sistema 5 por 2 nascentes N19 à montante e R15 (Fig. 3.32 b). Os pontos N19 e R19 e são de ordem zero. Os sistemas 4 e 5, são compostos pelos pontos N19/R15 e R11/R19/R20/R18 (Fig. 3.32 c)

Figura 3. 33: (a) Localização dos sistemas 4 e 5 na bacia. (b) Foto aérea com aproximação dos sistemas e respectivos delineamentos das áreas de contribuição de cada ponto.



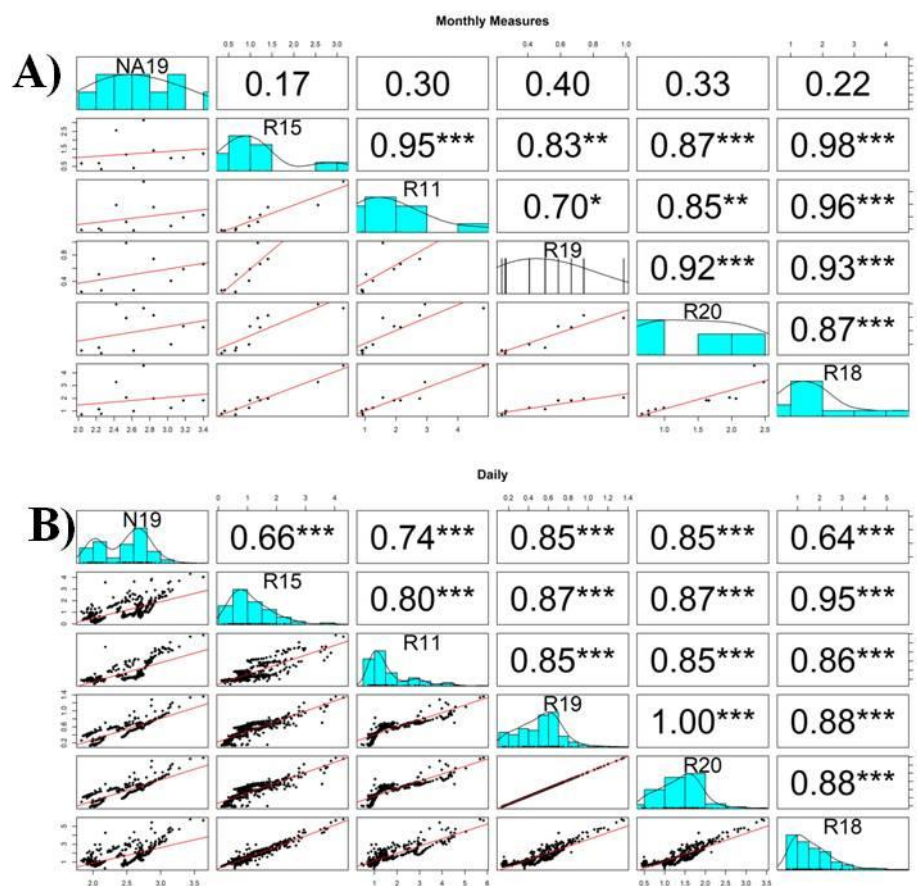
A nascente N19, apesar de baixa vazão ($0,09 \text{ L s}^{-1}$), apresenta uma elevada vazão específica, uma vez que sua área de contribuição é pequena (3,6 ha). Por outro lado, o ponto monitorado R18, apesar de apresentar a maior média de vazão (mais do que 9 L s^{-1})

1) não apresenta vazão específica alta, uma vez que sua área de contribuição é de 49,5 ha (Tab. 3.7).

Tabela 3.7: Média das vazões mensais e diárias das nascentes que compõem os sistemas 4 e 5, anos referência 2017 e 2018.

Medidas	SISTEMA 3					
	N19	R15	R11	R19	R20	R18
área (ha)	0.31	5.87	23.46	2.05	42.95	49.58
Q mensal medida (L/s)	0.10	0.84	5.24	0.12	7.32	10.68
Q diária (L/s)	0.09	0.78	4.51	0.12	6.93	9.67
Q mensal medida esp.	2.66	1.23	1.93	0.52	1.47	1.86
Q diária (mm/d)	1.89	1.15	1.66	0.52	1.39	1.68

Figura 3.34: correlação de Pearson calculada entre a vazão modelada das nascentes que compõem os sistemas 4 e 5.



Os sistemas 4 e 5 mostraram-se altamente correlacionados entre si (Fig. 3.33). As figuras 3.34 e 3.35 mostram a média mensal das nascentes que estão inseridas no sistema 4 e no sistema 5, respectivamente. Em tal perspectiva torna-se mais clara a percepção de que o escoamento básico específico na foz é mais baixo do que a vazão específica da maioria das nascentes. No sistema 4, a nascente N19 esteve sempre acima do escoamento básico, enquanto o ponto R15 mostrou-se acima do escoamento básico na maior parte do

tempo, aumentando essa diferença principalmente nos meses de verão, período em que a precipitação torna-se mais intensa (Fig. 3.34). Para o sistema 5 avaliando as médias mensais, o único ponto monitorado que apresentou-se abaixo do escoamento básico específico foi o R19. Os outros pontos apresentaram médias mensais superiores, principalmente nos meses chuvosos (Fig. 3.35).

Figura 3. 35: média mensal da vazão modelada para as nascentes que compõem o sistema 4.

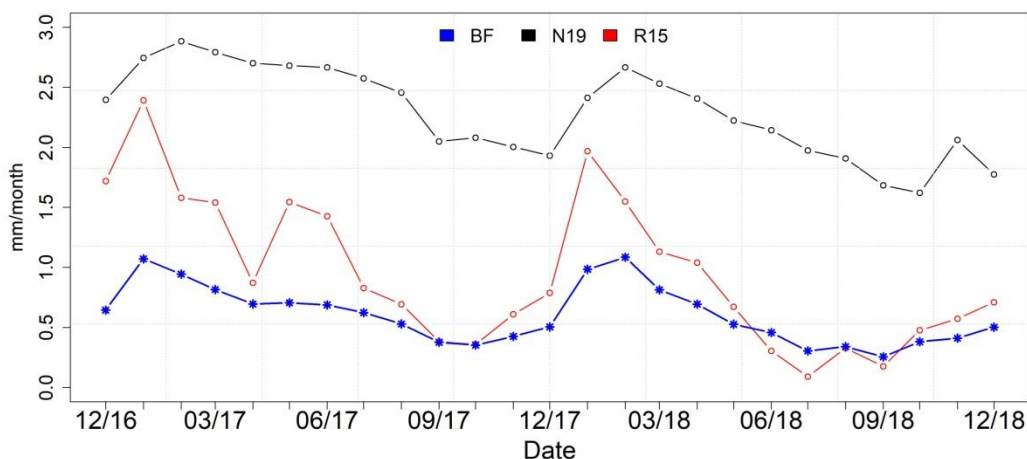
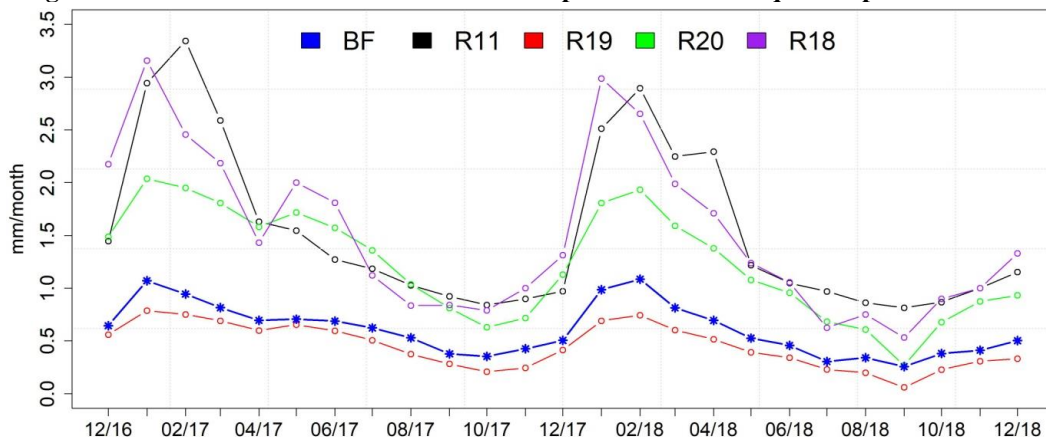


Figura 3. 36: média da vazão mensal modelada para as nascentes que compõem o sistema 5.



3.5 MEDIDAS DIARIAS

Foram selecionados 5 pontos (N8, N14, N16, N21, R3) para proceder medidas diárias em campo. Os pontos selecionados para medidas diárias encontram-se na Figura 3.36. Optou-se por proceder as medidas diárias no período de estiagem (entre os dias 11 de junho de 2019 ao dia 30 de outubro de 2019), para melhor entendimento da curva de recessão das mesmas. A série histórica da vazão das nascentes medidas diariamente está apresenta-se na figura 17. Entretanto, como a vazão do ponto R3 é da ordem de 4 a 6

vezes mais do que os outros pontos, optou-se em apresentar os dados em novo gráfico, excluindo o ponto R3, para facilitar a visualização (Fig. 18).

Figura 3.37: (a) Localização dos pontos médios diariamente na bacia do Ribeirão das Posses. (b) Foto aérea aproximando os pontos e respectivos delineamentos das áreas de contribuição de cada ponto.

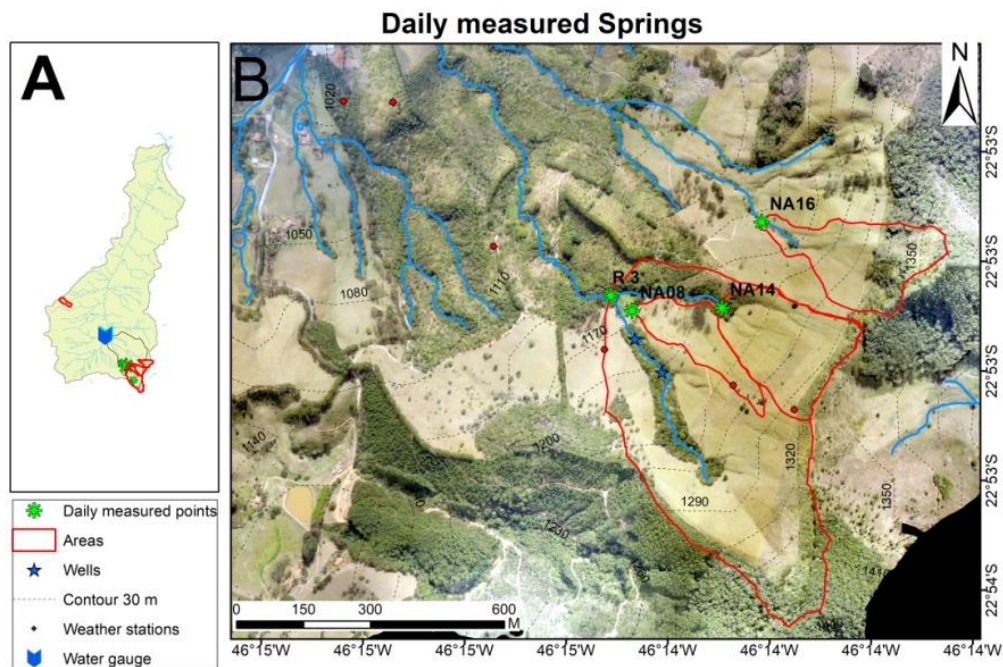
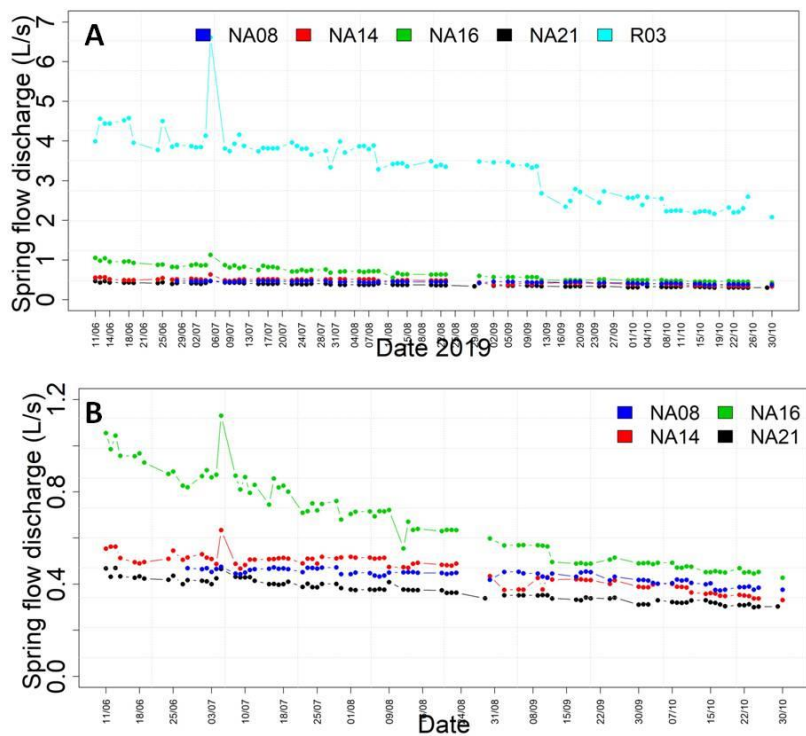
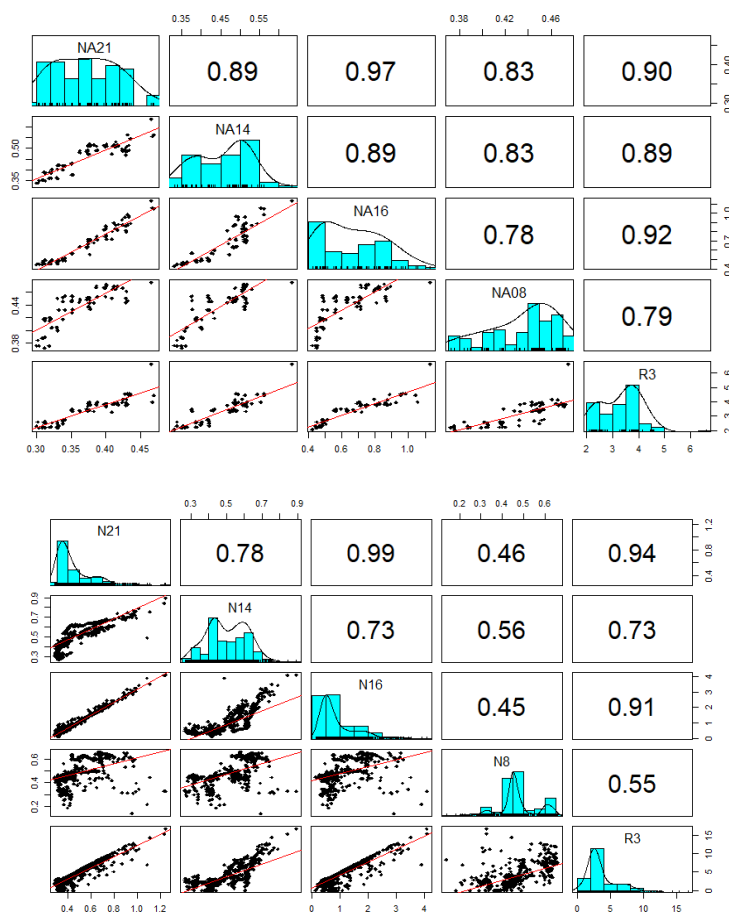


Figura 3.38: Série histórica da vazão das nascentes medidas diariamente (de 11 de junho a 30 de outubro de 2019), (a) com vazão máxima de 7 L/s; (b) com vazão máxima de 1,2 L/s.



As vazões medidas diariamente foram correlacionadas e o resultado apresenta-se na Figura 3.38 (a), onde se pode perceber que alguns pontos (N21/R3, N21/N16, N16/R3) estão altamente correlacionados. Para averiguar se os modelos calculados no item anterior estavam representando bem os dados medidos, foi feita a correlação dos dados modelados, considerando os mesmos. A correlação mostrou-se eficiente, apresentando alta correlação entre os mesmos pontos (Fig. 3.38 b).

Figura 3.39: correlação de Pearson entre a vazão de 5 pontos monitorados. (a) dos dados medidos diariamente (de 11 de junho a 30 de outubro de 2019); (b) dados modelados diários (anos de 2017 e 2018).



3.6 PADRÃO DE RECESSÃO HIDROLÓGICA

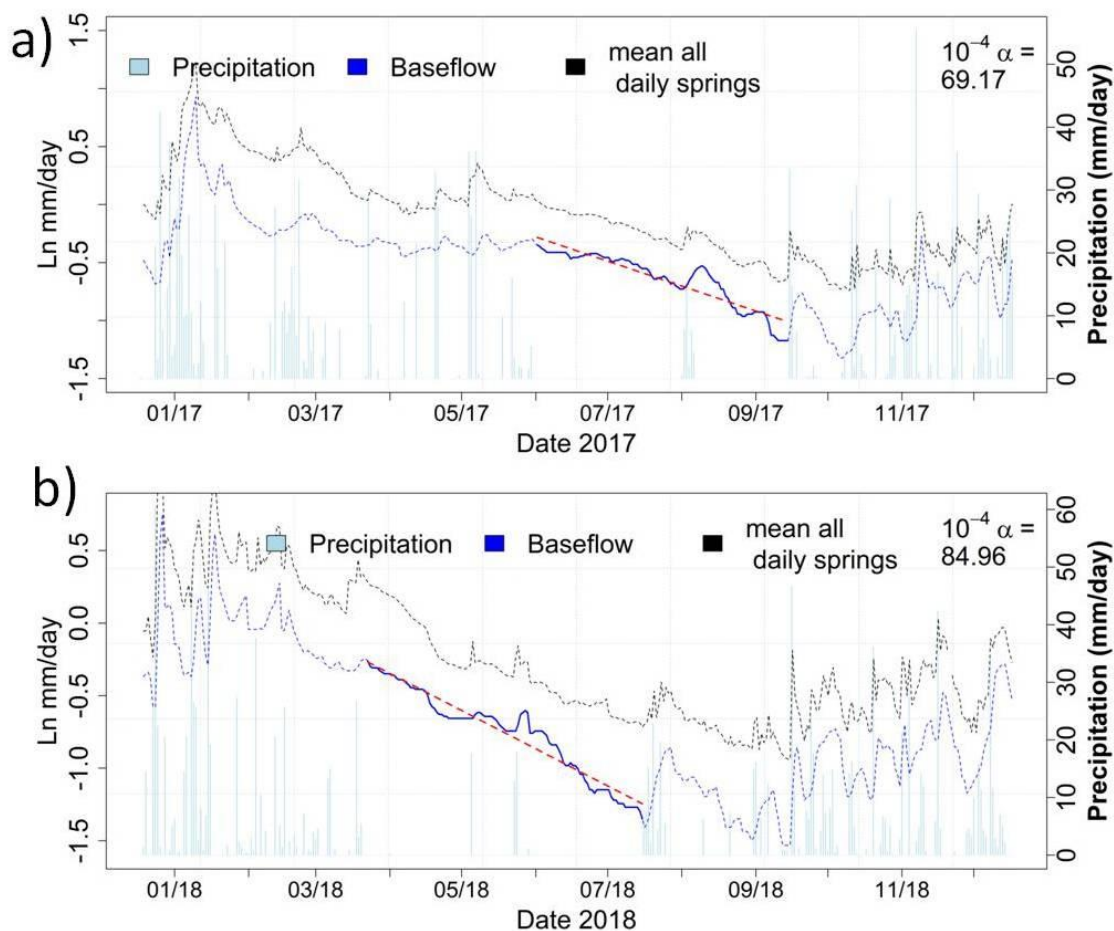
Para o cálculo do coeficiente de recessão, estritamente deve-se considerar episódios sem chuva, pois a ocorrência de recarga quebra a continuidade do processo de depleção do aquífero, trazendo-o para outro estado de uma transiente. Todavia, por simplicidade e para prover-se alguma viabilidade de estimativa de um padrão de recessão hidrológica que pudesse ser discutido em comum com todas as nascentes, foram feitas estimativas durante

a estação seca de 2017 e 2018, escolhendo-se intervalos os mais apropriados possíveis, mesmo com oscilações do escoamento provocadas por episódios isolados de chuva (KRESIC & STEVANOVIC, 2010). Os hidrogramas do escoamento básico nestes anos (Fig. 3.39 a,b) mostraram padrões de recessão geralmente estendendo-se do mês janeiro/fevereiro até meados de setembro/outubro, o que variou conforme o ano devido à variabilidade da chuva. Não se dispôs assim de amostras de recessão categoricamente sem chuva, ou seja, sempre houve alguns episódios chuvosos, com resposta notável no escoamento básico, o que indicou ter havido neste ínterim a ocorrência de processos de recarga e descarga da água subterrânea simultaneamente em alguns dias isolados.

Em 2017 considerou-se que a recessão estabelecida entre 15 de junho a 28 de setembro, intervalo que teve precipitação acumulada de 37 mm, concentrada em um único episódio de chuva (Fig. 3.39 a). Nota-se que entre aproximadamente fevereiro e início de junho o escoamento básico foi aproximadamente constante, com intercorrência de vários episódios chuvosos, a partir de então tendo mostrado uma queda pronunciada até o final de setembro. Em 2018 a recessão considerada foi estabelecida mais cedo do que em 2017, e estabelecida de 5 de abril a 29 de julho, com precipitação acumulada de 50 mm distribuída em 2 episódios de chuva (Fig. 3.39 b). O coeficiente de recessão calculado do escoamento básico da bacia ($\alpha \cdot 10^4$, em dia^{-1}) foi de 69 e 85 respectivamente em 2017 e 2018.

Nesta análise supõe-se de forma geral que quanto maior o coeficiente de recessão α , menor é o amortecimento da curva temporal de recessão, maior é a taxa temporal de depleção do aquífero e assim susceptível de uma perda mais rápida da capacidade de descarga. Ou seja, quanto menor o coeficiente, maior o amortecimento ao longo do tempo, caracterizando o aquífero a sustentar capacidade de produzir água superficial no decorrer da estiagem, ou que, por outro lado, também pode resultar artificialmente da ocorrência de episódios de chuva que tendem a amortecer a depleção.

Figura 3.40: Escoamento básico (linha tracejada azul), precipitação diária (barra vertical) e a média de todas as nascentes modeladas, em (a) em 2017 e (b) em 2018. A regressão do escoamento básico no intervalo de recessão (linha vermelha), a linha azul contínua mostra o intervalo de recessão considerado.

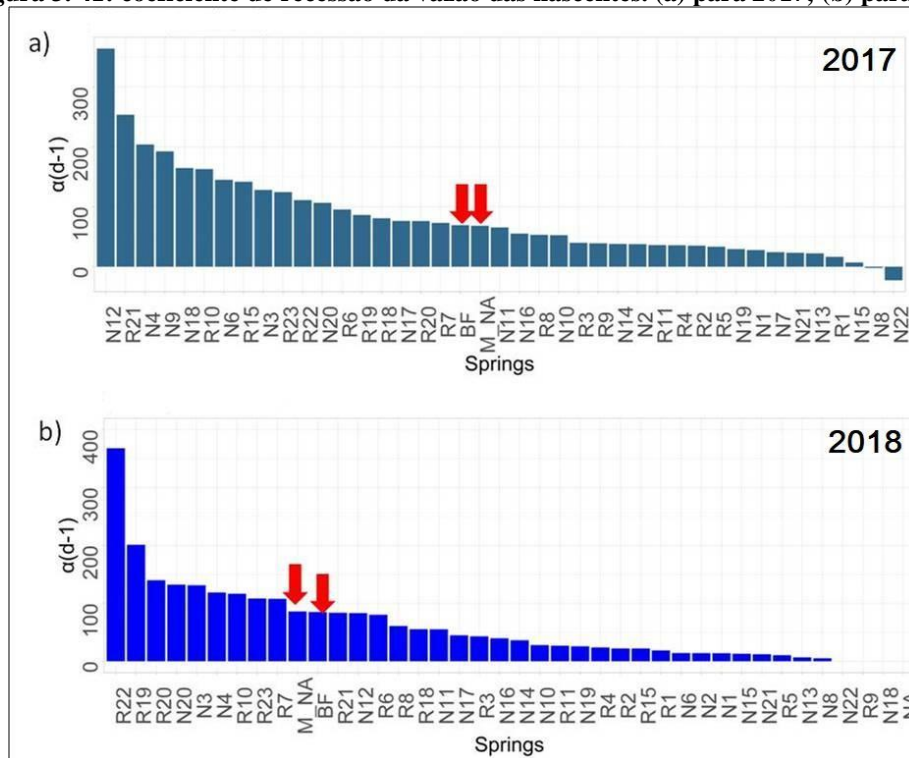


Para comparar os valores, a julgar-se estritamente por haver um episódio de chuva (37 mm) em 2017, contra dois episódios (total de 50 mm) em 2018, não se consegue explicar a diferença dos coeficientes calculados, apesar de que a diferença de chuva entre os casos foi modesta e de apenas 13 mm. Para uma análise mais adequada, seria relevante estimar o quanto cada episódio de chuva efetivamente promoveu de infiltração e sua contribuição de recarga ao aquífero, relativamente às perdas por escoamento direto que eventualmente ocorressem.

A estimativa do coeficiente de recessão da vazão das nascentes foi feita individualmente com a série diária, conforme visualizado nos hidrogramas do Apêndice 2, e seus valores mostrados na Fig. 3.40 (a e b, para os anos de 2018 e 2019, respectivamente). O coeficiente de recessão da vazão média de todas nascentes ($\alpha \cdot 10^4$, em dia^{-1}) em 2017 e 2018 foi respectivamente de 58 e 79 dia^{-1} que mostraram-se ambos apenas um pouco abaixo do coeficiente de recessão do escoamento básico, mas inter anualmente

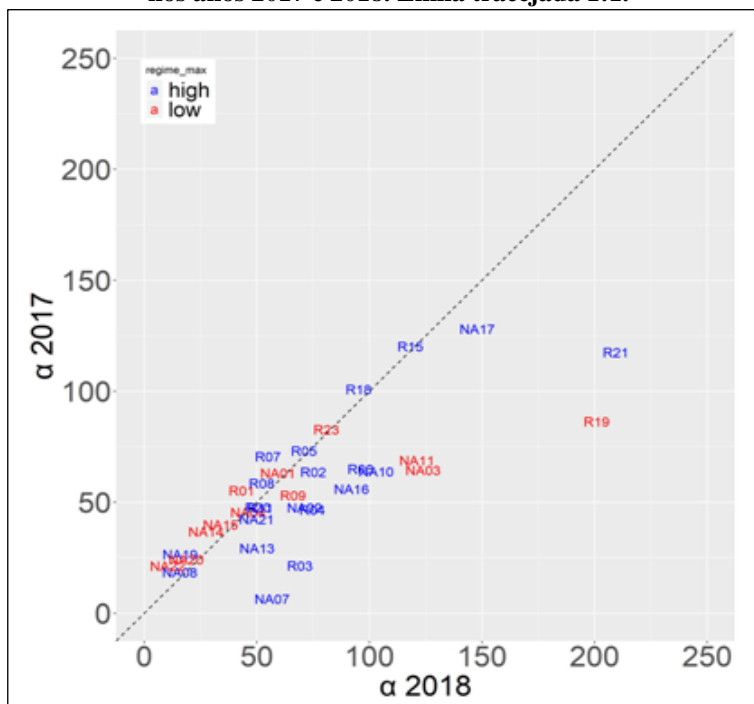
foram proporcionais à variação daqueles. A distribuição de frequência dos coeficientes das nascentes para cada ano foi razoavelmente semelhante (Fig. 3.40). De forma geral os valores ($\alpha \cdot 10^4$, em dia^{-1}) superiores foram acima de 150, os intermediários e também mais frequentes foram entre 50 a 150, e os menores abaixo de 50.

Figura 3. 41: coeficiente de recessão da vazão das nascentes. (a) para 2017; (b) para 2018.



Entre os dois anos, a hierarquia das nascentes não seguiu exatamente a mesma ordem, conforme indicam as sequências crescentes (Fig. 3.40), comparando-se os dois anos. A dispersão por nascente entre os anos mostra valores individuais predominantemente superiores em 2018 (Fig. 3.41), onde não fica bem definida se nascentes de alta ou baixa produção de água tem maior influência no padrão comparativo.

Figura 3.42: Relação do coeficiente de recessão ($\alpha \cdot 10^4$, em dia^{-1}) das nascentes individuais calculado nos anos 2017 e 2018. Linha tracejada 1:1.



O coeficiente de recessão hidrológica das nascentes não mostrou correlação aparente com as vazões máximas (p95%) (Fig. 3.42). Todavia notou-se uma relação muito evidente com as vazões mínimas (p05%) (Fig. 3.43) com uma relação de redução do coeficiente: este padrão é de certa forma esperado conceitualmente, uma vez que características de maior amortecimento da série temporal de depleção da vazão (ou seja, menor α) podem levar à condição de aumento da vazão mínima no final da estiagem, o que foi aparentemente corroborado com os padrões obtidos. Esta relação não é bem definida quando se enfoca apenas as nascentes de baixa produtividade, entretanto está melhor caracterizada nas vazões de alta produtividade (pontos em vermelho e azul na Fig.3.43, respectivamente), e que mostram no todo das nascentes uma definição de proporção bem estabelecida.

Figura 3.43: Relação do coeficiente de recessão ($\alpha \cdot 10^4$, em dia^{-1}) das nascentes individuais com as vazões máximas das nascentes (p95%) nos anos (a) 2017 e (b) 2018. Caracteres em azul (vermelho) são nascentes dos subgrupos de alta (pequena) vazão específica.

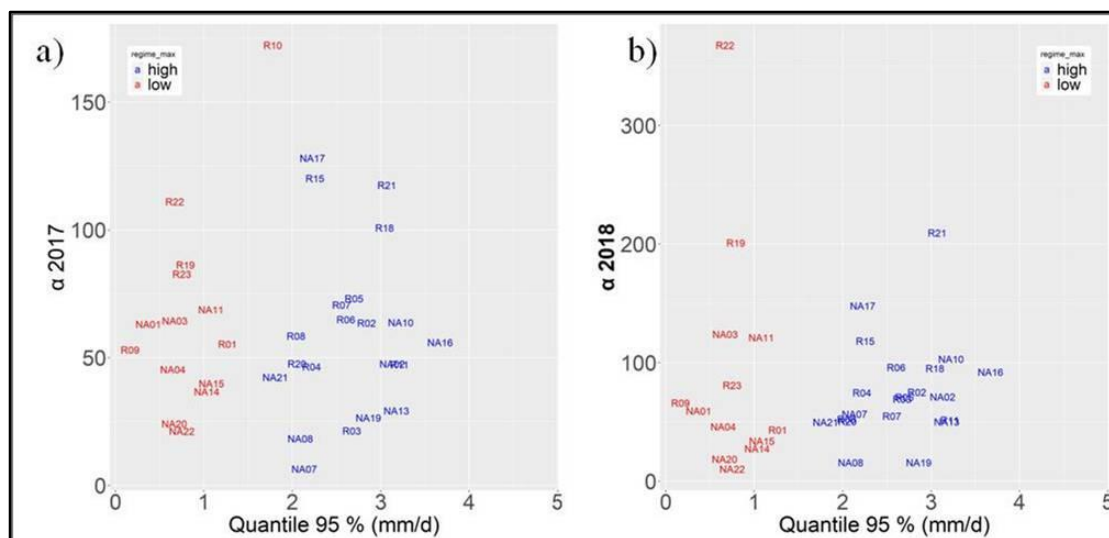
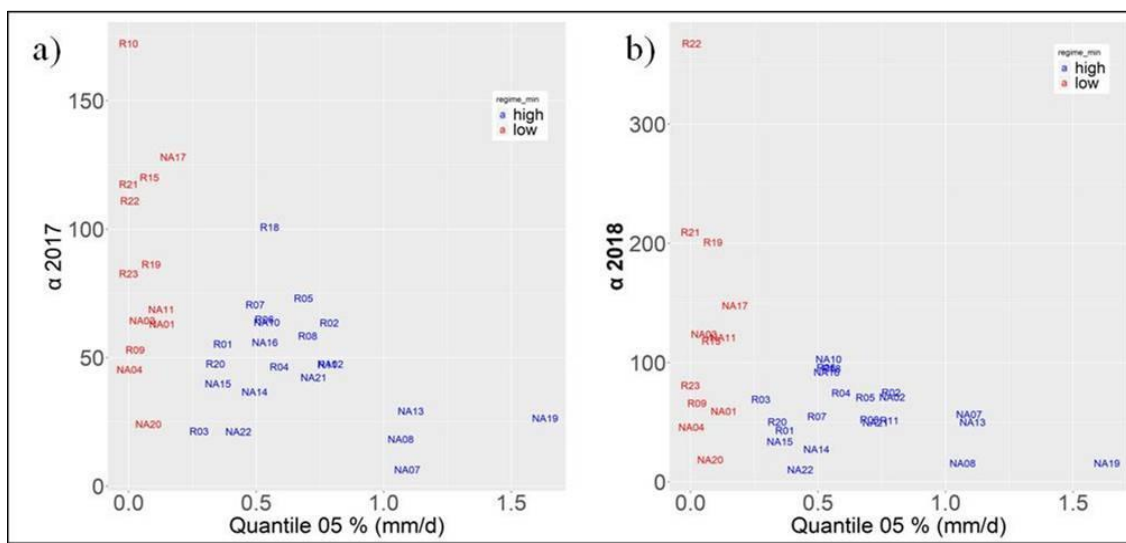


Figura 3.44: Relação do coeficiente de recessão ($\alpha \cdot 10^4$, em dia^{-1}) das nascentes individuais com as vazões mínimas das nascentes (p05%) nos anos (a) 2017 e (b) 2018. Caracteres em azul (vermelho) são nascentes dos subgrupos de alta (pequena) vazão específica.



CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO E CONTROLE NA VAZÃO DAS NASCENTES

A vazão das nascentes depende do que ocorre na sua área de contribuição à montante desde a superfície até em profundidade no solo e no aquífero. Para entender e quantificar o efeito de alguns processos fundamentais como a recarga do aquífero, as perdas de vapor d'água para a atmosfera, as escalas de tempo de resposta do sistema durante os regimes de descarga, entre outros, considerou-se aqui tentar diagnosticar o regime de vazão nas nascentes com certas características das áreas de contribuição que possam estar vinculadas àqueles processos fundamentais.

O propósito desta análise não é avaliar *per se* os fluxos hidrológicos de entrada e saída do sistema, como a infiltração, a evapotranspiração, o armazenamento de água no solo e a recarga para o aquífero, o que exigiria uma metodologia de cálculo mais aprofundada e acurada além do escopo desta investigação. Foi suposto mais exatamente dispor da vazão das nascentes e a partir daí tentar se estabelecer padrões estatísticos com algumas características biofísicas do sistema que *a priori* controlem os fluxos hidrológicos nas fronteiras. Dessa forma foi feita a investigação do padrão de variáveis hidrológicas estatísticas associadas ao regime de vazão das nascentes, em especial as vazões mínimas e máximas e os coeficientes de recessão calculados a partir da série de valores diários, com variáveis biofísicas associadas à topografia do terreno, à vegetação e ao tipo do solo, mais exatamente as seguintes: índice de declividade a 50 m e a 400 m de distância da surgência respectivamente, a percentagem de ocorrência dos tipos Argissolo vermelho e Nitossolo vermelho, a 50m e em toda a área de contribuição respectivamente (PVNV50 e PVNV), e o índice de cobertura de área de dossel arbóreo a 50m de distância e em toda a área de contribuição respectivamente (CADA50 e CADA).

Uma descrição de variabilidade destes índices no conjunto de nascentes é mostrada na Tabela 4.1, onde de forma geral notou-se grande amplitude de variação em todos os índices individualmente no conjunto amostral. O índice de declividade 50 m (Fig. 4.1) variou de 0.00 a 0.44 m/m, com mediana de 0,16 m/m, e o índice de declividade 400m (Fig. 4.2) mostrou-se predominantemente maior que o de 50m, variando entre 0.11 a 0.51 m/m com mediana 0,31 m/m.

O índice de solo em toda área de contribuição variou entre aproximadamente 25% a 100%, mas predominantemente sob uma faixa relativamente estreita, entre os percentuais de 25% a 75% por exemplo, igual a 61% e 78% de ocorrência respectivamente (Fig. 4.3, Tab. 1). Isto indica que as nascentes distribuíram-se em maioria sobre áreas prevalentes destas classes de solo, com apenas 4 exceções de índice abaixo de 50% nas nascentes N1, N10, R22 e R8.

Os coeficientes de recessão da vazão das nascentes em 2017 e 2018 foram na média estatística ($\alpha \cdot 10^4$) igual a 58 e 79 dia^{-1} respectivamente, sob um intervalo bastante alto de variação, aproximadamente de 5 até 150 dia^{-1} , (Fig. 4.5 e Tab. 4.1). Para várias nascentes o cálculo não foi inserido na discussão (indicados iguais a zero na Fig. 4.5, com 4 casos em 2017 e 8 casos em 2018) por tratarem-se de nascentes intermitentes que secam rapidamente na estiagem, respectivamente N06, N09, N12 e N18 em 2017 e adicionalmente R10 em 2018.

Os coeficientes de recessão da vazão das nascentes em 2017 e 2018 foram na média estatística ($\alpha \cdot 10^4$) igual a 58 e 79 dia^{-1} respectivamente, sob um intervalo bastante alto de variação, aproximadamente de 5 até 150 dia^{-1} , (Fig. 4.5 e Tab. 4.1). Para várias nascentes o cálculo não foi inserido na discussão (indicados iguais a zero na Fig. 4.5, com 4 casos em 2017 e 8 casos em 2018) por tratarem-se de nascentes intermitentes que secam rapidamente na estiagem, respectivamente N06, N09, N12 e N18 em 2017 e, adicionalmente, R10 em 2018.

Figura 4. 1: Índice de declividade (50m) e respectivos quartis de distribuição 25%, 50% e 75% (nas linhas tracejadas)

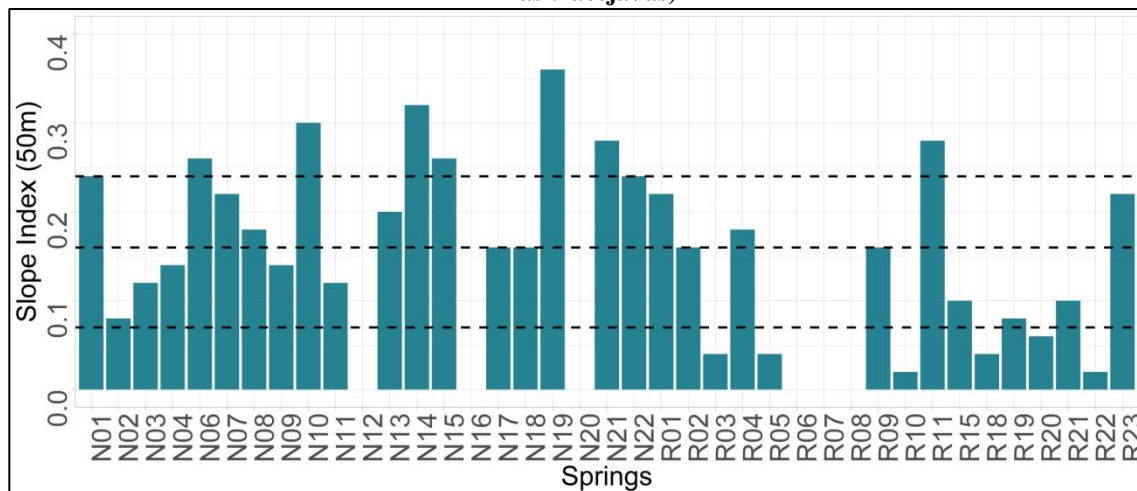


Figura 4. 2: Índice de declividade para 400m e respectivos quartis de distribuição 25%, 50% e 75% (nas linhas tracejadas). As nascentes circuladas em vermelho apresentaram área numa distância máxima de 200m da surgência (distância suposta no cálculo)

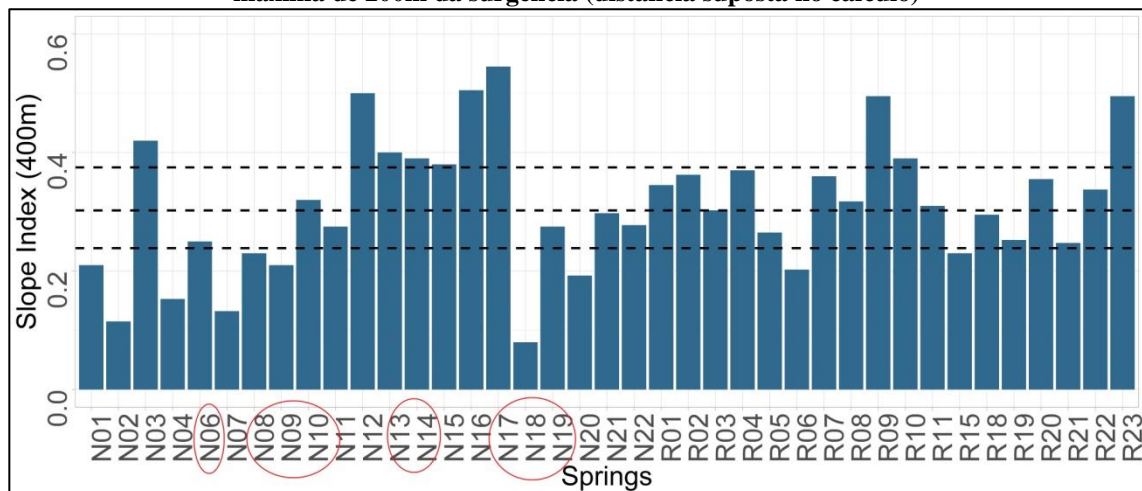


Figura 4. 3: Índice de solo (% PV e NV) e respectivos quartis de distribuição.

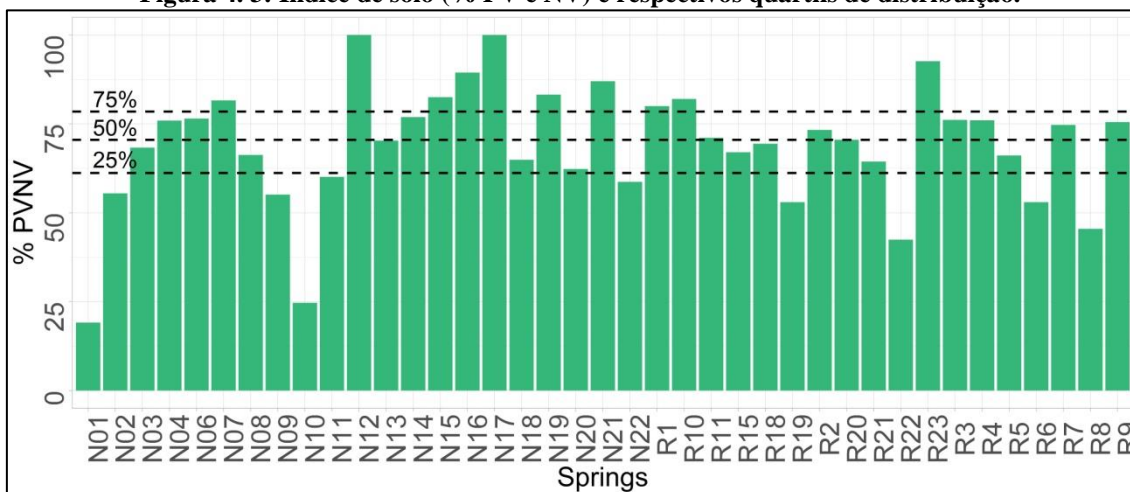


Figura 4. 4: Porcentagem de cobertura de área de dossel arbóreo (CADA, em %) e respectivos quartis de distribuição.

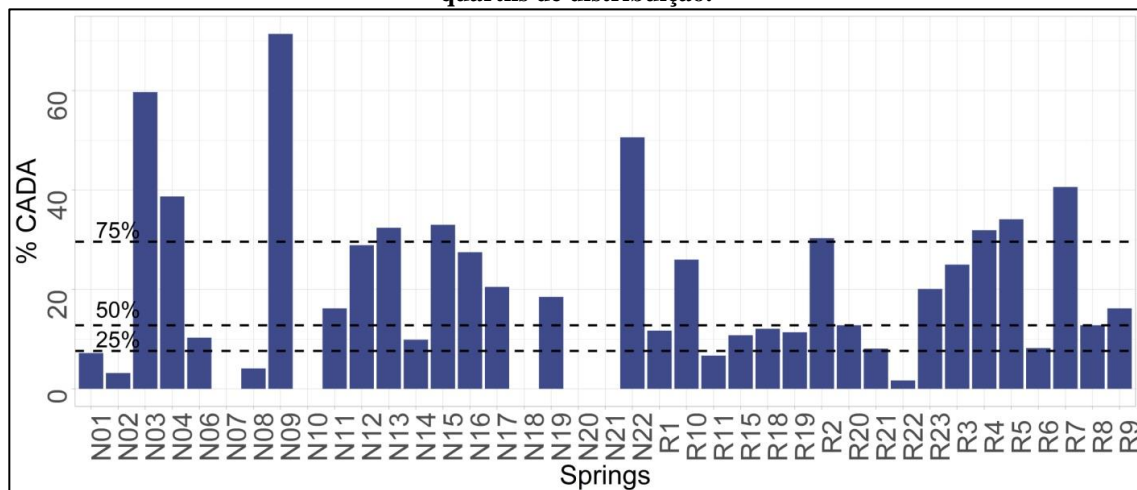


Figura 4. 5: Coeficientes de recessão nos anos de 2017 e 2018 ($\alpha \cdot 10^4$ em dia^{-1}) e respectivos quartis de distribuição (linhas tracejadas).

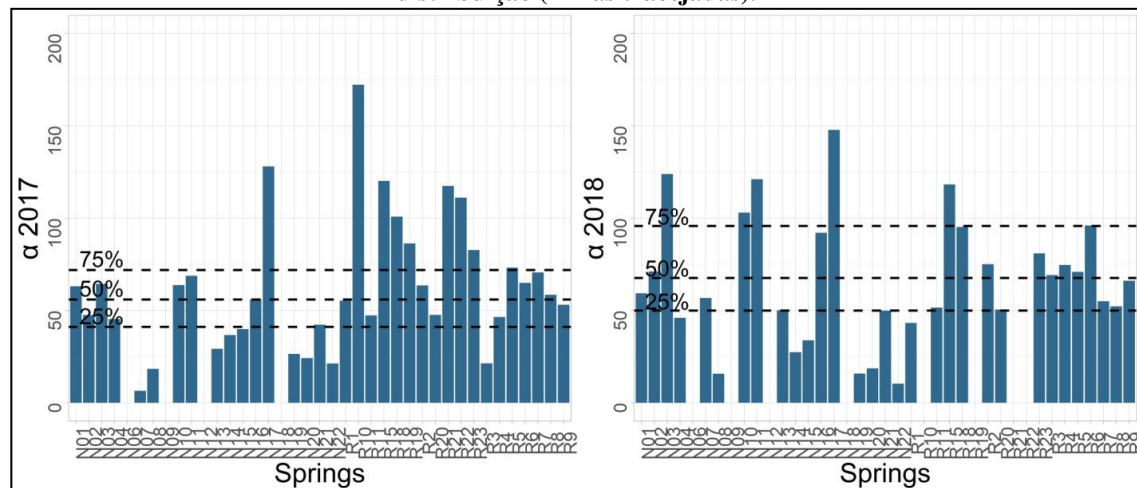


Tabela 4. 1: Variáveis hidrológicas e variáveis biofísicas investigadas por nascente (1ª coluna), percentagem de cobertura de área de dossel arbóreo a 50m de distância e em toda a área de contribuição respectivamente (CADA50 e CADA, em %), coeficiente de recessão (2017 e 2018), percentagem de ocorrência dos tipos Argissolo vermelho e Nitossolo vermelho, a 50m e em toda a área de contribuição respectivamente (PVNV50 e PVNV, em %), e o índice de declividade a 50 m e a 400 m de distância da surgência respectivamente (HL50 e HL400, em m/m)

cod NA	área (ha)	Q_max (mm/d)	Q_95% (mm/d)	Q_med (mm/d)	Q_min (mm/d)	Q_05% (mm/d)	% CADA	% CADA (50 m)	regime Qmax	regime Qmin	α (2017)	α (2018)	% PVNV (50 m)	Slope Index 1 (50m)	Slope Index 4 (400m)	
N01	4.01	0.63	0.37	0.22	0.12	0.13	7.20	48.04	low	low	63.13	59.33	19.16	0.00	0.24	0.21
N02	1.58	5.85	3.13	1.59	0.65	0.79	3.20	7.64	high	high	47.58	71.13	55.44	99.22	0.08	0.12
N03	14.30	1.68	0.67	0.28	0.00	0.05	59.70	50.55	low	low	64.46	123.88	68.30	90.01	0.12	0.42
N04	32.14	1.90	0.65	0.24	0.00	0.00	38.70	0.00	low	low	45.40	46.04	75.90	51.15	0.14	0.15
N06	3.15	1.59	0.47	0.11	0.00	0.00	10.30	41.85	low	low	NA	NA	76.50	33.78	0.26	0.25
N07	0.95	2.94	2.13	1.46	0.91	1.09	0.00	5.64	high	high	6.47	56.74	81.60	90.45	0.22	0.13
N08	2.61	2.18	2.09	1.56	0.46	1.07	4.10	0.00	high	high	18.37	15.75	66.25	100.00	0.18	0.23
N09	1.00	0.54	0.25	0.09	0.00	0.00	71.40	24.87	low	low	NA	NA	55.10	39.51	0.14	0.21
N10	1.31	6.13	3.23	1.39	0.40	0.54	0.00	0.00	high	high	63.79	103.01	24.70	58.99	0.30	0.32
N11	5.25	2.12	1.08	0.43	0.05	0.13	16.20	0.00	low	low	68.82	121.12	60.10	97.90	0.12	0.28
N12	4.82	6.06	2.60	0.77	0.00	0.00	28.90	0.00	high	low	NA	NA	100.00	100.00	0.00	0.50
N13	3.55	5.76	3.18	1.75	1.02	1.11	32.40	38.24	high	high	29.28	50.14	70.30	100.00	0.20	0.40
N14	5.56	1.39	1.03	0.78	0.41	0.49	9.90	50.91	low	high	36.69	27.42	76.90	100.00	0.32	0.39
N15	7.97	1.17	1.08	0.68	0.18	0.35	33.00	42.18	low	high	39.94	33.88	82.50	100.00	0.26	0.38
N16	5.25	6.73	3.67	1.48	0.21	0.53	27.50	13.71	high	high	55.97	92.10	89.40	100.00	0.44	0.51
N17	2.05	4.76	2.23	0.80	0.07	0.17	20.50	0.00	high	low	128.08	147.86	100.00	100.00	0.16	0.55
N18	0.15	11.35	4.78	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	high	low	NA	NA	64.90	71.36	0.16	0.08
N19	0.31	3.62	2.86	2.23	1.42	1.63	18.50	15.49	high	high	26.48	15.84	83.20	81.41	0.36	0.28
N20	4.64	2.11	0.66	0.30	0.00	0.08	0.00	0.00	low	low	24.20	18.64	62.30	84.77	0.42	0.19
N21	3.61	2.98	1.81	1.08	0.67	0.72	0.00	0.00	high	high	42.35	49.89	87.00	100.00	0.28	0.30
N22	10.77	1.67	0.75	0.55	0.20	0.43	50.60	39.88	low	high	21.27	10.36	58.70	83.42	0.24	0.28
R01	8.83	1.40	1.27	0.75	0.22	0.37	11.70	26.63	low	high	55.28	43.27	80.00	100.00	0.22	0.35
R02	16.91	5.09	2.84	1.43	0.67	0.79	30.30	47.13	high	high	63.58	75.08	73.30	87.53	0.16	0.36
R03	29.39	4.92	2.67	1.13	0.00	0.28	25.00	79.39	high	high	21.40	69.21	76.10	85.44	0.04	0.30
R04	38.15	4.00	2.22	1.09	0.47	0.59	31.90	68.81	high	high	46.50	74.65	76.00	61.27	0.18	0.37
R05	4.55	5.22	2.70	1.33	0.59	0.69	34.10	20.34	high	high	73.19	70.95	66.12	99.33	0.04	0.27
R06	22.05	6.73	2.61	1.32	0.37	0.53	8.20	6.80	high	high	64.91	96.04	53.00	0.00	0.00	0.20
R07	10.90	4.03	2.56	1.58	0.29	0.50	40.60	60.56	high	high	70.63	54.99	74.70	22.43	0.00	0.36
R08	2.63	3.00	2.04	1.41	0.57	0.70	12.80	54.88	high	high	58.49	52.25	45.50	0.00	0.00	0.32
R09	3.26	0.42	0.17	0.08	0.01	0.03	16.20	53.97	low	low	53.10	66.10	75.50	42.47	0.16	0.50
R10	9.06	4.06	1.78	0.57	0.00	0.00	26.00	10.01	high	low	172.26	NA	82.00	36.29	0.02	0.39
R11	23.46	5.83	3.21	1.53	0.44	0.78	6.70	27.86	high	high	47.33	51.58	71.10	67.09	0.28	0.31
R15	5.87	4.30	2.26	0.93	0.00	0.08	10.80	55.36	high	low	120.17	118.25	67.00	0.00	0.10	0.23
R18	49.58	5.76	3.04	1.49	0.31	0.55	12.10	2.61	high	high	100.84	95.21	69.40	0.00	0.04	0.30
R19	2.05	1.36	0.79	0.46	0.02	0.09	11.40	25.84	low	low	86.31	200.96	53.00	68.32	0.08	0.25
R20	42.95	3.43	2.05	1.22	0.18	0.34	12.80	0.00	high	high	47.66	50.47	70.50	0.63	0.06	0.36
R21	18.52	6.49	3.07	1.09	0.00	0.00	8.10	36.96	high	low	117.50	209.48	64.40	0.00	0.10	0.25
R22	5.70	1.21	0.67	0.35	0.00	0.00	1.70	0.00	low	low	111.10	367.63	42.45	2.19	0.02	0.34
R23	13.64	1.40	0.75	0.30	0.00	0.00	20.10	0.00	low	low	82.72	80.93	92.60	100.00	0.22	0.50

VAZÃO MÁXIMA E MÍNIMA

Nesta investigação é mostrada a dispersão da vazão máxima (p95%), da vazão mínima (p5%) e do coeficiente de recessão de cada nascente, respectivamente com suas características biofísicas, de forma a sugerir possibilidades de relações estatísticas entre as variáveis hidrológicas e as biofísicas.

De forma geral, para todas as dispersões de vazão máxima e mínima discutidas a seguir, os ajustes de regressão linear foram feitos para as nascentes de alta e baixa produtividade separadamente, com os resultados da regressão indicados nas legendas das figuras 4.6 a 4.12.

A dispersão da vazão específica máxima (p95%) com os índices de declividade a 50m ou 400 m (Fig. 4.6a,b) não mostrou relações de proporção bem definidas entre as variáveis.

Para a vazão específica mínima (p5%) notou-se uma correlação positiva com a declividade a 50 m mas de modesta significância ($p < 15,7\%$) (Fig. 4.7.a), e de forma um pouco mais contundente mostrou-se redução da vazão mínima com a declividade-40m, particularmente para as nascentes de alta produtividade ($p < 6,1\%$) (Fig. 4.7b), mas não significativa para as nascentes de baixa produtividade em todos os casos.

Esta ausência de correlação da vazão máxima com a declividade pode levantar muitos questionamentos. Nos episódios de chuva mais intensa, ou prolongados, principalmente após meados da estação chuvosa, é comum ocorrer alta umidade no solo e alta carga nos aquíferos rasos à montante, o que favoreceria as perdas como a descarga do aquífero e escoamento subterrâneo forçado pelo gradiente horizontal de pressão hidrostática, culminando com o aumento da vazão das nascentes. Por esta linha de pensar, no presente estudo de caso é possível que existam outros e mais importantes mecanismos forçando e/ou limitando a vazão máxima, que de toda forma não cabe aqui determinar com as atuais informações.

Sobre o aumento (redução) da vazão mínima para nascentes de alta produtividade com a declividade-50m (declividade-400m), poder-se-ia supor possível e parcialmente, devido à uma condição de baixa integridade ou desconectividade espacial dos processos de geração de escoamento subterrâneo próximo a surgência da nascente em relação à área de contribuição como um todo. Esta baixa correlação revelou-se como um padrão amostral de conjunto e não individual necessariamente, assim esta hipótese de desconectividade talvez não se manifeste necessariamente para certas nascentes

especificamente. Um outro indício possível desta desconectividade por heterogeneidade espacial decorreu de investigações locais na nascente N15 utilizando técnicas de eletrorresistividade no solo (André Kowalski e Carlos Mendonça/IAG/Usps, 2019, com. pessoal) (Fig. 4.8, a). Os autores detectaram zonas preferenciais de alta condutividade elétrica no solo à montante da surgência, com regolito mais desenvolvido e de profundidade e espessura variáveis, com função de maximizar os regimes de carga e descarga do sistema, como áreas estratégicas na dinâmica de vazão subterrânea para alimentar a nascente, em oposição funcional às zonas complementares de baixa condutividade (Fig. 4.8 a,b).

Estes mecanismos, se confirmados, poderiam eventualmente também ajudar a explicar a dinâmica da vazão máxima, no que diz respeito à falta de correlação com a declividade.

Figura 4. 6: Vazão máxima (p95%) em função do índice de declividade (*Slope index*) calculado nas distâncias horizontais da surgência de (a) 50m e (b) 400m, para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis:

(a)50 m: Baixa produtividade: $R^2 = -0.03694$; $p = 0.5062$; $\beta = -0.6788$.

Alta produtividade: $R^2 = 0.022$; $p = 0.235$; $\beta = 1.3674$

(b)400 m: Baixa produtividade: $R^2 = -0.0846$; $p = 0.8049$; $\beta = 0.2819$.

Alta produtividade: $R^2 = -0.03487$; $p = 0.5075$; $\beta = -0.8177$.

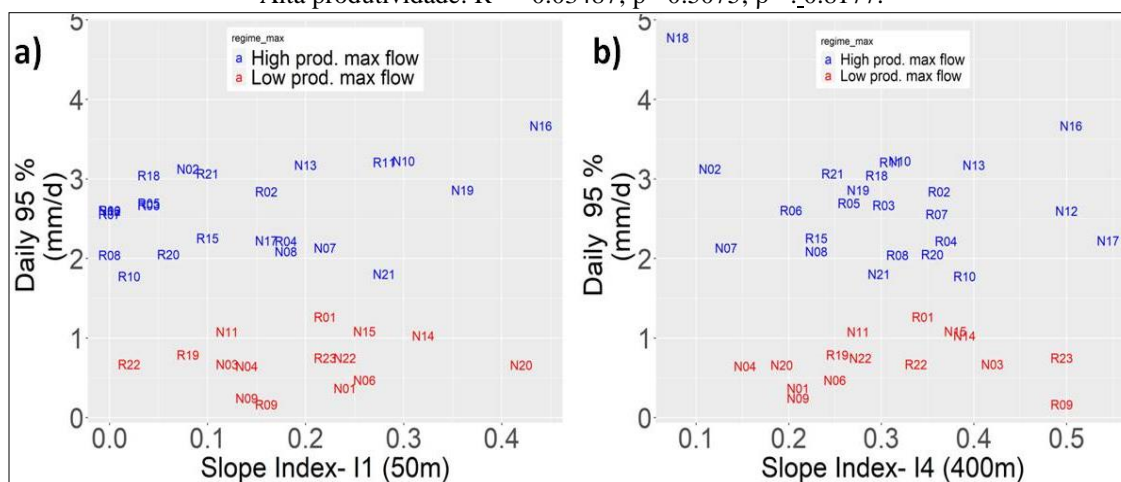


Figura 4.7: Vazão mínima (p5%) em função do índice de declividade (*Slope index*) calculado nas distâncias horizontais da surgência de (a) 50m e (b) 400m, para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis:

(a)50 m: Baixa produtividade: $R^2= 0.07083$; $p= 0.157$; $\beta = 0.31465$
 Alta produtividade: $R^2= 0.04032$; $p= 0.1853$; $\beta = 0.7925$.
 (b)400 m: Baixa produtividade: $R^2= -0.0641$; $p= 0.6498$; $\beta = -0.1049$.
 Alta produtividade: $R^2= 0.1723$; $p= 0.06174$; $\beta = -1.0566$.

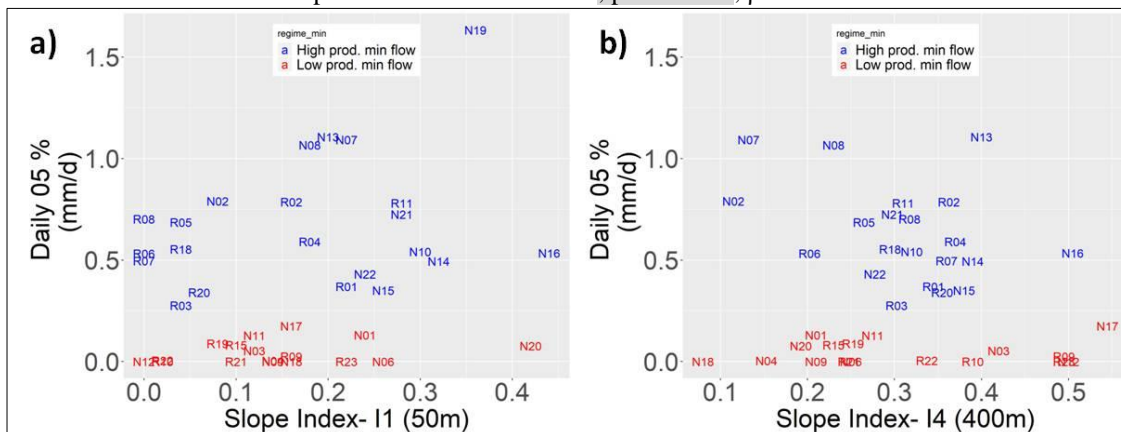
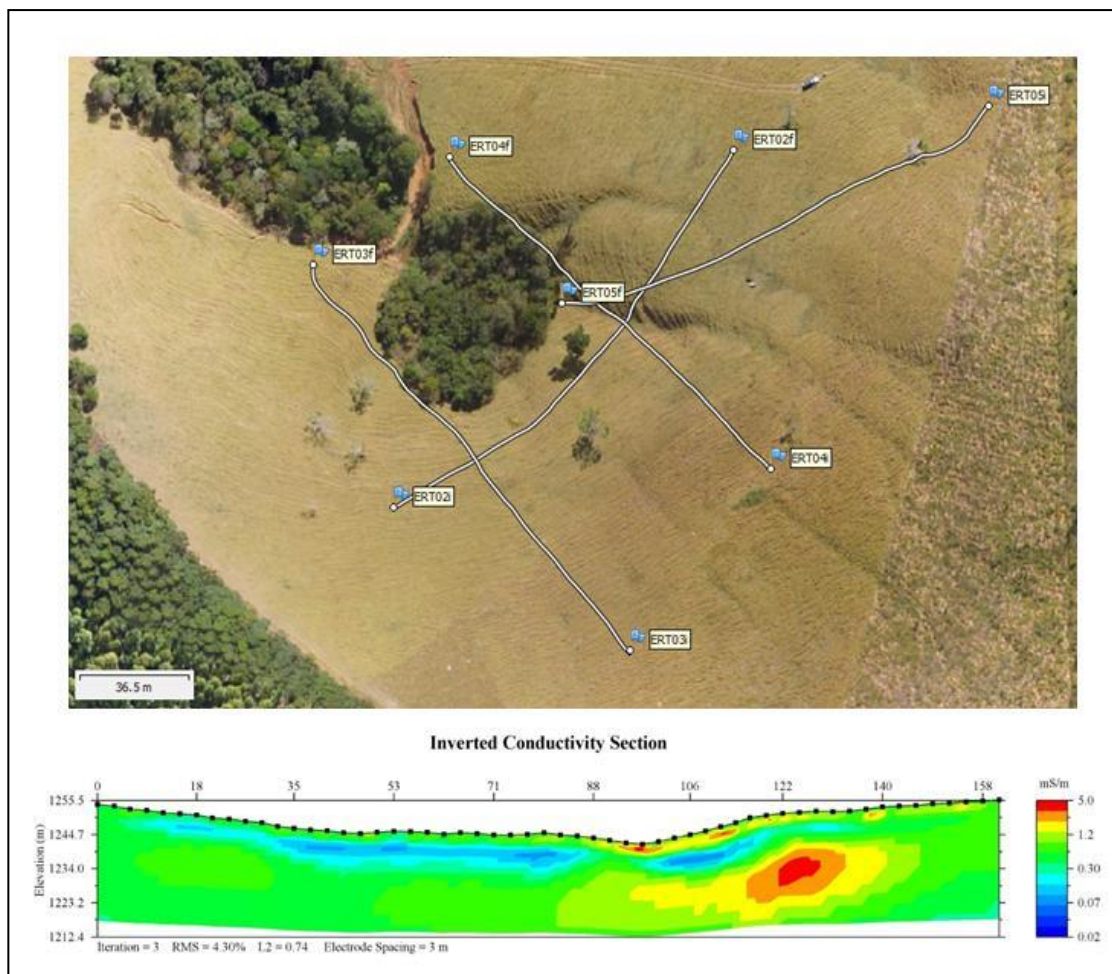


Figura 4. 8: (a) Experimento com técnica de eletroresistividade no solo com transectos horizontais (fonte: André Kowalski e Carlos Mendonça/Depto Geofísica/IAG/Usp, 2019, com. pessoal) para a nascente N15 no Ribeirão das Poses, realizadas em Setembro, 2019; (b) estimativa preliminar do campo bidimensional de condutividade elétrica (mS/m) com a profundidade (m) no transecto ERT02.



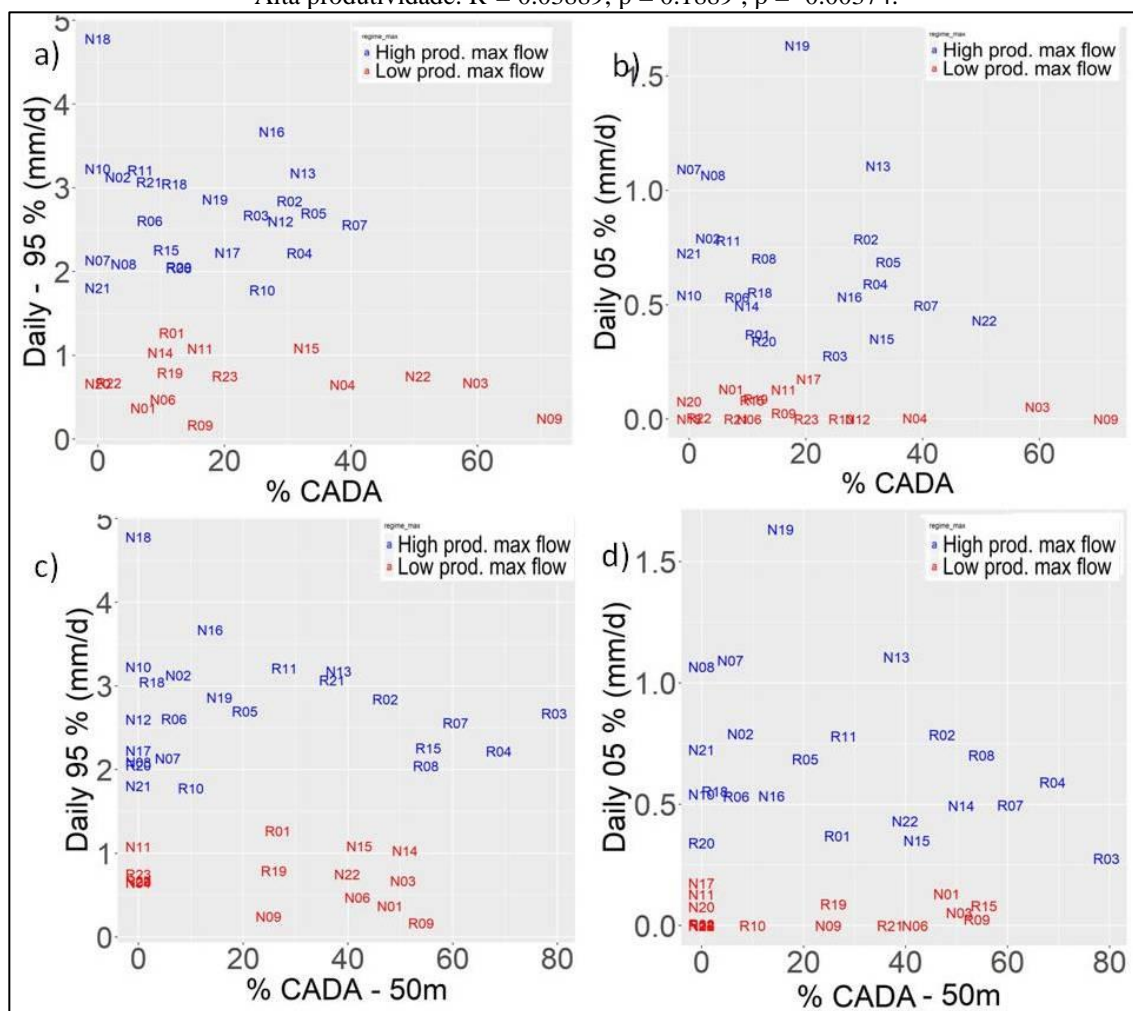
Para a cobertura de dossel arbóreo CADA em toda a área de contribuição, a dispersão tanto com a vazão específica p95% como p5% com não sugeriram uma relação bem definida (Fig. 4.9.a-d) e mesmo significativa. No caso da vazão p5% com CADA50m para as nascentes de alta produtividade (código azul na Fig. 4.9.d) não se descarta suspeitar por inspeção visual da redução de vazão com a CADA, mas sem significância estatística, e cuja suspeita foi possivelmente sugestionada por dois pontos afastados, o de baixo valor da nascente R3 e outro de muito alto valor da nascente N19 configurando uma relação negativa. Uma aparência semelhante a esta última ocorreu no caso da vazão p95% com a CADA50 m (Fig. 4.9.c). As vazões médias e medianas também foram ajustadas com o índice CADA, não tendo sido obtido correlação linear significativa em nenhum caso (cálculos não mostrados).

O intervalo de variabilidade do índice de vegetação foi muito concentrado abaixo do limiar de 60%, o que não excluiu do conjunto amostral áreas com extensa cobertura arbórea, que pudessem adensar a ocorrência nos quantis superiores e se verificar uma comparação de condições extremas.

A constatação de ausência de correlação das vazões máxima e mínima com a cobertura arbórea, de qualquer forma, não é suficiente para sustentar a hipótese de que o aumento da vegetação florestal promove a redução de vazão da nascente, por exemplo devido ao viés de aumento da evapotranspiração à montante. Analogamente, também é insuficiente para corroborar a hipótese do aumento das vazões mínimas com a vegetação florestal, por exemplo devido aos possíveis ganhos de água por infiltração e armazenamento de água no solo e/ou no aquífero raso. Com a disponibilidade deste conjunto amostral, e das variáveis descritas até aqui descritas, mostrou-se serem inconclusivas a associação de uma ou outra hipótese do papel da vegetação arbórea nas vazões máxima e mínima conforme calculadas.

Figura 4. 9: Vazão máxima (p95%) e vazão mínima (p05%), em função do índice da porcentagem de vegetação (CADA e CADA 50) na área de contribuição inteira e 50 m a montante da surgência. para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis:

- (a) 95%:Baixa produtividade: $R^2= -0.0301$; $p = 0.4558$; $\beta = -0.003001$.
 Alta produtividade: $R^2= -0.03367$; $p = 0.6215$; $\beta = -0.005581$.
 (b)5%: Baixa produtividade: $R^2= -0.0291$; $p = 0.4707$; $\beta = -0.0005413$.
 Alta produtividade: $R^2= -0.001629$; $p = 0.3375$; $\beta = -0.004663$.
 (c) 95%: Baixa produtividade: $R^2= -0.03544$; $p = 0.4832$; $\beta = -0.002857$;
 Alta produtividade: $R^2= -0.03266$; $p = 0.6068$; $\beta = -0.002910$;
 (d) 5%: Baixa produtividade: $R^2= -0.06164$; $p = 0.7934$; $\beta = -0.0001746$
 Alta produtividade: $R^2= 0.03889$; $p = 0.1889$; $\beta = -0.00374$.

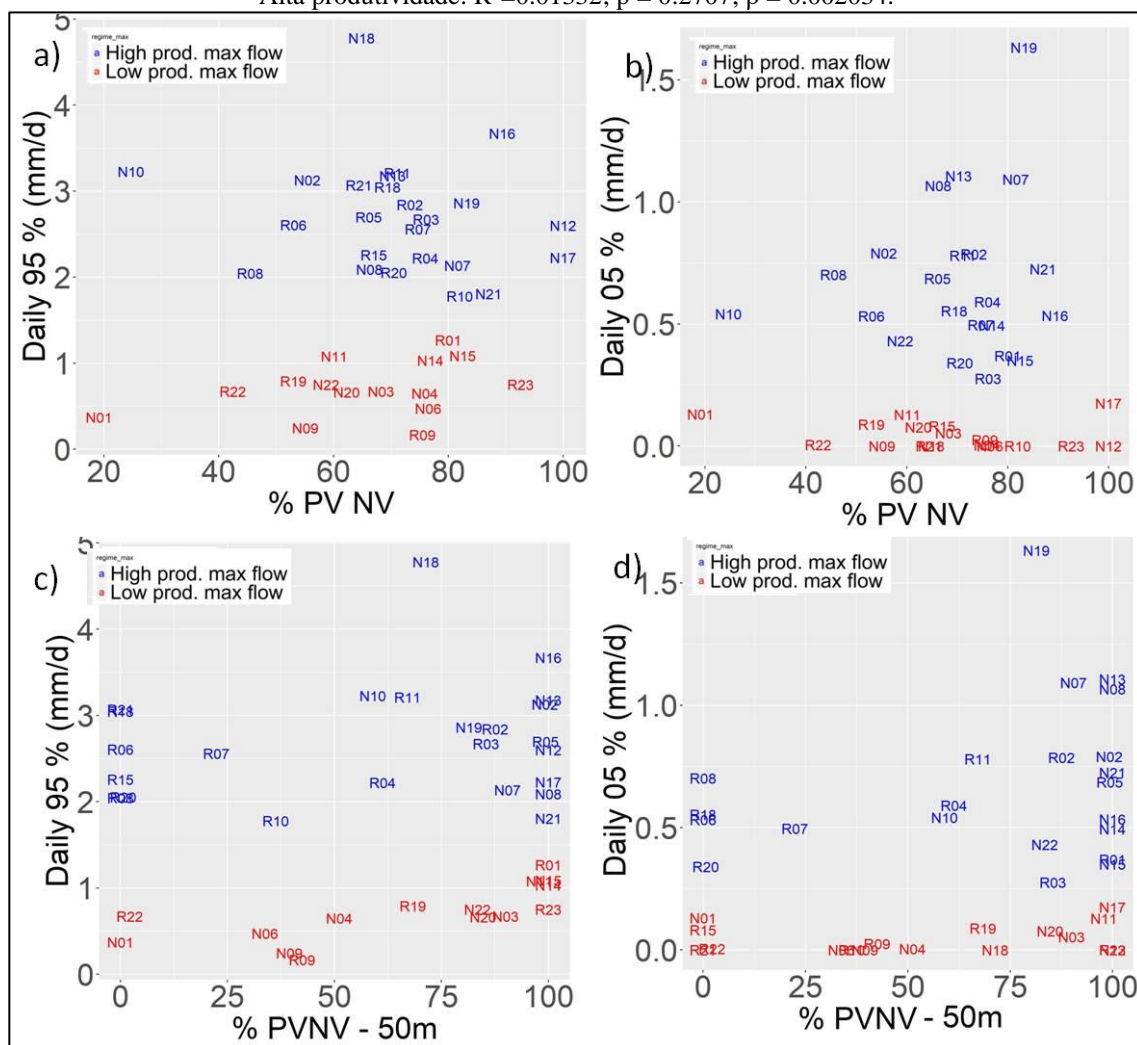


A dispersão das vazões específicas p95% e p5% com os índices de ocorrência de solo PVNV (Fig. 4.10) não sugeriram correlação significativa entre eles. Notou-se que no conjunto amostral há uma variabilidade expressiva do índice PVNV, com maior ocorrência no intervalo de 40% a 95%. Desta forma pode-se apenas mencionar que esta

classificação, segundo a preponderância do tipo de solo, e baseado apenas em uma análise de dispersão simples, mostrou-se insuficiente para se estabelecer alguma correlação como regime de vazões das nascentes. Há certamente muitos limitantes nesta maneira de incluir o controle do solo. Em primeiro lugar, não se especificou neste índice, para uma certa % de PVNV, a qual outro ou outros tipos de solo caberia(m) a percentagem complementar a 100%. Não se descarta que diferentes combinações de tipos de solo com o PVNV possam exercer um controle igualmente diferente. A outra limitação é a falta de prescrição de parâmetros físicos na atribuição do solo como fator causal, como por exemplo a porosidade e a condutividade hidráulica. A classificação de solos não restringe faixas de parâmetros físicos específicos para cada classe, o que torna esta prescrição dependente do conhecimento da variabilidade espacial dos parâmetros na bacia. A prescrição de parâmetros físicos do solo para este tipo de estudo possivelmente vai requerer medidas em escala horizontal e vertical, o que parece ser uma tarefa de notável esforço que vai além do escopo deste trabalho.

Figura 4. 10: (a) Vazão máxima (p95%) e (b) vazão mínima (p05%) em função da porcentagem de ocorrência de solo PVNV na área de contribuição para nascentes de baixa (código vermelho) e alta (código azul) produtividade de água. Estimativas de regressão linear das variáveis:

- (a) 95%:Baixa produtividade: $R^2= 0.1091$; $p = 0.1143$; $\beta = 0.009112$.
Alta produtividade: $R^2= -0.01397$; $p = 0.4132$; $\beta = -0.007069$.
(b) 5%: Baixa produtividade: $R^2= -0.02536$; $p = 0.449$; $\beta = -0.0005595$.
Alta produtividade: $R^2= -0.03655$; $p = 0.6161$; $\beta = 0.002420$.
(c) 95%:Baixa produtividade: $R^2= 0.4816$; $p = 0.002464$; $\beta = 0.006362$.
Alta produtividade: $R^2= -0.0189$; $p = 0.457$; $\beta = 0.002597$;
(d) 5%: Baixa produtividade: $R^2=-0.02235$; $p =0.4326$; $\beta = 0.0003066$..
Alta produtividade: $R^2=0.01332$; $p = 0.2707$; $\beta = 0.002034$.



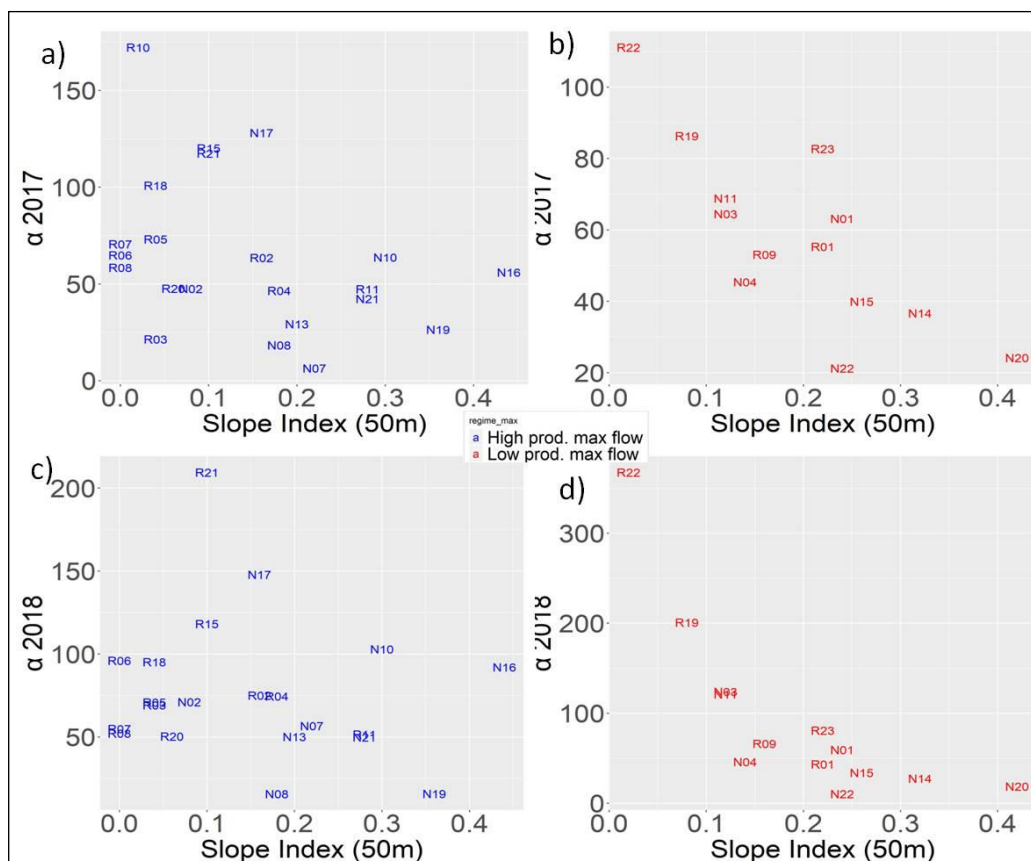
COEFICIENTE DE RECESSÃO

A dispersão do coeficiente de recessão α com o índice de declividade-400m não revelou correlação significativa em nenhum caso (Figs. 4.12). Todavia para o índice de

declividade-50m detectou-se um padrão muito diferente: nas nascentes de baixa produtividade há redução significativa com a declividade ($p < 0,1\%$) (código vermelho na Figs. 4.11.b,d), e também para as nascentes de alta produtividade (código azul na Figs. 4.11.a,c) mas com modesta significância estatística ($p < 9\%$, em 2017).

Figura 4. 11: Coeficiente de recessão em função do índice de declividade a 400m de distancia da surgência. .

- (a) A2017 X SI 50: alta produtividade: $R^2 = 0.09381$; $p = 0.09002$; $\beta = -119.78$;
 (b) A2017 X SI 50: Baixa produtividade: $R^2 = 0.5648$; $p = \mathbf{0.001849}$; $\beta = -187.24$.
 (c) A2018 X SI 50: alta produtividade: $R^2 = -0.02532$; $p = 0.4855$; $\beta = -55.77$;
 (d) A2018 X SI 50: Baixa produtividade: $R^2 = 0.5649$; $p = \mathbf{0.001845}$; $\beta = -717.43$



Esta constatação estabelece que a redução de α , associada ao maior amortecimento da vazão na etapa de depleção com desdobramentos de maior vazão mínima na estiagem, ocorre principalmente nas nascentes com acentuada declividade nas cercanias (distância 50m) mas não necessariamente dependente da declividade na área total de contribuição (índice 400m). Esta separação de escalas caminha em direção à possível desconectividade do regime funcional de escoamento nas nascentes com a área total de contribuição à montante, tornando a região das cercanias as áreas potencialmente mais funcionais e limitantes. Também ocorre que as nascentes com maior declividade-50m sejam onde existam as zonas de convergência do terreno mais acentuadas nas cercanias da surgência, o

que ajudaria a promover maior fluxo de água subterrânea lateral por forçamento de pressão durante a recessão hidrológica.

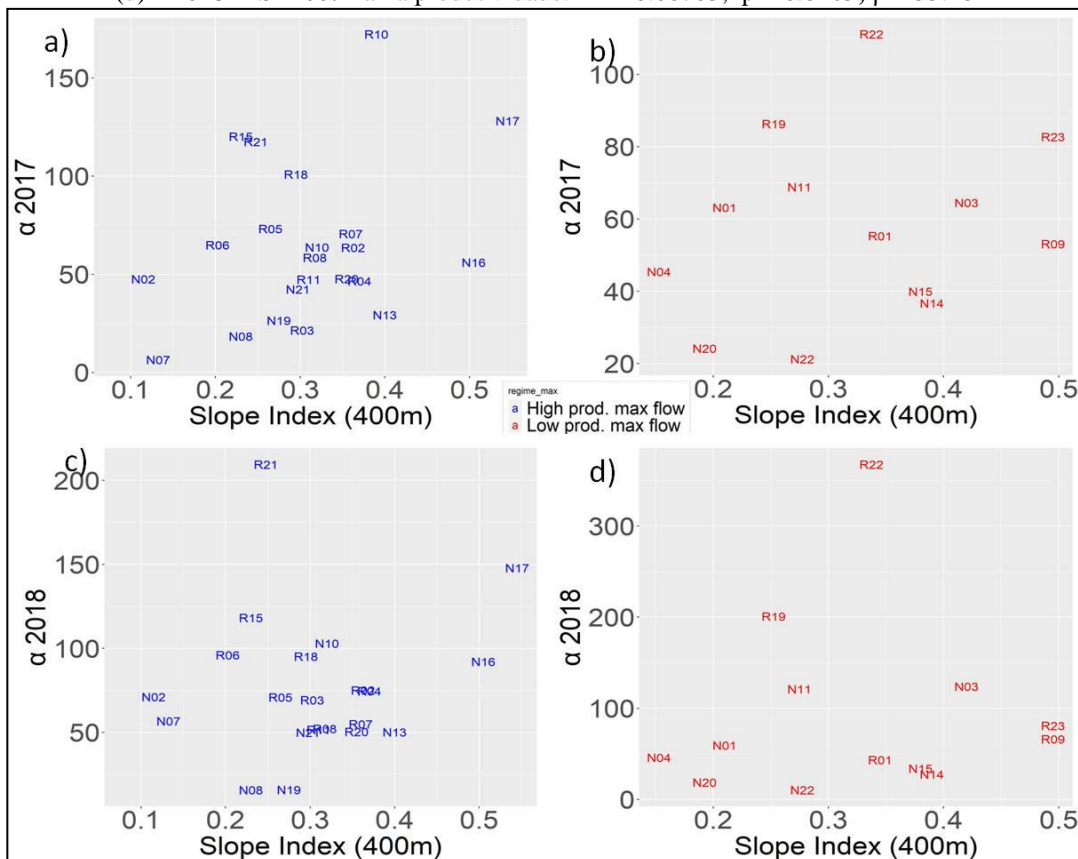
Figura 4. 12: Coeficiente de recessão em função do índice de declividade a 50m de distancia da surgência.

(a) A2017 X SI 400: alta produtividade: $R^2= 0.05406$; $p = 0.1536$; $\beta = 125.17$.

(b) A2017 X SI 400: Baixa produtividade: $R^2= -0.03833$; $p = 0.4711$; $\beta = 51.18$;

(c) A2018 X SI 400: alta produtividade: $R^2= -0.02965$; $p = 0.5227$; $\beta = 62.18$;

(d) A2018 X SI 400: Baixa produtividade: $R^2= -0.08703$; $p = 0.8465$; $\beta = 53.28$



A dispersão do coeficiente de recessão α com os índices de solo PVNV de forma geral não mostraram correlação significativa abaixo de 5% (Fig. 4.13 a 400m e Fig. 4.14 a 50m). Houve todavia uma aproximação no caso das nascentes de baixa produtividade para o índice de solo a 50m (Fig. 4.14.d), com modesta significância ($p < 8\%$ em 2018), em que o coeficiente de recessão diminui com o aumento da % de PVNV.

A dispersão do coeficiente de recessão α com os índices de vegetação CADA em toda a área de contribuição não indicaram correlação significativa (Fig. 4.14 e 4.15), assim como para o índice CADA-50m (Fig. 4.16).

Figura 4. 13: Coeficiente de recessão em função da porcentagem de argiloso vermelho e nitossolo vermelho (PVNV) a 400m de distancia, para (a) 2017 e (b) 2018. **2017:**

Baixa produtividade: $R^2 = -0.01229$; $p = 0.3752$; $\beta = -0.3553$;

Alta produtividade: $R^2 = -0.04225$; $p = 0.7039$; $\beta = 0.2192$;

(b)**2018:** Baixa produtividade: $R^2 = 0.0769$; $p = 0.185$; $\beta = -1.989$.

Alta produtividade: $R^2 = -0.04972$; $p = 0.8208$; $\beta = -0.1418$.

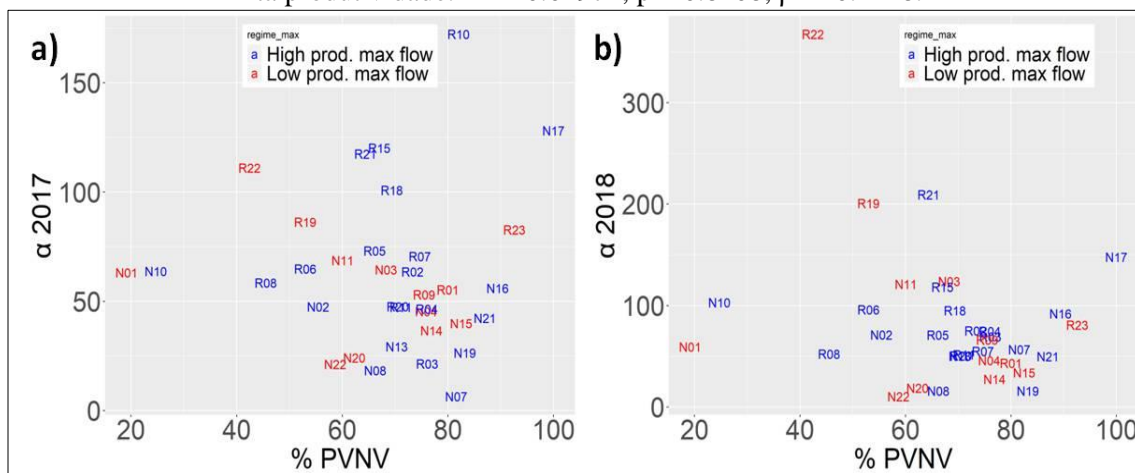


Figura 4. 14: Coeficiente de recessão (α) em função do porcentagem de PVNV 50 m a montante (PVNV: 50m)

- (a) α 2017, para alta produtividade: $R^2= 0.163$; $p= \mathbf{0.03543}$; $\beta = -0.4347$
 (b) α 2017, para baixa produtividade: $R^2= 0.1042$; $p= 0.1499$; $\beta = -0.2988$
 (c) α 2018, para alta produtividade: $R^2= 0.07101$; $p= 0.1283$; $\beta = -0.3471$
 (d) α 2018, para baixa produtividade: $R^2= 0.1781$; $p= \mathbf{0.08435}$; $\beta = -1.3441$

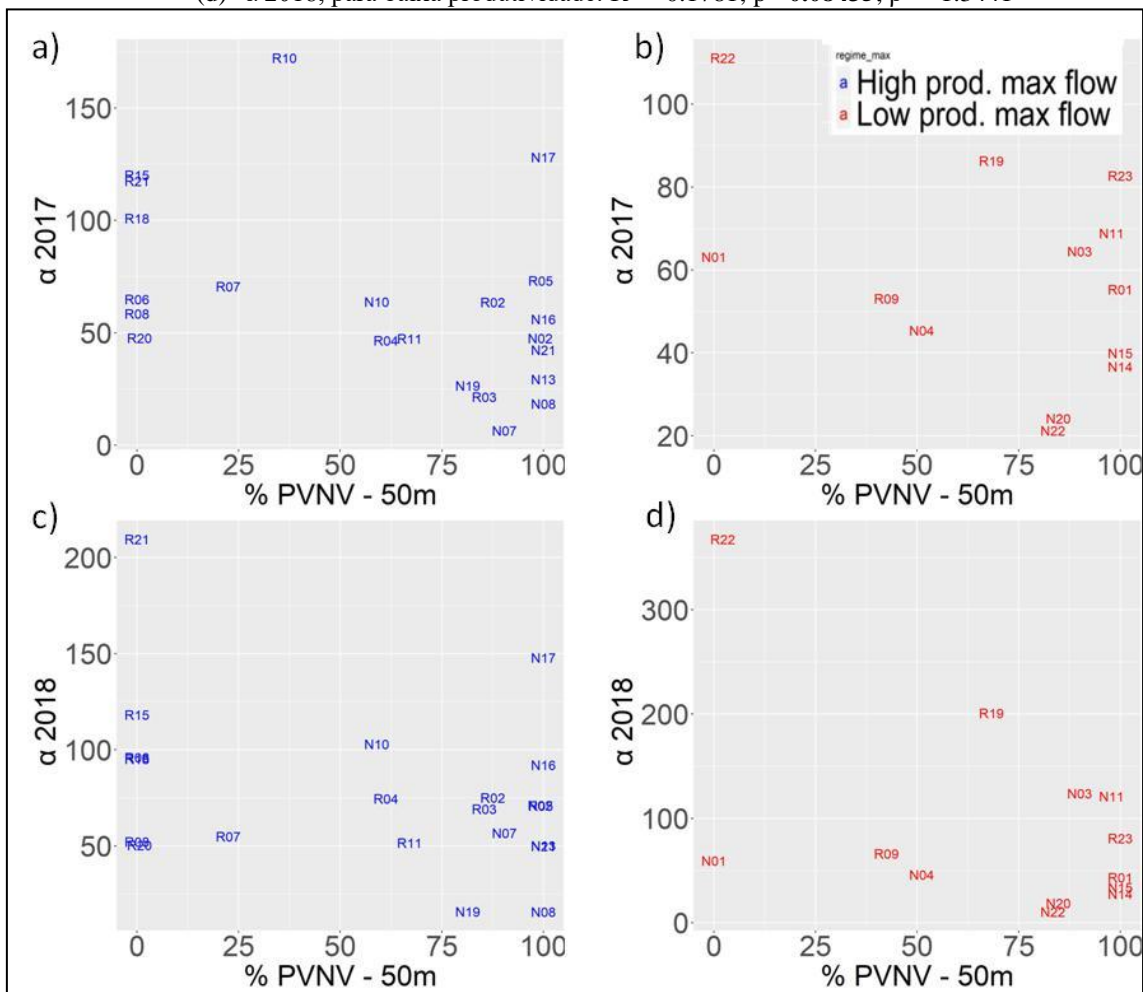


Figura 4. 15: Coeficiente de recessão em função da porcentagem de CADA (toda área de contribuição) para as nascentes de alta e baixa produtividade de água:

(a) alta, 2017: $R^2 = -0.02536$; $p = 0.4961$; $\beta = 0.4949$;

(b) baixa, 2017: $R^2 = 0.007356$; $p = 0.3191$; $\beta = -0.4119$;

(c) alta, 2018: $R^2 = -0.04684$; $p = 0.7493$; $\beta = -0.2533$;

(d) baixa, 2018: $R^2 = -0.0123$; $p = 0.3752$; $\beta = -1.412$.

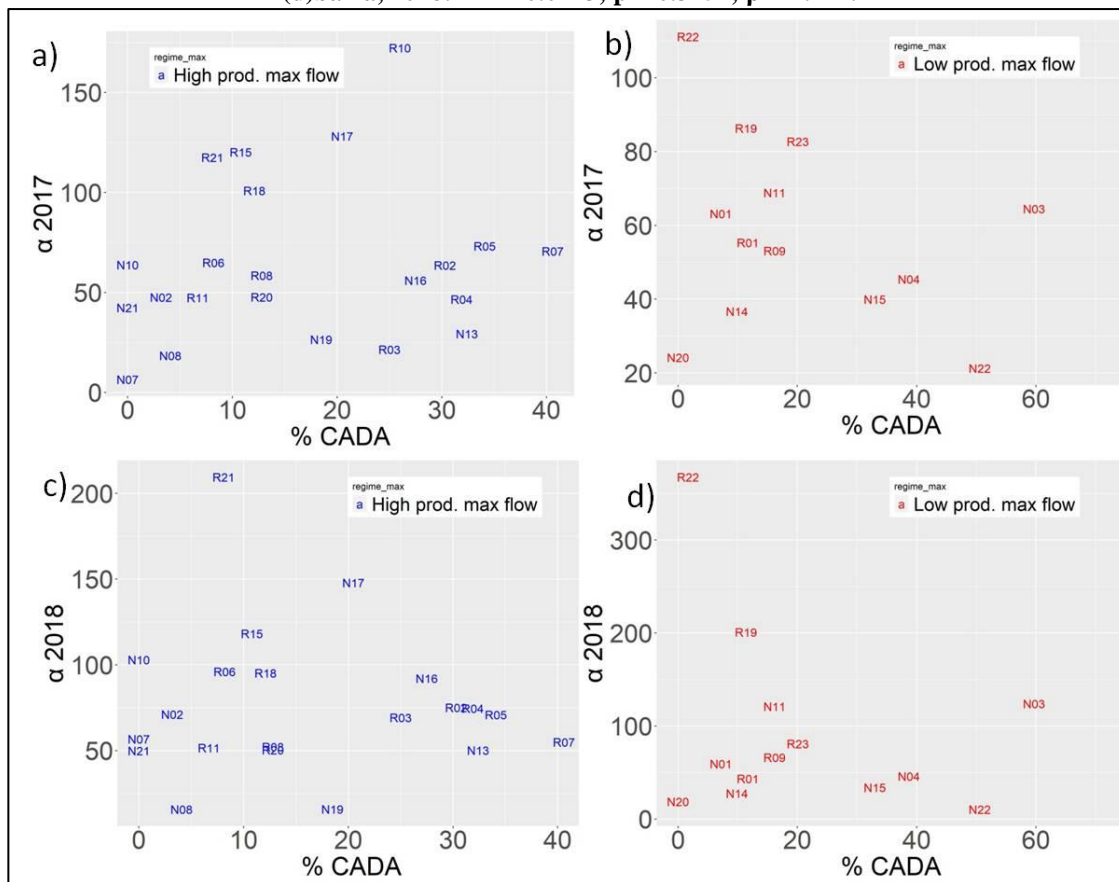


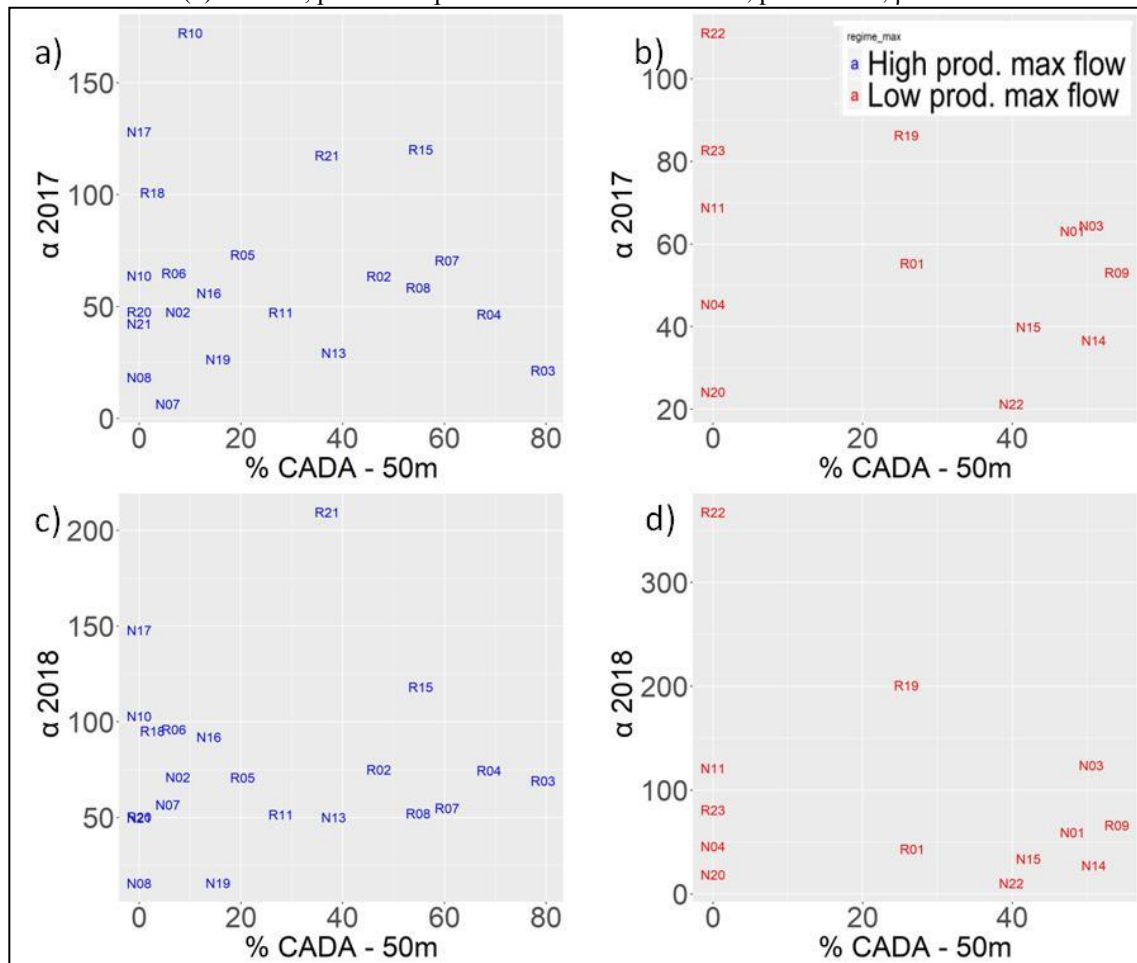
Figura 4. 16: Coeficiente de recessão (α) em função do índice de vegetação 50 m a montante (CADA: 50m)

(a) α 2017, para alta produtividade: $R^2 = -0.04603$; $p = 0.7858$; $\beta = -0.09743$.

(b) α 2017, para baixa produtividade: $R^2 = 0.02513$; $p = 0.2768$; $\beta = -0.3640$.

(c) α 2018, para alta produtividade: $R^2 = -0.04603$; $p = 0.7858$; $\beta = -0.09743$

(d) α 2018, para baixa produtividade: $R^2 = 0.02786$; $p = 0.2709$; $\beta = -1.411$.



A análise dos padrões de dispersão da vazão e do coeficiente de recessão com as propriedades biofísicas das áreas de nascentes, conforme discutida neste capítulo, é uma técnica inicial e necessária para avaliar as informações em caráter o mais bruto possível ou próximo disso, para que sejam expostas de forma correta e de verificação simples. Desta maneira, pela dispersão simples é possível se suspeitar ou mesmo detectar significativamente padrões de correlação entre as variáveis, por meio de modelos matemáticos, e que por sua vez podem conduzir até a se configurarem indícios de causalidade entre as variáveis. Todavia as correlações resultantes de regressões lineares ou não-lineares não são provas cabais de causalidade estritas, mas eventualmente representam um conjunto interessante de indícios, que eventualmente venham a ser agregados com outras análises e indícios, visando-se corroborar hipóteses.

4.1. CORRELAÇÃO DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E BIOFÍSICAS UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para se buscar indícios adicionais de possíveis relações causais entre as variáveis hidrológicas e as propriedades biofísicas do terreno, elaborou-se a seguinte sequência de estimativas utilizando a técnica de Análise de Componentes Principais:

- 1) foram selecionadas variáveis estatísticas hidrológicas por nascente (por exemplo Q1%, Q95% etc) calculadas a partir das séries temporais diárias de vazão das nascentes, e feita a Análise de Componentes Principais (ACP) destas variáveis (normalizadas) discriminadas por nascente; a seguir foram calculadas as componentes rotacionadas das CPs hidrológicas com o método Varimax;
- 2) foram selecionadas variáveis biofísicas por nascente (por exemplo índice CADA, índice PVNV etc) e feita a Análise de Componentes Principais (ACP) destas variáveis normalizadas discriminadas por nascente; a seguir foram calculadas as componentes rotacionadas destas CPs biofísicas com o método Varimax;
- 3) calculou-se a correlação linear das CPs rotacionadas hidrológicas com as CPs rotacionadas biofísicas, destacando-se como relevantes apenas os cruzamentos de coeficiente de Pearson significativos e com maior magnitude dentre os demais.

As componentes principais rotacionadas (RCs) concentram individualmente uma variável bruta, ou um conjunto de variáveis brutas que são mais covariadas, e que tem por sua vez cada uma o peso (*loading*) maximizado (geralmente próximo de 1) enquanto os demais pesos são relativamente muito menores. Foram feitos 2 estudos de caso, e no primeiro caso foram selecionadas as seguintes (cinco) variáveis estatísticas hidrológicas por cada nascente: Q1%, Q5%, Q50% Q95% e Q99% e as seguintes variáveis biofísicas (seis) por nascente: CADA, CADA50m, PVNV, PVNV50m, declividade 400m (slope400) e de declividade 50m (slope50m).

Tabela 4.1. 1: Pesos (*loadings*) das componentes principais rotacionadas (RCs) calculadas com as PCs das variáveis brutas Q1%, Q5%, Q50% Q95% e Q99% no conjunto de nascentes. Valores hachurados mostram os pesos relevantes resultantes da maximização.

LOADINGS	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5
p (01%): mm/d	0.988	0.141	-0.025	-0.004	-0.054
p (05%): mm/d	0.984	0.159	0.052	0.020	0.057
p (50%): mm/d	0.817	0.418	0.396	0.003	0.003
p (95%): mm/d	0.300	0.947	0.091	0.071	0.011
p (99%): mm/d	0.087	0.994	0.033	-0.053	-0.007

No 1º estudo de caso, após a aplicação de ACP nas variáveis hidrológicas, a aplicação do método Varimax nas PCs originais maximizou os pesos (*loadings*) das vazões Q1%, Q5% e Q50% na componente rotacionada RC1, e das vazões Q95% e Q99% na RC2 (Tab. 4.1.1.), indicando na RC1 uma representatividade de vazões baixas e mediana, e na RC2 das vazões altas. As demais RCs não agregaram representatividade das variáveis hidrológicas selecionadas.

Tabela 4.1. 2: Pesos (*loadings*) das componentes principais rotacionadas (RCs) calculadas com as PCs das variáveis brutas CADA, CADA50m, PVNV, PVNV50m, declividade 400m (slope400) e de declividade 50m (slope50m) no conjunto de nascentes. Valores hachurados mostram os pesos relevantes resultantes da maximização.

loadings rotated (Pbio)	RC3	RC2	RC4	RC1	RC5	RC6
% CADA	-0.076	0.234	0.163	0.125	0.940	0.114
CADA (50m)	-0.073	0.967	0.091	-0.026	0.214	-0.067
% PVNV	0.089	-0.027	0.227	0.934	0.125	0.230
% PVNV (50m)	0.285	-0.076	0.066	0.244	0.123	0.913
Slope I (400m)	0.079	0.097	0.955	0.212	0.157	0.060
Slope I (50m)	0.957	-0.075	0.078	0.083	-0.076	0.247

Conforme destacados os pesos máximos na Tab. 4.1.2, a aplicação do método Varimax nas PCS das variáveis biofísicas brutas maximizou o peso da variável CADA na componente rotacionada RC5, e sucessivamente de CADA50m na RC2, de PVNV na RC1, de PVNV50m na RC6, de declividade 400m (slope400) na RC4, e de declividade 50m (slope50) na RC3.

O próximo passo foi tomar as RCs calculadas das variáveis hidrológicas (Tab. 4.1.1) e das variáveis biofísicas (Tab. 4.1.2) e calcular a correlação linear entre ambas de forma combinatória. Renomeando por simplicidade as componentes rotacionadas como RC-h (hidrológicas) e RC-bio (biofísicas) respectivamente, obteve-se na matriz de correlação (Tab. 4.1.3) as maiores correlações em torno de 0,23 a 0,28, sendo todas as demais menores ou não significativas. Não é incomum que os maiores coeficientes de

correlação sejam desta magnitude nos estudos hidrológicos de vazão e características de terreno (ASSANI *et al.*, 2006).

Desta forma resultou a correlação da RC1-h (ou seja, nas variáveis hidrológicas Q1%, Q5% e Q50%) mais significativamente com a variável PVNV50m ($p < 8,8\%$), e com modesta significância com a variável declividade (slope50m, $p < 15,2\%$). Para a RC2-h que agrega as vazões Q95% e Q99% resultou uma correlação maior com PVNV mas que mostrou-se apenas modestamente significativa ($p < 14,9\%$).

Tabela 4.1. 3: Matriz de correlação linear (superior) e nível de significância estatístico (inferior) entre as componentes principais rotacionadas RC-h e RC-bio (nesta última indicada na 1ª linha a variável biofísica bruta destacada individualmente por componente). Valores hachurados mostram os pesos e significâncias mais relevantes.

	Slope 50 m	CADA 50 m	Slope 400 m	PVNV	CADA	PVNV 50 m
	correlation	correlation	correlation	correlation	correlation	correlation
	RC3 (Pbio)	RC2 (Pbio)	RC4 (Pbio)	RC1 (Pbio)	RC5 (Pbio)	RC6 (Pbio)
RC1- h	0.23	-0.13	0.05	-0.1	0.02	0.28
RC2-h	-0.18	-0.09	-0.12	-0.24	0.15	0.03
RC3-h	-0.38	0.06	0.14	-0.12	0.06	-0.4
RC4-h	0.02	0.4	0.16	0.1	0.04	0.27
RC5-h	0.13	-0.14	0.2	-0.05	0.01	0.25
	pvalue	pvalue	pvalue	pvalue	pvalue	pvalue
	RC3 (Pbio)	RC2 (Pbio)	RC4 (Pbio)	RC1 (Pbio)	RC5 (Pbio)	RC6 (Pbio)
RC1- h	0.152	0.427	0.747	0.525	0.916	0.088
RC2-h	0.285	0.578	0.464	0.149	0.370	0.857
RC3-h	0.016	0.711	0.383	0.474	0.733	0.011
RC4-h	0.910	0.011	0.331	0.531	0.804	0.103
RC5-h	0.441	0.382	0.224	0.752	0.973	0.133

No segundo estudo de caso foram selecionadas as seguintes variáveis hidrológicas Q5%, Q50%, Q95% e os coeficientes de recessão α_{2017} e α_{2018} , e as mesmas variáveis biofísicas do 1º caso. Após a ACP das variáveis hidrológicas seguida da aplicação do método Varimax, resultou a maximização dos pesos (Tab. 4.1.4) das vazões Q5% e Q50% na componente rotacionada RC1, e assim sucessivamente Q95% na RC4, α_{2017} na RC2 e α_{2018} na RC3, indicando na RC1 uma representatividade de vazões baixas e mediana, na RC4 das vazões altas, na RC2 do coeficiente α_{2017} e na RC3 do coeficiente α_{2018} .

Tabela 4.1. 4: Pesos (*loadings*) das componentes principais rotacionadas (RCs) calculadas com as PCs das variáveis estatísticas hidrológicas brutas Q5%, Q50%, Q95% e os coeficientes de recessão α 2017 e α 2018 no conjunto de nascentes. Valores hachurados mostram os pesos mais relevantes resultantes.

loading rotated	RC1	RC4	RC3	RC2	RC5
p (05%): mm/d	0.869	0.291	-0.209	-0.306	-0.149
p (50%): mm/d	0.821	0.506	-0.141	-0.089	0.204
p (95%): mm/d	0.392	0.917	-0.001	0.074	-0.010
α 2017	-0.218	0.070	0.407	0.884	0.002
α 2018	-0.175	-0.028	0.918	0.355	-0.001

No passo seguinte as RCs calculadas das variáveis hidrológicas (Tab. 4.1.4) e das variáveis biofísicas (Tab. 4.1.2) foram correlacionadas linearmente de forma combinatória, obtendo-se conforme mostrado na matriz de correlação (Tab. 4.1.5) as maiores e mais significativas correlações entre 0,26 a 0,39, com demais correlações menores ou não significativas. Desta forma resultou relevantemente a correlação da RC3-h (variável hidrológica α 2018) com a variável declividade (slope50 com $p < 6,2\%$), seguido de RC2-h (variável hidrológica α 2017) com as duas variáveis de declividade (slope50m com $p < 8,5\%$ e slope400m com $p < 7,6\%$) e com a variável PVNV50m ($p < 2,2\%$).

As correlações com os índices de vegetação sugeriram que a cobertura arbórea não encontra-se entre as variáveis biofísicas de maior influência. As correlações relevantes sugeriram a declividade-50m estando negativamente relacionada com os dois coeficientes de recessão amostrais (2017 e 2018), dando a noção de que as nascentes com declividade mais acentuada nas cercanias da surgência associam-se ao maior amortecimento da depleção hidrológica na estiagem.

Uma associação de proporção inversa apareceu na correlação positiva de α 2017 com declividade-400m, ou seja, a maior declividade na área de contribuição reduziu o amortecimento da depleção de vazão na estiagem.

Também mostrou-se relevante a correlação negativa dos coeficientes de recessão com o tipo de solo, conforme mostrou a associação de α 2018 com PVNV e de α 2017 com PVNV50m. Ou seja, o amortecimento da depleção hidrológica aparece relacionado com o aumento da proporção de solo PVNV.

Tabela 4.1. 5: Matriz de correlação linear (superior) e nível de significância estatístico (inferior) entre as componentes principais rotacionadas RC-h e RC-bio (nesta última indicada na 1ª linha a variável biofísica bruta destacada individualmente por componente). Valores hachurados mostram os pesos e significâncias mais relevantes.

	Slope 50 m	CADA 50 m	Slope 400 m	PVNV	CADA	PVNV 50 m
	correlation RC3 (Pbio)	correlation RC2 (Pbio)	correlation RC4 (Pbio)	correlation RC1 (Pbio)	correlation RC5 (Pbio)	correlation RC6 (Pbio)
RC1- h	-0.04	-0.08	-0.16	0.1	-0.14	0.07
RC2-h	-0.03	0.04	-0.01	0.13	-0.07	-0.02
RC3-h	-0.32	-0.17	0.12	-0.26	-0.19	-0.07
RC4-h	-0.3	-0.12	0.31	0.08	-0.04	-0.39
RC5-h	-0.33	0.13	-0.18	0.08	-0.01	-0.45
	pvalue RC3 (Pbio)	pvalue RC2 (Pbio)	pvalue RC4 (Pbio)	pvalue RC1 (Pbio)	pvalue RC5 (Pbio)	pvalue RC6 (Pbio)
RC1- h	0.839	0.659	0.360	0.568	0.417	0.701
RC2-h	0.854	0.809	0.952	0.476	0.681	0.904
RC3-h	0.062	0.335	0.509	0.136	0.284	0.678
RC4-h	0.085	0.498	0.076	0.653	0.834	0.022
RC5-h	0.059	0.472	0.313	0.640	0.947	0.007

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA O FUTURO

Este trabalho investigou os padrões hidrológicos de um conjunto de medidas diretas de vazão de água superficial em locais com surgência de nascentes na bacia do Ribeirão das Posses (Extrema, MG), localizada na Serra da Mantiqueira, e buscou definir modos de variabilidade do regime hidrológico das nascentes no espaço e no tempo, e a influência decorrente de fatores fisiográficos como a topografia, a vegetação e o solo. O trabalho mostra pioneiramente o conjunto mais amplo de medidas de vazão em nascentes e variáveis hidroclimatológicas, em termos de variabilidade espacial e dimensão temporal, em uma bacia na Serra da Mantiqueira e possivelmente no Brasil segundo nosso conhecimento até então, com a busca da explicação de grupos funcionais de nascentes, variação de extremos e sua dependência de fatores fisiográficos.

Foi utilizado um amplo conjunto de medições de campo, com medidas de vazão na base mensal com método manual de 39 nascentes desde janeiro/2016 até outubro/2019, estações meteorológicas automáticas (Vaisalla WXT) e estações pluviométricas convencionais (ANA) para estimativa de precipitação, nível automático do aquífero em poços piezométricos dispostos na faixa ripária e próximos de nascentes, e de vazão no exutório da bacia com estimativa do escoamento básico. Foi calculado um conjunto de séries temporais das nascentes desagregados na base diária utilizando-se métodos estatísticos de Regressão Linear simples (RL) e Múltipla (RLM) e Análise de Componentes Principais (ACP). Utilizou-se técnicas de Análise de Componentes Principais Rotacionadas (ACPR) posteriormente para a estimativa de parâmetros estatísticos do regime hidrológico das nascentes e análise de influência de características biofísicas das áreas de contribuição, em especial de declividade, vegetação arbórea e tipo de solo.

O regime de vazão em todas as nascentes sem exceção mostrou características sazonais em coerência com o regime de chuvas e de escoamento básico na bacia. O regime piezométrica na faixa ripária e nas áreas de encosta foram úteis na explicação de um modelo de base diária para desagregação da vazão das nascentes. Determinou-se um padrão de vazões máximas e mínimas (em Ls^{-1}) em função da área de contribuição de todas as nascentes que levou à identificação de dois grupos funcionais de vazão específica (em $mm d^{-1}$): o primeiro definido como de nascentes de alta produtividade, com regime de vazão específica na amplitude de $0,50 mm d^{-1}$ (mínima) a $2,6 mm d^{-1}$

(máxima), e o segundo de baixa produtividade, com regime de vazão específica na amplitude de $0,02 \text{ mm d}^{-1}$ (mínima) a $0,76 \text{ mm d}^{-1}$ (máxima). O grupo de baixa produtividade foi dominante nas nascentes de menor área de contribuição, na maioria < 10 ha. Estes grupos de alta e baixa produtividade não foram de nascentes estritamente exclusivas entre si ao considerar-se o regime de extremos de vazão, mas foram poucas exceções, tendo havido uma razoável separação.

No grupo de nascentes de alta produtividade mostrou-se ser mais bem estabelecida uma relação de proporção inversa do coeficiente de recessão com as vazões mínimas, o que sugere caracterizar este grupo com uma capacidade de armazenamento suficiente para prover regimes de descarga suaves ao longo da estiagem. No grupo de nascentes de baixa produtividade o regime de descarga sugere ser limitado e de características possivelmente heterogêneas comparando-se as nascentes.

As análises com RL e ACPR sugeriram de forma geral que os parâmetros hidrológicos de vazão específica mínima (Q5%) e do coeficiente de recessão (α) foram bastante sensíveis à variabilidade do índice de declividade a 50 m. Isto sugere a noção de que as nascentes operam durante a estiagem em uma faixa de dependência de zonas de contribuição muito próximas e especialmente sensíveis à declividade nas cercanias, possivelmente desconectadas da área de contribuição total. Pela RL as nascentes do grupo de alta produtividade foram em especial as mais sensíveis à esta dependência, enquanto pela ACPR não foi possível distinguir os grupos, uma vez que a análise não discriminou os grupos no conjunto amostral.

As análises de RL e ACPR dos parâmetros hidrológicos com os índices de vegetação não se mostraram conclusivas. Não se pode estipular que esta ausência de conclusão deu-se devido à não-causalidade, ou à relativa baixa variabilidade de vegetação arbórea no grupo amostral. De forma modesta pela RL, mas significativamente pela ACPR, indicou-se que o amortecimento da depleção hidrológica aumenta com a proporção de solo PVNV.

Este trabalho contém informações que poderão auxiliar na identificação de áreas preferenciais para implantação de projetos de manejo da vegetação visando à otimização da disponibilidade hídrica. A identificação de nascentes com padrões diferentes do regime de recessão pode se desdobrar em diferentes formas de resposta às possíveis alterações do manejo do solo e vegetação na área de contribuição. Há também grande sensibilidade de certo grupo de nascentes às variantes de declividade topográfica nas

cercanias da surgência, o que deve ser possivelmente um critério de ponderação para a previsão do regime de vazão sob alteração das condições externas de manejo.

As questões levantadas pelo trabalho certamente ainda não foram plenamente respondidas, e ainda podem ser aprofundadas sob muitas abordagens e pontos de vista. Como sugestões para o futuro, recomenda-se trabalhar em investigações que tragam mais informações e profundidade nos seguintes tópicos:

- 1) Avaliação da incerteza estatística na determinação das áreas de contribuição, das medidas observacionais de campo, das estimativas da vazão na base diária, e da incerteza total dos parâmetros hidrológicos estatísticos;
- 2) Melhor resolução espacial na determinação de parâmetros de declividade nas cercanias das nascentes, de forma a aprofundar as respostas de sensibilidade à topografia
- 3) Informações mais específicas de variabilidade do solo e seus parâmetros físicos, com ênfase nas cercanias das nascentes
- 4) Desenvolvimento de estudos com técnicas independentes como perfis de eletrorresistividade do solo, com amostragem piezométrica conjunta em locais estratégicos, para gerar informações alternativas e complementares.
- 5) Acompanhamento do monitoramento hidrológico nas áreas de restauração florestal da bacia do Posses, de forma a amostrar consequências de variação de cobertura vegetal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Pagamento por serviços ambientais. Unidade 1. Brasília: ANA, 2016

ALVARENGA, A. P. **Avaliação inicial da recuperação de mata ciliar em nascentes**. 2004, 175 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Ambiental) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

ALVARENGA, V. I. A. A. **Impactos hidrológicos decorrentes de diferentes cenários de cobertura do solo e mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica da serra da mantiqueira, utilizando o modelo dhsvm**. 2015. 171 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 1-27, 2004.

AZEVEDO, T. S. DE. **Legislação e Geotecnologias na Definição das Áreas de Preservação Permanente e das Reservas Legais : Aplicação à Bacia do Córrego das Posses , Município de Extrema – MG**. 2008. 168 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

BACELLAR, L. D. A. P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo.br**, v. 1, p. 1–39, 2005.

BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v.4, n.1, p. 131–149, 2008.

BERTOL, O. J. et al. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 781-792, 2007.

BEST, A. et al. **A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability**. Austrália: Murray-Darling Basin Commission, 56 p., 2003.

BREMER, L. et al. Bridging Theory and Practice for Monitoring in Water Funds. n. November. **Journal of Environmental Protection**, v. 7, n. 12, 98 p, 2015.

BROWN, A. E. et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 310, p. 28-61, 2005.

BROWN, S.; ZARIN, D. What does zero deforestation mean? **Science**, Washington, v. 342, n. 6160, p. 805-807, 2013.

CALDATO, L.; SCHUMACHER, M. V. O uso de água pelas plantações florestais – uma revisão. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 509–518, 2013.

CALDER, I., et al. **Towards a new understanding of forests and water**. Unasyuva,

2007.

CALHEIROS, R. DE O.; TABAI, F. C. V. **Cadernos da Mata Ciliar**. 2 ed ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Departamento de Proteção da Biodiversidade, 2009.

CALHEIROS, R. O. et al. **Preservação e Recuperação de Nascentes (de água e vida)**. Piracicaba: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ-CTRN, 53p. 2004.

CASTANY, G. **Tratado practico de las aguas subterráneas**. 1971. Omega, Barcelona.

CONORATH, G. D. **Águas urbanas: análise morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica do rio cachoeira - Joinville/SC**. 2012. 159 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

CRUZ, P. P. N. DA et al. Hydrological modeling of the Ribeirão das Posses: An assessment based on the Agricultural Ecosystem Services (AgES) watershed model. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 3, p. 351, 2017.

ESRI. **Arc Hydro Tools - Tutorial**. New York, p. 136, 2009.

FARIA, A. P. A dinâmica de nascentes e a influência sobre os fluxos nos canais. **A Água em Revista**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 74-80, 1997.

FELIPPE, M. F. **Caracterização e tipologia de nascentes em Unidades de Conservação de Belo Horizonte-MG com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais**. 2009. 277 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2009.

FELIPPE, M. F. **Gênese e dinâmica de nascentes: contribuições a partir da investigação hidrogeomorfológica em região tropical**. 2013. 254 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2013.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES, A. P. J. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d' água e propostas de especialistas. **Geografias**, v. 9, p. 70–81, 2013.

FERRAZ, S. F. B. et al. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, v. 29, n. 2, p. 187–200, 2014.

FERREIRA, A. T. S. et al. Mapeamento costeiro com aeronave remotamente pilotada: estudo de caso da praia da enseada do Guarujá, São Paulo, Brasil. In: II Simpósio Brasileiro sobre Praias Arenosas - II SBPA & XI Encontro Nacional de Gerenciamento Costeiro - XI ENCOGERCO. **Anais...** Florianópolis: 2018, p. 625-627.

GROPPO, J. D. **Caracterização hidrológica e dinâmica do nitrogênio em uma microbacia com cobertura florestal (Mata Atlântica), no Parque Estadual da Serra do Mar, núcleo Santa Virgínia**. 2010. 81 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2010

IRRIGART - Engenharia e Consultoria em Recursos Hídricos e Meio Ambiente Ltda. **Plano Municipal de Recursos Hídricos do Município de Extrema**, Relatório Final, setembro de 2013.

KFOURI, A.; FAVERO, F. **Projeto Conservador das Águas Passo a Passo: Uma descrição didática sobre o desenvolvimento da primeira experiência de pagamento por uma Prefeitura Municipal no Brasil**. Brasília DF: The Nature Conservancy do Brasil, 60 p. Série Água, Clima e Floresta, Projeto Extrema- IV-1ed. 2011.

KRESIC, N.; STEVANOVIC, Z. **Groundwater Hydrology of Springs** – Engineering, Theory, Management, and Sustainability. Burlington: Elsevier, p. 573, 2010.

LIMA, G. C. **Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das posses, Extrema (MG)**. 2010. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

LIMA, G. C. et al. Estimativa do potencial de recarga na sub-bacia das posses, Extrema (MG), em função dos atributos fisográficos, pedológicos e topográficos. **Geociências**, v. 32, n. 1, p. 51–62, 2013.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Engenharia de Recursos Hídricos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, EdUSP, 798 p. 1978.

MAIDMENT, D. R. Arc Hydro Data Model: A Hydrologic Data Integration Tool. **Weather**, p. 18–19, 2004.

MAILLET, E. T. **Essais d'hydraulique souterraine et fluviale**. Paris: Meschede, 1905. 218 p.

MALÍK, P.; VOJTKOVÁ, S. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. **Environmental Earth Sciences**, v. 65, p. 2245–2257, 2012.

MARTIN, C. T. et al. Fine-scale climate variability in a complex terrain basin using a high-resolution weather station network in southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, p. 1-17, 2018.

MEINZER, O. E. Plants as indicators of groundwater. **U.S. Geol. Surv. Water- Supply Paper 577**, 91p. 1927.

MEIRELES, L. D.; KINOSHITA, L. S.; SHEPHERD, G. J. Composição florística da vegetação altimontana do distrito de Monte Verde (Camanducaia, MG), Serra da Mantiqueira Meridional, Sudeste do Brasil. **Rodriguésia [online]**, v. 65, n. 4, p. 831-859, 2014.

MELLO, C. G. S. **Funcionamento do mecanismo remunerador do projeto conservador das águas no município de Extrema-MG**. 2012. Monografia (Curso de Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

MERWADE, V. **Watershed and stream network delineation using ArcHydro Tools**. p. 1–22, 2012.

MORAES, J. M. et al. Water storage and runoff processes in plinthic soils under forest and pasture in Eastern Amazonia. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 12, p. 2509–2526, 2006.

MOTA DA SILVA, J. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba**. 2014. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2014.

NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis, **Water Resources Research**, Vol. 26, pp. 1465-1473, 1990.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 252-262, 2016.

OLIVEIRA, L. F. C. DE; FIOREZE, A. P. Estimativas de vazões mínimas mediante dados pluviométricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 9–15, 2011.

PAGIOLA, S, CARRASCOSA V. G., TAFFARELLO, D. **Brazil's experience with payments for environmental services**. Washington: Latin America and Caribbean Sustainable Development Department, 2013.

PEREIRA, P.H. et al. **Conservador das Águas: 5 Anos**. Extrema: Departamento de Meio Ambiente de Extrema. Extrema-MG, Departamento de Meio Ambiente, Extrema, p.135. 2010.

PINTO, L. V. A, et al. Estudo da vegetação como subsídios para propostas de recuperação das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 775-793, 2005.

PRIMAVESI, A. **O manejo ecológico do solo: agricultura em regiões tropicais**. Ed. Nobel, São Paulo. 1982.

RANZINI, M. **Conceitos, métodos e equipamentos de medição de vazão**. 11º Curso de Hidrologia Florestal, 2018. Instituto Florestal – Laboratório de Hidrologia Florestal “Walter Emmerich”, 2018.

RECH, M. A. et al. Determinação de Modelo Hidrográfico de Escoamento para a Microbacia do Arroio Inhamandá a partir de parâmetros morfométricos das imagens dos sensores Aster e SRTM. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 1341–1348, 2011.

RICHARDS, R. C. et al. Governing a pioneer program on payment for watershed services: Stakeholder involvement, legal frameworks. and early lessons from the Atlantic forest of Brazil. **Ecosystem Services**, v. 16, p. 23–32, 2015.

ROCHA, H. R. ; DOMINGUES, L. M. . **Efeitos da seca de 2013/2014 no Sistema Cantareira: uma breve revisão**. In: Pedro Roberto Jacobi; Ana Paula Fracalanza; Vanessa Empinotti. (Org.). Governança da Água no contexto da escassez hídrica. 1ed.São

Paulo: IEE-USP; UFABC e GovAmb, 2017, v. , p. 1-248.

ROSA FILHO, E. F. Caracterização da depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga, α , de Maillet. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba:UFPR, 1993, v. 41, p. 125-144, 1993

ROSA, F. S. et al. Estrutura da paisagem, relevo e hidrografia de uma microbacia como suporte a um programa de pagamento por serviços ambientais relacionados à água. **Ambiente & Água- An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 9, n. 3, p. 526-539, 2014.

SAAD, S. I. et al. Avaliação do Modelo Integrated Valuation Of Ecosystem Services And Tradeoffs Para o Sistema Cantareira: Módulos de Hidrologia e de Perda de Sedimentos. In: **XIX Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**, n. 11, p. 1–16, 2011.

SALEMI, L. F., et al. Aspectos hidrológicos da recuperação florestal de áreas de preservação permanente ao longo dos corpos de água. **Revista do Instituto Florestal**, v. 23, n. 1, p. 69-80, 2011.

SANTANA, D. P. **Manejo integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003.

SHARP, E. R. et al. **InVEST 3.1.0 User's Guide**. The Natural Capital Project Stanford, 2014, 325.

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century**. Cambridge University Press (UK), p. 452, 2003.

SILVA, B. P. C. et al. Digital soil mapping including additional point sampling in posses ecosystem services pilot watershed, southeastern Brazil. **Scientific Reports Nature**, p. 1-12, 2019.

SILVA, L. A. da. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande - MG**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009a.

SILVA, R. F. G. **Estimativa de parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos em áreas de embasamento através de métodos indiretos**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009b.

TAMBOSI, L. R. et al. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 151–162, 2015.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M.. Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 4, p. 67-75, 2010.

VALENTE O. F., GOMES M, A. **Conservação de nascentes – Hidrologia e Manejo de bacias hidrográficas de cabeceiras**. Viçosa, Ed. Aprenda Fácil, 210p., 2005.

VAN DIJK, A. I. J. M.; KEENAN, R. J. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1–2, p. 1–9, 2007.

VASHISHT, A. K.; BAM, B. Formulating the spring discharge-function for the recession period by analyzing its recession curve: A case study of the Ranichauri spring (India). **Journal of Earth System Science**, v. 122, n. 5, p. 1313–1323, 2013.

VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970–978, 2010.

WATANABE, M. D. B. **Mata nativa e cana-de-açúcar: cálculo do valor dos serviços ecossistêmicos vinculados aos ciclos da água, do carbono e do nitrogênio utilizando a análise emergética**. 2008. 195 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 2008.

ZANIN, P. R.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. Características Hidrogeológicas De Nascentes Situadas Em Diferentes Modelados De Relevô. **Simp. Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2013.

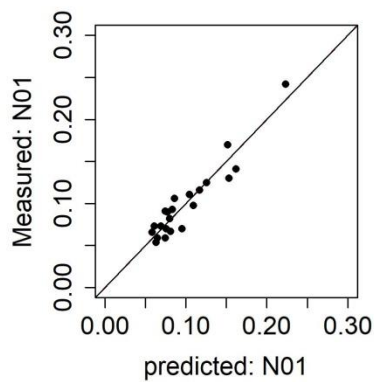
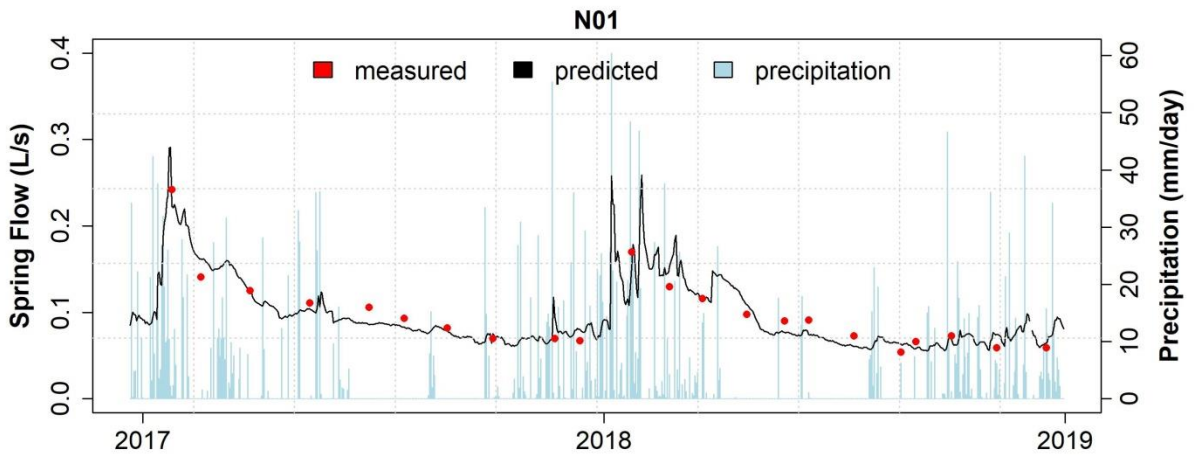
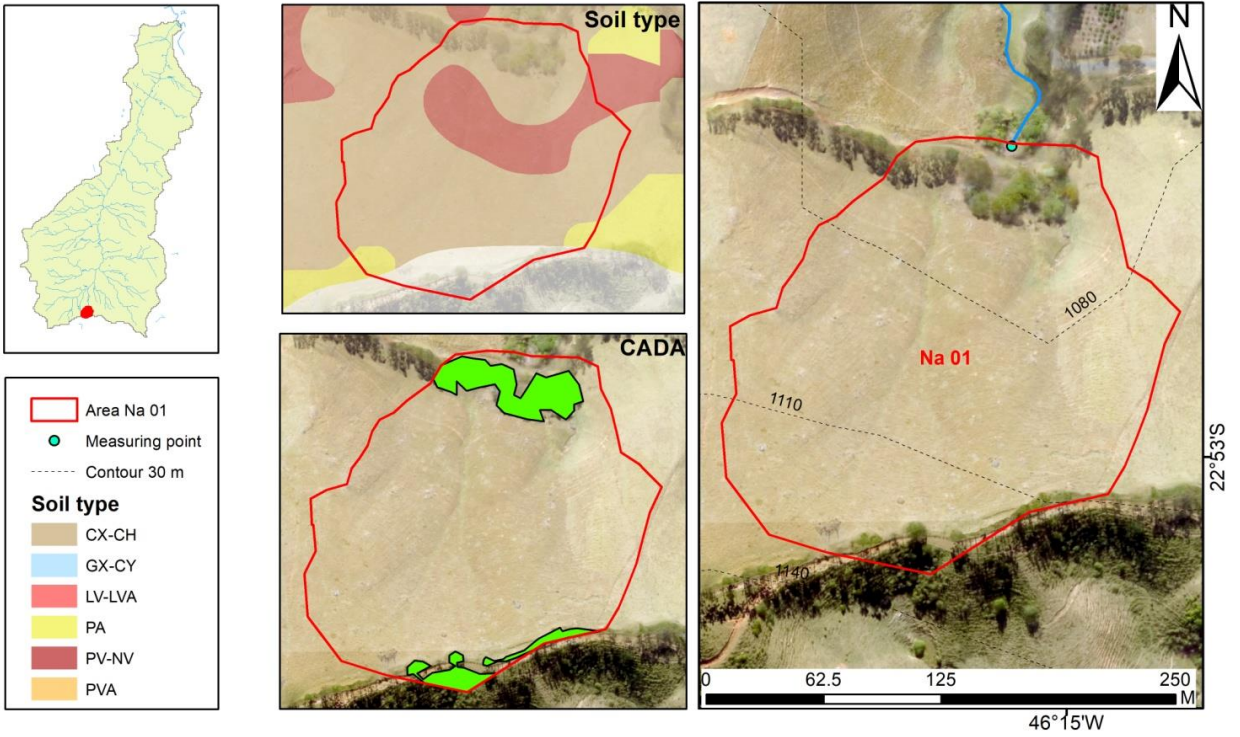
ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. **Catchment hydrology predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance**. Cooperative Research Centre For Catchment Hydrology, 1999. 42 p. Technical Report 99/12.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; DE MORAES, J.M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, v. 222, p. 29-38, 2006.

ZOLIN, C. A., et al. Minimização da erosão em função do tamanho e localização das áreas de floresta no contexto do Programa “Conservador das Águas”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2157-2166, 2011.

APÊNDICES

Spring NA 01

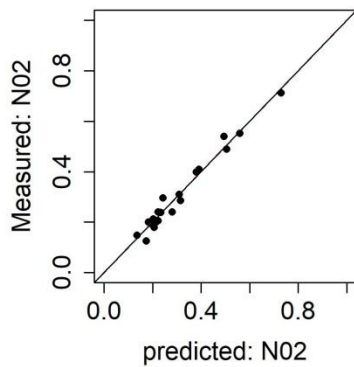
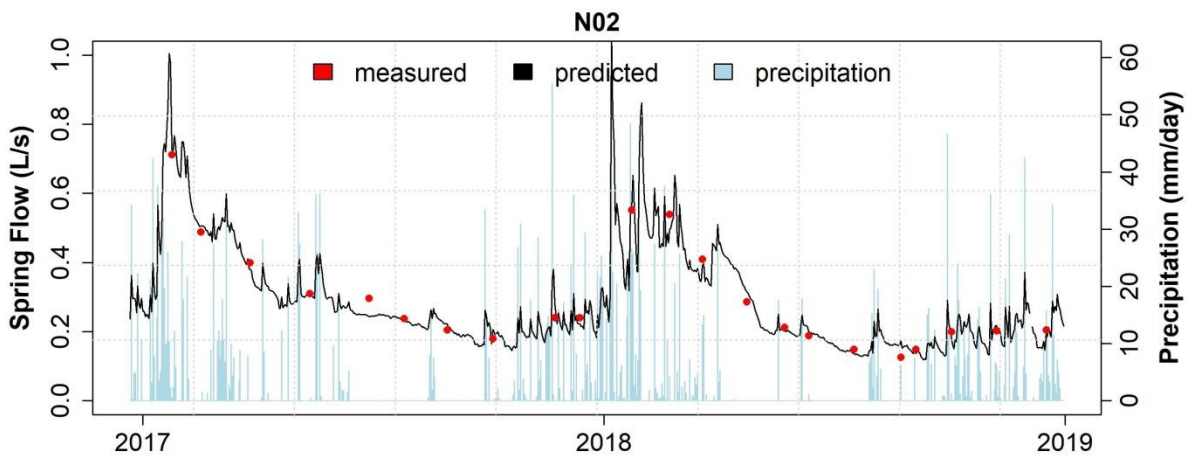
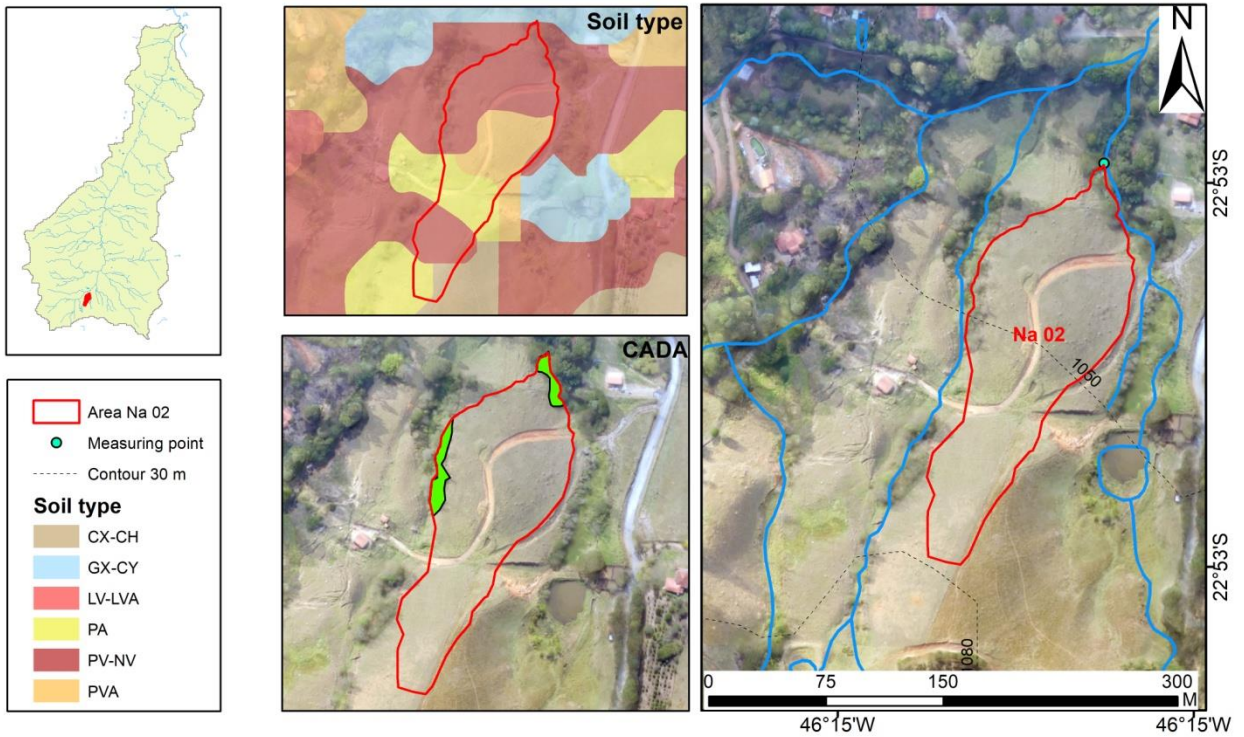


G3: PC 1,2

p-value:
2.286e-13

R2: 0.89

Spring NA 02

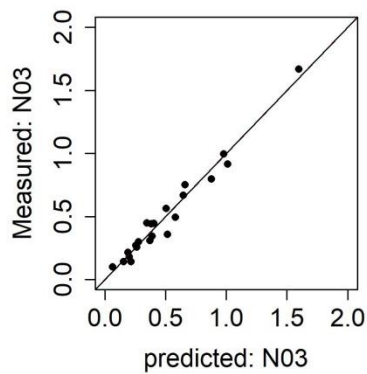
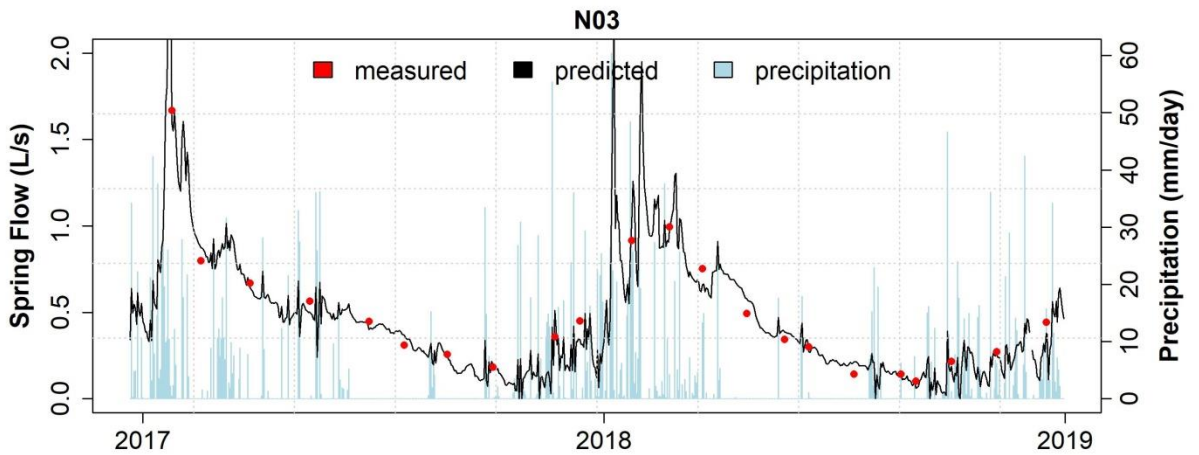
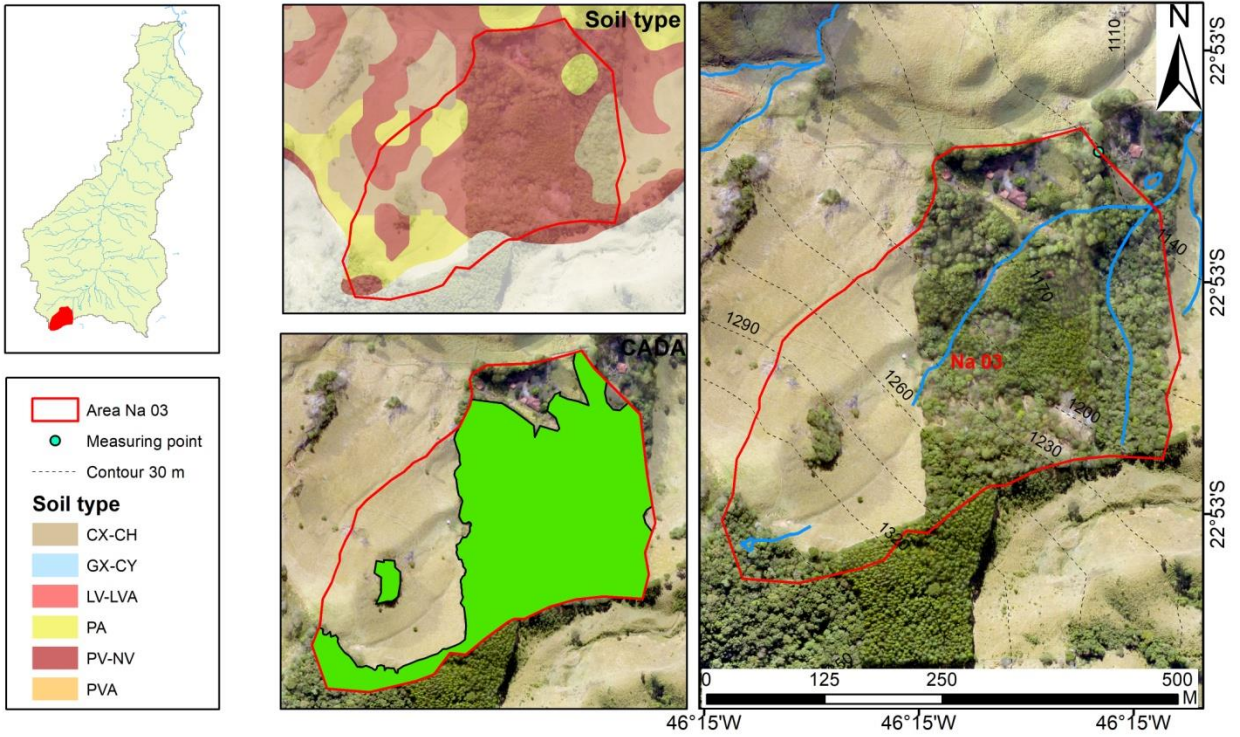


G4: PC 1,2,3

R2: 0.972

p-value: 3.404e-16

Spring NA 03

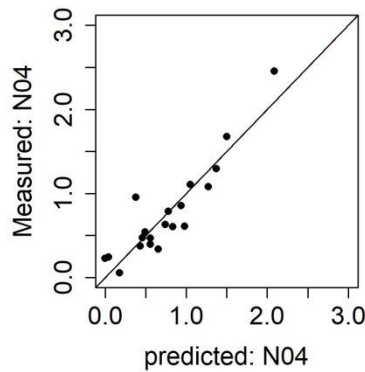
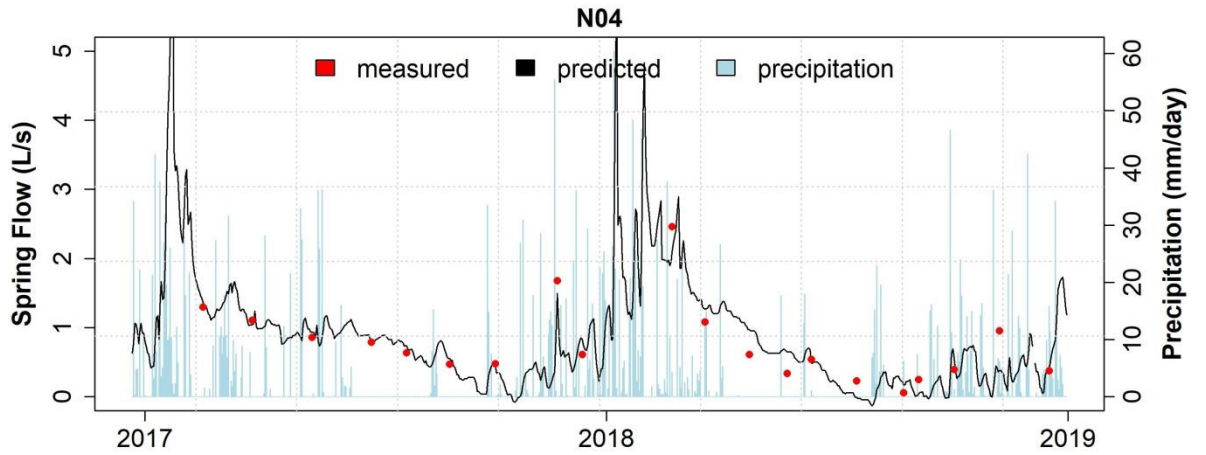
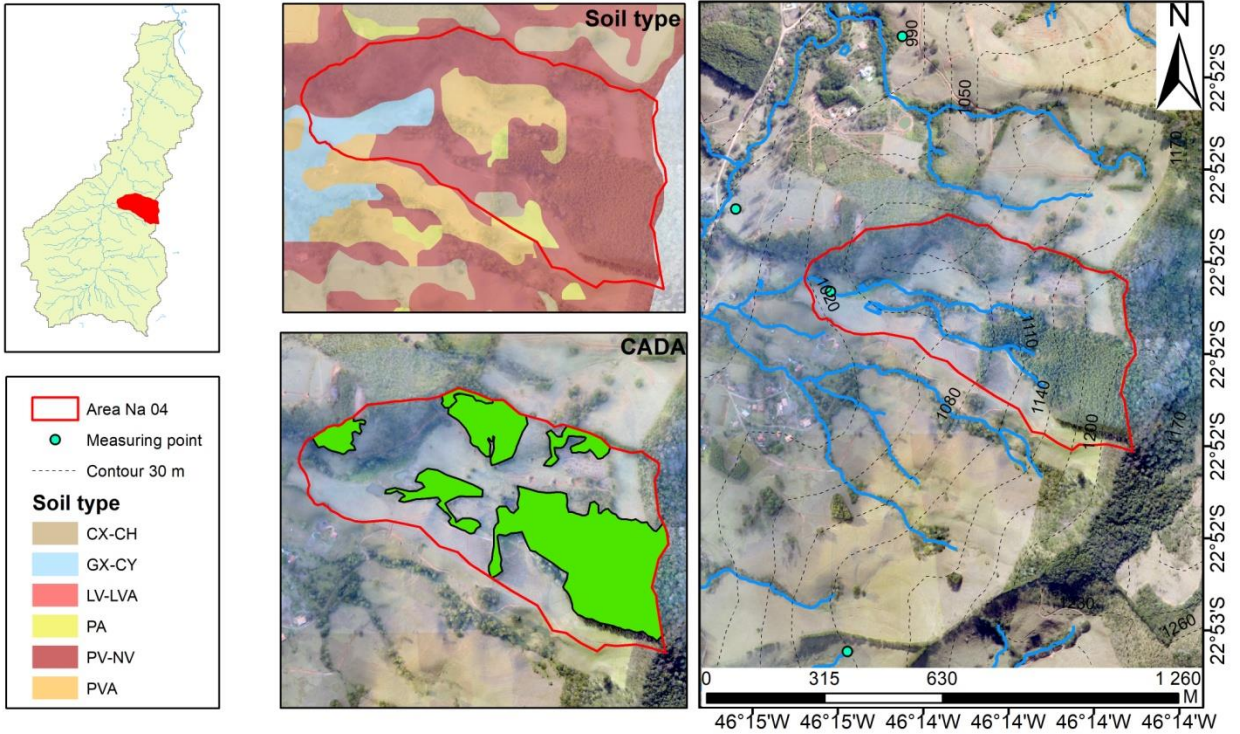


G4: PC 1,2,3,4

R2: 0.964

p-value: 4.232e-16

Spring NA 04

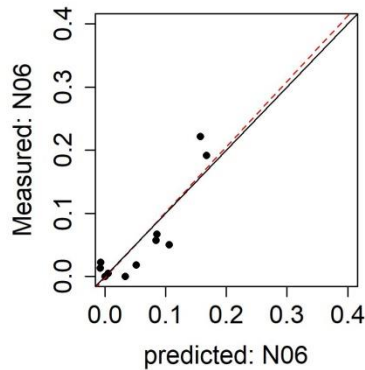
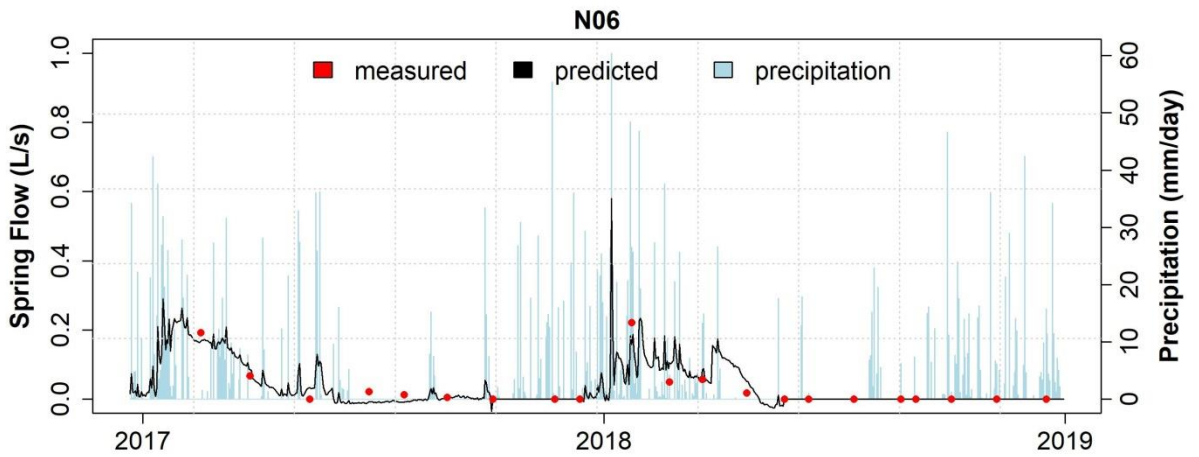
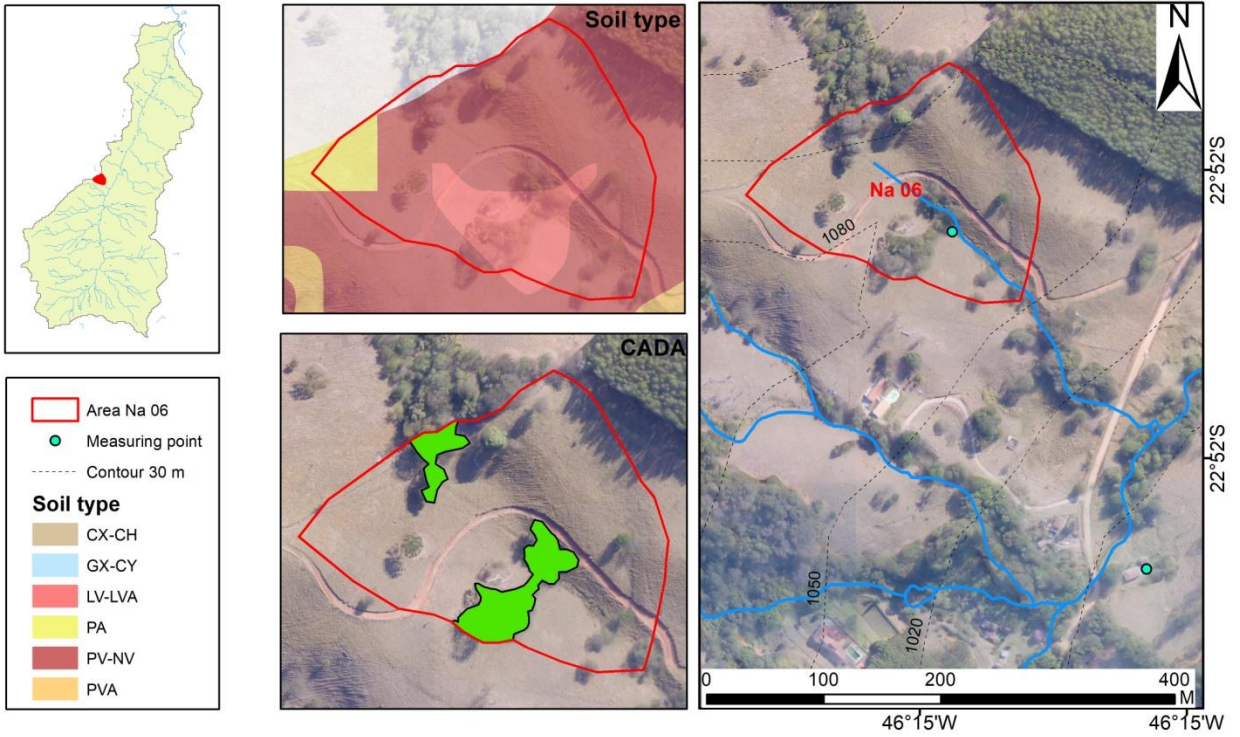


G6: PC 1,2,3

R2: 0.827

p-value: 1.76e-08

Spring NA 06

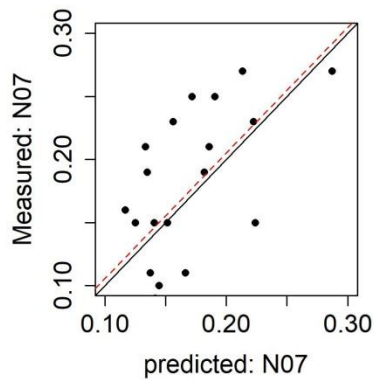
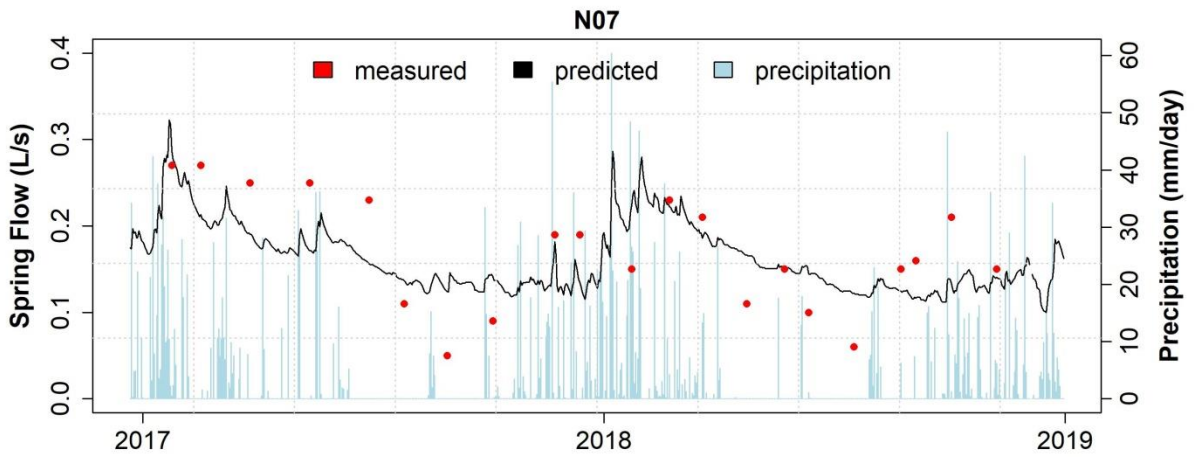
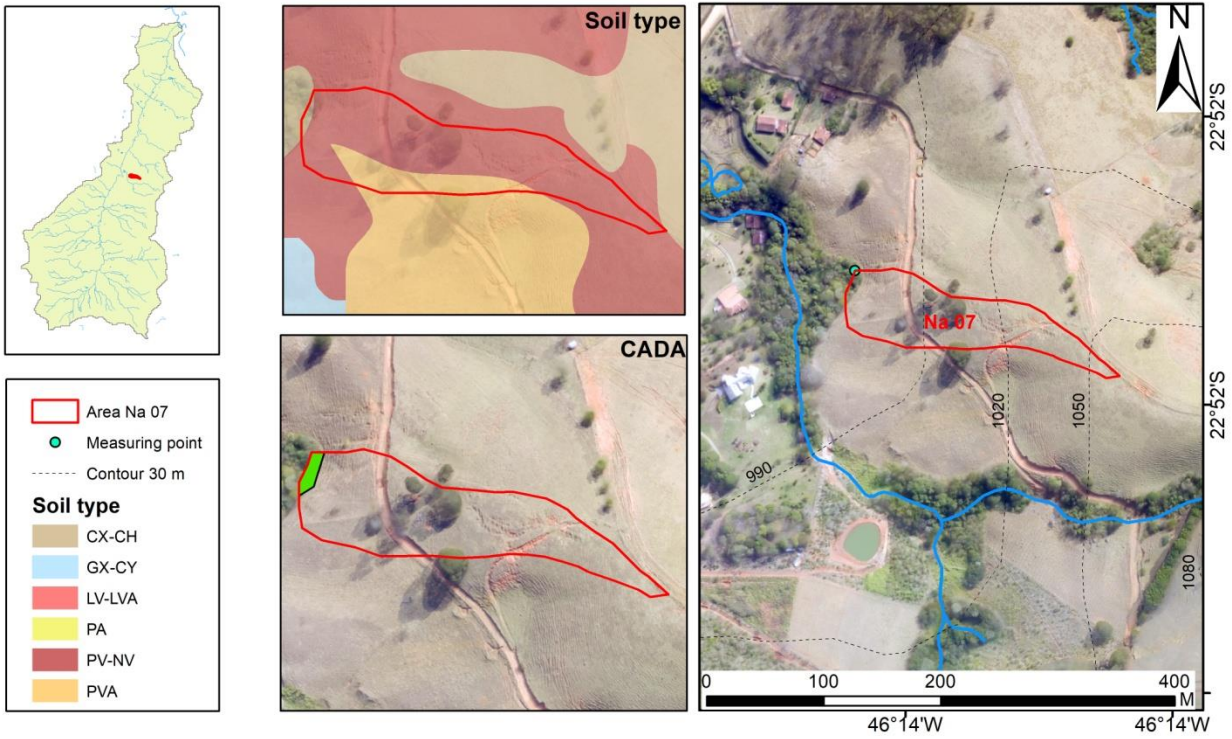


G4: PC 1,3, 4

R2: 0.832

p-value: 1.067e-08

Spring NA 07

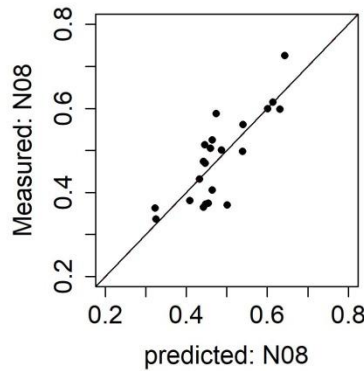
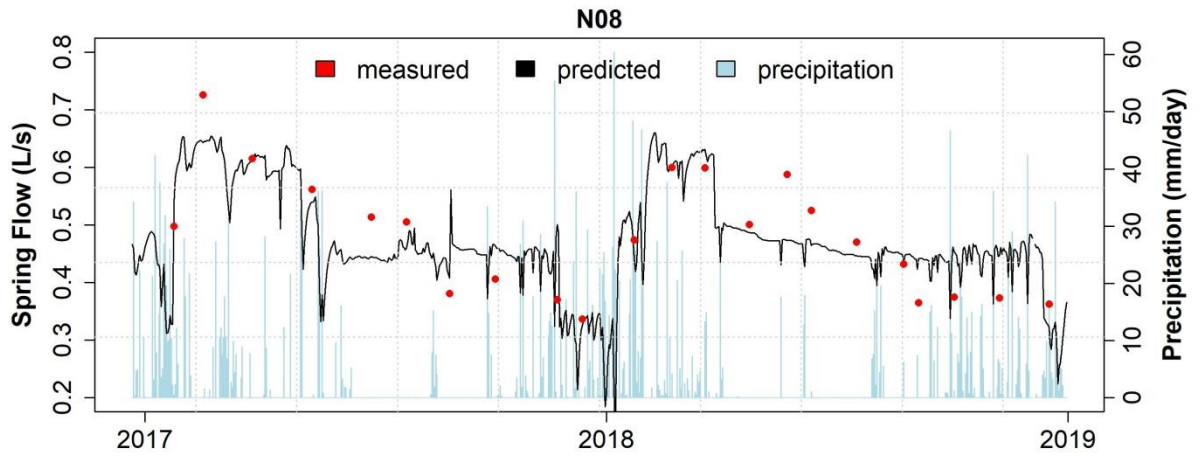
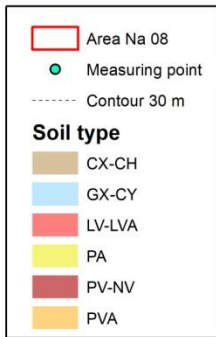
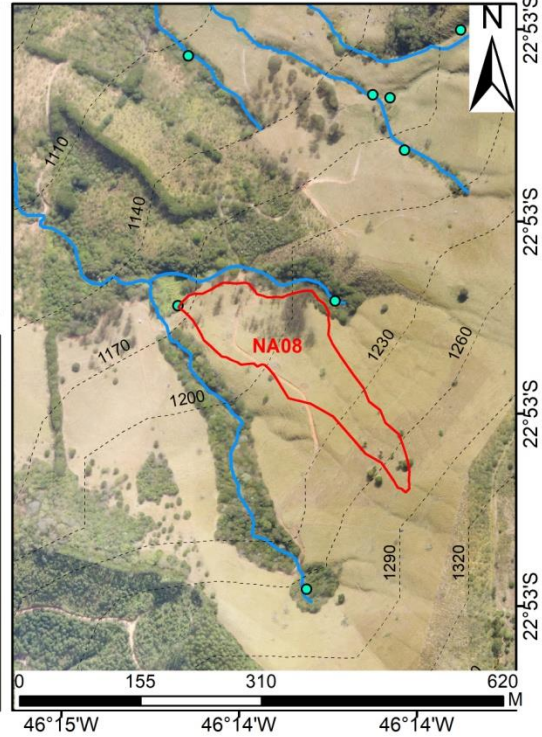
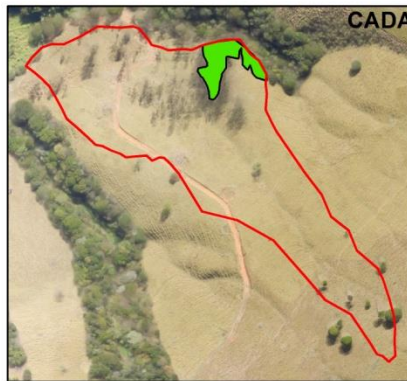
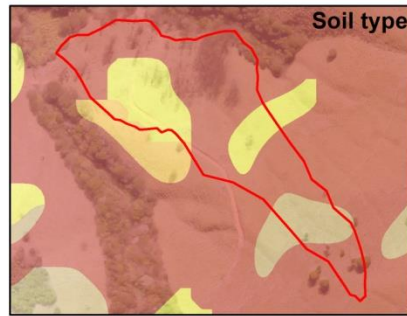


G1: PC 1

R2: 0.378

p-value: 0.001788

Spring NA 08

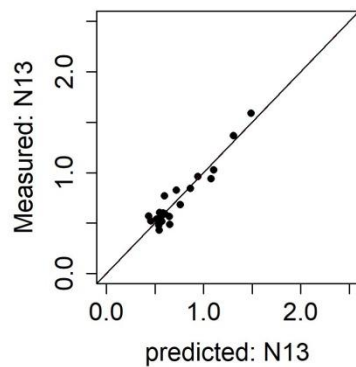
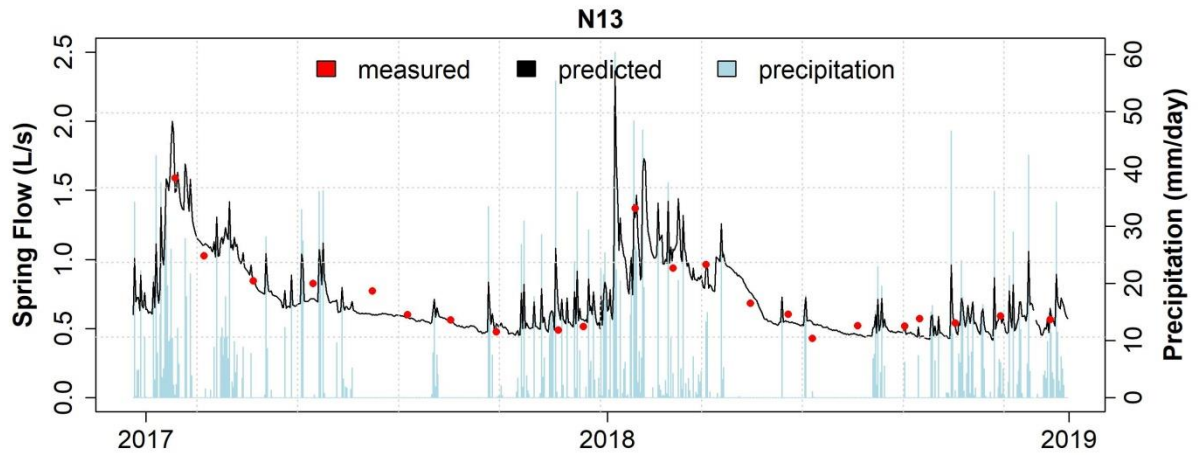
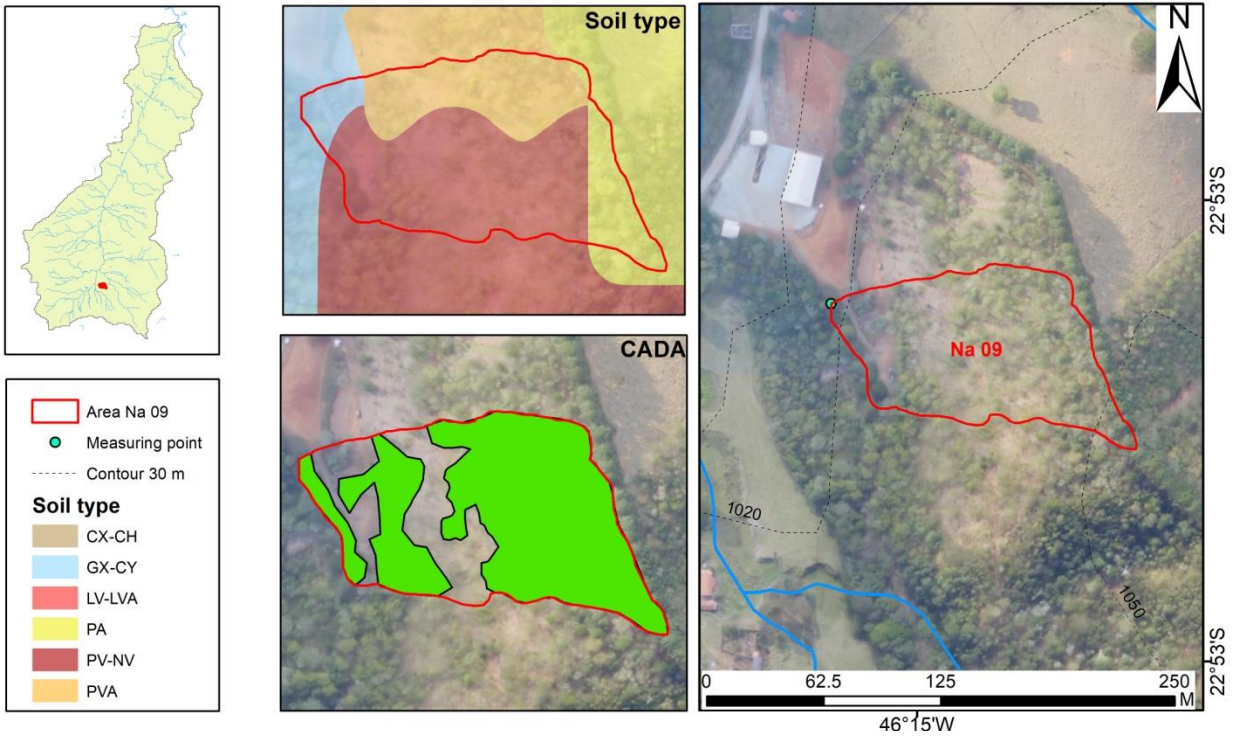


G1: PC 1, 2

R2: 0.652

p-value: 3.361e-06

Spring NA 09

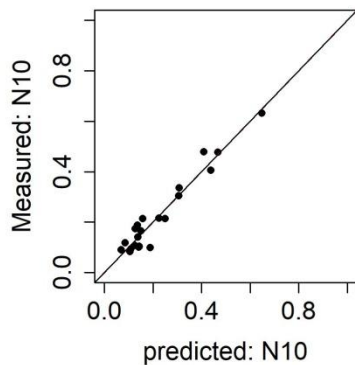
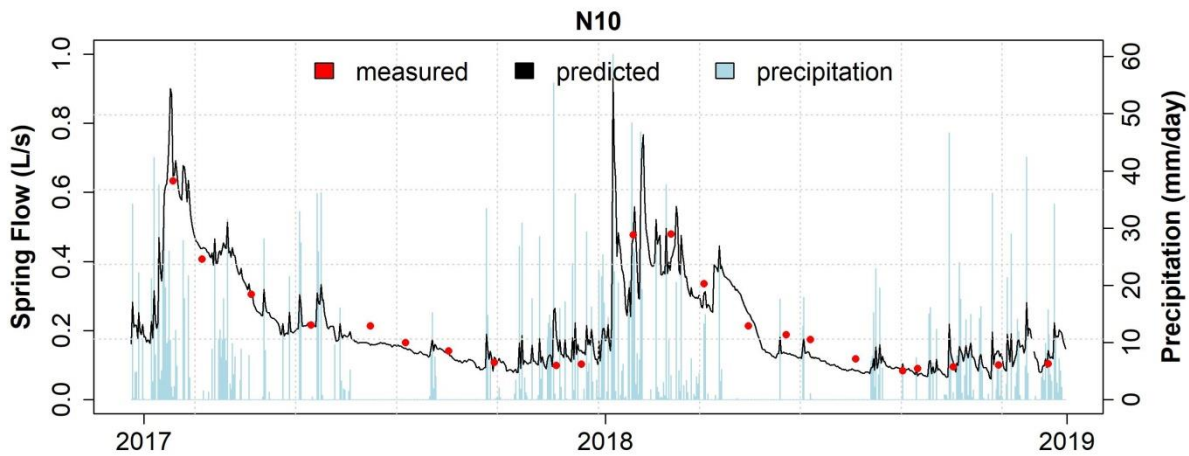
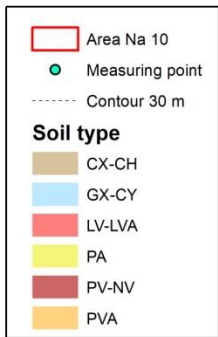
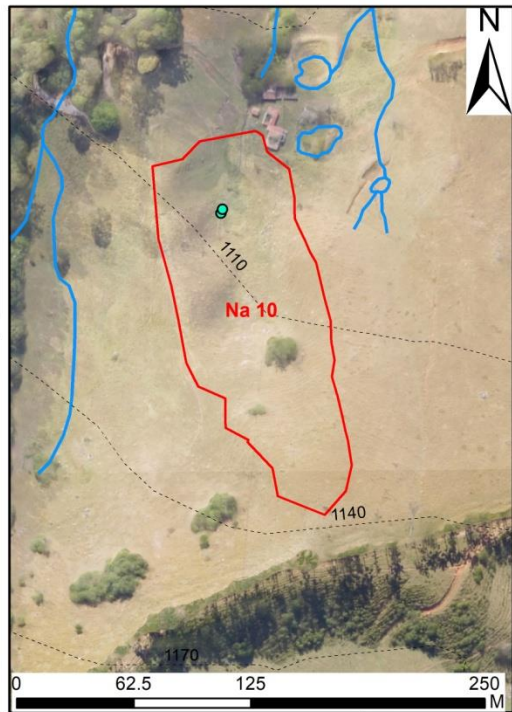
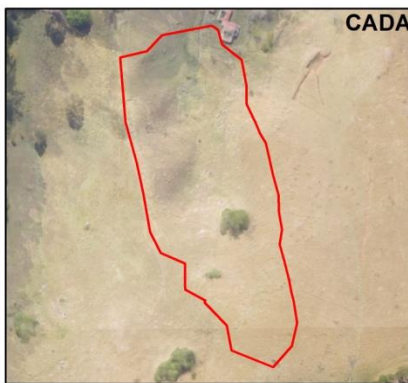


G4: PC 1,2, 3

R2: 0.906

p-value: 1.57e-13

Spring NA 10

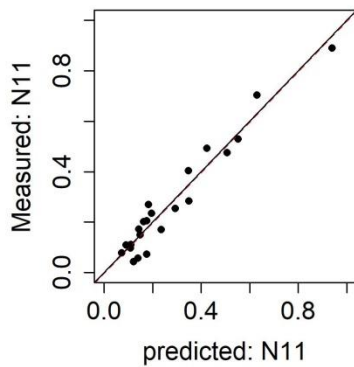
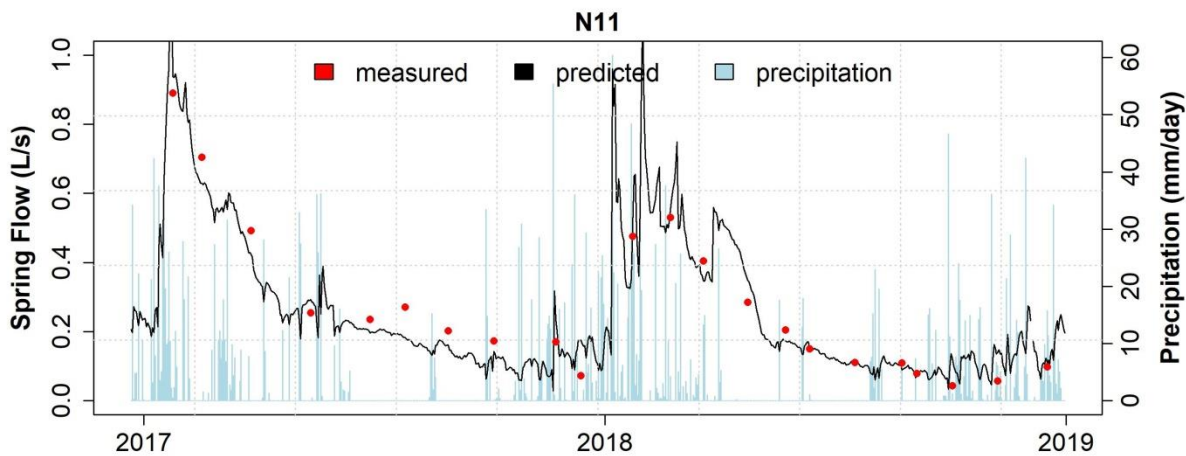
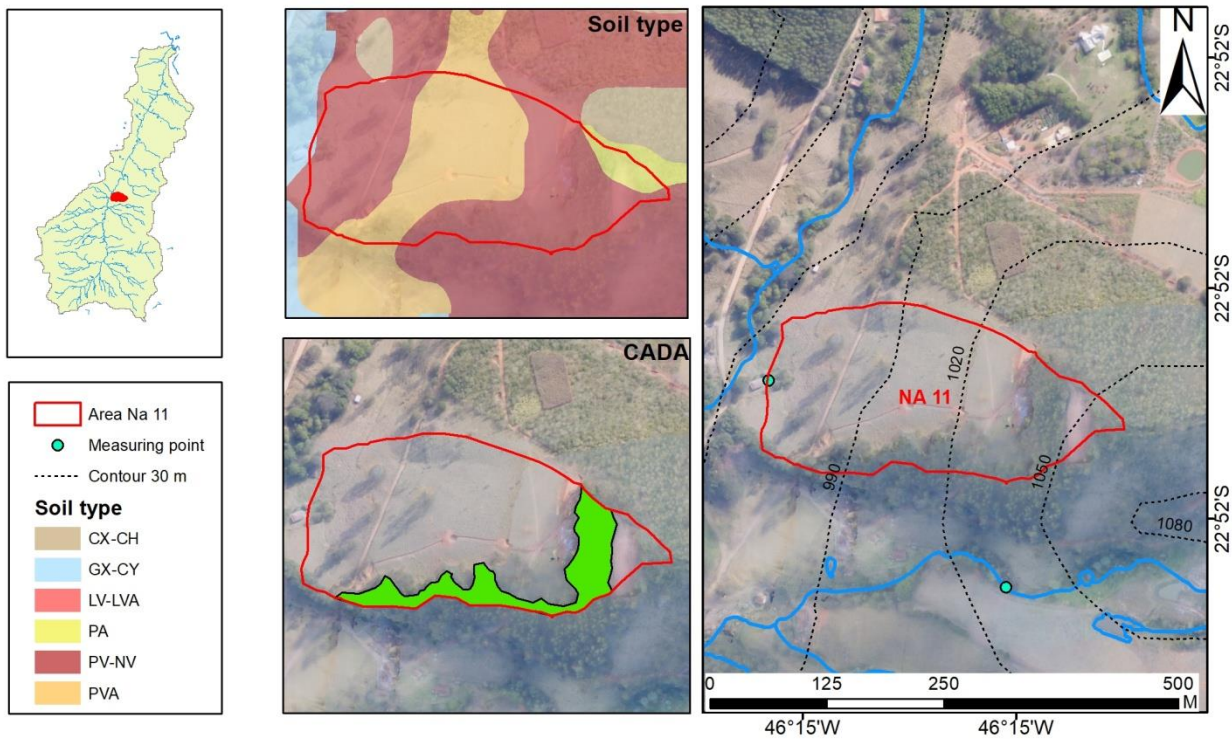


G4: PC 1,2,3

R2: 0.933

e: 1.973e-13

Spring NA11

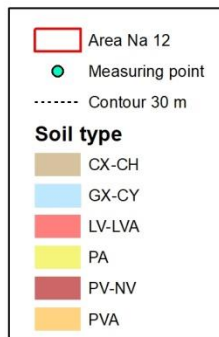
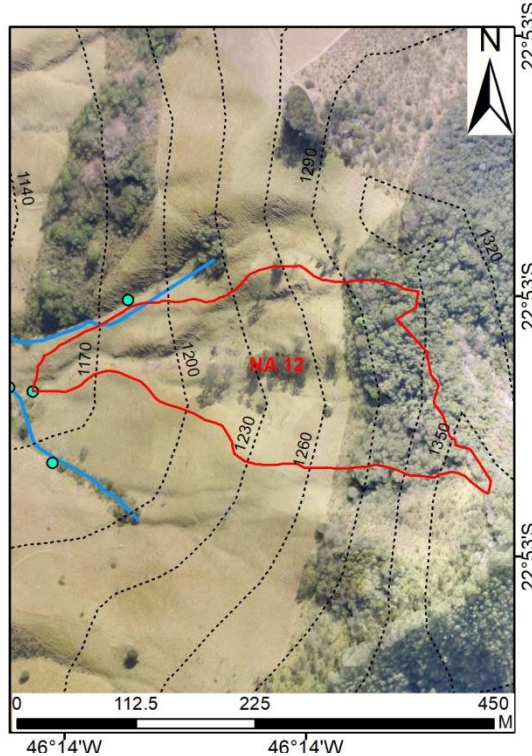
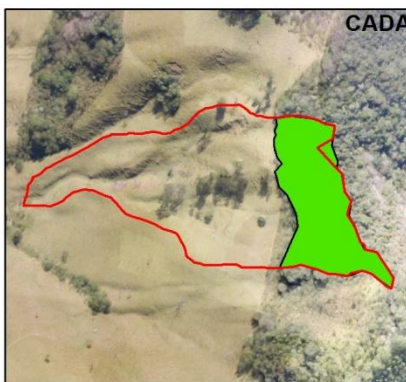
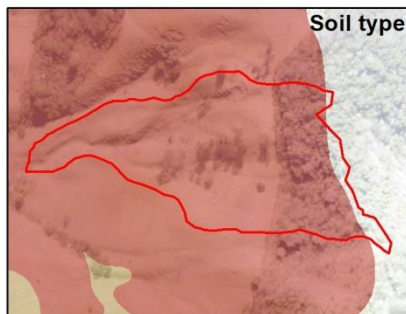


G4: PC 1, 2, 3

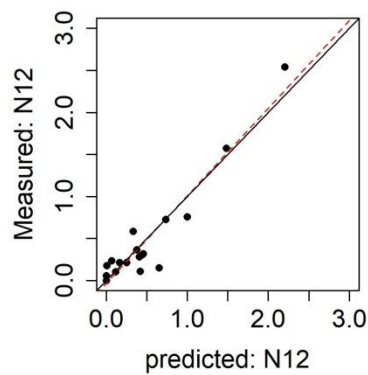
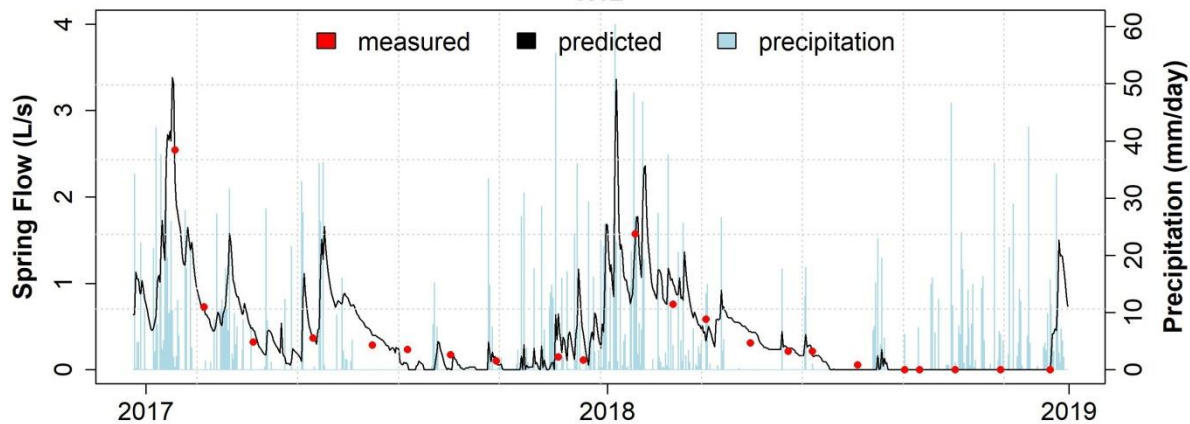
p-value: 1.166e-13

R2: 0.937

Spring NA12



N12

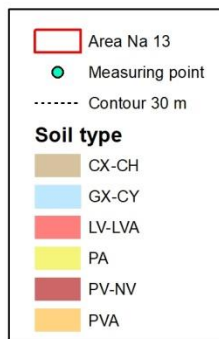
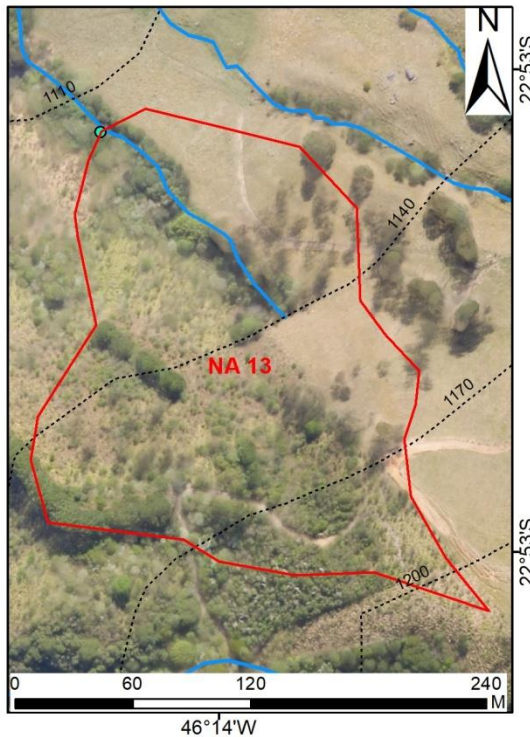
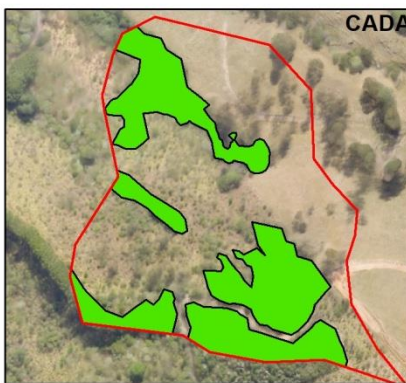
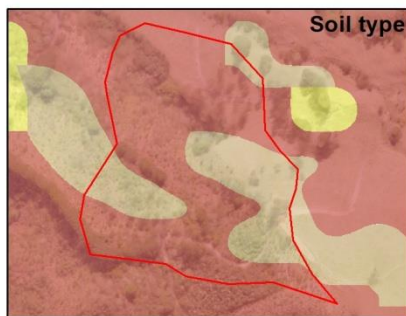


G1: PC 1, 2

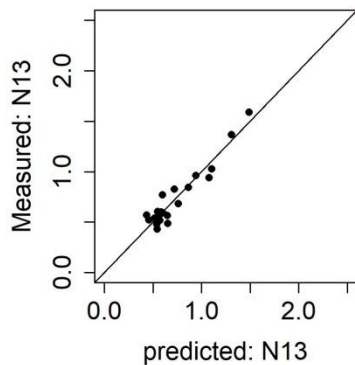
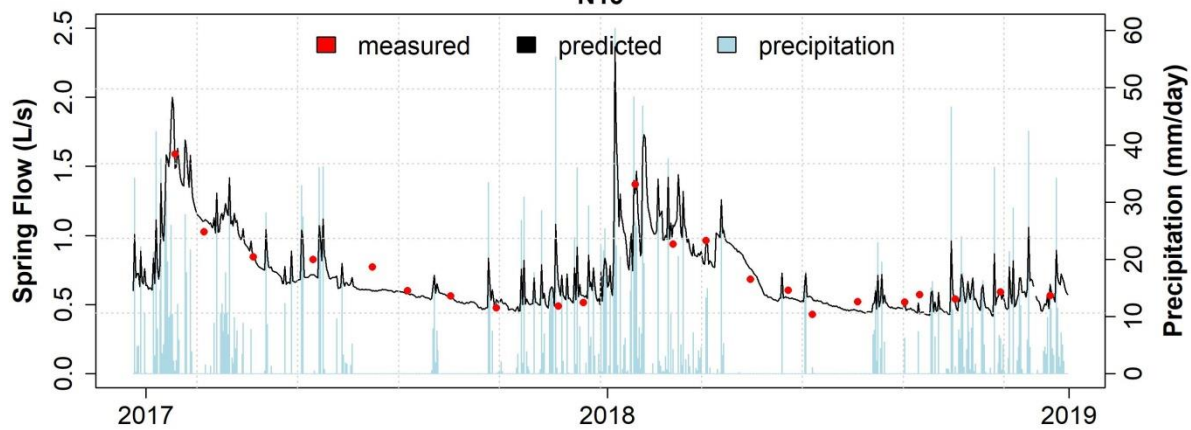
R2: 0.904

p-value: 7.479e-12

Spring NA13



N13

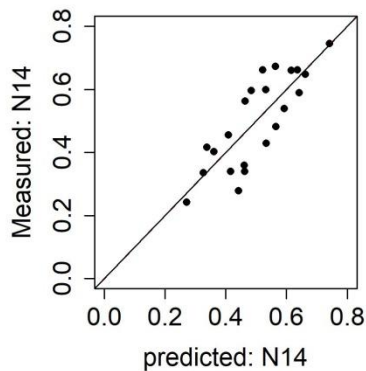
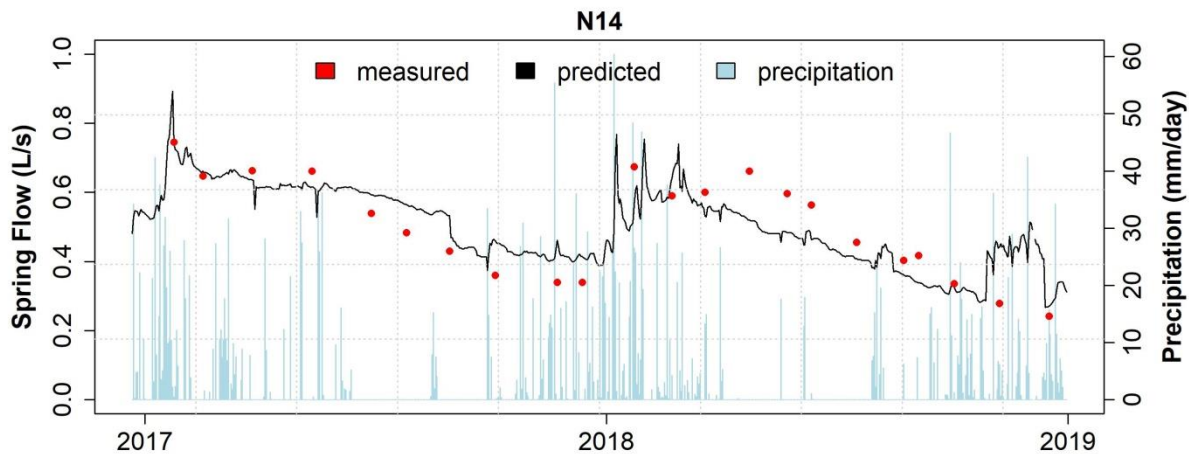
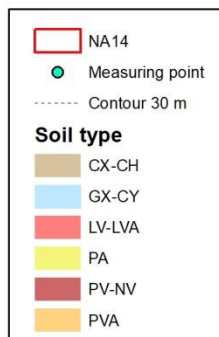
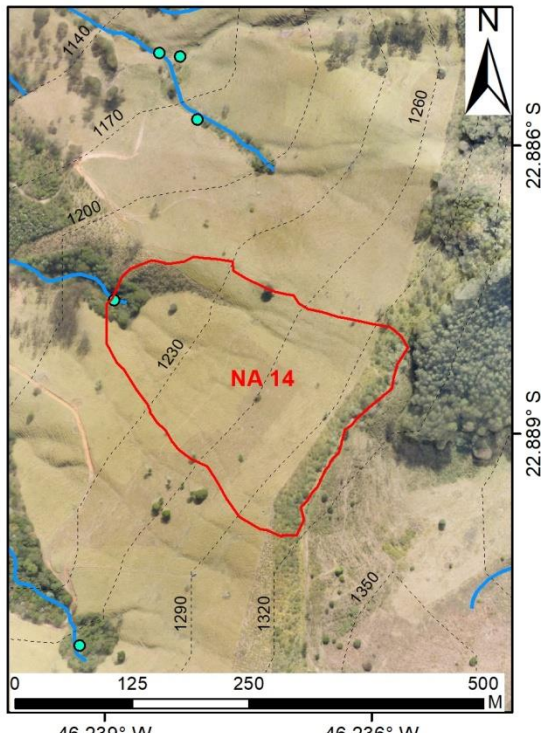
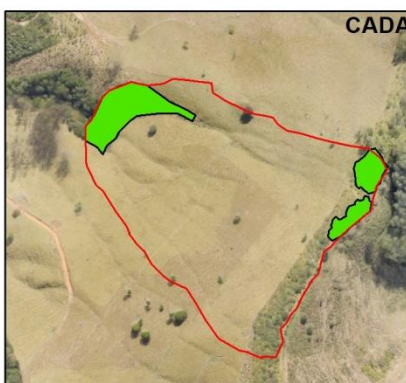
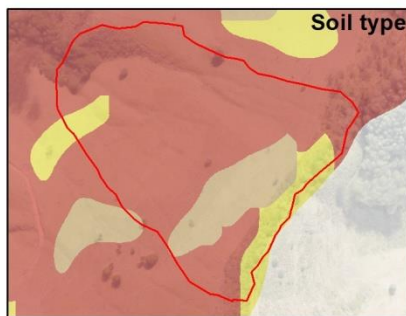
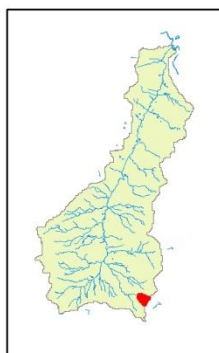


G4: PC 1, 2, 3

R2: 0.906

p-value: 1.57e-13

Spring NA14

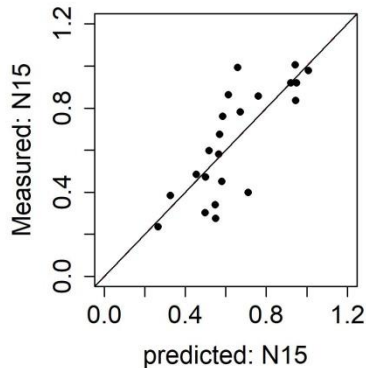
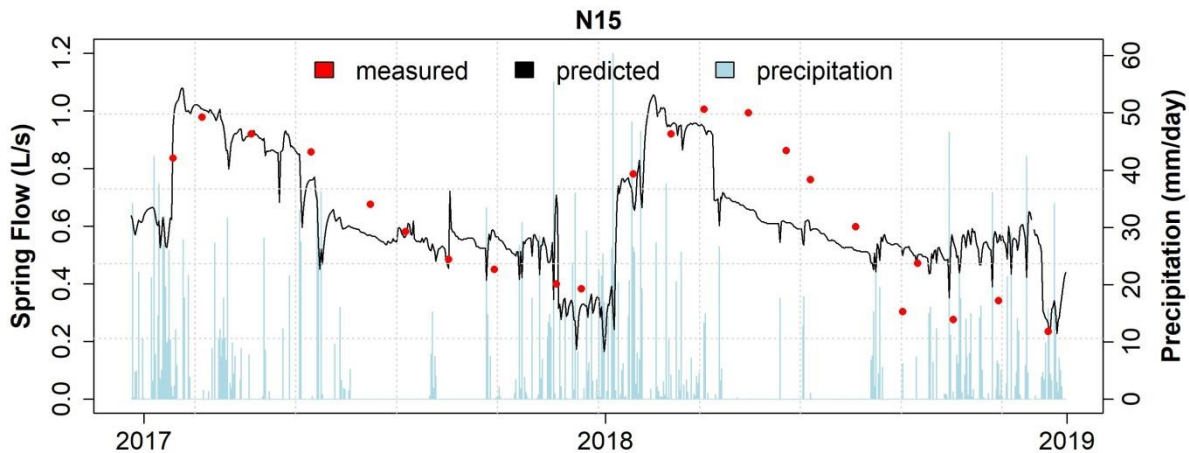
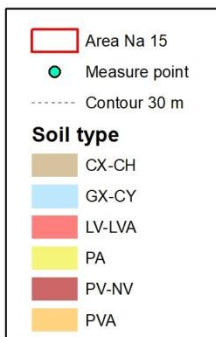
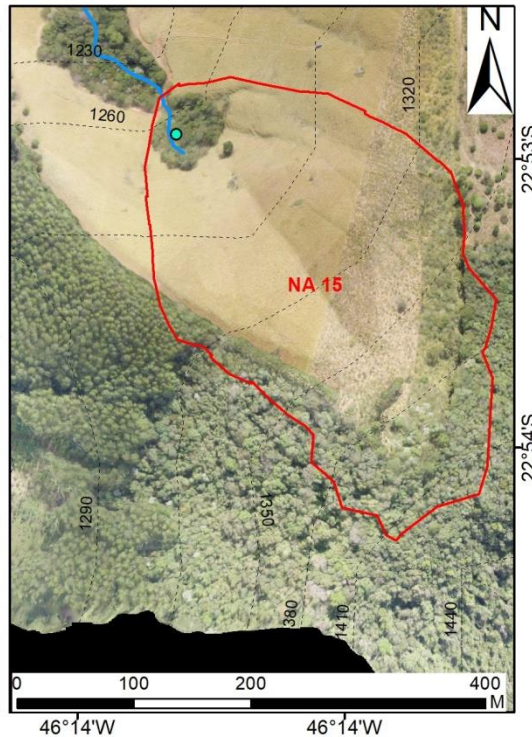
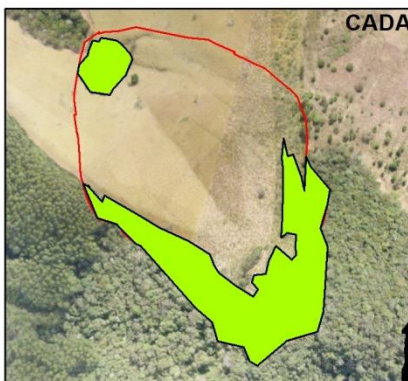
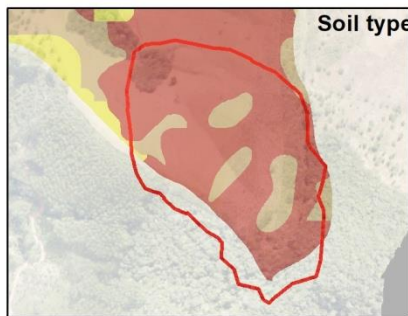


G6: PC 1,2

R2: 0.649

p-value: 4.575e-09

Spring NA15

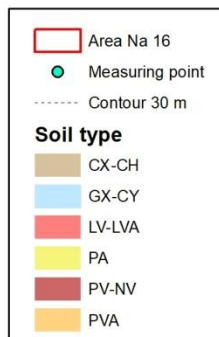
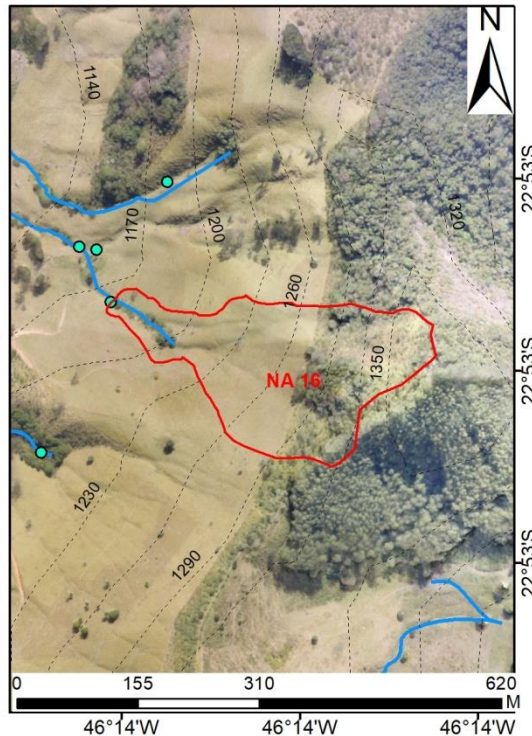
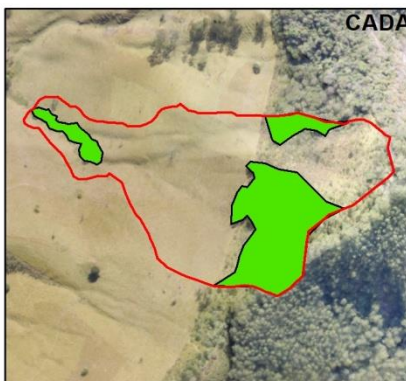
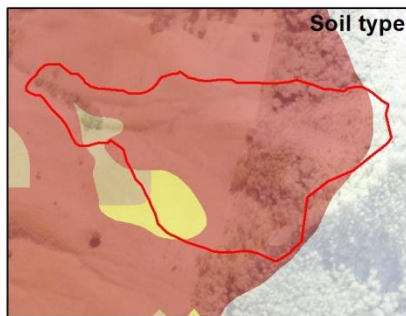


G6: PC 1,2

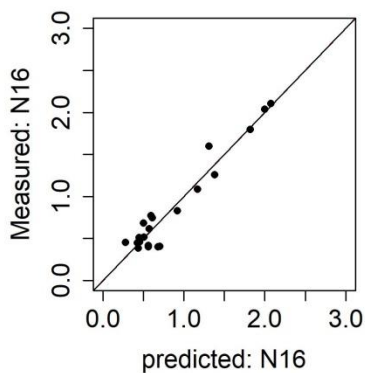
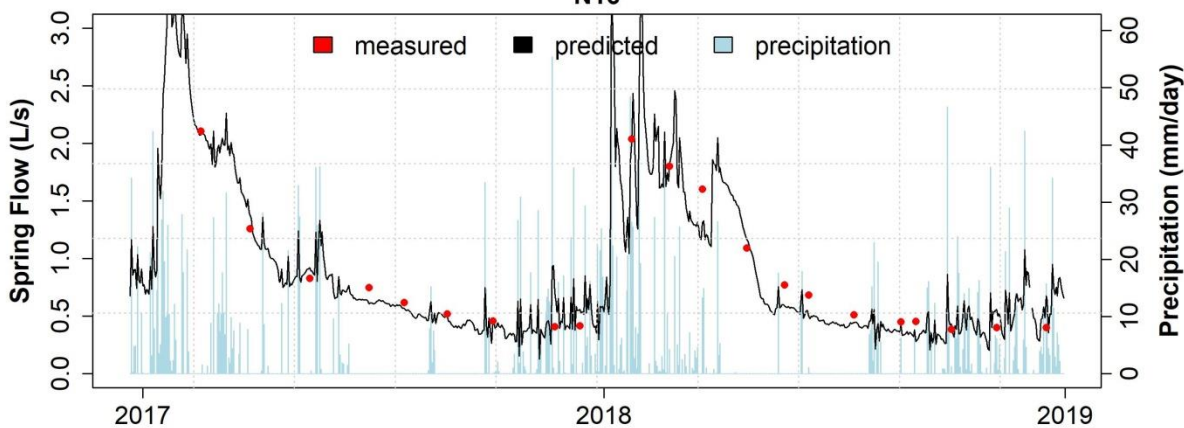
R2: 0.603

p-value: 1.31e-05

Spring NA16



N16

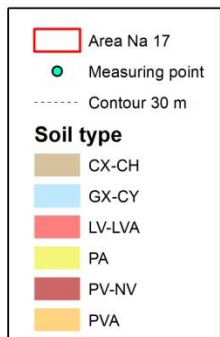
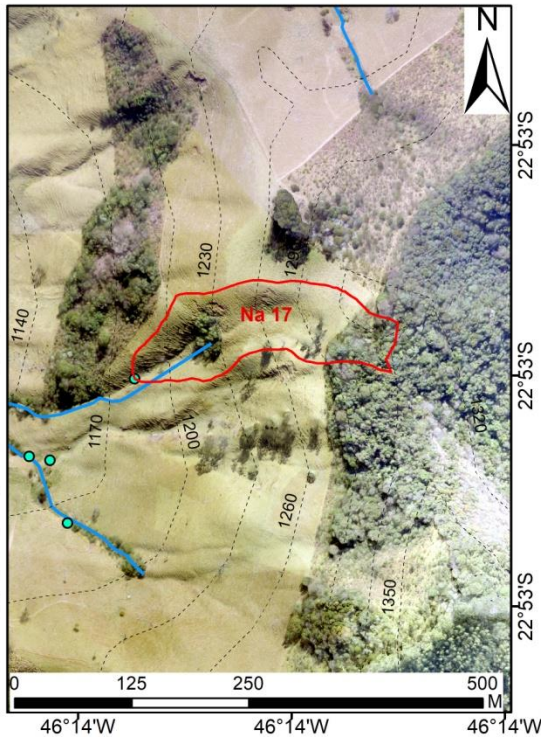
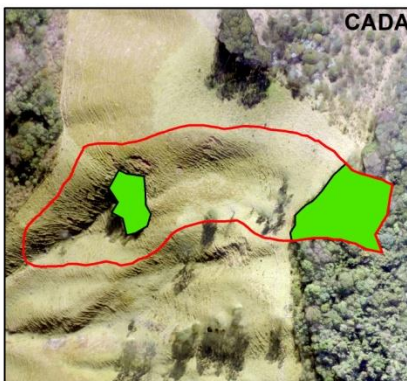
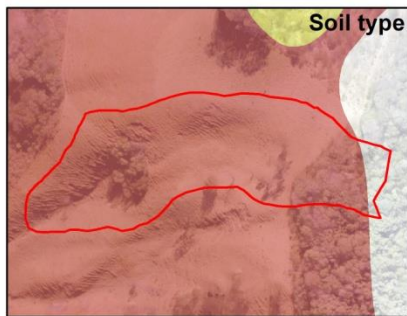


G4: PC 1, 2, 3

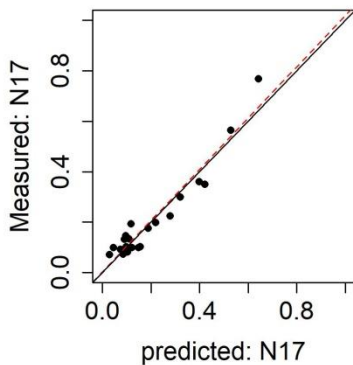
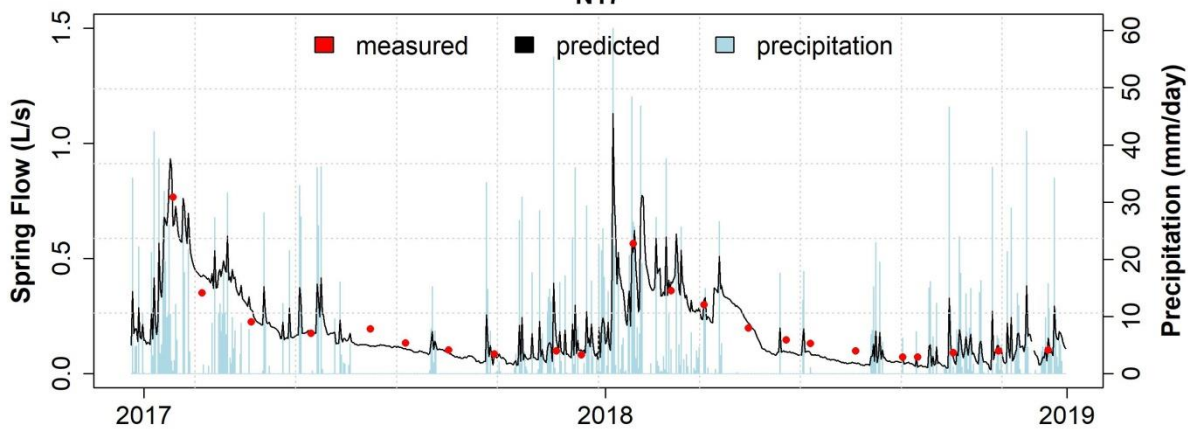
R2: 0.927

p-value: 1.814e-12

Spring NA17



N17

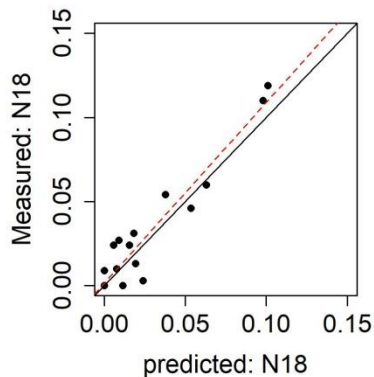
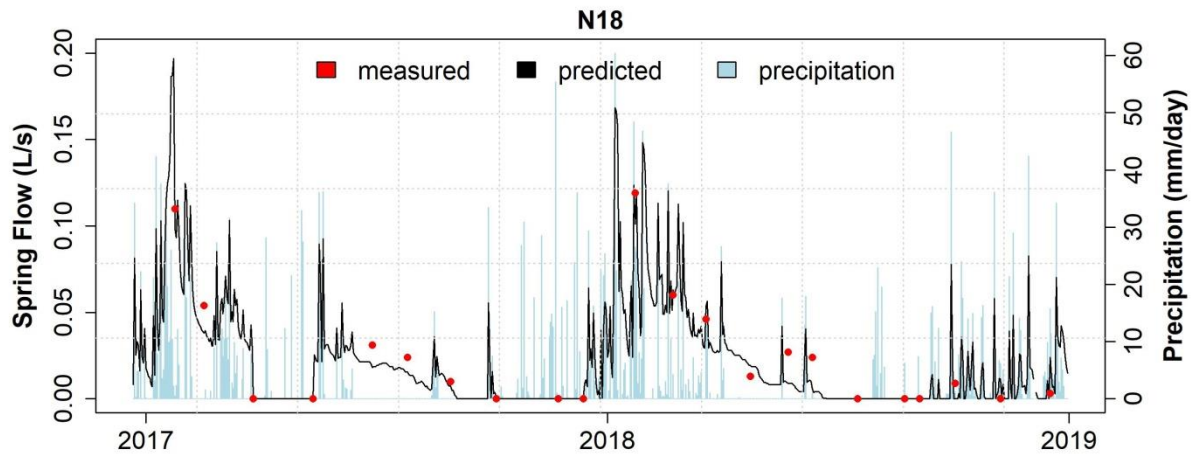
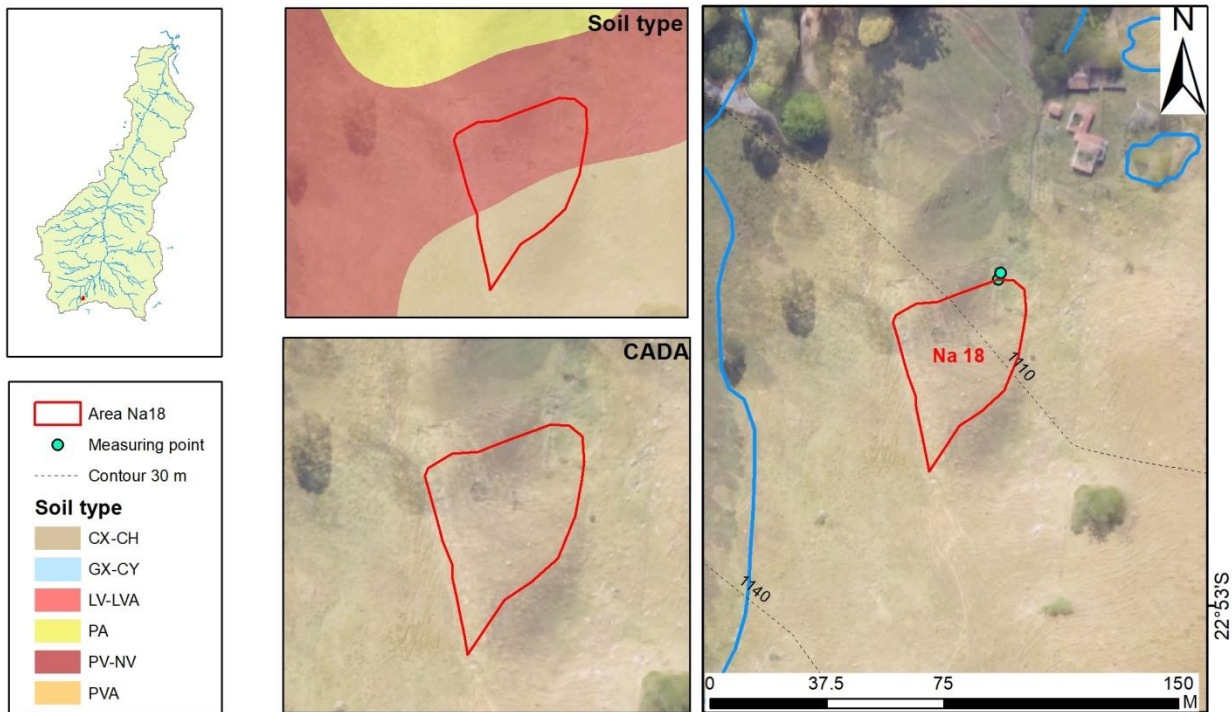


G4: PC 1,3

R2: 0.921

p-value: 1.117e-12

Spring NA18

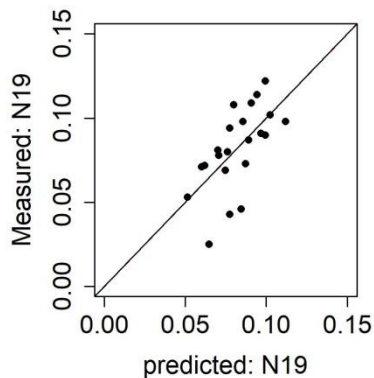
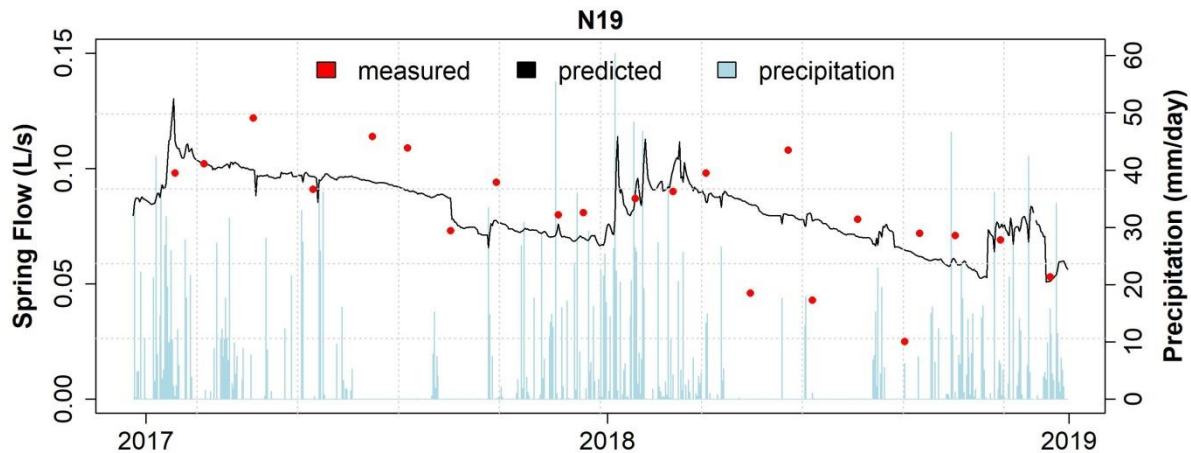
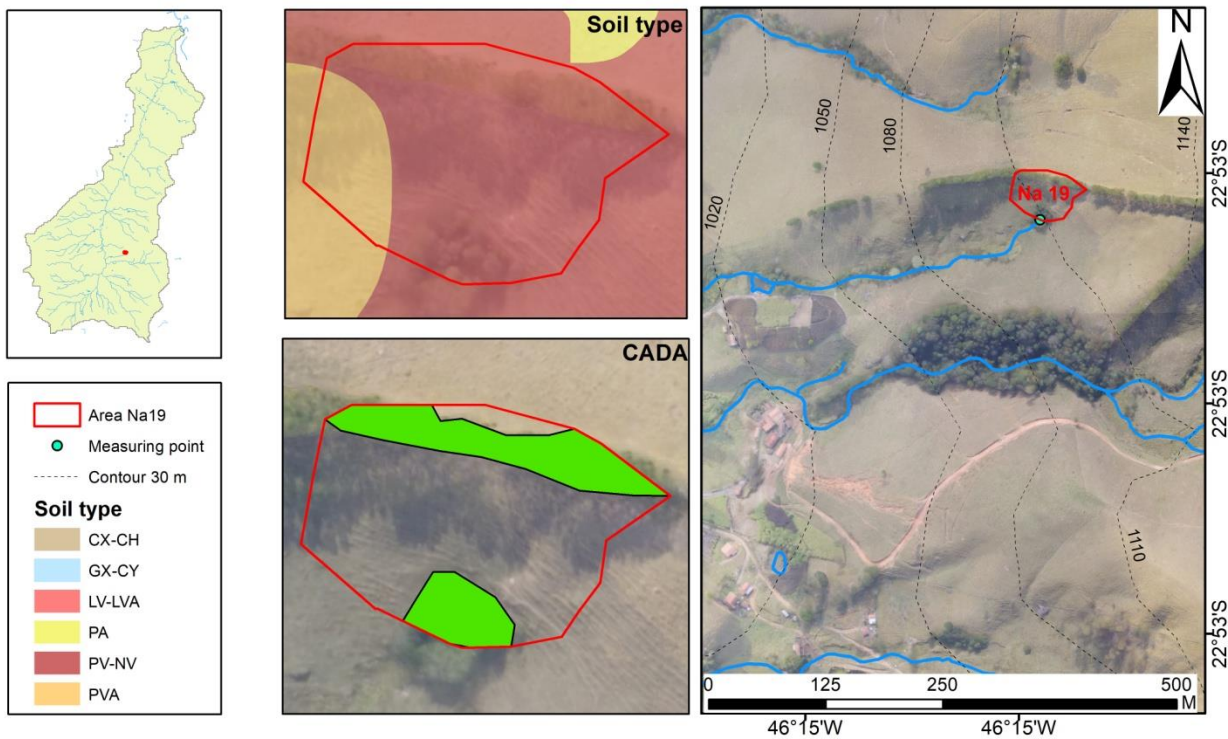


G5: PC 1,2

R2: 0.914

p-value:
2.564e-12

Spring NA19

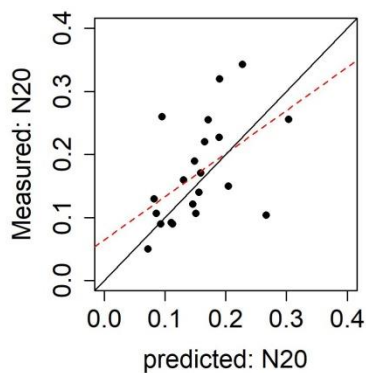
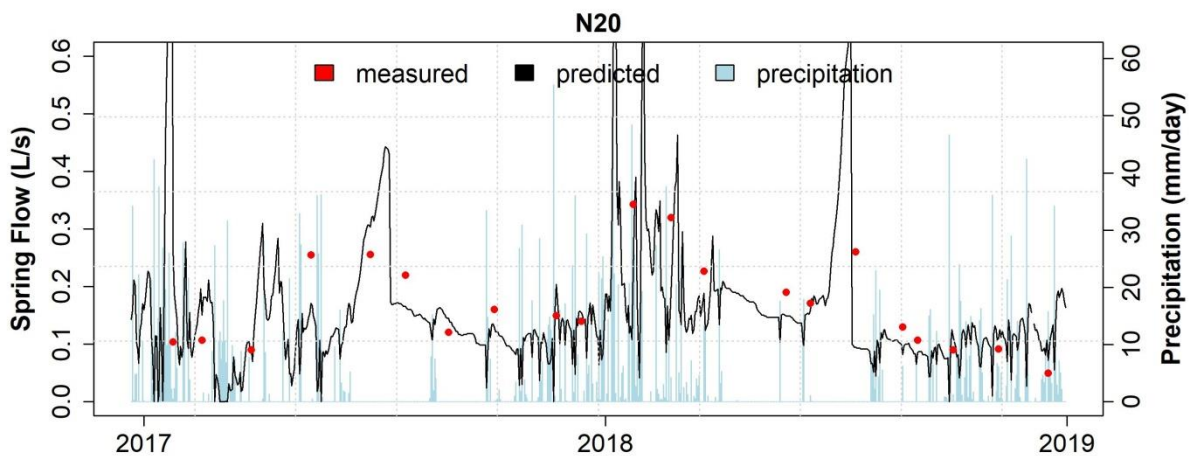
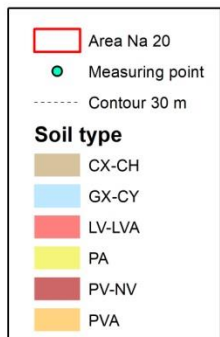
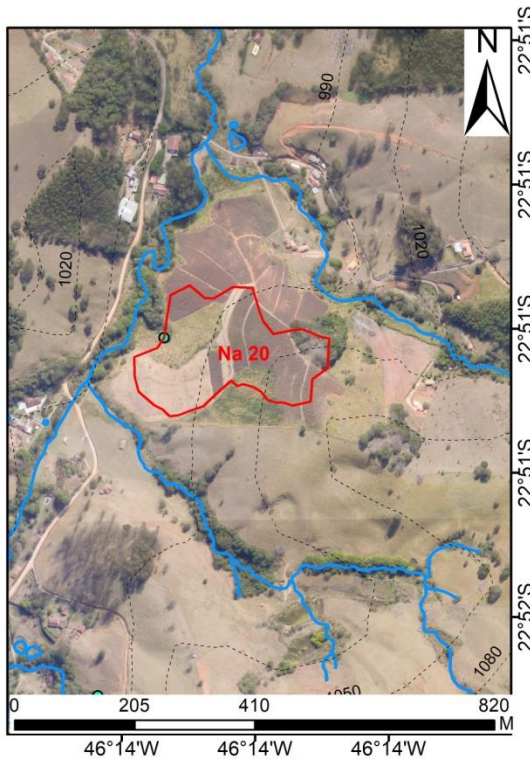
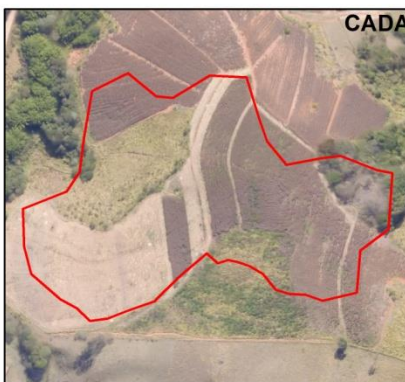
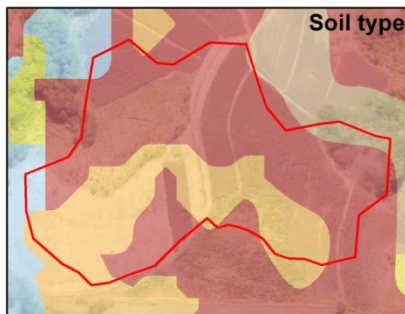


G6: PC 1,2

R2: 0.364

p-value: 0.001752

Spring NA 20

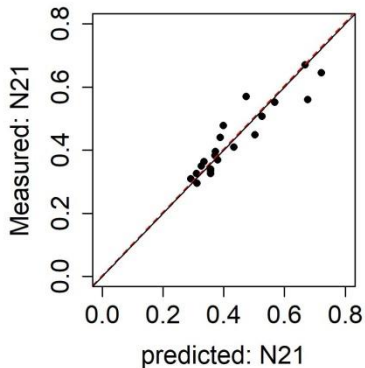
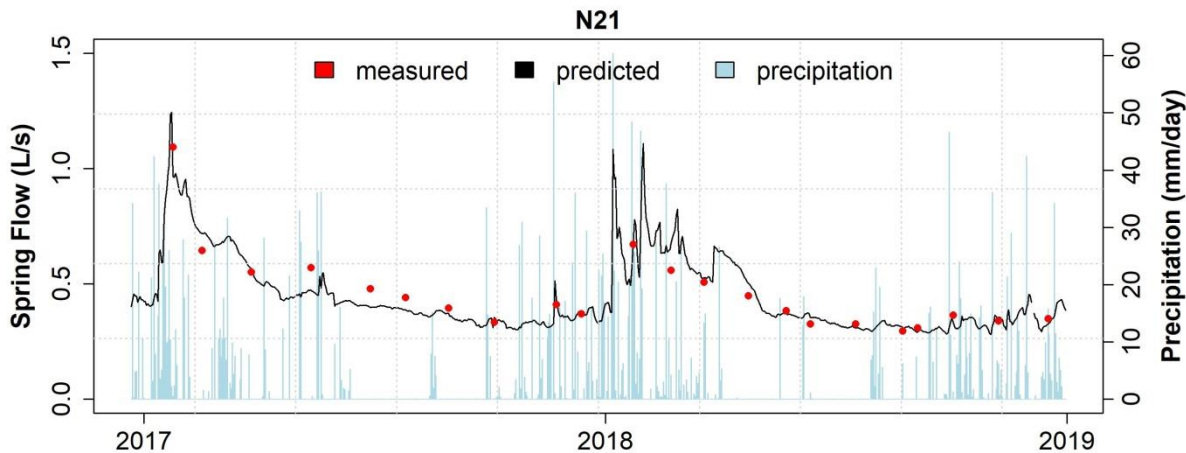
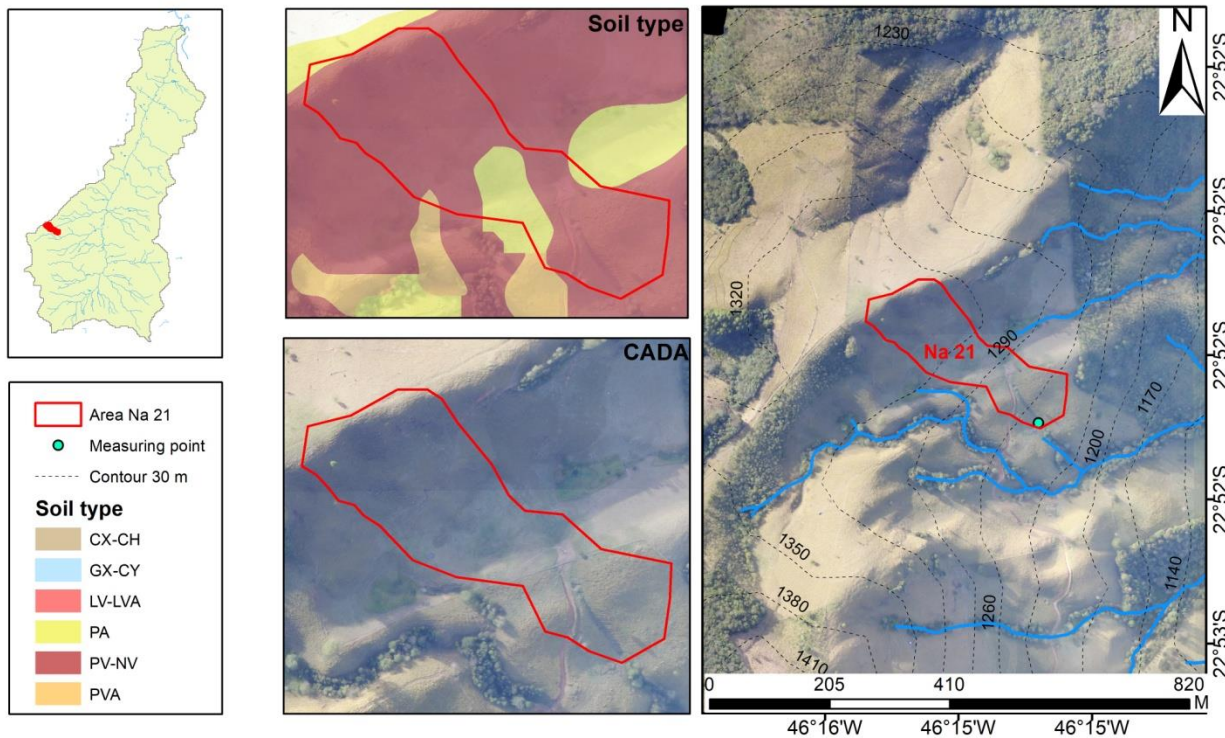


G2: PC 4

R2: 0.223

p-value: 0.01773

Spring NA 21

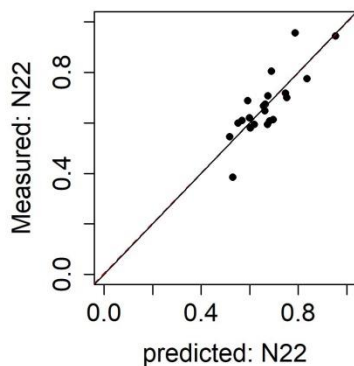
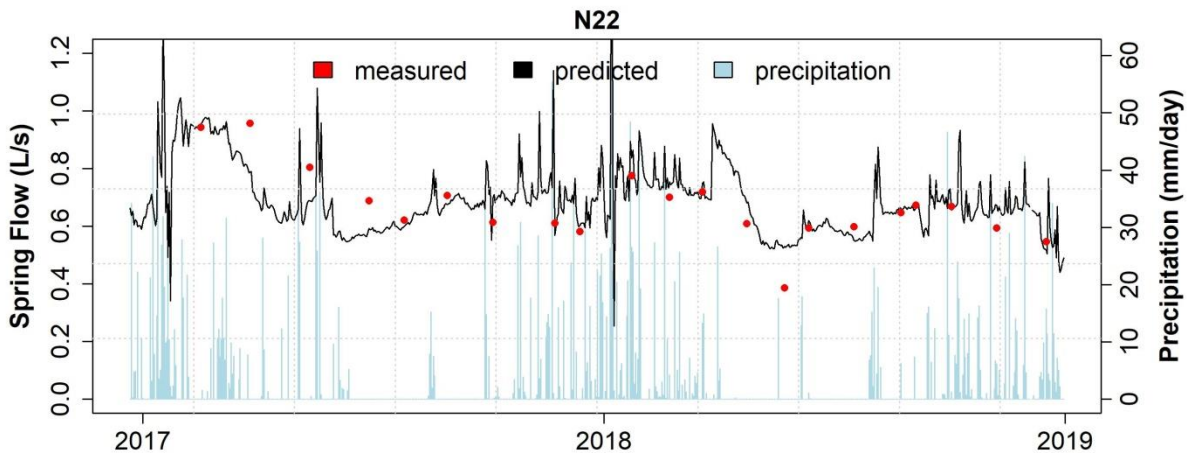
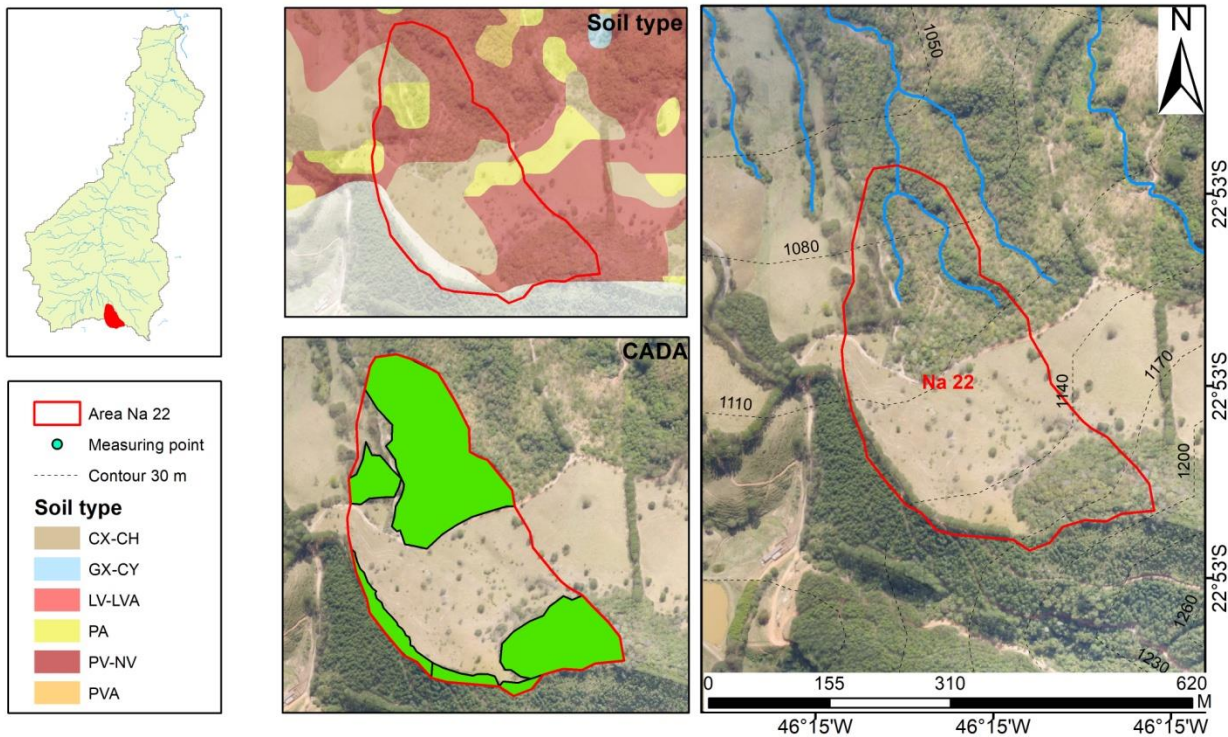


G3: PC 1,2

R2: 0.902

p-value: 8.868e-12

Spring NA 22

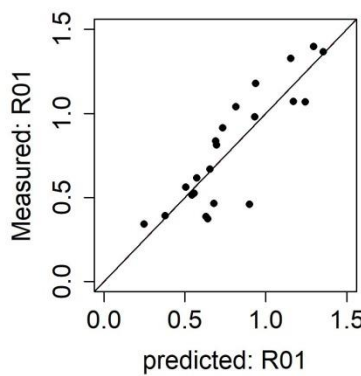
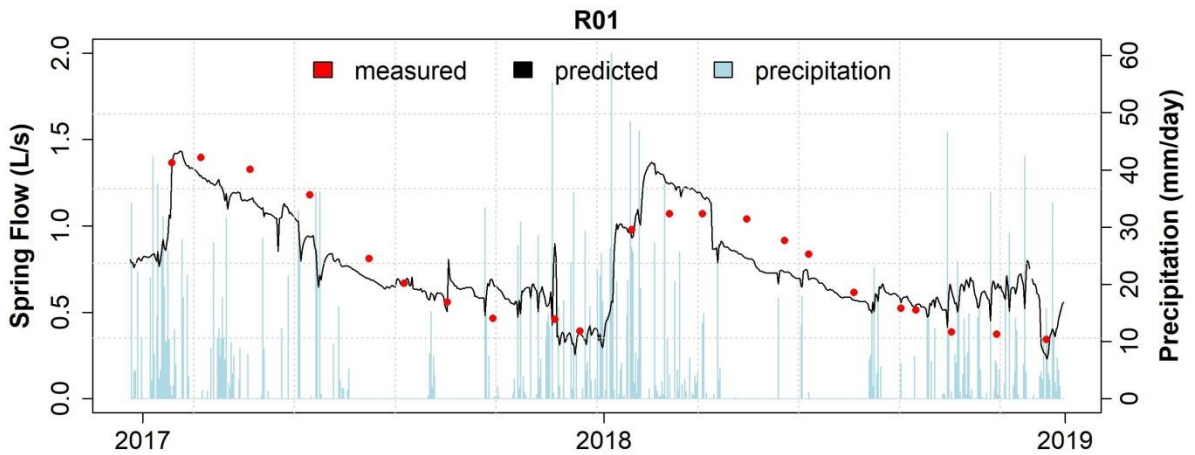
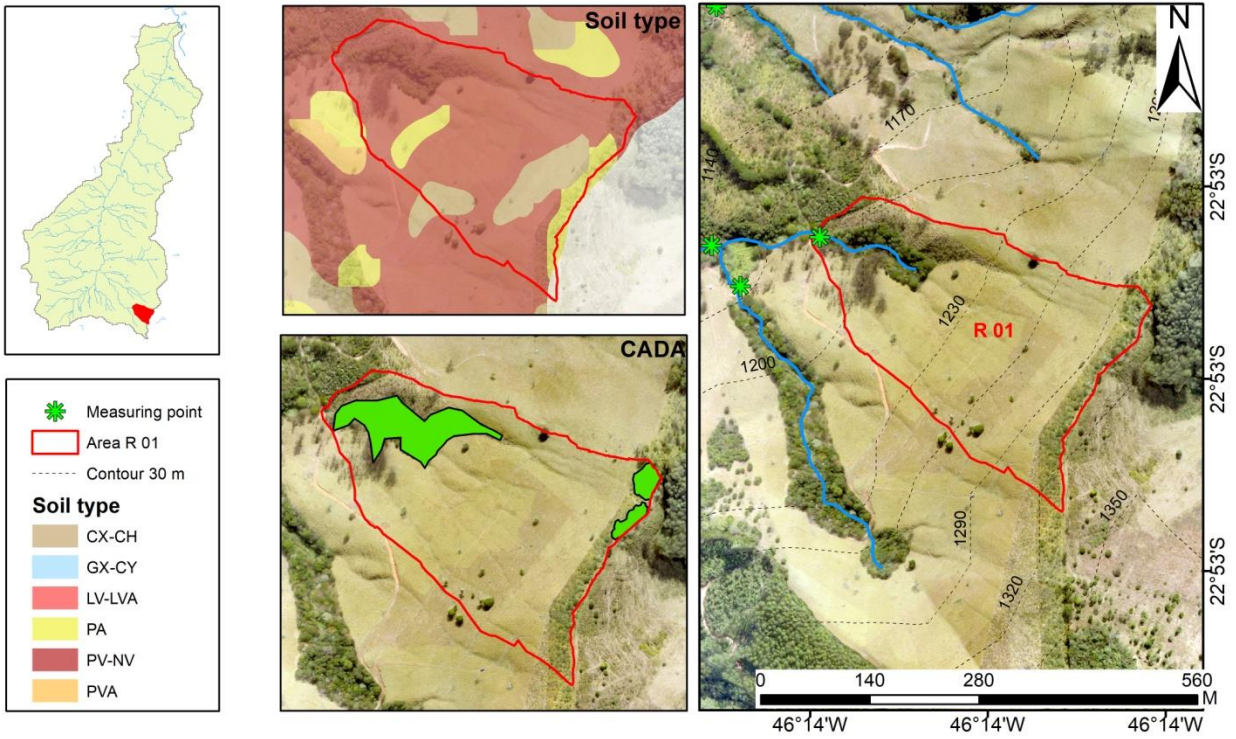


G3: PC 1,3

R2: 0.657

p-value: 5.144e-06

Point R 01

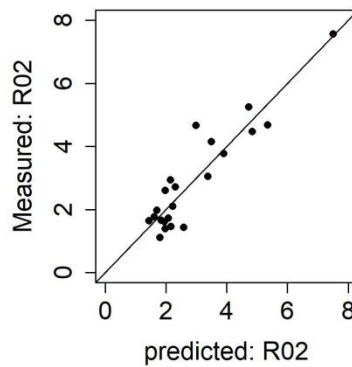
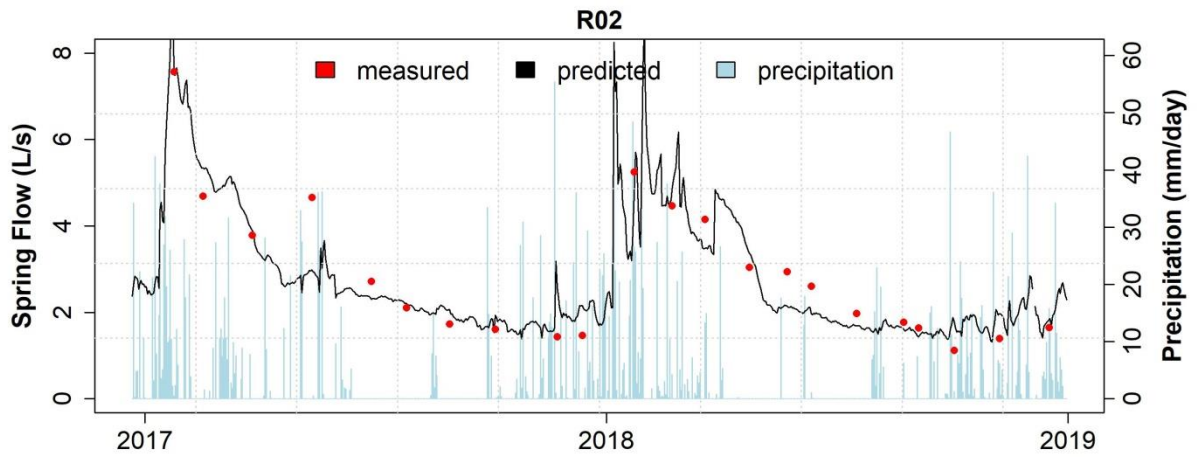
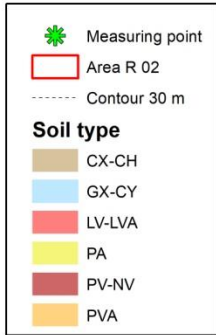
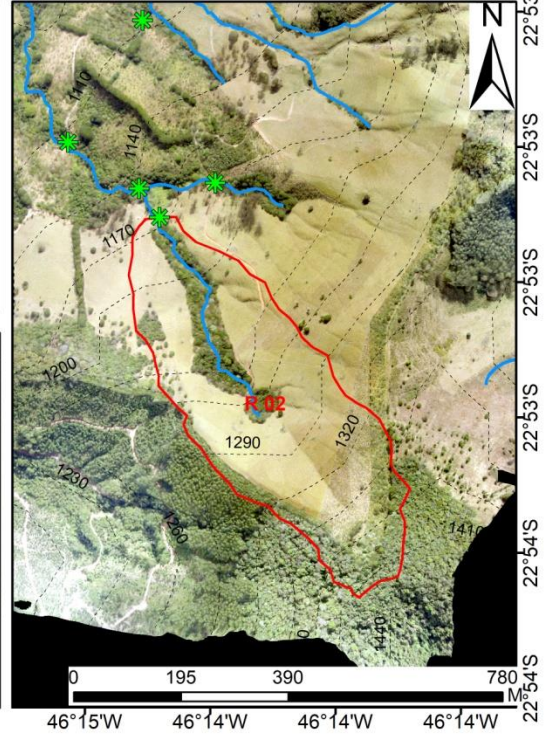
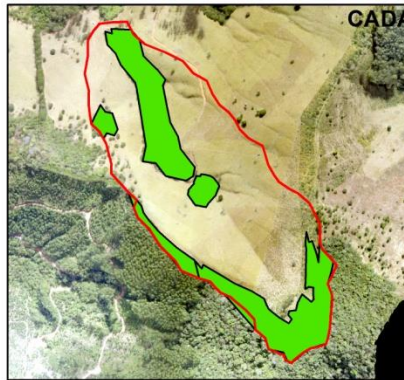
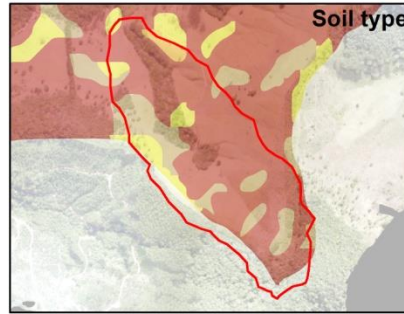


G1: PC 1,2

R2: 0.736

p-value: 2.041e-07

Point R 02

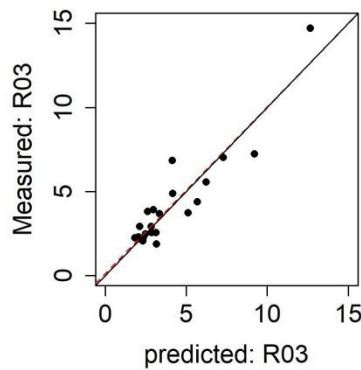
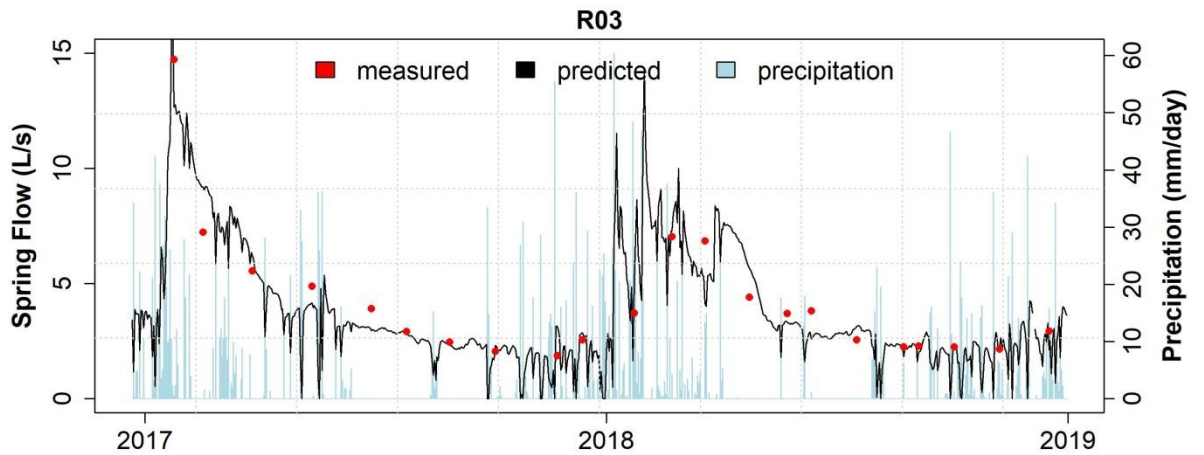
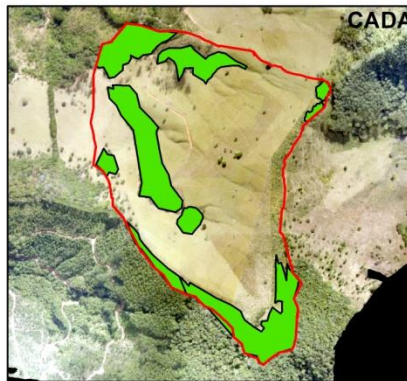
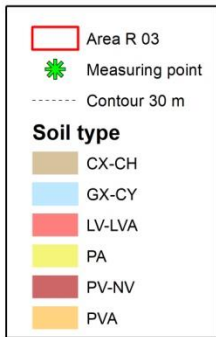
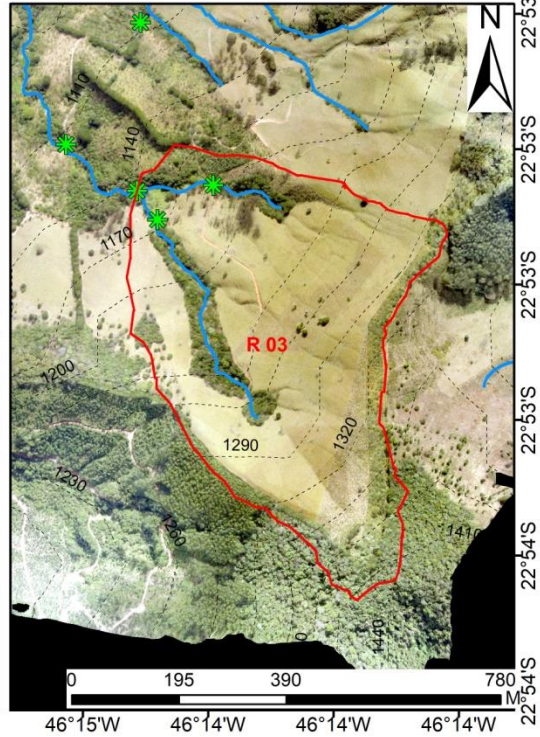
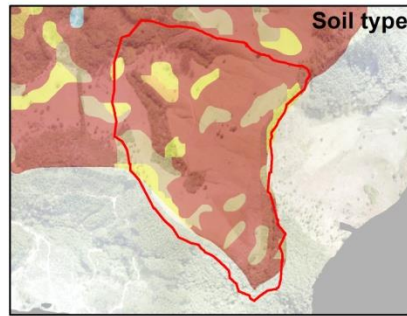


G3: PC 1, 2

R2: 0.846

p-value: 8.82e-10

Point R 03

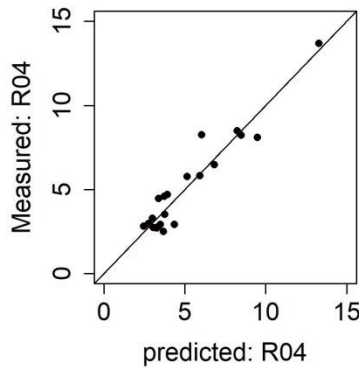
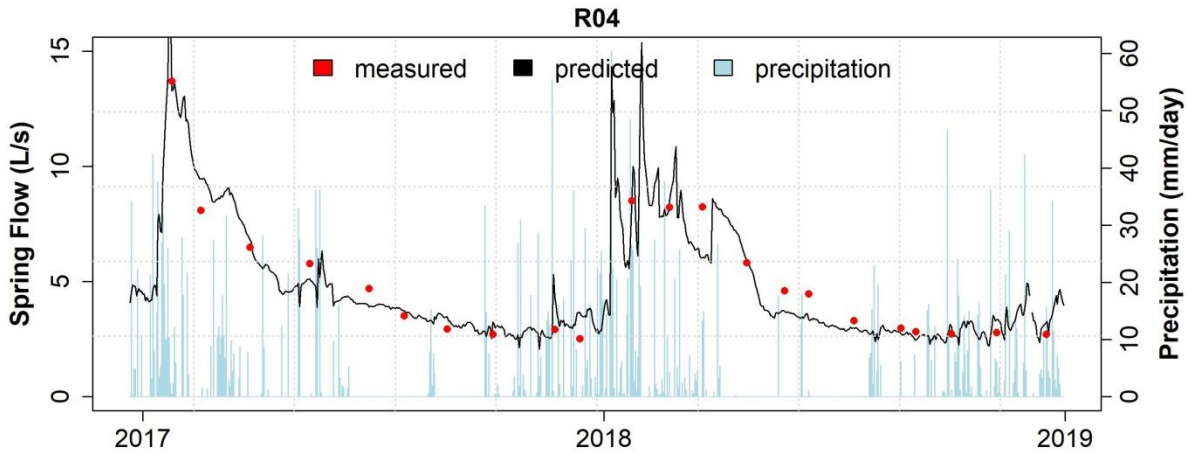
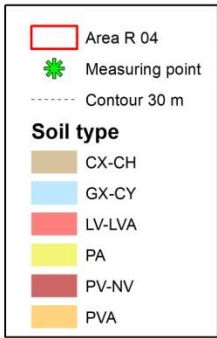
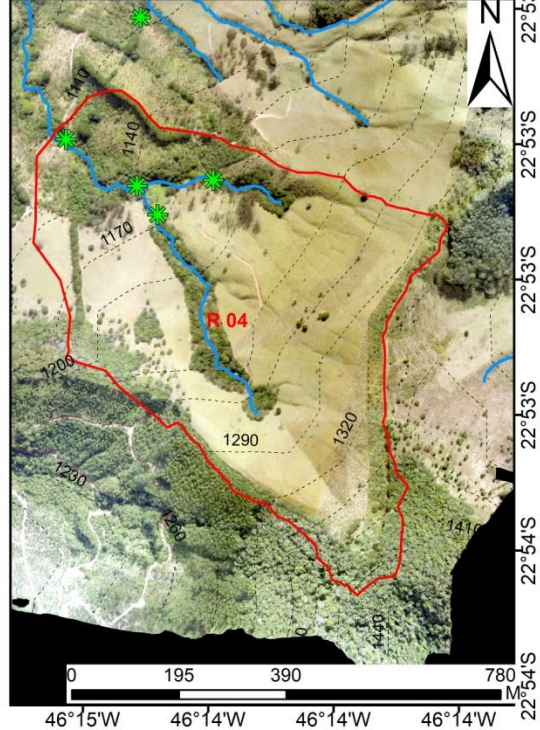
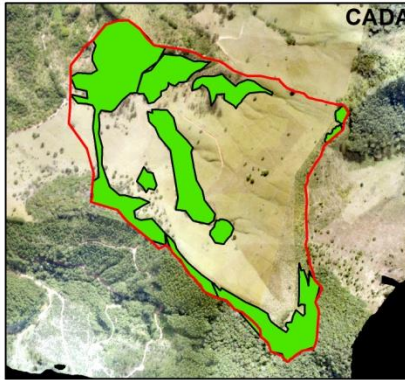
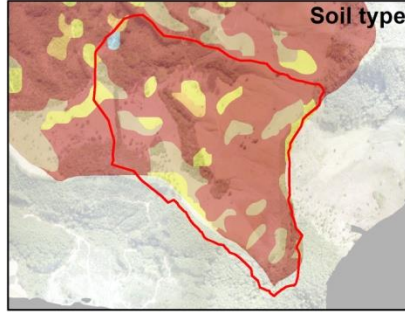


G4: PC 1, 2, 3

R2: 0.847

p-value: 7.917e-10

Point R 04

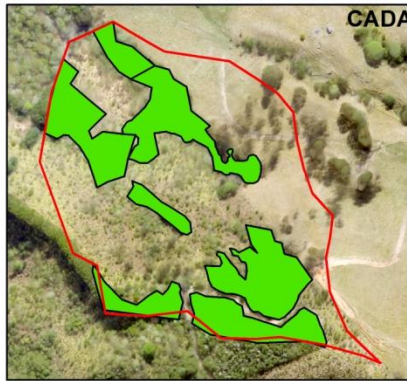
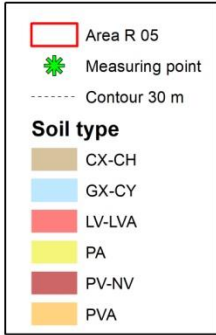
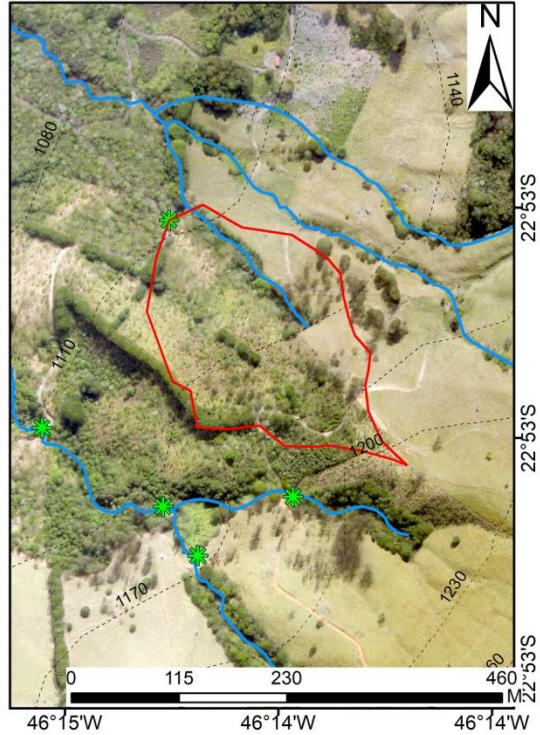
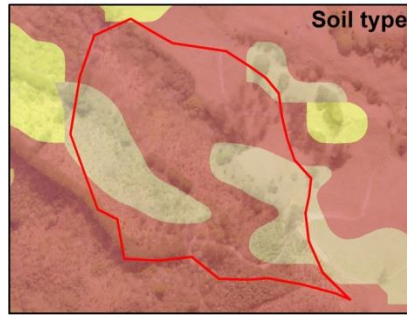


G3: PC 1,2

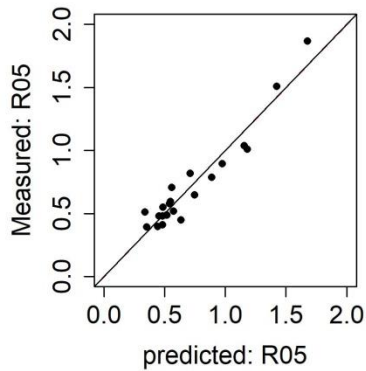
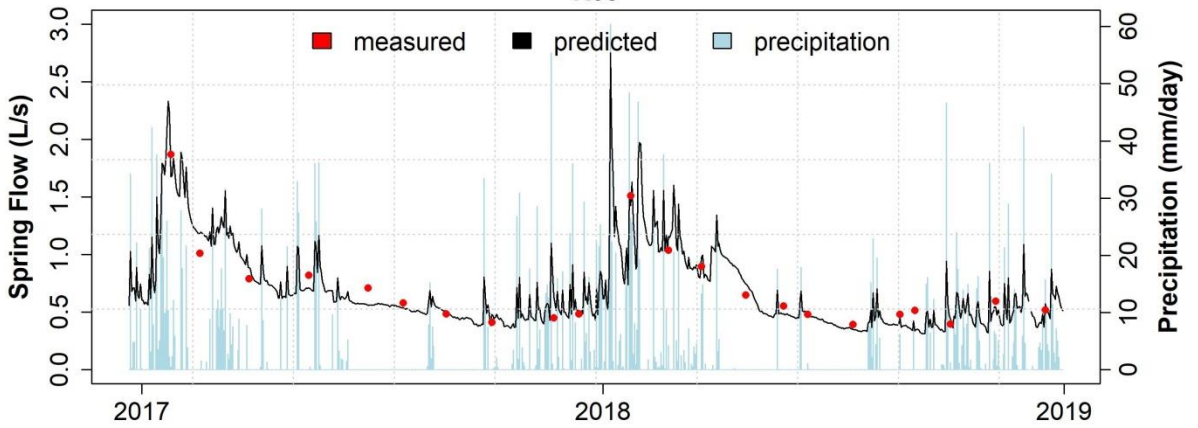
R2: 0.907

p-value: 5.556e-12

Point R 05



R05

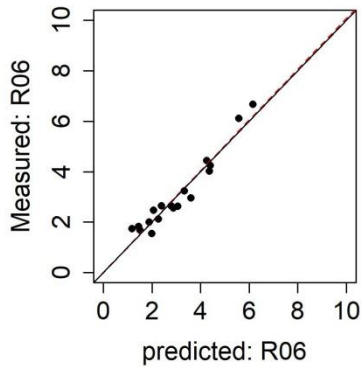
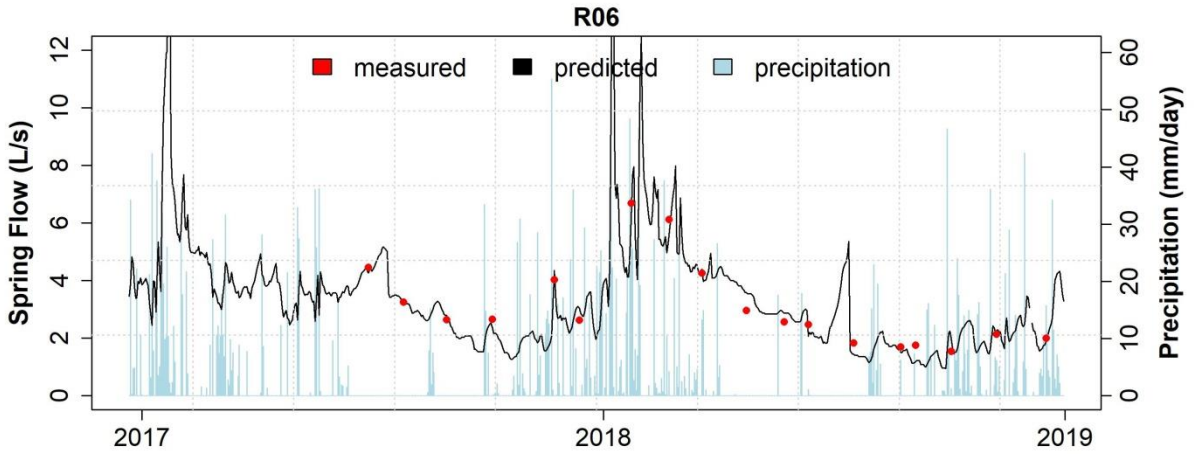
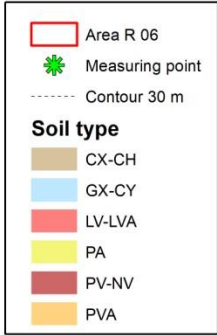
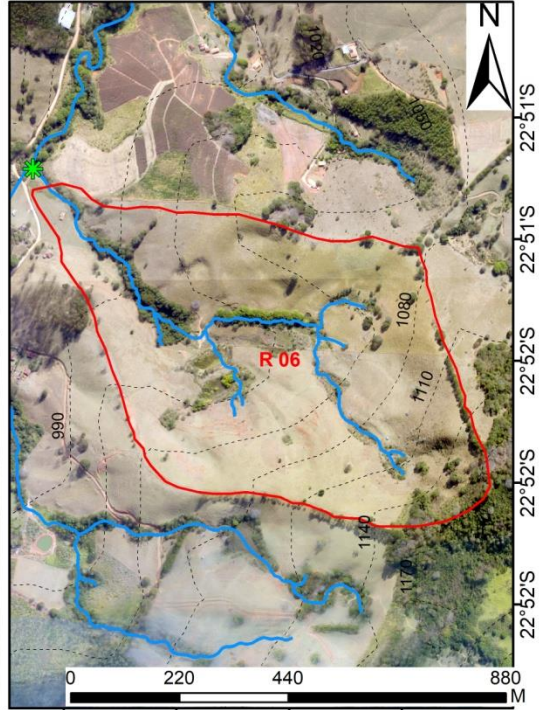
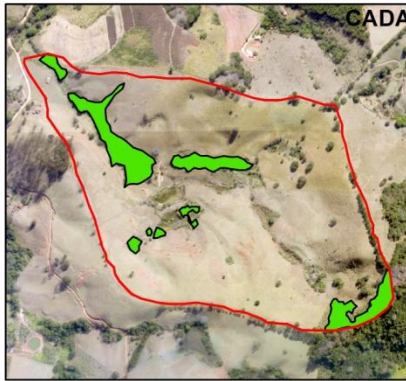
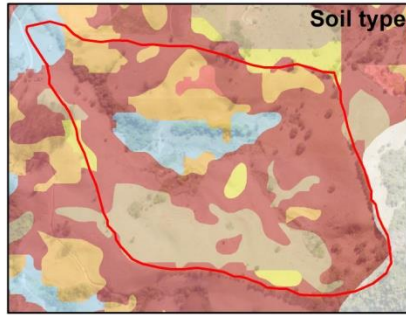


G4: PC 1,3

R2: 0.916

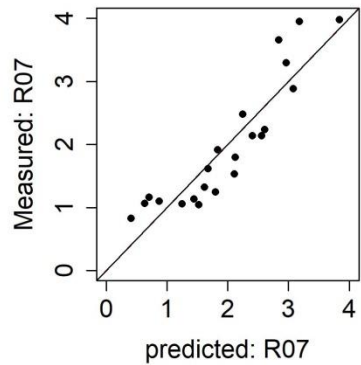
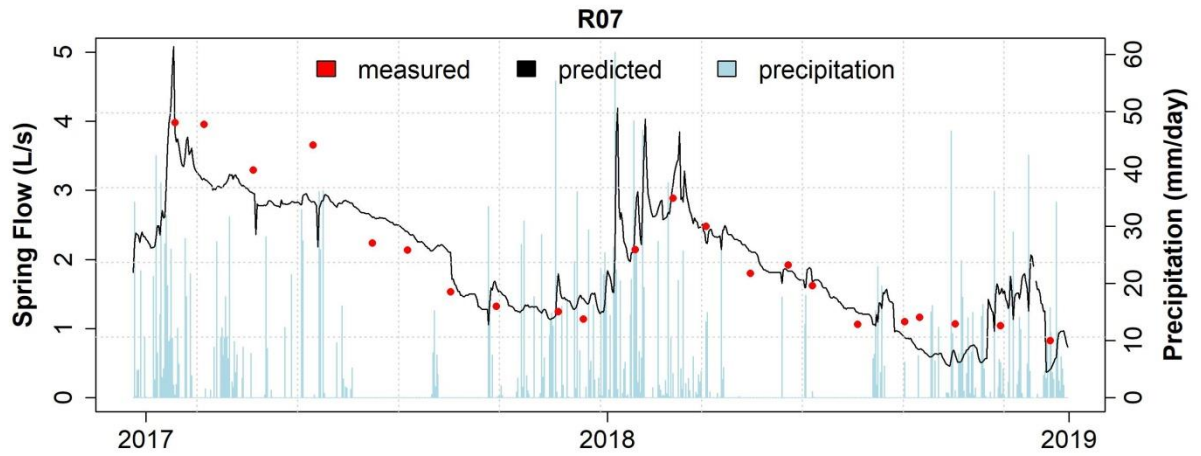
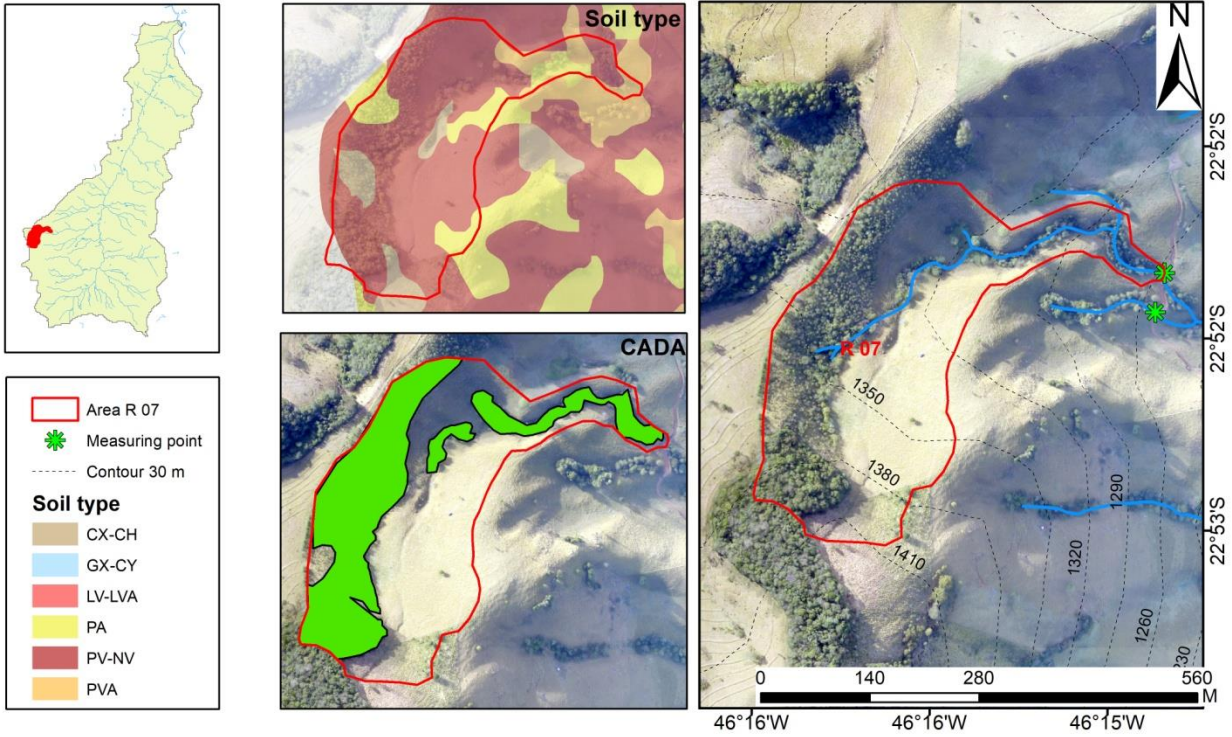
p-value: 2.078e-12

Point R 06



G2: PC 1,4
R2: 0.931
p-value: 6.089e-11

Point R 07

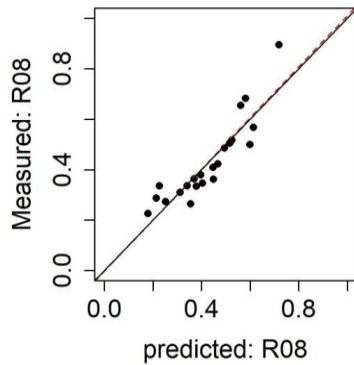
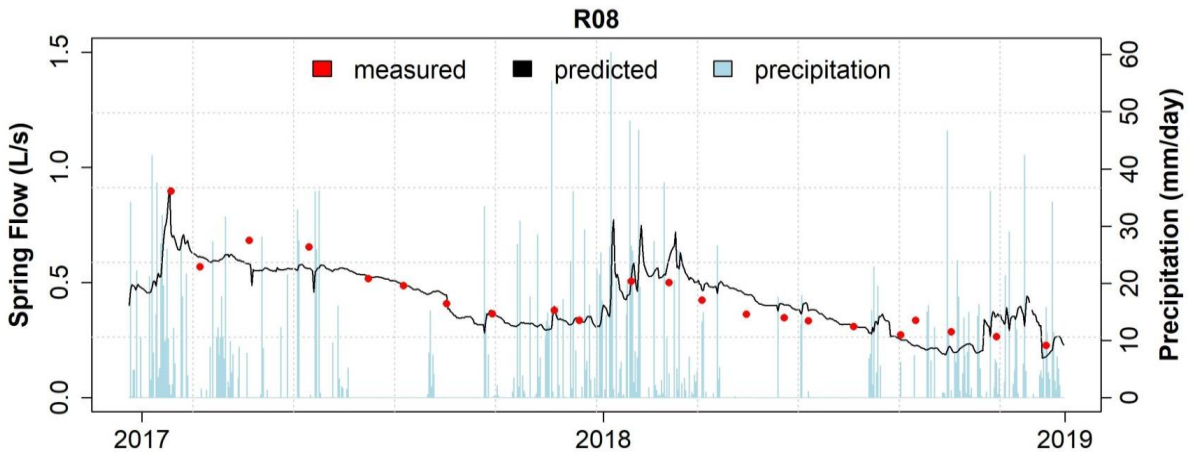
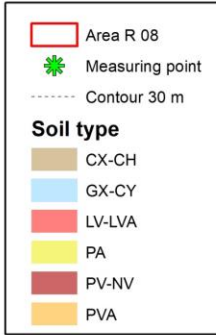
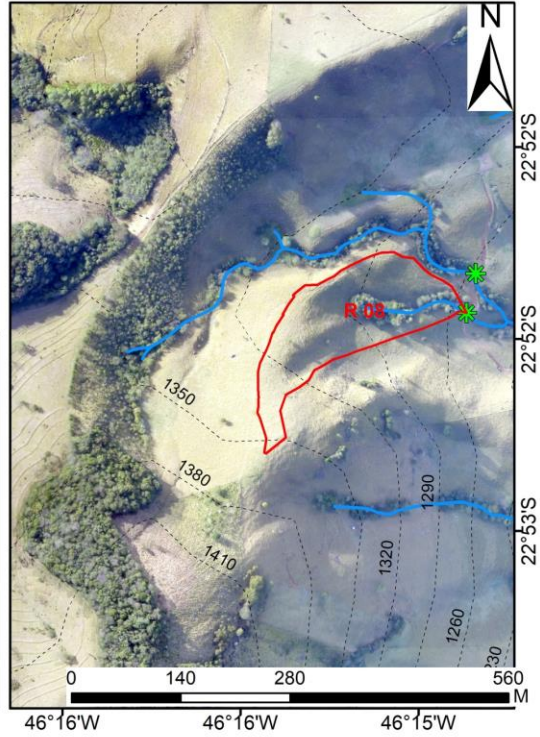
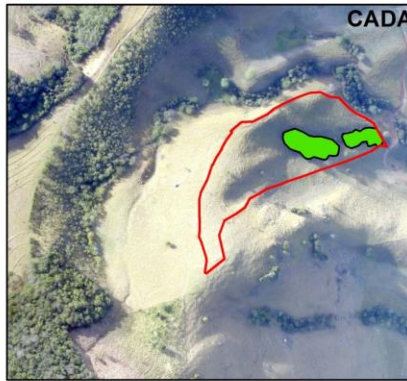
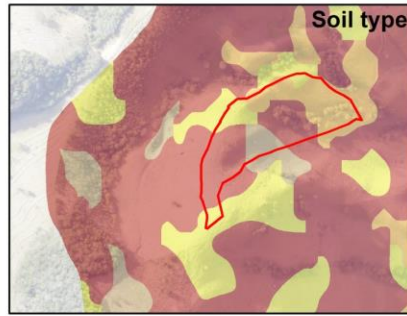


G6: PC 1,2

R2: 0.815

p-value: 5.544e-09

Point R 08

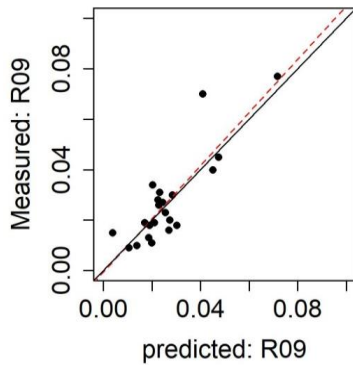
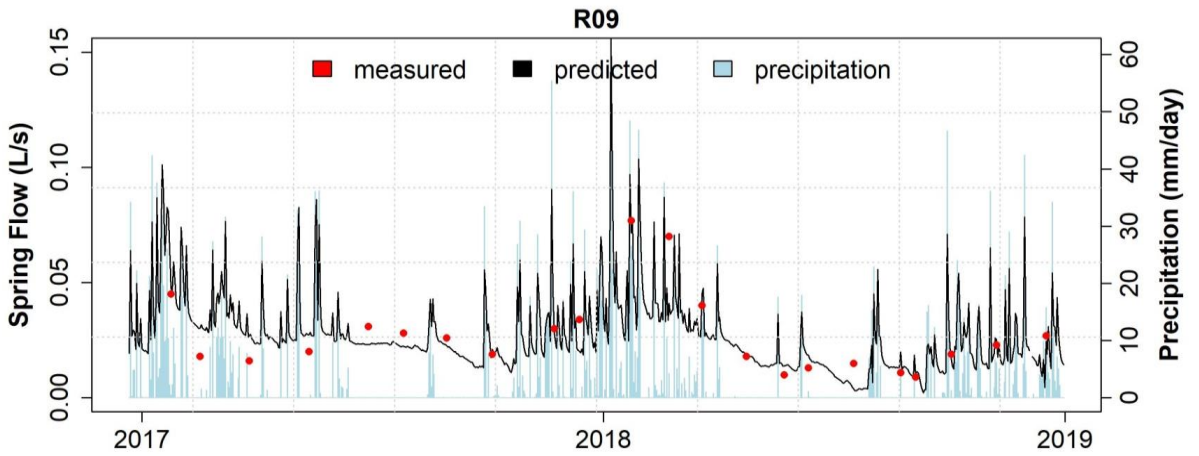
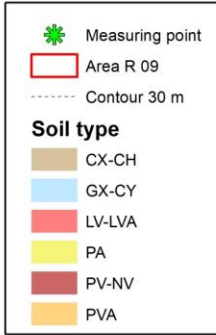
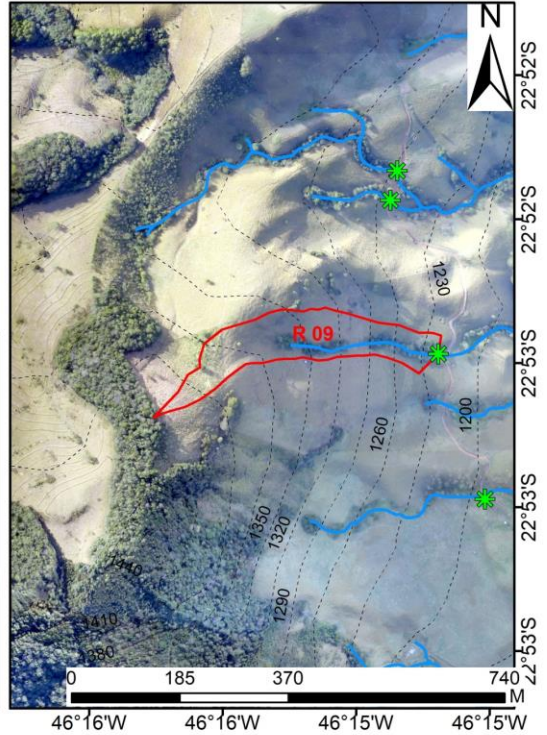
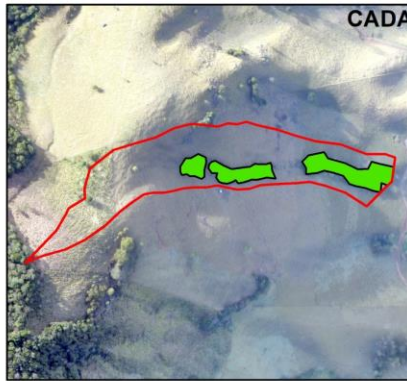
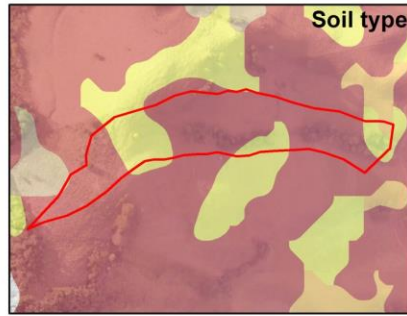


G6: PC 1,2

R2: 0.793

p-value: 1.732e-08

Point R 09

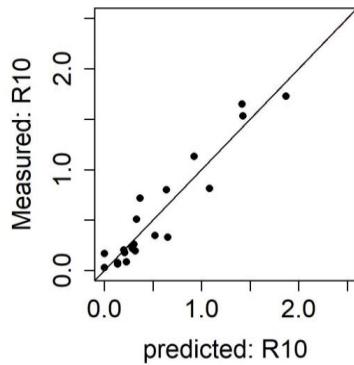
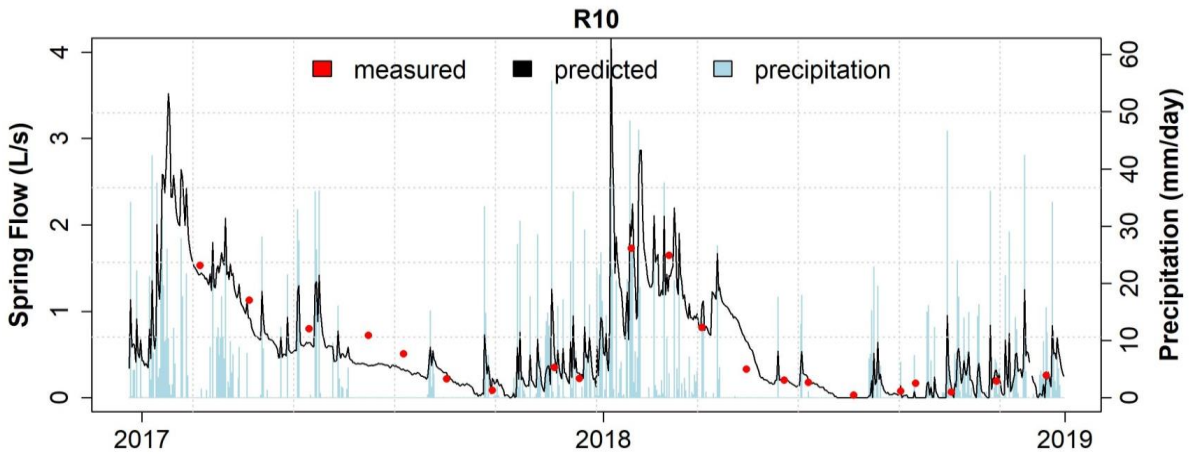
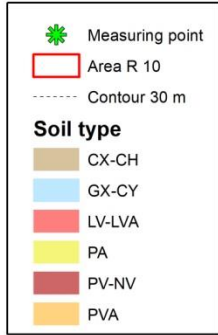
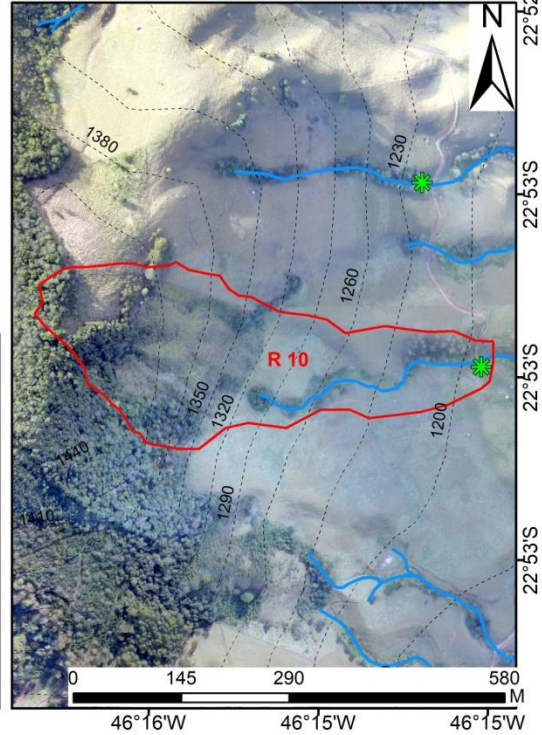
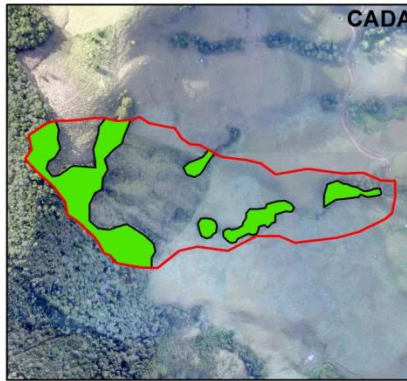
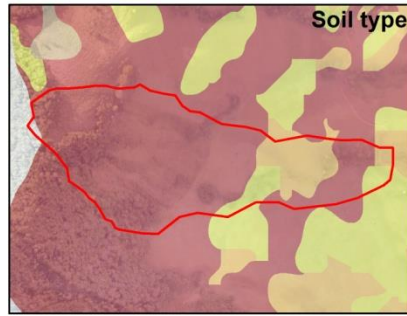


G4: PC 1, 2

R2: 0.719

p-value: 5.786e-08

Point R 10

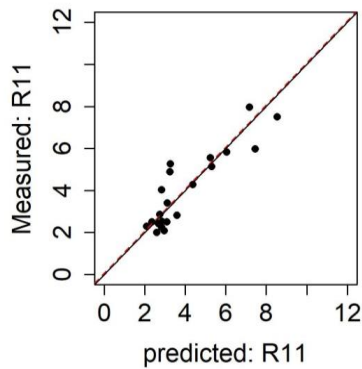
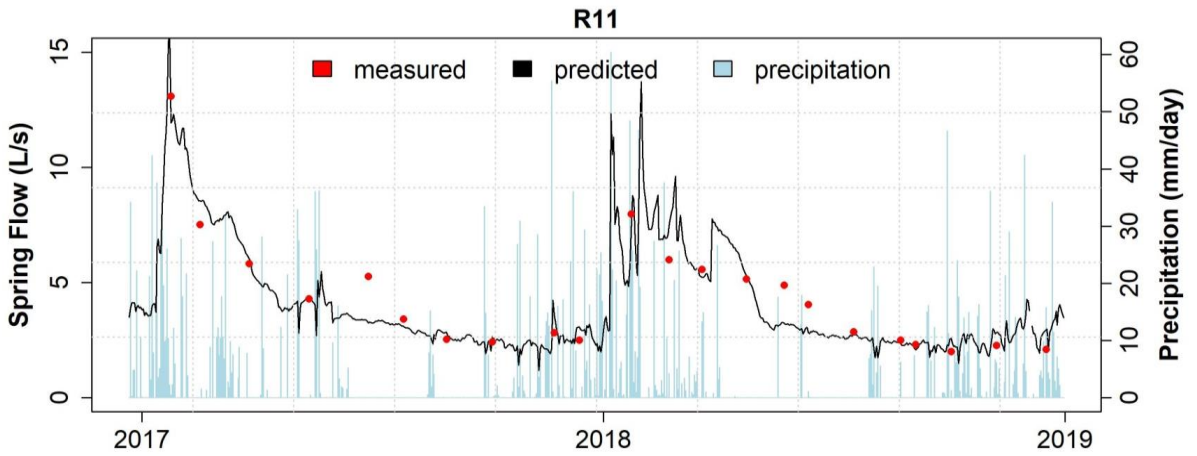
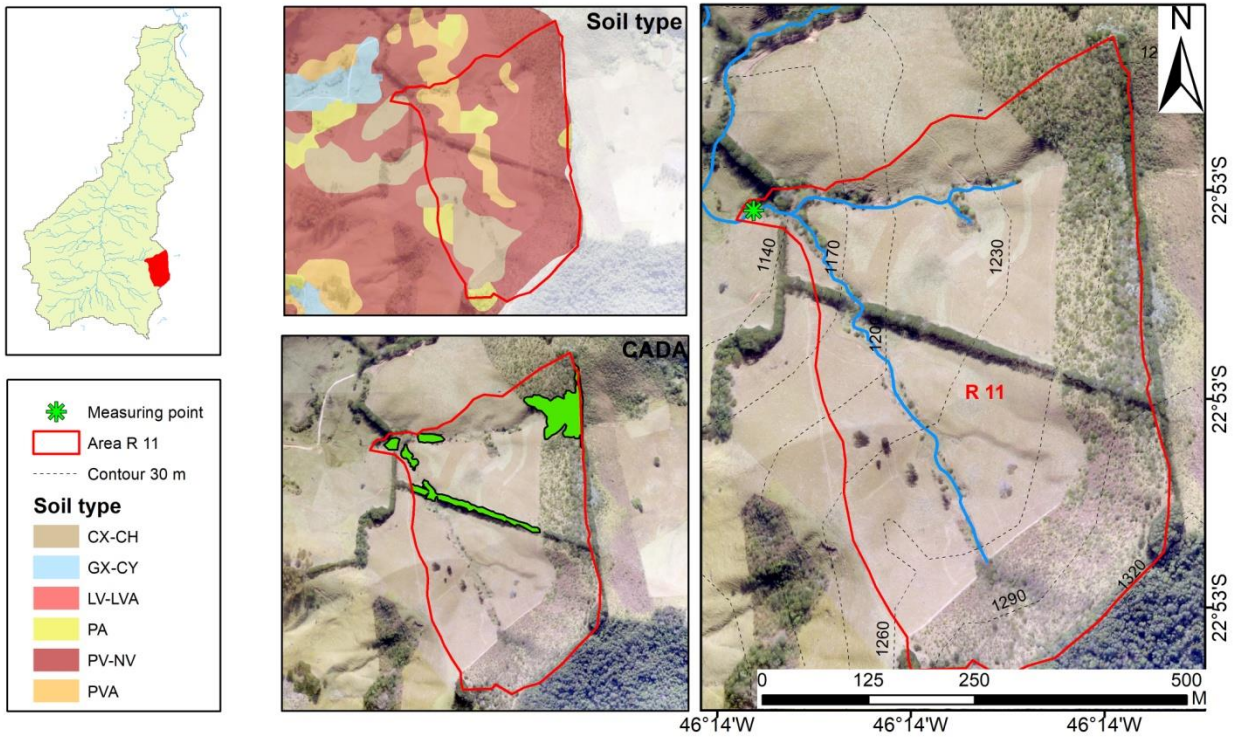


G4: PC 1,3

R2: 0.893

p-value: 1.171e-10

Point R 11

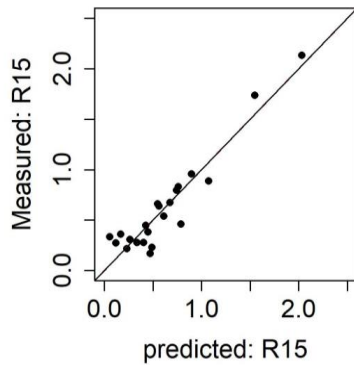
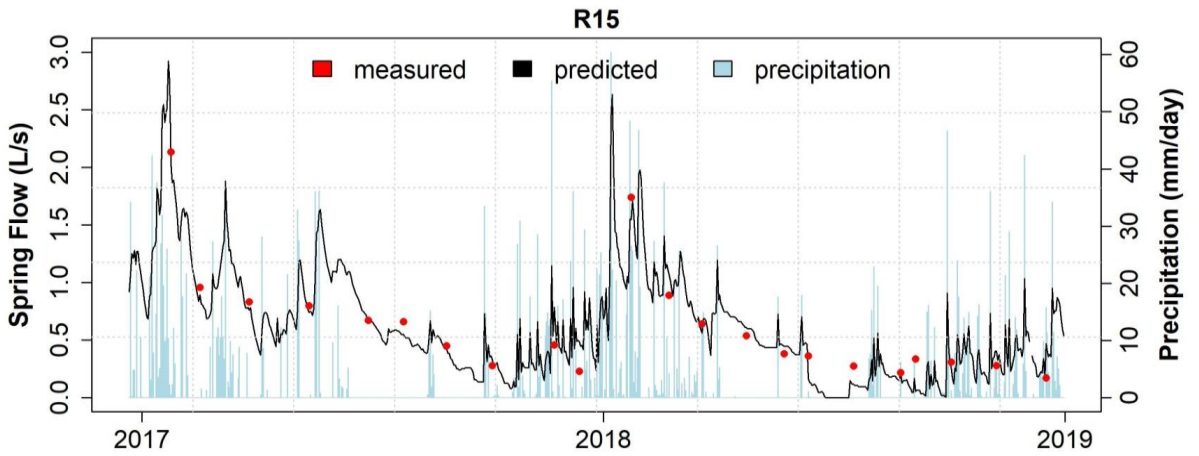
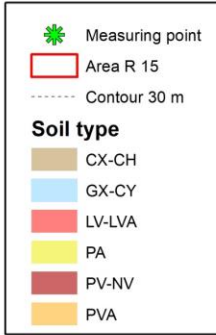
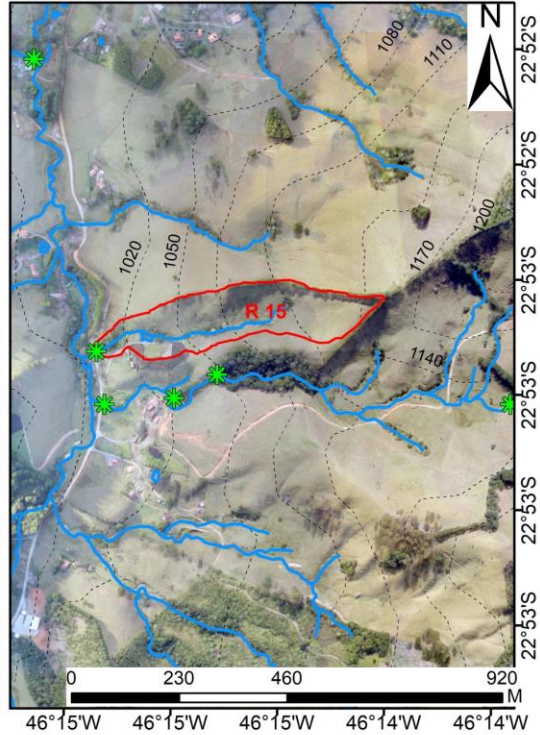
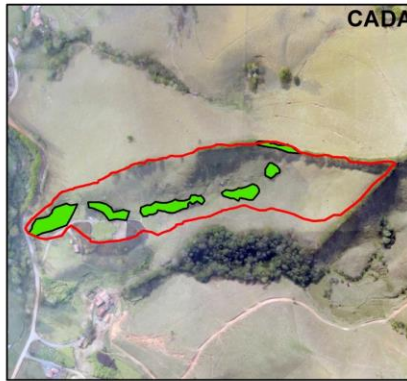
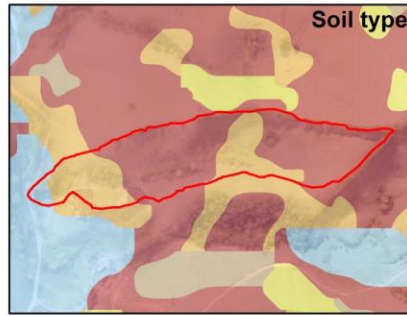


G3: PC 1, 2

R2: 0.884

p-value: 4.96e-11

Point R 15

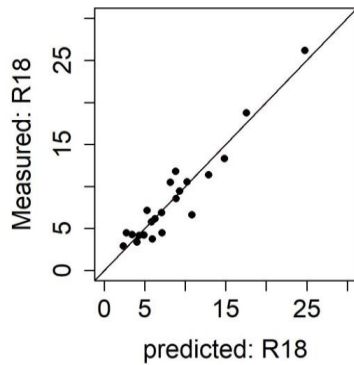
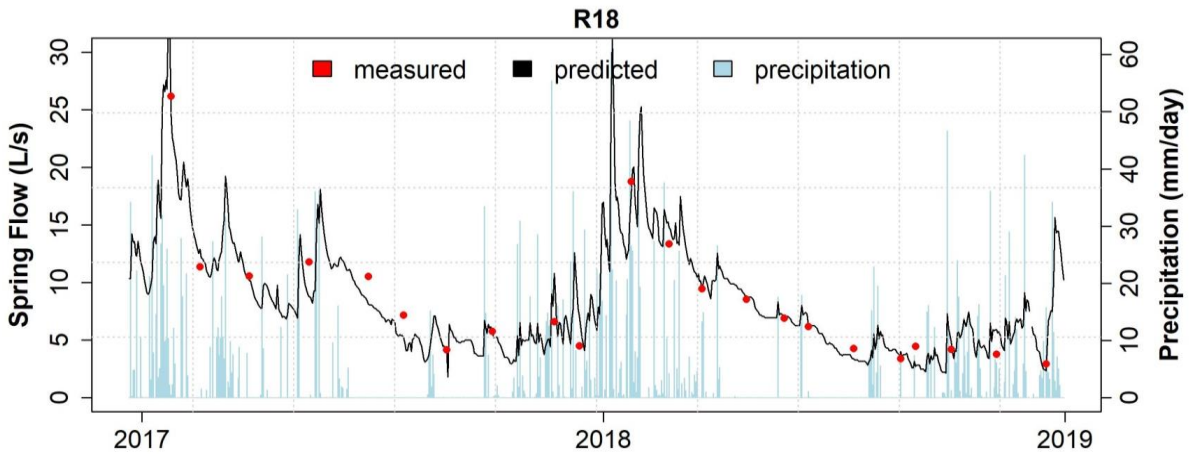
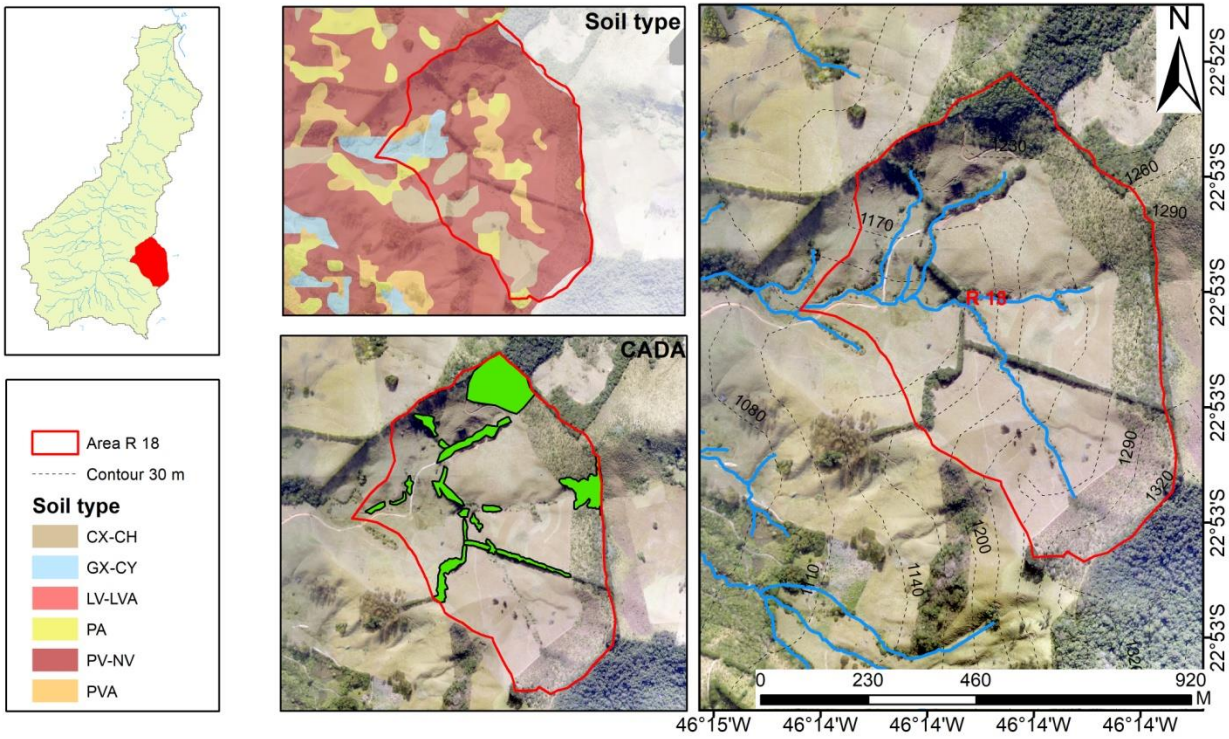


G2: PC 1, 2, 3

R2: 0.886

p-value: 4.273e-11

Point R 18

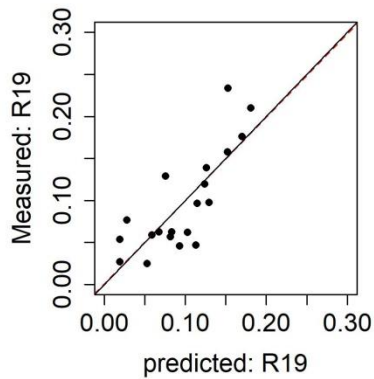
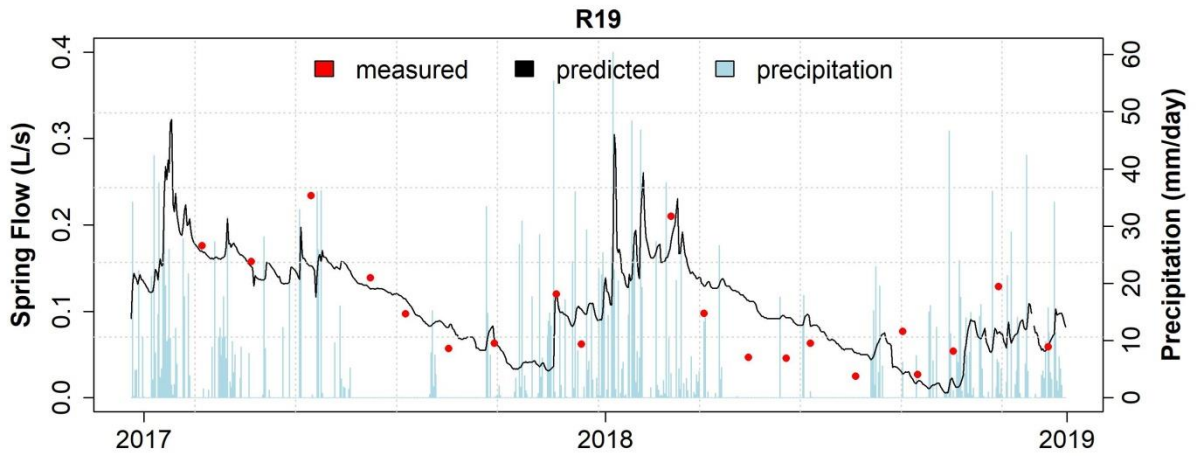
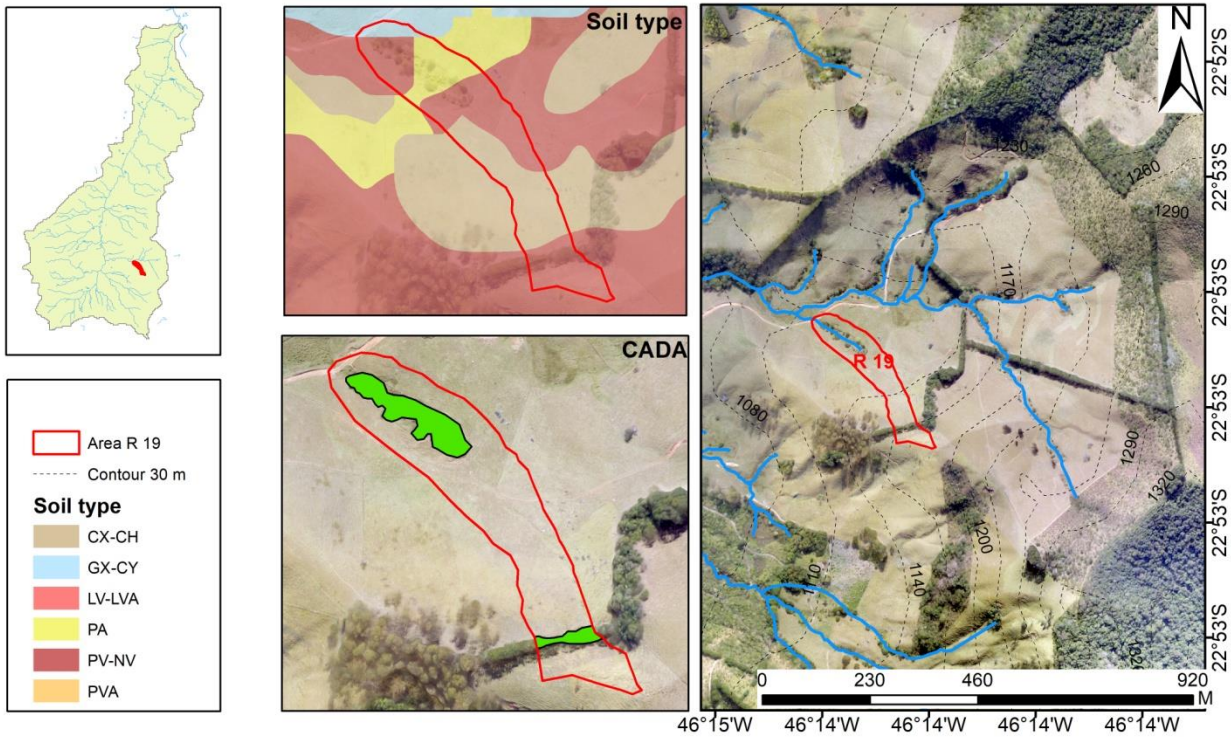


G1: PC 1,2

R2: 0.903

p-value: 8.374e-12

Point R 19

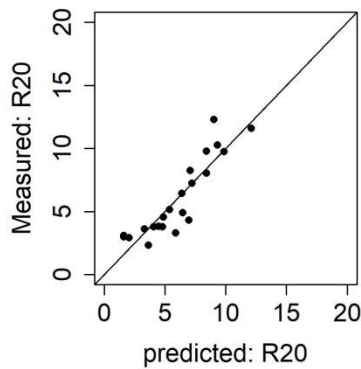
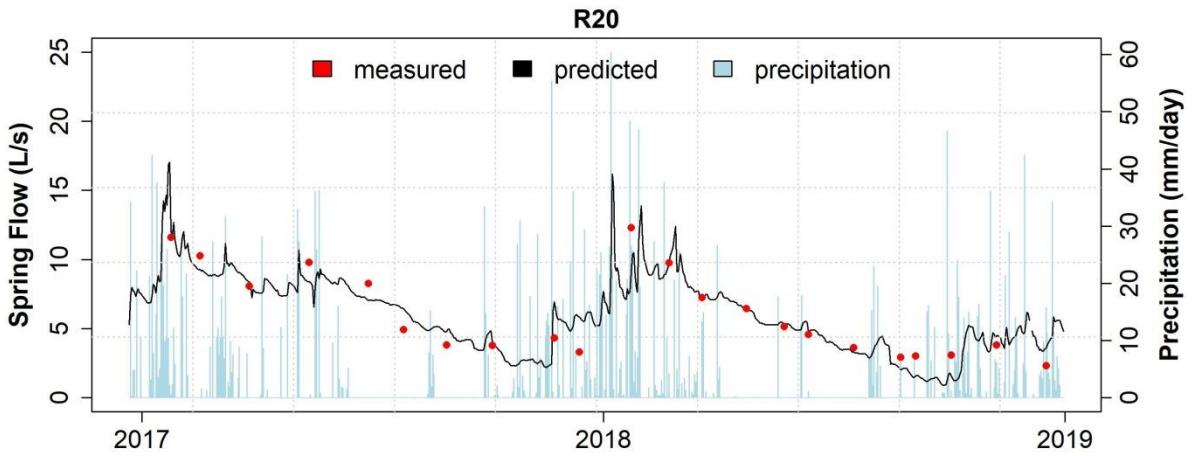
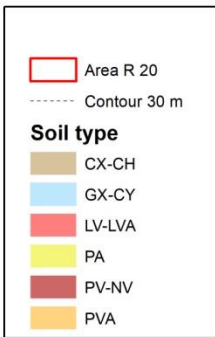
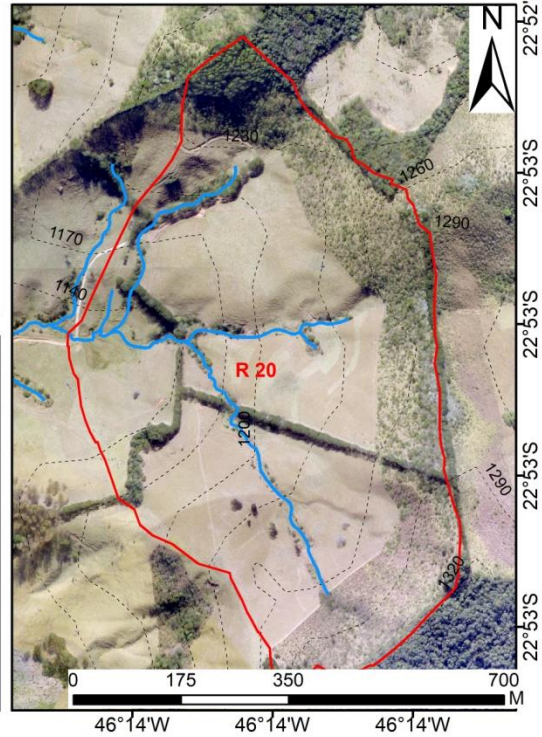
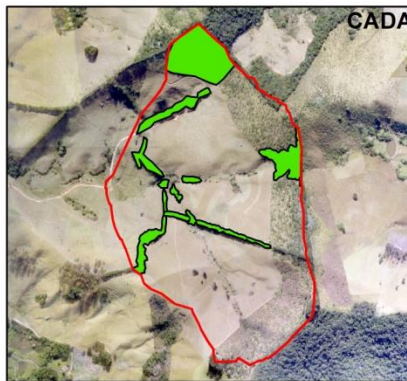
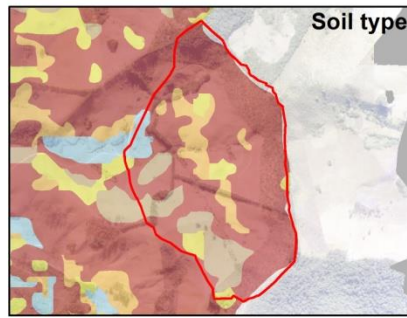


G6: PC 1

R2: 0.607

p-value: 3.11e-05

Point R 20

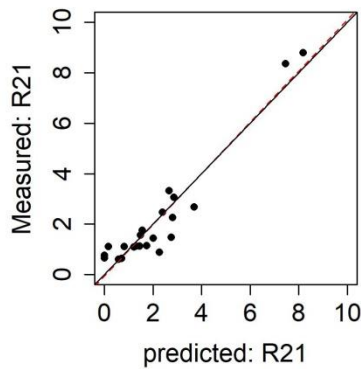
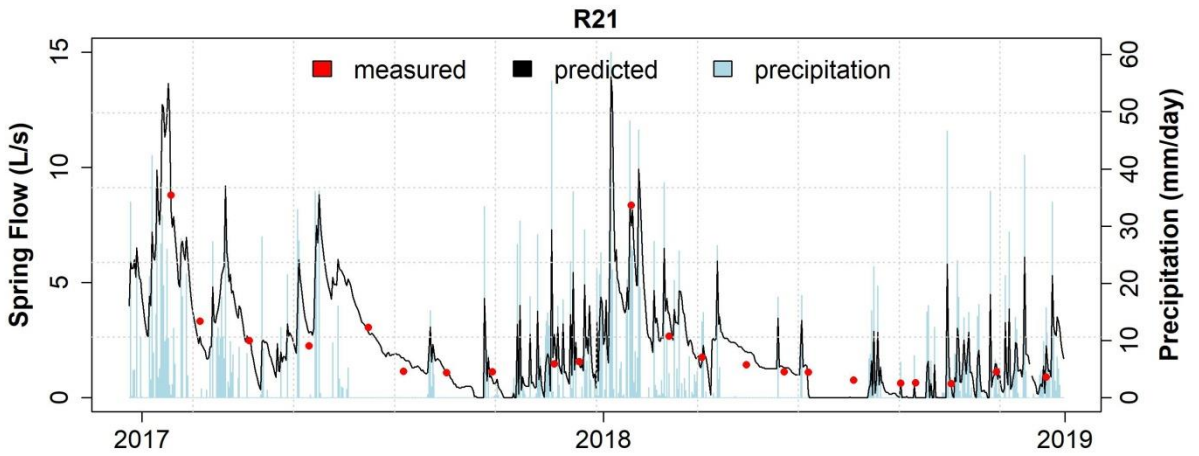
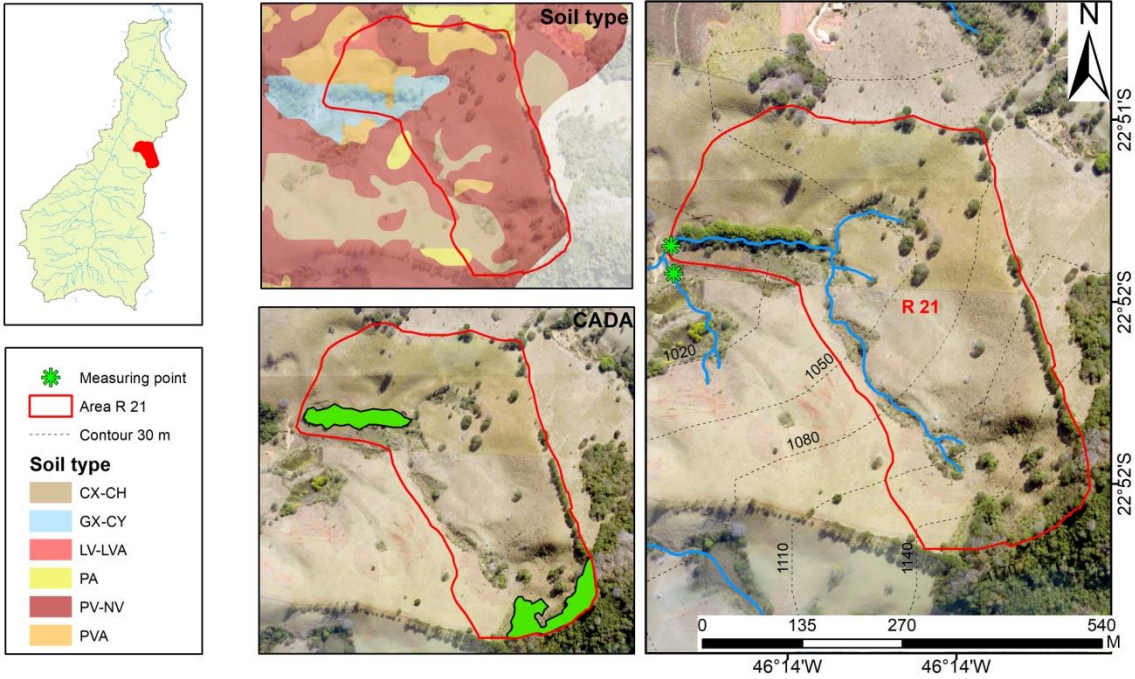


G4: PC 1,2

R2: 0.795

p-value: 5.547e-08

Point R 21

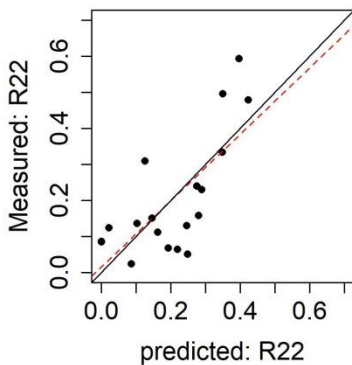
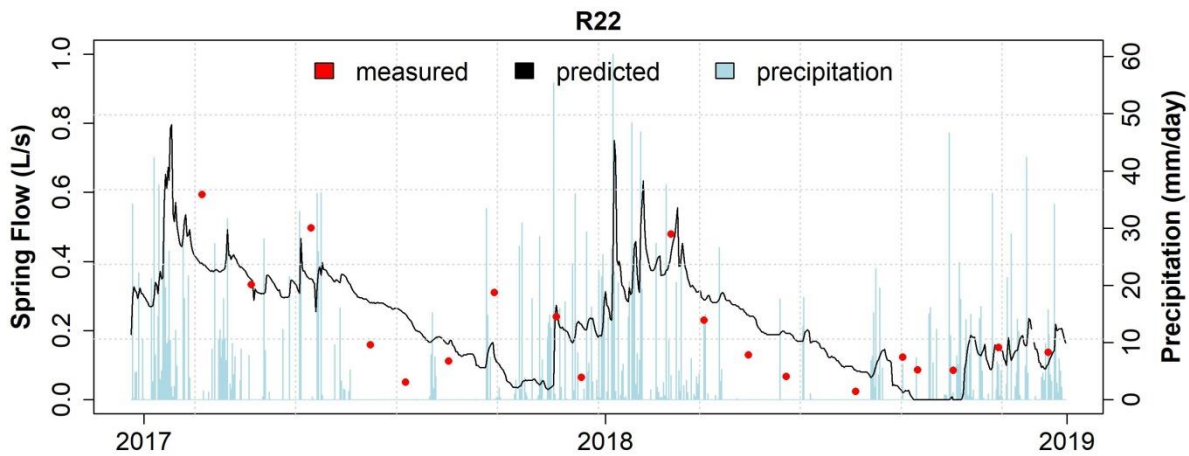
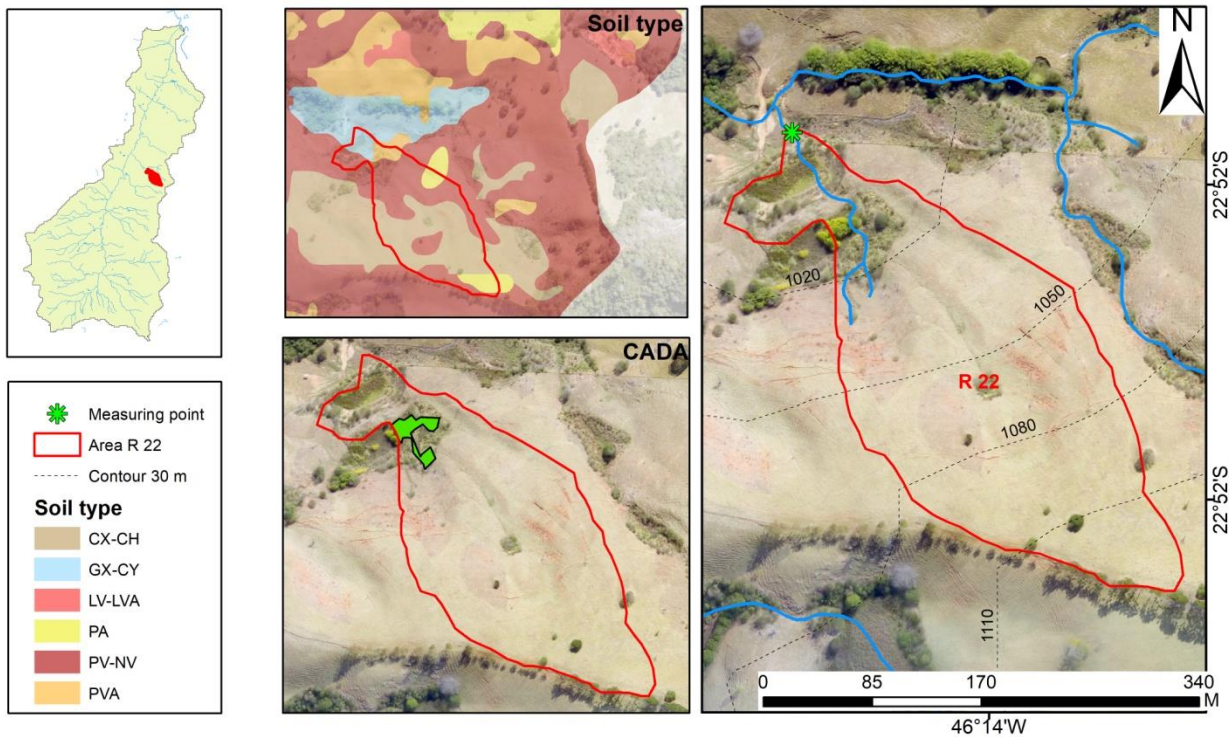


G2: PC 1,2, 4

R2: 0.905

p-value: 1.577e-11

Point R 22

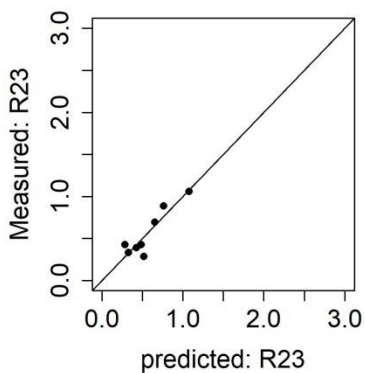
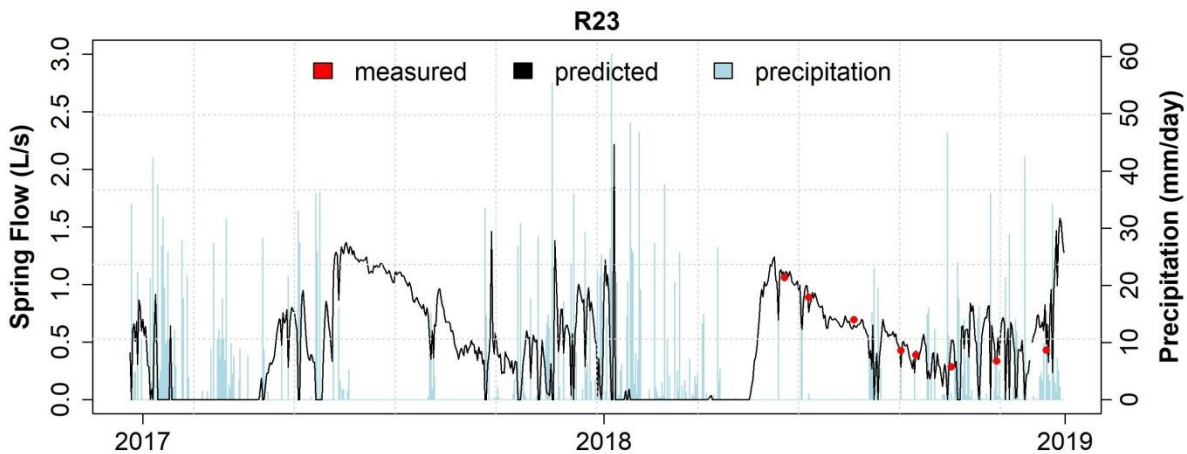
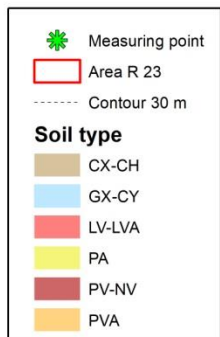
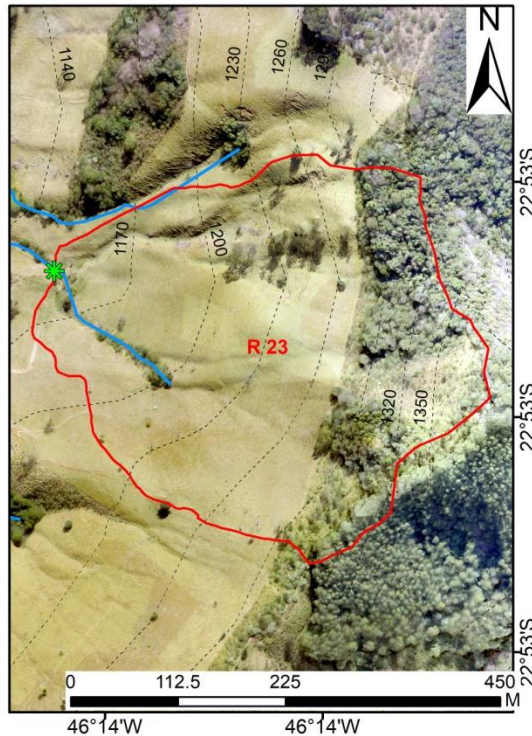
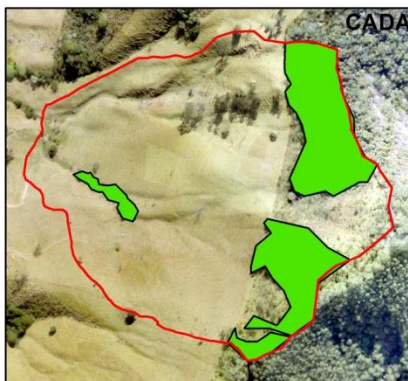
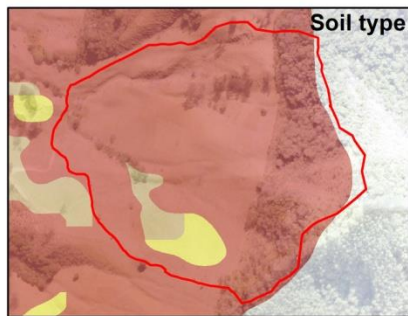


G6: PC 1

R2: 0.487

p-value: 0.000519

Point R 23



G4: PC 1, 2, 3, 4

R2: 0.802

p-value: 0.001629