

Cap. 9

“Estudo dos Indicadores de Qualidade do Solo para a Recuperação de Nascentes em Região do Cerrado Mineiro”

Autores:

Migliorini Mendes, R.S¹; Scotti, M.R.M²

1 Professora Depto Botânica da UEMG, Bióloga pela PUC Minas com Mestrado e Doutorado em Biologia Vegetal/ UFMG

2 Professora Depto de Botânica do ICB/ UFMG. Bióloga/UFMG, Mestrado em Microbiologia do solo (UFMG), Doutorado em Biologia do solo (UFRJ) e Pós doutorado pela Universidade de Lisboa (Portugal) e Universidade de Salamanca (Espanha).

E-mail para correspondência: reisila.simone@uemg.br

Resumo:

Este estudo visou diagnosticar a causa da degradação de uma nascente em Conceição do Para e a progressão da sua recuperação em comparação com uma nascente que foi recuperada há 10 anos em Taquaruçu de Minas e que serviu como ponto de referência para a análise de diversos indicadores relacionados ao solo. A nascente de Taquaruçu de Minas inicialmente seca, apresentou uma vazão de 555 ml de água /s. Similarmente, a nascente de Conceição do Pará produziu 402 ml/s oito anos após recuperação. O principal indicador de estresse comprometendo a recuperação da nascente de Conceição do Para foi o excesso de micro porosidade e compactação decorrente da falta da vegetação comprometendo a drenagem e movimentação das águas da chuva e a insurgência da água do aquífero. Os resultados mostram que o plantio de espécies arbóreas em zoneamento foi eficiente em ambas as nascentes para recuperar os serviços ecossistêmicos da floresta ripária.

Abstract

This study aimed to identify the degradation factors and restoration progress of a headwater stream in Conceição do Pará, Minas Gerais, Brazil. For comparison, a successfully restored 10-year-old headwater in Taquaruçu de Minas City served as a reference site for soil quality indicators. While initially dry, the Taquaruçu de Minas headwater exhibited a restored flow rate of 555 ml/s. Similarly, the Conceição do Pará spring produced 402 ml/s after 8 years of restoration efforts. The study identified excess

micro-porosity and soil compaction as key indicators of stress hindering the Conceição do Pará spring's recovery. These issues, stemming from the lack of vegetation, impaired drainage, rainwater infiltration, and spring resurgence. The findings emphasize the crucial role of planting native woody species, carefully selected for ecosystem compatibility, in successfully restoring the essential services provided by riparian forests.

Palavras-chave: Pará de Minas, Taquaruçu de Minas, Cerrado, vazão de nascentes, recuperação de florestas ripárias.

Keywords: Cerrado, springs, flow rate, recovery of riparian forests, spring restoration.

Introdução

A crise hídrica que estamos vivendo nos últimos anos traz sérias consequências econômicas e sociais. A falta de chuvas tem conduzido o Brasil e, em particular, a região Sudeste a uma situação difícil em vários campos, como na geração de energia elétrica, no abastecimento de água das cidades e na agricultura e pecuária. Sabemos que agricultura e pecuária são atividades econômicas essenciais na produção de alimentos, que têm em comum a necessidade de espaço físico e o suprimento de água. O desmatamento de extensas áreas de Cerrado, para suprir a falta de espaço nessas atividades e ampliar a fronteira agrícola, diminui drasticamente a quantidade de água infiltrada, retida e percolada no solo, aumentando o escoamento superficial (runoff), a lixiviação e, conseqüentemente, o assoreamento dos cursos hídricos (Indoria et al., 2020; Weeraratna, 2022).

A substituição da cobertura vegetal por pastagens rompe o elo entre a água do subsolo (subterrânea) e a atmosfera, exercido pelas raízes da vegetação freatófita arbórea comprometendo a disponibilidade desse recurso. As árvores possuem atributos funcionais como sistemas radiculares profundos, capacidade de fixação de carbono, tolerância à seca, capacidade de sombreamento e interação com a microbiota do solo, que as capacitam como engenheiras de ecossistemas. Elas capturam, redirecionam, estocam e liberam água em resposta aos estímulos ambientais e fisiológicos. O principal papel das espécies arbóreas no ciclo hídrico é a capacidade de evapotranspiração elevando o nível de água de um potencial mátrico de – 50 KPA em nível das raízes no

solo para – 20 000 KPA em nível das folhas ou atmosférico, movendo a água de um potencial com maior conteúdo para um nível com menor conteúdo de água. Este movimento da água exercido pela evapotranspiração estabelece um continuum solo-planta-atmosfera efetuado pelas espécies arbóreas especialmente nas florestas. Esta movimentação da água entre lençol freático e plantas assegura a força de ascensão capilar nos poros do solo e manutenção do próprio lençol freático (Brady and Weil, R.R., 2007). A formação de poros do solo depende da textura do solo, da presença das raízes e da formação de agregados (Bronik and Lal, 2005). A formação de agregados é controlada pela vegetação presente, seja através do sistema radicular que física e quimicamente estabiliza o solo, seja pelo *input* de biomassa vegetal que fornecem substrato para a microbiota decompositora responsável pela formação de ácidos húmicos (Gholami and Khaleghi, 2013).

O produto da decomposição das plantas lenhosas ricas em lignina é o ácido húmico, molécula responsável pela formação de agregados no solo (Stevenson, 1994; Six et al., 2002.). As substâncias húmicas, moléculas ricas em cargas negativas, estabelecem pontes iônicas entre si e entre argila e areia formando os complexos argilo-húmicos que são a unidade primária de agregação (Piccolo, 2002). A formação dessas pontes resulta na formação de microagregados (<250 μm) e macroagregados (>250 μm) como descrito por Tisdall and Oades (1982) e Kimura et al. (2017). A formação de agregados, por sua vez, permite a formação de poros (macro e microporos) permitindo a aeração e permeabilidade. (Stevenson, 1994).

Um solo com bom estado de agregação funciona também como sequestrador de carbono, mitigando as mudanças climáticas (Zheng et al., 2016; Zhao et al., 2018; Mustafa et al., 2020). Portanto, podemos aumentar a disponibilidade de água doce na superfície terrestre através do manejo correto da vegetação das áreas de recarga hídrica, do entorno das nascentes e das matas ciliares (An et al., 2010; Barrela et al., 2001; David et al., 2013; Lawrence et al., 1997; Smith et al., 1998). Esta última, também chamada de floresta ripária, tem como função, entre outras, a preservação da biodiversidade e da qualidade da água no solo e no corpo hídrico, o controle da erosão das margens de rios e lagos, a produção de biomassa, além da manutenção da temperatura da água pelo sombreamento, o que assegura a vida aquática (Naiman e Decamps, 1997; Triska, 1993; Vidon et al., 2010; Welch, 1991).

Assim, a escolha da vegetação, bem como das intervenções numa área de floresta ripária, pode ser decisiva para o sucesso da recuperação e da qualidade dos afloramentos hídricos. A compreensão das atividades funcionais envolvidas nas regiões ripárias é condição para a eficácia da recuperação, pois os elementos envolvidos nesses processos são indicadores de excelência do sistema de floresta ripária tampão e da qualidade da água, assim como da proteção do corpo hídrico (Qiua e Dosskey, 2012). A floresta ripária é um ecótono de transição do ecossistema terrestre com o aquático (Lowrance et al., 1997) a qual tem um papel pivotante no tamponamento e proteção de ambos os ecossistemas, especialmente nas inundações (Naiman and Decamps, 1997). A vegetação ripária estabiliza as margens; reduz erosão (Naiman and Decamps, 1997); intercepta carreamentos superficiais e água de nascente assim como fluxos hídricos superficiais e profundos (Lowrance et al., 1997; Anbumozhi et al., 2005). Baseado nas diversas funções das florestas ripárias, foi possível perceber e entender a presença de zonas funcionais naturais (Welsch, 1991) as quais são prerrogativas para sua recuperação e seu manejo adequado (Best Management Practice – BMP). De acordo com US Natural Resources Conservation Service (NRCS), um Sistema ripário tampão consiste em 3 zonas funcionais, além da zona hiporéica assegurando os serviços ecossistêmicos de estabilização e drenagem do solo sob inundações e sob pressão antrópica de diferentes usos nos solos circunvizinhos. Em concordância com NRCS, diferentes autores categorizaram as zonas ripárias como zonas funcionais (Welsch, 1991; Lowrance et al., 1997; Sheridan et al., 1999; Schultz et al., 2004) como segue:

1- Zona hiporéica que conecta as águas terrestres e aquáticas profundas em um fluxo bidirecional.

2- Zona I, área adjacente ao curso de água cuja função é estabilizar as margens e conectar a água superficial com o lençol freático tendo como principais características uma arquitetura de raízes mais profundas e ser adaptadas a elevados níveis de umidade. Esta vegetação desempenha um papel de contenção física e química das margens e auxilia também no tamponamento, filtrando sedimentos e moléculas químicas. Essa zona deve ter grande estabilidade física e capacidade de drenagem para receber tanto o fluxo superficial como profundo oriundo da zona 2, assim como aquele oriundo da água de inundações.

3- Zona II, que é a zona subsequente à Zona I onde as espécies presentes são produtoras de biomassa vegetal, capazes de assegurar drenagem e estabilização impedindo erosão superficial e profunda. O serviço ambiental de percolação da água ocorre predominantemente nessa zona em função da grande produção de poros no solo promovida pela agregação do solo que por sua vez é responsável pela estabilização do mesmo. Por isso, a principal característica das espécies dominantes deve ser a habilidade em produzir biomassa vegetal, substrato para a formação da matéria orgânica do solo ou matéria orgânica húmica. Em consequência da formação de ácidos húmicos é também nesta Zona que ocorre a função do tamponamento ou contenção dos sedimentos, das erosões laminares e profundas e o maior sequestro de carbono e de poluentes. Nutrientes responsáveis pela eutrofização de lagos e rios tais como nitratos, metais pesados e poluentes químicos são especialmente tratados nessa zona devido a ação quelante da matéria orgânica húmica (Weissteiner et al., 2013).

4- Zona III, a última zona, é a faixa mais distante da margem e constitui a primeira barreira de proteção para o corpo hídrico, fazendo interface com outros tipos de uso do solo como agrícola, pastagem, urbano etc. Assim, terá o papel de reduzir a velocidade do fluxo de águas superficiais e o arraste de sedimentos. O material originado de áreas altas que chega à zona ripária é filtrado através dos agregados formados nas diferentes zonas funcionais, protegendo o ecossistema aquático do excesso de nutrientes e poluentes, assim como dos sedimentos (Kreutzweiser e Capell, 2001; Vidon *et al.*, 2010) que podem alterar a estrutura alimentar do sistema aquático pela capacidade de troca catiônica dos ácidos húmicos (Kuglerova et al., 2014) e pelo significativo sequestro de carbono no solo ripário (Pan et al., 2011).

O objetivo deste estudo de caso foi realizar um diagnóstico do impacto e avaliar a progressão da recuperação de uma nascente que se encontrava em estágio inicial de reabilitação, em comparação com uma nascente que foi recuperada há 10 anos e que serviu como ponto de referência para a análise de diversos indicadores relacionados ao solo. Esses indicadores incluíram análises texturais e de fertilidade do solo, conteúdo de água no solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, bem como fatores de armazenamento de água no solo, como umidade do solo, água superficial do solo, macroporosidade e microporosidade. Além disso, foram investigados fatores relacionados à fertilidade e à estrutura do solo, que têm impacto na drenagem e na

infiltração, juntamente com a descarga de água, que foi avaliada por meio do volume aparente de vazão.

2- Material e métodos

Localização e descrição do impacto ambiental

2.1- Área experimental 1 – Taquaraçu de Minas (TM) – Nascente recuperada

O estudo foi realizado na fazenda do sr. José Maria Pinto, localizada no município de Taquaraçu de Minas, na bacia do rio Taquaraçu. Situada a 728 metros de altitude nas coordenadas geográficas: Latitude: 19° 39' 49" Sul Longitude: 43° 41' 29" Oeste (Fig. 1A). O município se estende por 329,2 km² e contava com 3 792 habitantes no último censo. A densidade demográfica é de 11,5 habitantes por km² no território do município.

A área de estudo em TM apresentava duas nascentes em área de pastagem intensiva as quais eram usadas para dessedentação de animais e para abastecimento familiar. As nascentes foram degradadas pelo pisoteio de animais até a perda total da água sob forte processo erosivo (Fig. 1B). Após contenção do processo erosivo com enrocamento (Fig. 1C) foi feito o plantio de espécies selecionadas através do sistema de zoneamento (Fig. 1D). Após 10 anos de plantio com retorno da produção de água pelas nascentes (Fig. 1E-F) foi feita a coleta de amostras de solo para as análises abaixo mencionadas visando utilizá-las como referência para diagnóstico da degradação da área experimental 2

2.2 Área experimental 2 – Conceição do Pará (CP) Nascente degradada

O estudo foi realizado na Fazenda São João, localizada na comunidade de São João de Cima, pertencente ao município de Conceição do Pará, Minas Gerais. A fazenda localiza-se à margem esquerda do rio São João, um afluente do rio Pará nas coordenadas geográficas 44° 50' 12.95" de longitude Oeste de Greenwich e 19°45' 01.75" de latitude Sul, com altitude de 677 metros (Fig. 1G). As médias anuais da região de precipitação são de 1300 mm, as temperaturas variam entre 35°C e 15°C e a umidade relativa do ar média é de 68%. O tipo de clima, segundo Köppen, é Cwa, caracterizado como temperado chuvoso (mesotérmico com inverno seco e verão chuvoso). A temperatura do mês mais frio é inferior a 18° e do mês mais quente superior a 22° C. O mês mais seco tem precipitação inferior à décima parte da precipitação do mês mais chuvoso. O solo original

é um Latossolo vermelho amarelo distrófico de textura argilosa, horizonte A moderado, relevo ondulado sob vegetação de cerrado e floresta subperenifolia. Segundo relatos a área antes de ser submetida a pastagem intensiva apresentava nascentes difusas. O experimento foi desenvolvido em área de pastagem, composta por vegetação de *Brachiaria sp* de aproximadamente 1,5 hectare. A área abrange um topo de morro, uma encosta, uma nascente difusa e um brejo, onde se registrou um declínio na produção de água ao longo dos últimos anos. A primeira ação foi tentar delimitar a área de nascente difusa e para tanto foi feita medição da umidade superficial do solo utilizando um sensor de umidade analógico portátil modelo MUS60-TR, marca Tracom por este ser um método de medição instantânea e confiável. O aparelho utilizado foi modelo MUS60-TR, marca Tracom. Desta forma foi possível estimar a área de trabalho (Fig. 1H) .

2.3 Delineamento experimental do plantio na CP

Uma vez estabelecida a área de trabalho e considerando que o afloramento de água estaria em toda área, ajustamos o modelo de plantio em zonas tendo em mente que a zona Z_0 , na área de afloramento de água deveria ser composta por espécies freatófitas que chamamos de Zona Zero (Z0). Inicialmente, a introdução de espécies arbóreas era essencial para restabelecimento do *continuum-solo-planta-atmosfera* e estabilização do lençol freático. Após este serviço ecossistêmico ser atingido, o excesso de água iria constituir uma pressão seletiva sobre as espécies arbóreas das zonas 1, 2 e 3, as quais deveriam entrar em declínio. Para tanto, a área foi dividida em quatro zonas (Fig. 1-I) no entorno da zona estimada para afloramento da água: Z0, mais próxima da nascente com 10 m a partir do ponto de afloramento; Z1 com 14 m, Z2 com 13 m e Z3 com 10 m (Fig.1-H). Foram coletadas amostras de solo e realizadas medições do percentual de umidade superficial do solo em cinco pontos aleatórios dentro de cada zona. A área do brejo, apesar de cercada, não foi plantada e sua vegetação foi mantida intacta. A área total de plantio foi de aproximadamente, 1,4 hectare e foram plantadas 1.710 mudas de espécies variadas.

2.4 Ações iniciais em CP

A área foi cercada com o objetivo de impedir a entrada dos animais da fazenda (gado e cavalos) e, por conseguinte, o pisoteio e a compactação do solo. Após o cercamento, procedemos uma roçada mecanizada, com roçadeira costal a gasolina e

manual usando foice. O controle químico das formigas foi necessário e feito com o uso de iscas granuladas nos buracos encontrados. Esses procedimentos visaram reduzir ao máximo a vegetação invasora e a herbivoria, preparando a área para o plantio das mudas. As espécies foram selecionadas de acordo com registros de levantamento florístico da região, suas funções ecológicas das zonas 1 e 2 e adaptação a condição de umidade do solo (Fig. 1J-K).

2.5 Estudo dos indicadores de degradação da nascente na CP

Os parâmetros analisados foram: teor de umidade do solo, conteúdo de água no solo: $\text{Peso fresco/Peso seco} \times 100$, vazão da água, fertilidade físico-química do solo pós-plantio, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e densidade do pós-plantio.

2.5.1 Coleta das amostras de solo

Após delimitação das zonas estabelecidas na época da recuperação (Z1, Z2 e Z3), coletamos amostras de solo ($n=3$) em cinco pontos aleatórios dentro de cada zona. As amostras coletadas foram submetidas a diferentes análises.

2.5.2 Análise física em amostras indeformadas de solo

Nos locais estudados (TM e CP) foram coletadas três amostras indeformadas, com anel de Kopecky ou anel volumétrico com capacidade de 50 cm^3 , nas quatro zonas determinadas anteriormente de cada área de estudo e enviadas para análise dos atributos físicos, segundo o manual de métodos de análises de solo da Embrapa (1997).

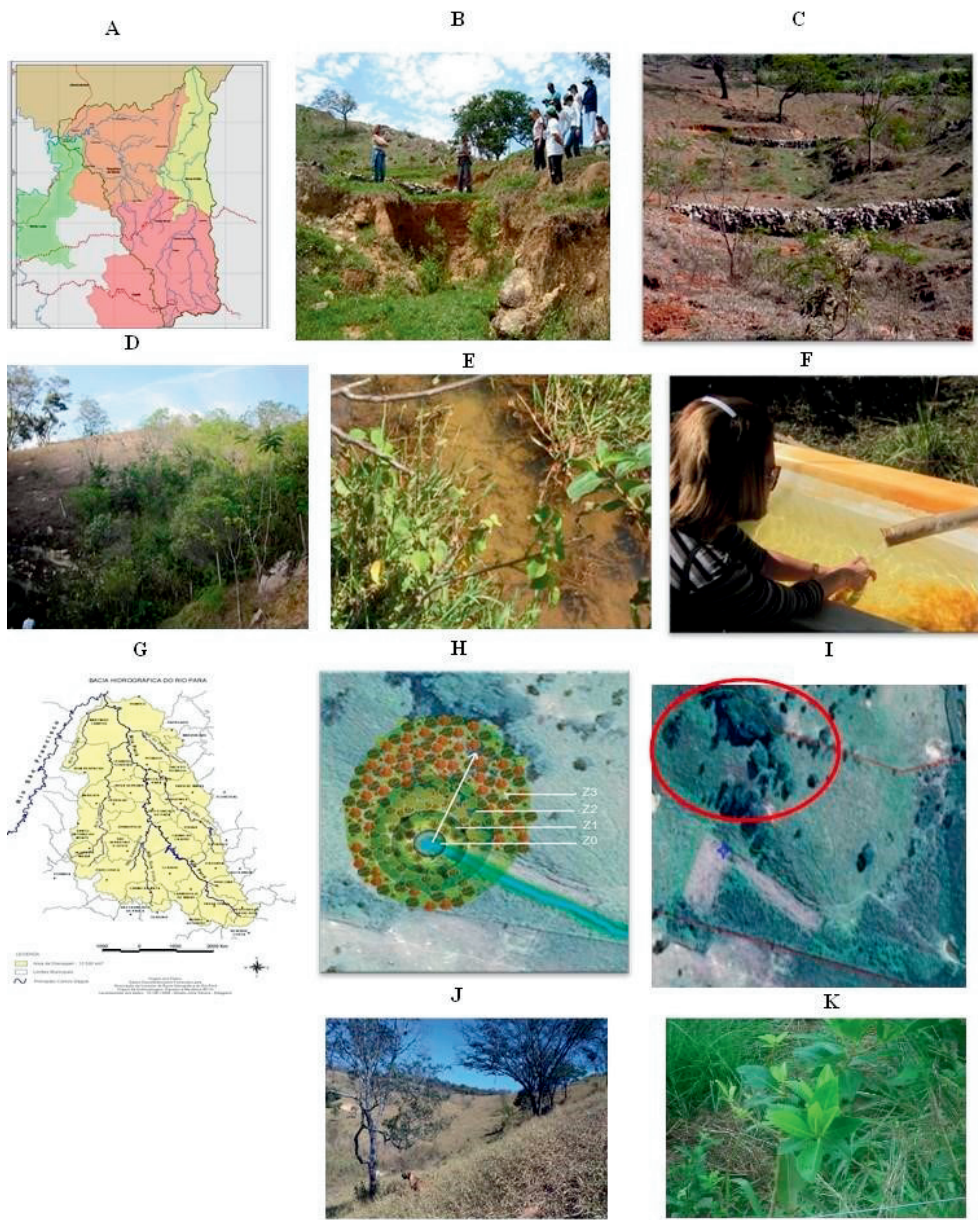


Fig. 1 - A: Mapa de localização de Taquaruçu de Minas (TM), **B:** Area degradada da nascente em TM, **C:** Barreiras de contenção de sedimentos em TM, **D:** Plantio de mata ripária em zoneamento no entorno da nascente em TM, **E e F:** Recuperação da nascente em TM. **G:** Mapa Localização Conceição do Pará (CP) **H:** Modelo de plantio adotado em CP, **I:** Área de localização da nascente em CP com elevado nível de umidade **J e K:** Área de Plantio em zoneamento em CP.

2.5.3- Densidade aparente

É a relação entre a massa da amostra de solo e seu volume total, incluindo os espaços porosos. No laboratório, essas amostras foram, cuidadosamente secas em temperatura controlada para remover a umidade. Em seguida, a massa da amostra seca é medida com precisão e, finalmente, o volume é obtido dividindo a massa pelo valor da densidade do solo. A densidade aparente é expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 .

2.5.4- Porosidade total

É a proporção dos espaços vazios (poros) presentes no solo em relação ao volume total da amostra. Para determinar a porosidade total, o volume de ar (espaços porosos) e o volume de sólidos são medidos separadamente. Em seguida, a porosidade total é calculada subtraindo o volume de sólidos do volume total da amostra e dividindo pelo volume total da amostra.

2.5.5- Macro e microporosidade

A macroporosidade é a porcentagem de espaços porosos maiores no solo, permitindo a rápida infiltração de água e a aeração do solo. A microporosidade, por outro lado, é a porcentagem de espaços porosos menores, que retêm água por mais tempo e são importantes para a disponibilidade de água para as plantas. A separação entre macroporosidade e microporosidade é feita através de técnicas de imersão e saturação em água para encher completamente os poros. Após a saturação, a amostra é submetida a uma série de procedimentos, como secagem controlada, para determinar os volumes de macroporos e microporos. A diferença entre a porosidade total e a macroporosidade é usada para calcular a microporosidade.

2.5.6- Análises em amostra deformada de solo

Nos locais estudados (TM e CP) foram coletadas três amostras deformadas para análise dos atributos químicos, nas quatro zonas determinadas anteriormente de cada área de estudo. As amostras foram coletadas em embalagens impermeáveis, seladas com nó e fita adesiva a fim de evitar perdas de água por evaporação. No laboratório ocorreu a pesagem de uma massa úmida conhecida e, em seguida, o material foi

colocado para secar em estufa a 105°C, até o peso constante. O material então foi novamente pesado, obtendo-se a massa seca. As análises laboratoriais foram realizadas de acordo com Embrapa (1997).

2.5.7- Análise textural / Granulometria

Baseia-se na sedimentação das partículas que compõem o solo. Após a adição de um dispersante químico, fixa-se um tempo único para a determinação da densidade da suspensão que se admite ser a concentração total de argila. As frações grosseiras (areias fina e grossa) são separadas por tamisação e pesadas. O silte é obtido por diferença (Embrapa, 1979).

2.5.8- Análises químicas

Foram coletadas três amostras de cada área nas quatro zonas com uma cavadeira articulada (boca de lobo). Cada amostra foi composta por uma mistura de três subamostras colhidas em cada bloco/zona. As amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas impermeáveis, transportadas para o laboratório de recuperação de áreas degradadas ICB/UFMG, onde foram pesadas e separadas para serem enviadas para análise. Os atributos químicos avaliados foram os teores dos principais minerais (Fósforo, Potássio, Magnésio, Cálcio, Alumínio), teor de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7 e a saturação por bases. As análises laboratoriais foram realizadas de acordo com Embrapa (1997).

2.5.9 Volume de vazão

A medição do volume da vazão de água na nascente antes e após as ações de restauração permite comparar os resultados e determinar se houve um aumento na quantidade de água fluindo na nascente. As medidas de vazão também permitem avaliar o impacto das práticas de manejo implementadas na pastagem circundante à nascente.

As vazões foram quantificadas a partir da coleta de água em recipiente com escala milimétrica e cronômetro e expressas em ml/s.

3- Resultados

3.1- Amostras indeformadas

As amostras oriundas do solo indeformado retratam a condição exata do solo no momento da coleta. Analisando os parâmetros do solo relacionados com a dinâmica da água, observa-se que a área CP (solo indeformado) apresenta os mais baixos índices de porosidade total e macroporosidade (Fig. 2), assim como água gravitacional, conteúdo de água do solo e umidade total (Fig. 3) em relação à TM. Porém, CP apresentou um excesso de microporosidade e conseqüentemente uma maior densidade sugerindo se tratar de um solo compactado com deficiência na percolação. Este pode ser o fator impediante do afloramento da nascente, explicando também a pouca umidade de água gravitacional e conteúdo de água do solo, registrados no CP.

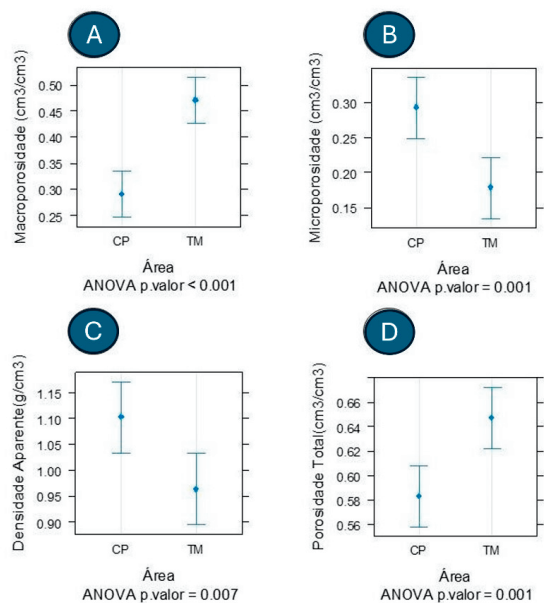


Fig. 2 – Amostras indeformadas de solo. A – macroporosidade; B – microporosidade; C – densidade aparente; D – porosidade total estimada pela ANOVA. Intervalo de 95% de confiança para as médias das respectivas variáveis nas áreas TM e CP.

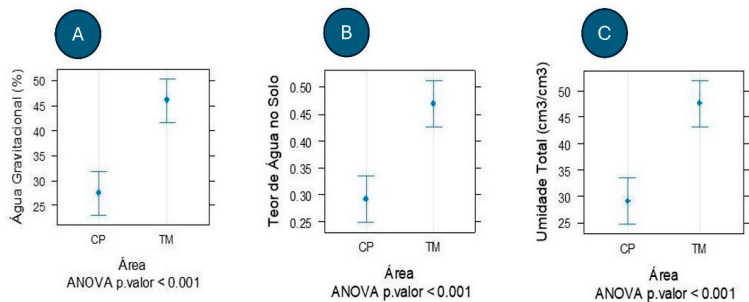


Fig. 3 – Análise de densidade aparente (BulkD), = A- água gravitacional (GravWat). B- água no solo (SoilWatPor) e C - umidade total (TotMoi), estimada pela ANOVA. Intervalo de 95% de confiança para as médias das respectivas variáveis nas áreas TM e C.

3.2 - Amostras deformadas

Em relação aos resultados oriundos da amostra deformada, também o conteúdo de água do solo foi significativamente menor em CP, mas a umidade superficial foi similar em ambas as áreas, o que fala a favor do comprometimento da drenagem em CP prejudicando a percolação da água em profundidade (Fig. 4).

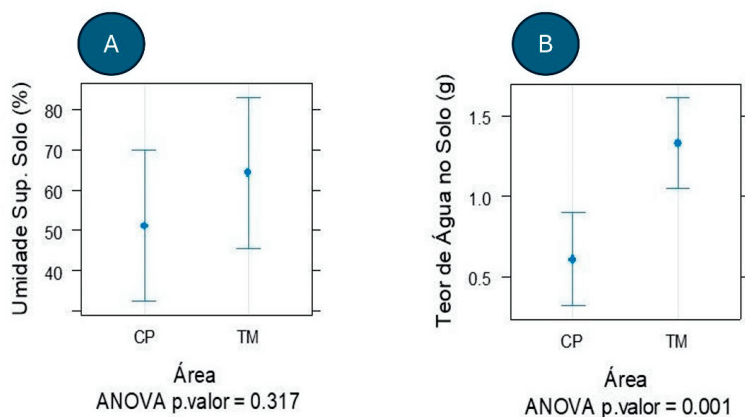


Fig. 4 – Análise de água superficial e teor de água no solo. A – umidade superficial do solo; B – teor de água no solo, estimada pela ANOVA. Intervalo de 95% de confiança para as médias das respectivas variáveis nas áreas TM e CP.

O excesso de microporosidade e densidade elevada podem estar correlacionado com o baixo conteúdo de matéria orgânica da área. Realmente, a CP apresenta uma menor fertilidade em relação à TM, estimada pelo conteúdo de MO, e saturação de bases (Tabela 1). A área CP apresentou também deficiência significativa de nutrientes (P, Ca, Mg e K), acompanhada por baixa CTC e baixa saturação de bases (Tabela 1).

Tab. 1 – Análises físico-químicas do solo e comparação entre as duas áreas CP e TM

Variáveis	Médias	Comparação p
Sand (g/kg)	CP 526,25	0,014
	TM 416,50	
Clay (g/kg)	CP 228,67	0,82
	TM 234,33	
Silt (g/kg)	CP 245,17	0,82
	TM 348,50	
pH (H ₂ O)	CP 5,18	0,011
	TM 5,76	
MO (g/dm ³)	CP 33,84	0,026
	TM 44,39	
P (mg/dm ³)	CP 6,63	0,003
	TM 2,24	
K (cmol/dm ³)	CP 49,00	0,65
	TM 46,75	
Ca (cmol/dm ³)	CP 0,98	0,006
	TM 3,96	
Mg (cmol/dm ³)	CP 0,56	0,003
	TM 2,93	
AL (cmol/dm ³)	CP 0,83	0,284
	TM 0,46	
BS (cmol/dm ³)	CP 1,63	0,002
	TM 6,89	
CTC (cmol/dm ³)	CP 8,97	0,008
	TM 14,68	
Saturação de Base (%)	CP 18,15	0,005
	TM 42,23	

Volume de vazão de água

Os resultados da medição da vazão de água na nascente antes e apenas 12 meses após as ações de restauração determinaram um aumento na quantidade de água fluindo na nascente de CP após o plantio em zoneamento.

Tab. 2 – Vazão da nascente nas áreas de estudo no tempo inicial e pós-plantio.

	T0	T 12 meses	T > 8 anos
TM	0 mL/s	2,4 mL/s	555 mL/s
CP	0,081 mL/s	0,11 mL/s	402 mL/s

Legenda: TM aos 12 meses e 10 anos pós-plantio e CP 12 meses pós-plantio inverno e verão.

Os resultados da análise de PCA (Fig. 5) mostraram que todos os parâmetros analisados conjuntamente explicaram 84,22% dos resultados relacionados com a efetividade da nascente, sendo que PC1 (porosidade, macroporosidade, silte, argila, densidade do solo, água gravitacional, conteúdo de água do solo, umidade do solo total, umidade superficial do solo, conteúdo de água do solo) explicaram 37,5% da variância e dos resultados relacionados com TM e PC 2 (Matéria Orgânica (MO), Capacidade de Troca Catiônica (CEC), Soma de Bases (BS), pH, cálcio e microporosidade) explicaram 23,2% dos resultados de CP.

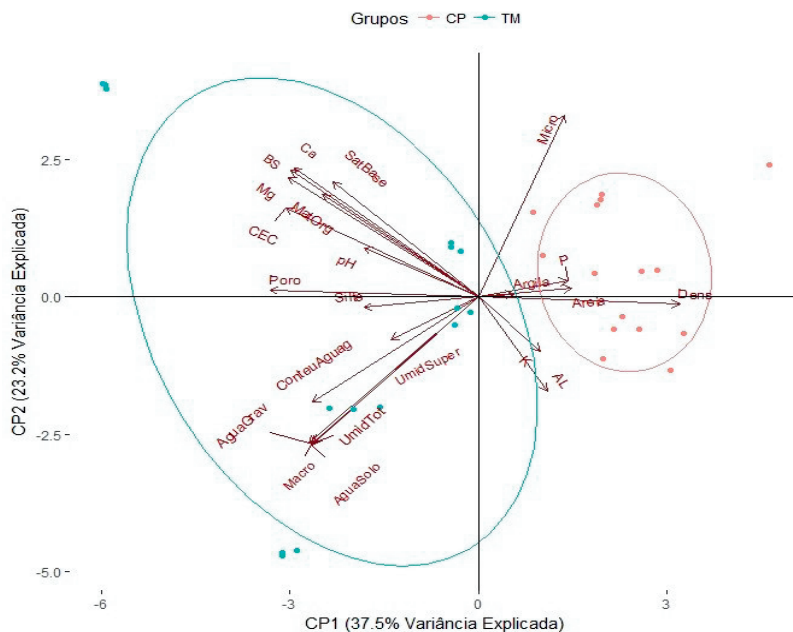


Fig. 5 – PCA 1 Análise de componentes principais (PCA 2) e gráfico de dispersão com base na média das variáveis estudadas de TM e CP. Poro: Porosidade total, Macro: Macroporosidade, Micro: Microporosidade, Umi: umidade total, ÁguaGrav: água gravitacional, ConteÁgua: conteúdo de água no solo, UmidSuper: Umidade superficial, BS: soma de bases, CEC: capacidade de troca catiônica.

Quando foram comparadas as áreas de estudo sob os efeitos do zoneamento (zonas tampão) (Fig. 6) as amostras TM Z0 e Z1 se agruparam sob a influência de todos os parâmetros relacionadas com a água solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total, água gravitacional, conteúdo de água do solo, umidade do solo total, umidade superficial do solo). Entretanto, as amostras TM Z2 e Z3 estão sob influência dos parâmetros de fertilidade como CEC e MO. Estes resultados evidenciam que a vegetação na área de referência TM está cumprindo suas funções ecossistêmicas previstas no sistema de zoneamento. As amostras da área degradada (CP) foram fortemente influenciadas pela microporosidade e densidade, fatores estes que parecem não permitir o afloramento das nascentes. As amostras de solo de CP Z0 foram especialmente afetadas pela microporosidade.

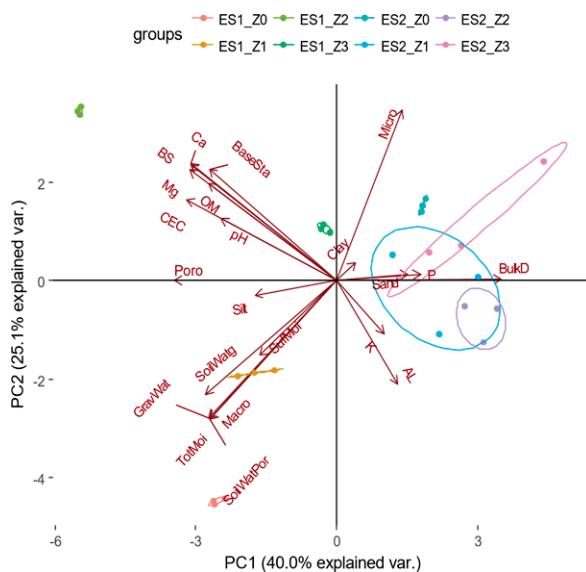


Fig. 6 – Análise de componentes principais (PCA 2) e gráfico de dispersão com base na média das variáveis estudadas em cada zona de TM (ES1) e CP (ES2). Poro: Porosidade total, Macro: Macroporosidade, Micro: Microporosidade, Umi: umidade total, ÁguaGrav: água gravitacional, Umidsuper: Umidade superficial, BS: soma de bases, CEC: capacidade de troca catiônica.

Discussão

O principal indicador de estresse de qualidade ambiental relacionado com a água no solo foi a elevada microporosidade decorrente da falta da vegetação produtora de biomassa, leia-se matéria orgânica húmica. A microporosidade de CP revelou que água não se distribuiu adequadamente ao longo dos poros comprometendo a infiltração, resultando em níveis deficitários de infiltração da água gravitacional nos macroporos e no comprometimento da drenagem prejudicando tanto a insurgência da água do aquífero. como também a infiltração das águas da chuva.

Essa baixa distribuição da água no solo da área CP está também relacionada com a deficiência de macroporos o que favoreceu o aumento da densidade do solo, especialmente quando comparados com os resultados de TM, confirmando a drenagem deficitária do solo CP. Este diagnóstico conduz à necessidade de melhorar os índices de macroporos com o plantio de espécies lenhosas com um sistema radicular

profundo capaz de não só promover o *continuum* da água no solo, mas também de aumentar a porosidade do solo.

O conteúdo de MO do solo é fator essencial para a recuperação de uma nascente, pois é determinante para assegurar a formação de poros por meio da agregação do solo (An *et al.*, 2010; Tivet *et al.*, 2013; Kimura e Scotti, 2016) resultante da incorporação ao solo de biomassa vegetal lignificada e formação de ácido húmico que estabelecem ligações com a argila (Welsch, 1991; Lowrance, 1997; Naiman e Decamps, 1997; Triska *et al.*, 1999; Shultz *et al.*, 2004; Kimura *et al.*, 2017).

A compactação do solo em CP confirmada pela alta densidade e pela elevada microporosidade constitui impedimento mecânico para o crescimento de raízes e pode ser usada como indicadora de degradação da estrutura do solo. Em particular, a formação de agregados promovida pelo aporte de MO e, conseqüente, formação de ácidos húmicos poderiam modificar a quantidade e o tamanho dos poros (macro e microporosidade), garantindo a aeração e a drenagem do solo (Stevenson, 1994). Considerando que o conteúdo de argila foi similar entre as áreas, o déficit nutricional da área CP pode ser atribuído ao baixo conteúdo de matéria orgânica desses solos contrastando com a área de referência encontrada em TM cuja fertilidade pode ser atribuída à matéria orgânica proveniente do *litter* da vegetação estabelecida.

O equilíbrio entre macro e microporos de um solo é condição para que ocorram aeração e drenagem (Six *et al.*, 2000; Eynard *et al.*, 2004; Tivet *et al.*, 2013; Kimura e Scotti, 2016). Essas características do solo são imutáveis, pois dependem de sua composição textural. Porém, esses atributos podem ser melhorados com o uso de técnicas adequadas de recuperação de áreas degradadas. Por meio da incorporação ao solo de uma matéria orgânica qualitativa e quantitativamente adequada, é possível modificar o índice de agregação do solo e equilibrar sua porosidade contribuindo para aumentar a macroporosidade de um solo compactado e resultando em melhoria da drenagem, como na área TM.

As medidas de vazão de água ao longo de um processo de recuperação de nascente degradada são essenciais para avaliar os resultados e a eficácia das ações tomadas durante o processo de restauração. Essas medições fornecem dados concretos e quantitativos sobre a evolução do processo de recuperação. O aumento da quantidade de água cerca de 24 meses após o plantio pode revelar que a nascente está sendo

recuperada e ajudam a monitorar o progresso ao longo do tempo e avaliar a eficácia das ações de restauração. Essa abordagem mais precisa e direcionada visa garantir que os esforços empregados resultem em benefícios concretos para o meio ambiente e para a disponibilidade de recursos hídricos na região.

Os resultados do PCA mostram que os principais parâmetros relacionados com o conteúdo de água na área TM foram relacionados com água gravitacional, umidade total, conteúdo de água do solo e macroporosidade, constituindo os indicadores de efetividade da nascente. Na área CP, a deficiência em matéria orgânica e o excesso de microporos constituem os principais indicadores da deficiente disponibilidade de água (Fig. 5). Porém, o aumento da vazão em apenas 12 meses da recuperação sugere a melhoria desejada. A evolução desses indicadores precisa de monitoramento.

Em conclusão, o principal indicador de estresse de qualidade ambiental relacionado com a água no solo foi a elevada microporosidade decorrente da falta da vegetação produtora de biomassa, leia-se matéria orgânica húmica. A microporosidade da CP resultou no comprometimento da drenagem e prejudicou a infiltração das águas da chuva e a insurgência da água do aquífero.

As espécies selecionadas para plantio em cada zona tampão em Taquaraçu de Minas se mostraram adequadas para o restabelecimento dos atributos do solo relacionados à dinâmica da água no solo, sendo que nas zonas Z0 e Z1, mais próximas ao lençol freático, as espécies plantadas desempenharam um papel fundamental na recuperação dos serviços ecossistêmicos de equilíbrio entre macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade aparente, água gravitacional, conteúdo de água do solo, umidade total e umidade superficial do solo, o que garantiu o afloramento da água e seu escoamento superficial. Nas zonas Z2 e Z3, cujas funções são infiltração e percolação da água, as espécies plantadas favoreceram as características: fertilidade e matéria orgânica.

O plantio em zoneamento com espécies adequadas se define como estratégia indicada para recuperar os serviços ecossistêmicos de ressurgência e funcionalidade da nascente, como verificado em TM. Com base nos parâmetros estudados, podemos concluir que a restauração em Conceição do Pará (CP) parece estar evoluindo em direção à nascente recuperada TM.

Agradecimentos

Agradecemos ao Fundo Socioambiental - FSA da Caixa Econômica Federal -CEF. Acordo de Cooperação Financeira 209/2021 e ao Prof. Marcio B. Baptista (*In memoriam*).

Bibliografia

- Anbumozhi, V., J. Raddhakrishnan J. & E. Yamaji. 2005. Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations. *Ecological Engineering*, 24(5): 517-523.
- An S., A. Mentler, H. Mayer & W.E.H. Blum. 2010. Soil aggregation. aggregate stability. organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau China. *Catena*, 81: 226–233.
- Barrela, W.; M. Petreire Jr., W. S. Smith, L.F. Montag. 2001. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: Rodrigues, R.R. & H.F. Leitão Filho (Eds.). *Matas ciliares: conservação e recuperação*. São Paulo: EDUSP, FAPESP, p. 187-207.
- Brady, N.C. & R.R. Weil, R. R. 2007. *The Nature and Properties of Soil*, fourteenth ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Bronik, C.J. & R. Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3–22.
- David, T.S., C.A. Pinto, N. Nadezhdina, N., C.K. Besson, M.O. Henriques, T.Quilhó, J. Cermak, J.S. Pereira, M.M. Chaves & J.S David. 2013. Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution. In: *Quercus suber* trees: A modelling approach based on root sap flow. *Forest Ecology and Management*.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1979. *Manual de métodos de análise de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1979. 212 p. Documentos.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. *Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos*. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro. 212 p.
- Eynard, A., T.E. Schumacher, M. J. Lindstrom & D.D. Malo. 2004. Porosity, and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usterts. *Soil Science Society of American Journal*, 68: p.
- Gholami, V. & M.R. Khalegui. 2013. The Impact of Vegetation on the Bank Erosion (Case Study: The Haraz River). *Soil e Water Research*, 8: 158–164.
- Indoria, A. K., K.L. Sharma & K.S. Reddy. 2020. Hydraulic properties of soil under warming climate. *Climate Change and Soil Interactions*, 473–508. doi:10.1016/b978-0-12-818032-7.00018-7.

- Kimura, A.C. & M.R. Scotti. 2016. Soil aggregation and arbuscular mycorrhizal fungi as indicators of slope rehabilitation in the São Francisco River basin (Brazil). *SoilWater Res.* 11:114-123.
- Kimura, A., M.B. Baptista & M.R. Scotti. 2017. Soil humic acid and aggregation as restoration indicators of a seasonally flooded riparian forest under buffer zone system. *Ecological Engineering*, 98, 146-156.
- Kreutzweiser, D. P. & S.S. Capell. 2001. Fine sediment deposition in streams after selective forest harvesting without riparian buffers. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(12):2134-2142.
- Kuglerová L. E. Jansson, A. Ågren, H. Laudon & B. Malm-Renöfält. 2014. Groundwater discharge creates hotspots of riparian plant species richness in a boreal forest stream network. *Ecology*, 95(3): 715-725.
- Lowrance, R. et al. 1997. Water quality functions of riparian forest buffers in Chesapeake Bay watersheds. *Environmental Management*, 21(5):687-712.
- Mustafa, A. X. Minggang, S.A.A Shah, M.M. Abrar, S. Nan, W. Baoren & A. Núñezdelgado .2020. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. *Journal of Environmental Management*, 270, 110894.
- Naiman, R. J. & E.C. Anderson. 1997.. Streams and rivers: their physical and biological variability. In: SCHOONMAKER, P.K.; VON HAGEN, B.; WOLF, E.C. (Ed). *The Rain Forests of Home: Profile of a North American Bioregion*. Washington (DC): Island Press.
- Piccolo, A. & J.S.C. Mbagwu. 1994. Humic substances and surfactants effects on the stability of two tropical soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58:950-955.
- Qiu, Z & M. G. Dosskey. 2012. Multiple function benefit: Cost comparison of conservation buffer placement strategies. *Landscape and Urban Planning*, 107(2):89-99.
- Shultz, I., T. M. Isonhart, W.W. Simpkins, & J.P. Colletti. 2004. *Riparian Forest buffers in agroecosystems—lessons learned from the Bear Creek Watershed, central Iowa, USA*. *Agroforestry Systems*, New York, 61(1-3):35-50.
- Six, J. et al. 2000. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2):681-689.
- Smith, S.D., D.A. Devitt, A. Sala, J.R. Cleverly JR & D.E. Busch. 1998. Water relations of riparian plants from warm desert regions. *Wetlands*, n. 18, p. 687–696.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. New York: John Wiley & Sons.
- Tisdall, J.M. 1996. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRCn Press, Boca Raton, FL, pp. 57–96.

- Tivet, F., J.C.M. Sá, R. Lal, P.R. Borszowskej, S.J.B. Santos, A. Farias, G. Eurich G. D.C. Hartman, M.S. Nadolny, Jr. & L. Seguy. 2013. L. Aggregate C depletion by lowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in subtropical and tropical regions of Brazil. *Soil Tillage*.
- Triska, F.J., J.H. Duff & R.J. Avanzino. 1993. Patterns of hydrological exchange and nutrient transformation in the hyporheic zone of a gravel-bottom stream: examining terrestrial aquatic linkages. *Freshwater Biology*, 29:259-274.
- Vidon, P., C. Allan, D. Burns, T.P. Duval, N. Gurwick, S. Inamdar & S. Sebestyen. 2010.. Hot spots and hot moments in riparian zones: potential for improved water quality management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2): 278-298.
- Weeraratna, S. 2022. Factors Causing Land Degradation. In: *Understanding Land Degradation*. SpringerBriefs in Geography. Springer, Cham.
- Weissteiner, C.J., F. Bouraoui & A. Aloe. 2013.Reduction of nitrogen and phosphorus loads to European rivers by riparian buffer zones. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 408(8):1-15.
- Welsh, D. J. 1991. Riparian Forest buffers: function and design for protection and enhancement of water resources. US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area, State & Private Forestry, Forest Resources Management.
- Zhao, Y., M. Wang, S. HU, X. Zhang, Z. Ouyang, G. Zhang & X. Shi. 2018. Economics and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16): 4045-4050.
- Zheng, W., E. K. Morris, A. Lehmann & M.C. Rillig. 2016. Interplay of soil water repellency, soil aggregation and organic carbon. A meta-analysis. *Geoderma*, 283:39-47.