



Sistema Baseado em Regras *Fuzzy* Utilizado na Qualidade Física de um Latossolo Vermelho em Recuperação há 17 Anos ⁽¹⁾.

**Alfredo Bonini Neto⁽²⁾; Fernando Ferrari Putti⁽³⁾; Carolina dos Santos Batista Bonini⁽⁴⁾;
Luis Roberto Almeida Gabriel Filho⁽⁵⁾; Camila Pires Cremasco Gabriel⁽⁶⁾.**

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da UNESP – campus de Tupã.

⁽²⁾ Professor Assistente Doutor no curso de Engenharia de Biosistemas; Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Tupã; Tupã, São Paulo; bonini@tupa.unesp.br; ⁽³⁾ Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP – Campus de Botucatu; ⁽⁴⁾ Professor Assistente Doutor, UNESP – Campus de Dracena, ⁽⁵⁾⁽⁶⁾ Professor Assistente Doutor, UNESP – Campus de Tupã.

RESUMO: A utilização incorreta dos solos e grandes construções no meio rural vêm causando alterações no mesmo, tornando-os menos produtivos, aumentando assim as áreas degradadas. Modelos matemáticos têm sido utilizados para avaliar parâmetros agrônômicos. Neste sentido, este trabalho tem como objetivos aplicar ferramentas matemáticas e computacionais, ou seja, lógica difusa (*fuzzy*), para se ter um levantamento da recuperação do solo degradado que está sob intervenção antrópica com técnicas para recuperação há 17 anos, tendo sido utilizados combinações de adubos verdes, calcário e gesso e foram comparados com duas testemunhas (T1: solo exposto (sem práticas de recuperação) e T2: Vegetação nativa de Cerrado). Os dados avaliados são físicos, gerando a resposta *fuzzy* das variáveis analisadas em função da profundidade e do tipo de tratamento adotado para a recuperação do solo. Os resultados obtidos utilizando a lógica *fuzzy* são comparados com resultados já existentes mostrando que a modelagem matemática é uma ferramenta útil para análise do solo degradado.

Termos de indexação: Solo degradado, Modelagem matemática, Inteligência artificial.

INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos naturais de forma inadequada geralmente dá lugar a um novo sistema ecológico não sustentável. Com isso, solos utilizados intensamente e de forma inadequada, são levados à degradação.

Castro et al. (2009), estudando o efeito de adubos verdes na recuperação do solo em área degradada, verificou o efeito benéfico de coberturas vegetais utilizadas na vegetação estão modificando seus atributos físicos e químicos. Diversos estudos de monitoramento da matéria orgânica do solo e seus efeitos na qualidade do solo têm sido investigados como Askari & Holden, 2014, Wang et al., 2014 entre outros.

Tradicionalmente, nas pesquisas realizadas na

área de ciências agrárias os dados obtidos em campo ou laboratório são analisados estatisticamente, submetidos à análise de variância, com as medias sendo comparadas sobremaneira pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade para variáveis qualitativas como, p. ex., para efeitos de adubação, dos tratamentos de recuperação do solo, manejo do solo e da água (TEIXEIRA FILHO et al., 2014; BONINI et al 2013).

Estas investigações levam-se em conta muitas indecisões, p. ex., a profundidade do solo em função de qual tratamento utilizado, qual técnica de manejo será utilizada para cada tipo de solo que está sob recuperação, etc. Com isso justifica-se a formulação desse trabalho com o intuito de utilizar a lógica *fuzzy* como ferramenta de análise de solos degradados levando-se em conta estas indecisões.

A lógica *fuzzy* tem por objetivo modelar, de modo aproximado, o raciocínio humano, visando manipular informações em um ambiente de incerteza e imprecisão, fornecendo uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento que é inexato, incompleto ou não totalmente confiável (ZADEH, 1965).

Recentemente, na área da agronomia esses modelos matemáticos têm sido utilizados com maior frequência. Técnicas como sistemas de inferência *Fuzzy* tem sido utilizadas por Zhu et al. (2010), três abordagens que usam valores de pertinência *fuzzy* foram abordadas para prever a variação detalhada das propriedades do solo, resultados mostraram que a regressão com variáveis ambientais funcionam bem para áreas onde a relação solo-terreno é relativamente simples, mas de regressão com os valores de pertinência *fuzzy* é bem melhor para as áreas onde as relações solo-terreno são mais complicadas, Beucher et. al. (2014) avaliou o uso da lógica *fuzzy* para o mapeamento do solo em escala de reconhecimento, aplicando-o para a parte sul das áreas costeiras da Finlândia.

Na área de ciência do solo mais especificamente, alguns trabalhos foram desenvolvidos na área de fertilidade do solo como o trabalho feito por Zorluer

et al. (2010), onde um novo método de aproximação pela lógica *fuzzy* foi desenvolvido para combinar os resultados físico e químico da dispersão do solo.

Outras pesquisas foram desenvolvidas utilizando a lógica *fuzzy*, como Zhong et al. (2014), Tran et al. (2002), Jian-Hua et al. (2009) entre outras.

O problema de degradação escolhido para fornecimento dos dados para a construção dos modelos foi gerado em consequência da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira-SP, e estudado inicialmente por Bonini (2012). Como sequelas da construção, diversas áreas, anexas ou não ao corpo da obra, tendem a sofrer acentuada degradação, que se manifesta sob a forma de ruptura do equilíbrio entre a litosfera (especialmente em sua porção mais frágil, os solos), a hidrosfera e a biosfera (especialmente a cobertura vegetal) (ALVES e SOUZA, 2008).

Este trabalho tem por objetivo analisar dados de solos degradados via lógica *fuzzy*, levando em conta os tratamentos utilizados, a profundidade analisada e as propriedades físicas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em Selvíria, MS. A região apresenta médias de precipitação anual de 1370 mm, temperatura de 23,5 °C e umidade relativa do ar entre 70 e 80%. O solo original da área de estudo foi classificado Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006). Da área em estudo, foram retirados 8,6 m do perfil do solo original, para o uso na construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, ficando exposto o subsolo da área em estudo, desde 1969 (ALVES & SOUZA, 2008).

Maiores detalhes da área experimental (histórico) podem ser encontrados em Bonini (2012).

O experimento foi delineado em blocos inteiramente casualizados, constituído de nove tratamentos e quatro repetições, foram os seguintes: T1 - Solo exposto (sem técnica de recuperação) e T2 - Vegetação nativa de Cerrado, Testemunha (solo mobilizado) até 1999 (SM); Mucuna-preta até 1999 (MP); Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (G/FP); calcário + mucuna-preta até 1999 (C+MP); Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 (C + G/FP); calcário + gesso + mucuna-preta até 1999 (C+Ge+MP); calcário + gesso + guandu, até 1994, após substituído por feijão-de-porco (C + Ge + G/FP), em todos os tratamentos de recuperação após 1999 foram implantados *Brachiaria decumbens*

Modelagem Fuzzy

As variáveis de entrada do sistema baseado em

lógica *Fuzzy* proposto foram a “Profundidade do solo” e “Tratamento”. Para a variável “Profundidade do solo”, foram utilizadas 2 funções de pertinência denominadas “PF-1”, “PF-2” conforme **Figura 1(a)** e **Tabela 1**, e para variável “Tratamento”, foram definidas 9 funções de pertinência, definidas de acordo com o Erro! Fonte de referência não encontrada. e a **Tabela 2**.

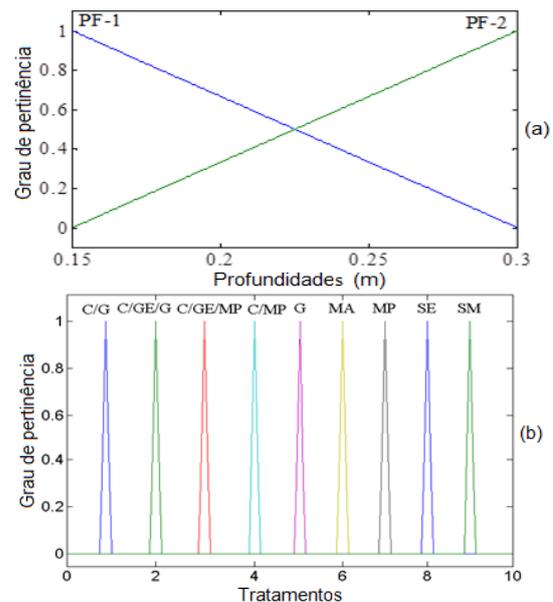


Figura 1. Funções de pertinência definidas para os conjuntos *Fuzzy* da variável de entrada: (a) “Profundidades”, (b) “Tratamentos”.

Tabela 1. Definições das funções de pertinência da variável de entrada “profundidade do solo”.

Sistema <i>Fuzzy</i>	Tipo	Limitação
PF-1	Triangular	[0.1 0.15 0.3]
PF-2	Triangular	[0.15 0.3 0.35]

Tabela 2. Definições das funções de pertinência da variável de entrada “Tratamentos”.

Sistema <i>Fuzzy</i>	Tipo	Limitação
c+g	Triangular	[0.9 1 1.1]
c+ge+g	Triangular	[1.9 2 2.1]
c+ge+mp	Triangular	[2.9 3 3.1]
c+mp	Triangular	[3.9 4 4.1]
g	Triangular	[4.9 5 5.1]
ma	Triangular	[5.9 6 6.1]
mp	Triangular	[6.9 7 7.1]
se	Triangular	[7.9 8 8.1]
sm	Triangular	[8.9 9 9.1]

As variáveis de saída do sistema *fuzzy* proposto foram: umidade do solo e resistência à penetração; gerando a resposta *fuzzy* das variáveis analisadas em função da profundidade do tipo de tratamento adotado para a recuperação do solo. As funções de pertinência das variáveis foram definidas em 5



funções de pertinência denominadas “Muito Baixa” (MB), “Baixa” (B), “Média” (M), “Alta” (A) e “Muito Alta” (MA), definidas de acordo com a **Tabela 3**, assim como definidas nas quais os quartis dos grupos de dados são representados por Q1, Q2 e Q3, além da utilização dos valores máximos e mínimos.

Tabela 3. Definição das funções de pertinência das variáveis de saída.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
Muito Baixa (MB)	Trapezoidal	[Limite inferior - 1, Limite inferior, Mínimo, Q1]
Baixa (B)	Triangular	[Mínimo, Q1, Q2]
Média (M)	Triangular	[Q1, Q2, Q3]
Alta (A)	Triangular	[Q2, Q3, Máximo]
Muito Alta (MA)	Trapezoidal	[Q3, Máximo, Limite Superior, Limite Superior + 1]

Para a obtenção da base de regras, foram criadas 18 (9 x 2) combinações entre os conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada, assim foi criados 18 pares da forma (Tratamento x Profundidade) com ajuda de um especialista.

Para a validação do sistema *fuzzy*, foi utilizado a função “*evalfis*” do Matlab para os cálculos das saídas (MATHWORKS, 2014). Assim correlacionando os dados coletados (Y_{obs}) com os dados calculados (Y_{fuzzy}). Também foi realizada a análise de regressão polinomial e o cálculo do coeficiente de correlação (R). Assim podendo comparar os resultados obtidos pelo sistema *fuzzy* com as equações da regressão através do *mean square error* (MSE).

$$MSE = \sum_{i=1}^n [(Y_{obs} - Y_{fuzzy})^2 / (n - 2)]$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da **Tabela 3** foi possível criar a **Tabela 4**,

Tabela 5. MSE, R², p valor e Ajuste do Modelo *fuzzy* para umidade do solo e resistência a penetração (significativos).

Tratamentos	MSE		R ²		p valor		Ajuste do Modelo <i>fuzzy</i>	
	Modelo <i>fuzzy</i>	Modelo Regressão	Modelo <i>fuzzy</i>	Modelo Regressão	Modelo <i>fuzzy</i>	Modelo Regressão		
Umidade do solo	c+g	0.003857	0.111	0.0897	0.111	<0.001	<0.001	$Y_{obs} = 0.0375 + 0.511 Y_{Fuzzy}$
	c+ge+mp	0.003435	0.018	0.405	0.405	<0.001	<0.001	$Y_{obs} = -0.0380 + 1.157 Y_{Fuzzy}$
	g	0.003569	0.013	0.345	0.347	0.002	0.002	$Y_{obs} = -0.0575 + 1.220 Y_{Fuzzy}$
	mp	0.003463	0.019	0.355	0.355	0.002	0.002	$Y_{obs} = 0.0931 + 0.324 Y_{Fuzzy}$
	sm	0.003352	0.014	0.371	0.370	0.002	0.002	$Y_{obs} = -0.0756 + 1.366 Y_{Fuzzy}$
Resistência à penetração	c+ge+mp	0.000297	0.015	0.391	0.391	0.001	0.001	$Y_{obs} = 0.0392 + 0.618 Y_{Fuzzy}$
	c+mp	0.000192	0.009	0.641	0.642	<0.001	<0.001	$Y_{obs} = -0.101 + 2.066 Y_{Fuzzy}$
	sm	0.000587	0.014	0.372	0.370	0.002	0.002	$Y_{obs} = 0.0120 + 0.806 Y_{Fuzzy}$

que é à base de regras do sistema *fuzzy*.

A **Tabela 5** apresentam as correções realizadas para os tratamentos em função das profundidades analisadas. Para os tratamentos que apresentam $p < 0,005$ foi realizado a correções da curva a partir do modelo *fuzzy*, sendo realizado para ambas as saídas do modelo.

Deve-se ressaltar que os valores do R² e do p valor não sofreu grandes variações após corrigidos. Porém, para o MSE verificou reduções para todos os tratamentos que apresentam efeito significativo. As **Figuras 2(a) e (b)** apresentam as curvas dos tratamentos para análise da resistência do solo e umidade do solo em função da profundidade. Observa-se que os tratamentos C+GE+MP, C+MP e SM, apresentaram um aumento da resistência à penetração em relação à profundidade de solo, SM foi o que apresentou maior resistência.

Tabela 4. Base de regras do sistema *fuzzy*.

Tratamento	Profundidade	Umidade do solo	Resistência à penetração de raízes
c+g	PF-1	B	M
c+ge+g	PF-1	A	B
c+ge+mp	PF-1	M	M
c+mp	PF-1	M	M
g	PF-1	A	A
ma	PF-1	B	B
mp	PF-1	M	M
se	PF-1	M	M
sm	PF-1	A	A
c+g	PF-2	A	MA
c+ge+g	PF-2	MA	A
c+ge+mp	PF-2	MA	MA
c+mp	PF-2	MA	MA
g	PF-2	A	MA
ma	PF-2	A	A
mp	PF-2	MA	MA
se	PF-2	MA	MA
sm	PF-2	MA	MA

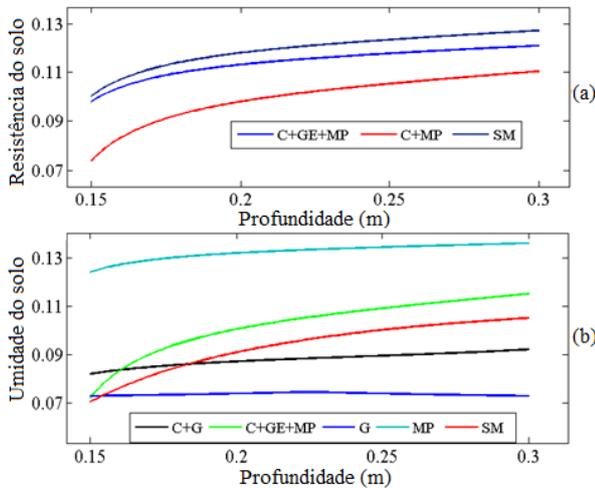


Figura 2. Curvas dos tratamentos: (a) Resistência *fuzzy* em função da profundidade do solo, (b) Umidade *fuzzy* em função da profundidade do solo.

Para a umidade do solo utilizando sistemas *fuzzy* verificou-se que o tratamento MP apresentou maior umidade do solo e G a menor umidade em função da profundidade do solo.

CONCLUSÕES

Os tratamentos C+GE+MP, C+MP e SM (resistência mecânica a penetração) e C+G; C+GE+MP; G; MP (umidade do solo) apresentaram diferença significativa em relação à profundidade e adaptou ao modelo *fuzzy*.

O tratamento que mostrou recuperação em relação aos demais foi o C+MP para resistência mecânica a penetração do solo e o tratamento MP foi o que obteve maior umidade em todas as camadas estudadas.

O uso do sistema *fuzzy* para avaliar os dados de campo foi melhor devido ao menor erro quadrático.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP (PROPe) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C. e SOUZA, Z. M.. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2505-2516, 2008.

ASKARI, M. S.; HOLDEN, N. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230-231, 131-142, 2014.

BEUCHER A., FRÖJDÖ S, ÖSTERHOLM P., MARTINKAUPPI A., EDÉN P. Fuzzy logic for acid

sulfate soil mapping: Application to the southern part of the Finnish coastal areas. *Geoderma*, 226–227, 21–30. 2014.

BONINI, C. S. B. Restauração ecológica de um solo decapitado sob intervenção antrópica há 17 anos. 191 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2012.

BONINI, C. S. B.; SUZUKI, L.G.A.S.; ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Green manure and sewage sludge used to recover the fertility of a degraded Oxisol. *International Journal of Sciences*, 2, 49-57. 2013.

CASTRO, M. M. T.; ALVES, M. C.; NASCIMENTO, V. CASTRO, M.T.T. Revegetation on a Removed Topsoil: Effect on Aggregate Stability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 40, p. 771-786, 2009.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2006. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPSO, 306p.

JIAN-HUA W., XIAN-GUO L., MING J, XIAO-YAN L., JING-HAN T. Fuzzy Synthetic Evaluation of Wetland Soil Quality Degradation: A Case Study on the Sanjiang Plain, Northeast China. *Pedosphere*, 19 (6), 756–764. 2009.

MATHWORKS. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 05 maio 2014.

TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; BENETT, C. G. S.; ARF, O. & SÁ, M. E. Wheat Nitrogen Fertilization Under no Till on the Low Altitude Brazilian Cerrado. *Journal of Plant Nutrition*, 37(11), 1732-1748. 2014.

TRAN, L.T.; RIDGLEY, M.A.; DUCKSTEIN, L.; SUTHERLAND, R. Application of fuzzy logic-based modeling to improve the performance of the Revised Universal Soil Loss Equation. *Catena*, 47, 203–226. 2002.

WANG, X.; CAMMERAAT, E. L. H.; CERLI, C.; KALBITZ, K. Soil aggregation and stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 72, 55-65. 2014.

ZADEH L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v.8, p.338- 353. 1965.

ZHONG W. S., ZHI-HAO Z., BING X., HAO Q., MOREL J. L., LIANG Q. R. A Fuzzy-based Methodology for an Aggregative Environmental Risk Assessment of Restored Soil. *Pedosphere*, 24 (2), 220-231. 2014.

ZHU A. X., YANG L., LI B., QIN C., PEI T., LIU B. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic. *Geoderma*, 155, 164–174. 2010.

ZORLUER I., ICAGA Y, YURTCU S., TOSUN H. Application of a fuzzy rule-based method for the determination of clay dispersibility. *Geoderma*, 160, 189–196. 2010.