



Sistema pericial em PROLOG no diagnóstico do potencial agrícola de solos

J.M. Siqueira¹, V. Rocio²

¹ Licenciada em Agronomia – Universidade Federal Rural de Pernambuco – Brasil. Email: jucilenesiqueira@live.com.pt.

² LEaD – Laboratório de Educação a Distância, Universidade Aberta. Portugal. Email: vjr@univ-ab.pt

Resumo

As análises laboratoriais de amostras de solo ocupam lugar de destaque como instrumento diagnóstico do potencial produtivo. Estas análises podem estimar as propriedades físicas, químicas e nutricionais dos solos, tornando-se a base para manejo do solo e recomendação de corretivos e fertilizantes destinados a agricultura. Um perito em ciências do solo é capaz de estimar tais propriedades.

Por outro lado, considerando o avanço da tecnologia da informação, é possível realizar operações inferenciais automáticas. A substituição do perito pela inteligência artificial visa automatizar o processo de diagnóstico. Tal fato sugere o desenvolvimento do sistema pericial aplicado à ciência do solo suportado pela programação em lógica (linguagem PROLOG), baseado em regras com raciocínio difuso, possibilitando a utilização do conhecimento dos peritos declarados em literatura e armazenadas na base de conhecimento do sistema.

Este trabalho apresenta o sistema pericial PROLOG^{CC}, com a elaboração de um protótipo, obtendo como resultado a viabilidade funcional do sistema pericial com raciocínio difuso em PROLOG, no diagnóstico do potencial agrícola de solos.

O sistema pericial proposto sugere a construção de um sistema que pode ser introduzido na engenharia de biosistemas com maior complexidade, visando automatizar as análises periciais nas ciências do solo.

Palavras-chave: Sistemas periciais, PROLOG, lógica difusa, automatização, diagnóstico de solos.

Abstract

Soil samples analysis laboratory have a prominent place as diagnostic's tool of potential productive soil. These analyses can estimate the proprieties physical, chemical and nutritional soil's, becoming the basis for soil management and recommendation of fertilizers for agriculture. An expert in soil science is able to estimate such properties.

On the other hand, considering the advancement of information technology, it can perform automatic inference operations. The expert's replacement for the artificial intelligence aims automate the process of diagnosis. Such fact suggests the development of the expert system applied to soil science supported by the logic programming–PROLOG, rule-based fuzzy reasoning, allowing the use of the knowledge of experts reported in the literature and stored in the knowledge base system.

This paper presents the PROLOG^{CC} expert system and prototype's development, resulting at the functional viability of the expert system with fuzzy reasoning in PROLOG in the diagnosis of the agricultural potential of soils.

The proposed expert system suggests the construction of system that can be introduced in biosystems engineering of greater complexity in order to automate forensic analysis in soil science.

Keywords: Expert systems, fuzzy logic, PROLOG, automation, soil's diagnosis.

1. INTRODUÇÃO

As análises laboratoriais de amostras de solo ocupam lugar de destaque como instrumento diagnóstico do potencial agrícola dos solos. Estas análises podem estimar as propriedades físicas, químicas e nutricionais de solos, tornando-se base para recomendação de corretivos e fertilizantes destinados a agricultura.

Qualquer perito em ciências do solo é capaz de estimar as propriedades que caracterizam um solo agrícola mediante análises laboratoriais de amostras de solos. Por outro lado, considerando o avanço da tecnologia da informação é possível realizar operações inferenciais automáticas no sentido de diagnosticar os solos agrícolas quanto ao seu potencial produtivo e por conseguinte, indicar a melhor proposta visando corrigir ou atenuar as deficiências detectadas.

A substituição do perito pelo uso da tecnologia de informação se deve ao facto da dificuldade deste primeiro, analisar em tempo hábil as inúmeras combinações das propriedades físicas, químicas e nutricionais consideradas. A morosidade pericial pode ser minimizada se a informação requerida estiver organizada em uma base de conhecimento interativa disponível para consulta, possibilitando escolher a estratégia agrícola e econômica adequadas ao manejo de solos. Outra razão diz respeito a viabilização da aplicação de sistemas inteligentes visando informatizar o processo pericial. Tais sistemas constituem uma das áreas com maior sucesso e aplicação no âmbito da inteligência artificial.

O profissional nas ciências agrárias, na maioria das vezes, em posse de análises laboratoriais representativas de uma área agrícola, gera conclusões pelo raciocínio aproximativo a partir do conhecimento experimental ou empírico.

O raciocínio aproximativo constitui uma forma natural do homem raciocinar, utilizando termos linguísticos que são vagos (*e.g.* "Se o nível de azoto no solo é baixo deve adubar com alta dose de azoto."). O problema é transpor este tipo de raciocínio para o computador que, como se sabe, trabalha com valores exatos.

Em termos matemáticos, a lógica difusa serve de base para os modelos de raciocínio que são aproximados ou não exatos. Os conceitos de lógica difusa podem ser utilizados para traduzir a informação imprecisa contida em frases expressas em linguagem natural, tais como, *muito, pouco, quase*, etc. Tem por objetivo permitir graduações na pertinência de um elemento a um dado conjunto, ou seja, de calcular a possibilidade de um elemento pertencer com maior ou menor intensidade àquele conjunto. (Zadeh, 1999; Zadeh, 1965), (Ferrari, et al., 2004).

Na fig.1 pode ser visualizado o grau de pertinência de um elemento nos conjuntos *A* e *B* associando às diferentes tonalidades de cinzas. Cada tonalidade de cinza representa um valor ($\mu_{\text{valor linguístico}}^X(x)$) ou grau de pertença ao conjunto *A* e *B*. Estes conjuntos são denominados conjuntos difusos e são uma generalização dos conjuntos clássicos.

O conjunto difuso é definido como um subconjunto *A* contido no conjunto universo *X* e pode ser caracterizado em forma de pares ordenados (equação 1), onde, $\mu_{\text{valor linguístico}}^X(x)$ é a função de associação conhecida como grau de pertinência de *x* em *A*. Normalmente, o valor $\mu_{\text{valor linguístico}}^X(x)$ é um número que varia entre 0 e 1, sendo 1 o valor do grau de pertinência do elemento que pertence completamente ao conjunto e 0 o valor do grau de pertinência do elemento que não pertence ao conjunto.

$$A = (x; \mu_{\text{valor linguístico}}^X(x)) \text{ para todo } x \in X, \quad (1)$$

A função de pertinência que define um conjunto difuso é denominada predicado difuso. Os predicados difusos em PROLOG^{CC} são interpretados a partir do predicado não difuso. Ou seja, um predicado não difuso é definido por uma propriedade A do solo associado a uma variável x por um functor do tipo $functor(A, x)$, onde x tem apenas dois valores lógicos (verdadeiro-1 ou falso-0). Assim o predicado difuso é definido a partir do predicado $functor(A, x)$ associado a uma variável linguística var_x do tipo $var_x(functor)$, onde var_x tem valores lógicos no intervalo entre verdadeiro -1 e falso-0. Por exemplo, os predicados $valor_S(pH,7)$ e $valor_P(pH,7.9)$ assumem que o pH de S e P são 7 e 7.9, respectivamente. E assim, o predicado difuso $neutro(valor_S)$ e $neutro(valor_P)$ é interpretado como “o valor S tem pH neutro com o valor lógico verdade -1” e “o valor_P tem pH neutro com valor lógico verdade entre os valores 1 e 0”, respectivamente.

A teoria dos conjuntos difusos tem como fundamento a lógica difusa, que vem sendo aplicada intensamente na engenharia de biosistemas. Silva, et al.(2010) realizaram um estudo utilizando a geoestatística e o sistema de classificação difusa, analisando a fertilidade de uma área experimental. Silva&Lima(2009) utilizaram a lógica difusa no estudo da variabilidade espacial de atributos do solo. Carvalho(2009) elaborou um mapa digital de solos com o objetivo de avaliar o uso de geotecnologias na cartografia de solos. Torre, et al(2005) usando a ferramenta computacional *Predictive Fuzzy Rules Generator (PreFuRGe)* baseado na lógica difusa e mineração de dados investigaram em seu artigo a relação ótima da produção total de morango com concentração de nitrato em água a diferentes profundidades, determinando a dose ideal que permitiu um balanço entre a produção e a minimização de danos ambientais. Kavdir(2003) aplicou a lógica difusa como suporte a tomada de decisão na classificação do grau de maçãs.

Pelos trabalhos de investigação acima mencionados, surge a questão em aplicar a teoria dos conjuntos difusos e lógica difusa nas ciências do solo. Utilizando este paradigma, é possível realizar uma análise pericial mediante a posse dos dados analíticos do solo e dos parâmetros que o classificam em relação as suas propriedades físicas, químicas e nutricionais, podendo estabelecer uma relação entre estes parâmetros e diagnosticar um determinado solo quanto ao seu nível de deficiência. Estes tipos de relações estabelecem o raciocínio difuso em sistemas periciais.

O sistema pericial aplicado para este artigo é um mecanismo de raciocínio difuso com abordagem da lógica difusa, sob a linguagem de programação em lógica (PROLOG) capacitado a efetuar o raciocínio difuso, o que será identificado como Sistema Pericial PROLOG Convencional Capacitado – abreviado para PROLOG^{CC}.

O presente artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 descreve a metodologia do mecanismo inferencial PROLOG^{CC}. A seção 3 apresenta os resultados obtidos da aplicação do mecanismo inferencial no diagnóstico do potencial agrícola dos solos e discute as análises periciais obtidas. A seção 4 apresenta a conclusão, sugerindo novas investigações nesta temática. A seção 5 cita a bibliografia consultada.

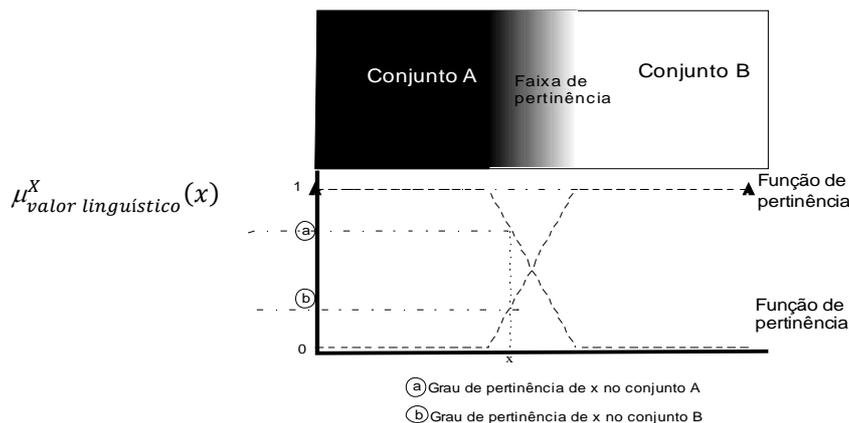


Figura 1: Desenho esquemático dos conjuntos difusos

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema pericial proposto resulta num conjunto de 10 parâmetros a serem analisados quanto ao nível de deficiência (tabela 1) a partir das propriedades físicas, químicas e nutricionais de cada amostra de solo (tabela 2) e do mecanismo inferencial PROLOG^{CC}.

Tabela 1: parâmetros de deficiências

Parâmetros de deficiência	Símbolo
Deficiência quanto a retenção de humidade do solo	def_ag
Deficiência quanto ao oxigénio existente no solo	def_ox
Deficiência quanto a retenção de bases trocáveis	def_ret_cat
Deficiência quanto ao pH do solo	def_pH
Deficiência quanto a toxicidade do alumínio	def_alum
Deficiência quanto a proporcionalidade da catiões	def_prop_ca
Deficiência quanto ao grau de saturação de bases do solo	def_sbt
Deficiência quanto ao nível de fósforo do solo	def_fos
Deficiência quanto ao nível de potássio do solo	def_pot
Deficiência quanto ao nível de azoto do solo	def_m_org

A principal componente do sistema pericial é o modelo inferencial constituído por regras da seguinte forma:

$$\text{“SE } \underbrace{\text{var_ling(Propriedade X, Y, \dots, Z)}}_{\text{antecedência}} \text{ ENTÃO } \underbrace{\text{var_ling(Parâmetro W)}}_{\text{consequência}} \text{.”} \quad (2)$$

Por exemplo:

“SE o solo tem baixo CTC ENTÃO a deficiência do solo quanto a retenção de catiões é muito_forte”

As variáveis linguísticas que classificam as limitações ao uso agrícola são determinadas pelo método inferencial, e são denominadas de nulo, leve, forte e muito forte (tabela 3). Tais variáveis são enquadradas como consequência resultante da agregação das regras inferenciais (equação 2) computando um valor unitário que representa o nível de deficiência percentual das regras inferidas.

O mecanismo de raciocínio difuso aplicado em PROLOG^{CC} (equação 2) funciona em três etapas principais: codificação, inferência e decodificação (fig.2). Por codificação, entende-se como o processo de conversão de dados exatos em predicados difusos, e inversamente, entende-se por decodificação como o processo de determinação de resultados exatos a partir dos valores difusos inferidos.

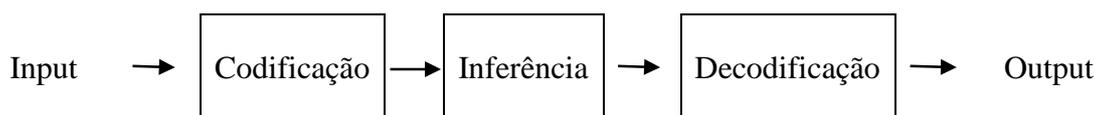


Figura 2: Mecanismo de raciocínio difuso em sistemas periciais

Tabela 2: Propriedades do solo e respectivos predicados difusos

Propriedades do solo	Predicados Difusos
Textura do solo	leve(tex), médio(tex) e pesado(tex)
Atividade da argila:	alto(ctc_argila) e baixo(ctc_argila)
Capacidade de troca de catiões (CTC):	alto(ctc), medio(ctc) e baixo(ctc)
pH do solo:	muito ácido(pH), ácido(pH), neutro(pH), alcalino(pH), muito alcalino(pH).
Porcentagem de saturação por alumínio:	ideal(alum) e não ideal(alum).
Grau de saturação de bases (GSB)	alto(gsb), medio(gsb) e baixo(gsb)
Porcentagem de sódio trocável (PST)):	alto(pst), medio(pst) e baixo(pst)
Fertilidade do solo quanto ao nutriente fósforo	alto(fos), medio(fos) e baixo(fos)
Fertilidade do solo quanto ao nutriente potássio:	alto(pos), medio(pos) e baixo(pos)
Fertilidade do solo quanto ao nutriente nitrogênio	alto(m_org), medio(m_org) e baixo(m_org)
Proporcionalidade de bases trocáveis:	ideal(prop_ca), sódico(prop_ca), magnesiano(prop_ca), cálcico(prop_ca), potássico(prop_ca), deficiência de bases(prop_ca), deficiência cálcica(prop_ca), deficiência magnesiana(prop_ca), deficiência potássica(prop_ca)

Tabela 3: resultado geral da agregação das regras

TABELA 3: Resultado geral da agregação das regras		
NÍVEL	PD(%)	SEMÂNTICA
Nulo	0-2	Ideal, sem necessidade de melhoramento; ou com percentagem mínima de deficiência
Leve	3-13	Facilmente corrigido com emprego de capital e de práticas agrícolas simples.
Forte	14-42	Corrigível, com emprego de capital e conhecimento técnico-operacional.
Muito Forte	43-100	De difícil correção, necessita de alto emprego de capital e conhecimento técnico-operacional.

2.1. CODIFICAÇÃO

A operação de codificação é simples. O primeiro passo é dado pela entrada dos valores x , contidos no universo de discurso da respectiva variável linguística, e assim, determina-se o grau no qual estas entradas pertencem a cada dos apropriados conjuntos difusos pela função de pertinência $\mu_{valor\ linguístico}^x(x)$.

O predicado de cada conjunto difuso é definido em $PROLOG^{CC}$ através de uma lista de pares (valor=>grau de pertinência), que correspondem a pontos do gráfico da função $\mu_{valor\ linguístico}^x(x)$. O restante gráfico é obtido por interpolação de segmentos de reta entre pontos consecutivos da lista.

A fig.3 mostra a definição de alguns predicados aplicados neste artigo, nomeadamente para a propriedade GSB (grau de saturação de bases), através dos operadores # e => do $PROLOG^{CC}$. O interpretador $PROLOG^{CC}$ permite determinar o grau de pertinência de cada valor de GSB a cada um dos conjuntos difusos alto, médio e baixo. Por exemplo, de acordo com a fig. 3, um GSB de 55 é médio com grau de pertinência 0.75 e é alto com grau de pertinência 0.25. O grau de pertinência ao conjunto difuso baixo é 0, o que corresponde, na lógica clássica, a dizer que o facto baixo (gsb) é falso.

```

Em PROLOG CC
%Definição dos conjuntos difusos relativos a GSB
alto(gsb) # [0=>0, 50=>0, 70=>1, 100=>1].
medio(gsb) # [0=>0, 30=>0, 50=>1, 70=>0, 100=>1].
baixo(gsb) # [0=>1, 30=>1, 50=>0, 100=>0].

```

Figura 3. Codificação

2.2. INFERÊNCIA

As regras difusas são definidas em PROLOG^{CC} recorrendo a um operador próprio, (:<), que substitui o operador (:−) do PROLOG convencional. Enquanto o operador (:−) funciona como uma implicação na lógica clássica, em que o conseqüente só é verdadeiro se o antecedente o for, o operador :< do PROLOG^{CC} é a implicação difusa, em que o grau de pertinência do conseqüente é determinado em função do antecedente. Ao contrário da notação matemática habitual, o conseqüente surge do lado esquerdo destes operadores e o antecedente do lado direito. O PROLOG^{CC} mantém a vírgula como operador lógico de conjunção (E), sendo o operador de disjunção (OU) representado por ponto e vírgula. Do ponto de vista do programador, é mais comum, no entanto, usar cláusulas separadas para representar uma disjunção. Por exemplo, em vez de **forte(def_ret_cat):< (baixo(ctc);medio(ctc))**, é preferível usar a forma mais clara:

forte(def_ret_cat) :< baixo(ctc).

forte(def_ret_cat) :< medio(ctc).

As regras do sistema pericial são colecionadas por parâmetro de deficiência analisada. Cada parâmetro de deficiência detém quatro predicados, respectivamente, muito forte, forte, leve ou nulo, que correspondem aos valores da variável linguística de saída, determinando as condições em que a deficiência é considerada.

As características gerais do mecanismo inferencial induzem ao sistema pericial ser fechado, isto quer dizer que seu resultado final está limitado unicamente às regras pré-fixadas.

São inseridos 10 conjuntos de regras. Os conjuntos de regras N°1 e N°2 dizem respeito às propriedades físicas do solo; os conjuntos de regras N°3, N°4, N°5, N°6 e N°7 dizem respeito às propriedades químicas do solo; os conjuntos de regras, N°8, N°9 e N°10 dizem respeito às propriedades nutricionais do solo.

2.2.1 CONJUNTO DE REGRAS N°1 (DEF_AG).

A deficiência de água é função da quantidade de água disponível às plantas e das condições climatológicas, especialmente a precipitação e evapotranspiração. Determinadas propriedades do solo influenciam na disponibilidade e retenção de água, tais como: textura e tipo de argila.

```

Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência em água.
muito_forte(def_ag) :< baixo(ctc_argila),leve(tex).
forte(def_ag):< alto(ctc_argila),leve(tex).
forte(def_ag):< baixo(ctc_argila),medio(tex).
leve(def_ag):< alto(ctc_argila), medio(tex).
leve(def_ag):< baixo(ctc_argila),pesado(tex).
nulo(def_ag):<alto(ctc_argila),pesado(tex).

```

2.2.2 CONJUNTO DE REGRAS Nº2 (DEF_OX):

A deficiência de oxigênio no solo está relacionada com a classe de drenagem natural do solo, que por sua vez é dependente da textura e tipo de argila. Estas propriedades condicionam diretamente a porosidade do solo e por conseguinte, a deficiência de oxigênio.

```
Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência em oxigênio.
muito_forte(def_ox):<alto(ctc_argila),pesado(tex).
forte(def_ox):<baixo(ctc_argila),pesado(tex).
forte(def_ox):<alto(ctc_argila),medio(tex).
leve(def_ox):<alto(ctc_argila),leve(tex).
leve(def_ox):<baixo(ctc_argila),medio(tex).
nulo(def_ox):<baixo(ctc_argila),leve(tex).
```

2.2.3 CONJUNTO DE REGRAS Nº3 (DEF_RET_CAT):

A capacidade de troca de cátions – CTC é mensurada pela soma dos cátions trocáveis, tais como, cálcio, magnésio, sódio, potássio, alumínio, hidrogênio, entre outros em quantidades mínimas. Com vistas à potencialidade do fator produtivo de solos, pode-se afirmar que valores elevados de CTC são desejados nos solos, devido a maiores quantidades de cátions serem armazenadas e posteriormente, através de reações de troca iônica, cedidos aos vegetais.

```
Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência em retenção de cátions
muito_forte(def_ret_cat):< muito_baixo(ctc).
forte(def_ret_cat):<baixo(ctc).
forte(def_ret_cat):< medio(ctc).
leve(def_ret_cat):<alto(ctc).
nulo(def_ret_cat):< muito_alto(ctc).
```

2.2.4 CONJUNTO DE REGRAS Nº4 (DEF_PH)

A propriedade pH do solo influencia no crescimento das plantas pela ação direta dos íons de hidrogênio e ação indireta através das mudanças que provocam nas disponibilidades dos elementos essenciais existentes do solo.

```
Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto ao pH
muito_forte(def_ph):< alcalino(pH),medio(pst).
muito_forte(def_ph):< alcalino(pH),alto(pst).
muito_forte(def_ph):< muito_alcalino(pH).
muito_forte(def_ph):< muito_acido(pH).
forte(def_ph):< acido(pH),n_ideal(alum).
forte(def_ph):< alcalino(pH),baixo(pst).
leve(def_ph):< acido(pH),ideal(alum).
nulo(def_ph):< neutro(pH).
```

2.2.5 CONJUNTO DE REGRA Nº 5 (DEF_ALUM)

O alumínio em excesso é prejudicial à planta causando toxicidade, diminuindo a produtividade.

```
Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto a toxicidade do alumínio
muito_forte(def_alum):< n_ideal(alum).
nulo(def_alum):< ideal(alum).
```

2.2.6 CONJUNTO DE REGRAS Nº6 (DEF_PROP_CA)

A proporção entre bases trocáveis diz respeito ao efeito interativo que este causa no equilíbrio entre coloide, solução do solo e raiz da planta. A proporção ideal faz com que o solo disponibilize de forma equilibrada os nutrientes essenciais às plantas. (Brady, 1989).

```

Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto a proporcionalidade de cátions
muito_forte(def_prop_ca):< sodico(prop_ca).
forte(def_prop_ca):< magnesiano(prop_ca).
forte(def_prop_ca):< potassico(prop_ca).
leve(def_prop_ca):< calcico(prop_ca).
leve(def_prop_ca):< def_bases(prop_ca).
leve(def_prop_ca):< def_calcico(prop_ca).
leve(def_prop_ca):< def_magnesiano(prop_ca).
leve(def_prop_ca):< def_potassico(prop_ca).
nulo(def_prop_ca):< ideal(prop_ca)..

```

2.2.7 CONJUNTO DE REGRAS Nº 7(DEF_SBT)

O grau de saturação de bases diz respeito ao teor de bases trocáveis adsorvidas no coloide que estão potencialmente disponíveis às plantas. No entanto, são considerados apenas os cátions cálcio, magnésio e potássio como benéficos. É importante considerar o cátion sódio de forma inversa. Os efeitos de toxicidade que prejudicam o solo devido ao alto teor de sódio trocável é um fator a considerar quando se deseja medir as deficiências deste solo.

```

Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto a soma de bases trocáveis.
muito_forte(def_sbt):< alto(pst), alto(gsb).
muito_forte(def_sbt):< alto(pst), baixo(gsb).
muito_forte(def_sbt):< alto(pst), medio(gsb).
forte(def_sbt):< baixo(pst),baixo(gsb).
forte(def_sbt):< medio(pst),baixo(gsb).
leve(def_sbt):< baixo(pst),medio(gsb).
leve(def_sbt):< medio(pst),alto(gsb).
leve(def_sbt):< medio(pst),medio(gsb).
nulo(def_sbt):< baixo(pst),alto(gsb).

```

2.2.8 CONJUNTO DE REGRAS Nº 8 (DEF_FOS)

Este conjunto de regras analisa o nível de fosfato no solo estimando o efeito no crescimento das plantas.

```

Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto a nutriente fosfato.
muito_forte(def_fos):< muito_baixo(fos).
forte(def_fos):< baixo(fos).
forte(def_fos):< medio(fos).
leve(def_fos):< alto(fos).
nulo(def_fos):< muito_alto(fos).

```

2.2.9 CONJUNTO DE REGRAS Nº 9 (DEF_POT)

Este conjunto regras analisa o nível de potássio no solo estimando o efeito no crescimento das plantas.

```

Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto a nutriente potássio.
muito_forte(def_pot):< muito_baixo(pot).
forte(def_pot):< baixo(pot).
forte(def_pot):< medio(pot).
leve(def_pot):< alto(pot).
nulo(def_pot):< muito_alto(pot).

```

2.2.10 CONJUNTO DE REGRAS Nº10 (DEF_M_ORG)

Este conjunto regras analisa o nível de azoto no solo estimando efeito no crescimento das plantas.

```

Em PROLOG_CC
%Regras de inferência difusa para avaliar o efeito: deficiência quanto a nutriente azoto.
muito_forte(def_m_org):< muito_baixo(m_org).
forte(def_m_org):< baixo(m_org).
forte(def_m_org):< medio(m_org).
leve(def_m_org):< alto(m_org).
nulo(def_m_org):< muito_alto(m_org).

```

Considerando que todos os predicados difusos estão associados ao respectivo grau de pertinência (equação 1 e figura 3), o interpretador PROLOG^{CC} calcula o valor verdade de cada regra da forma como exemplificada: seja a 1ª regra do conjunto de regras N^o7

$$\text{muito_forte}(\text{def_sbt}):< \text{alto}(\text{pst}), \text{alto}(\text{gsb}).$$

Se $\text{alto}(\text{gsb})$ tiver um valor verdade de 0,25 e $\text{alto}(\text{pst})$ tiver um valor verdade de 0,5, o grau de pertinência da consequência da regra, ou seja, $\text{muito_forte}(\text{def_sbt})$ é o valor mínimo, portanto, grau de pertinência de $\text{muito_forte}(\text{def_sbt}) = \text{mínimo}(0,25;0,5) = 0,25$.

Em uma segunda etapa da codificação, o interpretador PROLOG^{CC} computa o valor do grau de pertinência do conjunto de regras. Por exemplo, sejam os valores do grau de pertinência dos predicados difusos das regras como abaixo descritos. O valor mínimo de cada regra é computado como a seguir:

```

alto(gsb(55);0,25)×alto(pst(1.63);0,0)→min (0,25;0,0)|(muito_forte)=0,0 muito forte
medio(gsb(55);0,75)×alto(pst(1.63);0,0)→min (0,25;0,0)|muito_forte)=0,0 muito forte
baixo(gsb(55);0,0)×alto(pst(1.63);0,0)→min (0;0,0)/muito_forte)=0,0 muito forte
baixo(gsb(55);0,0)×medio(pst(1.63);0,0)→min (0;0,0)/muito_forte)=0,0 muito forte
alto(gsb(55);0,25)×medio(pst(1.63);0,0)→min (0,25;0,0)/forte)=0,0 forte
medio(gsb(55);0,75)×medio(pst(1.63);0,0)→min (0,75;0,0)/forte)=0,0 forte
baixo(gsb(55);0,0)×baixo(pst(1.63);1,0)→min (0,0;1,0)/forte)=0,0 forte
medio(gsb(55);0,75)×baixo(pst(1.63);1,0)→min (0,75;1,0)/leve)=0,75 leve
alto(gsb(55);0,25)×baixo(pst(1.63);1,0)→min (0,25;1,0)/nulo)=0,25 nulo

```

O valor do grau de pertinência do conjunto de regras é calculado pelo máximo grau de pertinência verificado entre as regras, que neste caso é o predicado difuso *leve* (def_sbt);0,75 e recebe a notação (μ_{max}).

2.3. DESCODIFICAÇÃO

A conclusão da análise pericial é baseada na decodificação de valores que figuram as magnitudes de deficiências para cada regra executada. A esta decodificação de valores denomina-se resultado computacional do conjunto de regras executadas.

O processo de raciocínio proposto para representar o resultado computacional é um modelo matemático onde através de uma função monotónica $f(x)$, o grau de pertinência do conjunto de regras (μ_{maxC}). é propagado, computando um valor que simboliza a magnitude da deficiência do solo agrícola para cada conjunto de regras executado e é denominado Descodificador de Peso Ordenado (DPO). O DPO é assim definido como a soma infinitesimal de todos os pontos da função de pertinência agregada, ponderados pelo valor de deficiência correspondente. Assim, a propagação do grau de pertinência do conjunto de regras difusas será interpretada como a máxima força propagada pela função (δ_{maxC}) e é definido como:

$$\delta_{maxC} = \mu_{maxC} * (b''_{maxC} - b'_{maxC}) + b'_{maxC}$$

onde b' e b'' são os extremos inferior e superior do intervalo no domínio do conjunto difuso resultante C onde $C = \{\text{nulo} \in [0; 25], \text{leve} \in [25; 50], \text{forte} \in [50; 75] \text{ e } \text{muito forte} \in [75; 100]\}$. e o peso da máxima força propagada será calculado pela equação 3.

$$DPO(\delta_{maxC}) = \begin{cases} 0, & \text{se } f^{-1}(PO) = \emptyset \\ \int_0^{\delta_{maxC}} x \cdot f(x) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

Graficamente, o DPO é o volume de um gráfico tridimensional delimitado por $f(x)$ e por um plano inclinado a 45° .

Aplicando os valores do exemplo acima mencionado temos que o cálculo do peso da máxima força de propagação difusa do conjunto de regras nº 7 que analisa a deficiência def_sbt é igual a:

$$\delta_{maxC} = \mu_{maxC}(w) * (b''_{maxC} - b'_{maxC}) + b'_{maxC} = 0,75 * (50 - 25) + 25 = 43,75 \cong 44$$

$$DPO(44) = \int_0^{44} x \cdot f(x) = (44 * 44) + (43 * 43) + \dots + (0 * 0) \cong 30452 \cong 9\%$$

Portanto, a magnitude que o efeito obteve em relação as causas GSB e PST é de 9%, ou seja o solo apresenta deficiência leve em relação à soma de bases trocáveis, indicação de ser facilmente corrigido com emprego de capital e de práticas agrícolas simples, de acordo com a tabela 3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema pericial proposto constituiu de 10 parâmetros analisados quanto ao efeito: nível de deficiência (tabela 1). Foram inseridos na base de dados 5 registros de análises laboratoriais de solos da fonte bibliográfica (Jacomine, et al., 1975) e 1 registro hipotético com deficiência máxima. Os registros foram analisados para cada parâmetro, calculando o valor de peso (DPO) em função da força propagada resultante do mecanismo inferencial. Os registros selecionados foram análises de amostras de solo do horizonte A que apresentaram uma profundidade em torno de 30 cm. Este critério foi pelo facto da espessura considerada alcançar a maior percentagem de zona radicular, podendo deduzir raciocínios inferenciais quanto ao potencial produtivo deste solo.

Como pode ser verificado na tabela 4, as deficiências foram analisadas por propriedades: físicas, químicas e nutricionais e comparadas com a descrição do perito. PROLOG^{CC} respondeu aos dados inseridos da análise laboratorial das amostras de solo, apresentando o percentual de deficiências para cada parâmetro analisado. Observa-se que a descrição técnica feita pelo perito não se distancia dos valores encontrados por este sistema. Pode-se verificar que os resultados traduzem o efeito das regras quando executadas. Utilizando os predicados difusos inseridos nos parâmetros de deficiências, foi possível inferir sobre o potencial produtivo dos solos e visualizar o esforço necessário para requalificá-lo, conscientizando das potencialidades e limitações deste solo quando avaliados no sistema.

Analisemos os resultados do solo hipotético. Se for questionado a um perito acerca do seguinte solo: 100% de areia, 0% de matéria orgânica, 0% de cálcio, 0% de magnésio e 0% de potássio, com um pH alcalino e alto teor de sódio. Com certeza este irá concluir que não se trata de um solo agrícola, provavelmente, seria areal em zona litorânea sem cobertura vegetal. Neste caso, o sistema responderia como: solo com muito forte nível de deficiências na maioria dos efeitos analisados. É assim que um perito faz. Analisa os pontos principais de um solo e vai considerando suas deficiências, ponderando acerca das dificuldades para requalificação do solo visando aumentar a produção agrícola.

Quanto ao mecanismo de raciocínio, de um modo geral, a análise pericial neste sistema responde por comparação a um solo ideal e vai adicionando pesos de deficiências de acordo com as regras executadas. No entanto, ainda é uma análise geral e sem grandes complexidades, mas indica entre as propriedades físicas, químicas e nutricionais, quais seriam

as maiores deficiências. O facto da escolha da função propagadora do grau de pertinência serem tomados por critérios intuitivos, desfavorece a precisão computacional.

Quanto ao aspecto inovador, o descodificador DPO do PROLOG^{CC} no campo das ciências do solo permite sondar o raciocínio do perito através de pesos ordenados.

Outrossim, a resposta computacional é fornecida em sequência de dígitos que podem ser introduzidos em uma análise automática por sensores e casas de comando. Este sistema pode ser utilizado como ferramenta de codificação e descodificação de dados podendo inclusive, ser adaptado para outros sistemas, *eg.* controladores lógicos programáveis, que desempenham funções automáticas em diversos domínios relacionáveis, no intuito de inspecionar e atuar como agente nos processos da produção agrícola.

Tabela 4: resultados dos solos analisados.

Tabela Erró! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento..1: resultados dos solos analisados.			
Sistema pericial PROLOG ^{CC}			Descrição Técnica (Jacomine, et al., 1975)
Físicas	Químicas	Nutricionais	
Solo Latossolo Vermelho Amarelo podzólico A moderado e fraco textura média.			
[(def_ag,8), (def_ox,32)]	[(def_ret_cat,36), (def_pH,6), (def_alum,0), (def_prop_ca,42), (def_sbt,6)]	[(def_fos,100), (def_pot,0), (def_m_org,75)]	“São solos de boas condições físicas e com relevo muito favorável ao manejo e uso de máquinas agrícolas; além disso, são solos de boa fertilidade natural e normalmente com ausência de alumínio trocável no complexo sortivo. Requerem adubações complementares. A calagem normalmente pode ser dispensada em algumas áreas.” Pag 127.
Terra Roxa Estruturada Similar Eutrófica latossólica A moderado e proeminente textura argilosa			
[(def_ag,13), (def_ox,42)]	[(def_ret_cat,25), (def_pH,6), (def_alum,0), (def_prop_ca,42), (def_sbt,6)]	[(def_fos,100), (def_pot,0), (def_m_org,41)]	“Constituem bons solos para agricultura, têm boas condições físicas, acidez moderada e alumínio trocável baixo ou mesmo ausente. Requerem para incremento da produtividade, o uso racional de adubação complementares e calagens e práticas simples de conservação.” Pag. 277
Brunizem Avermelhado abruptico vértico textura média argilosa			
[(def_ag,13), (def_ox,13)]	[(def_ret_cat,35), (def_pH,0), (def_alum,0), (def_prop_ca,42), (def_sbt,0)]	[(def_fos,100), (def_pot,41), (def_m_org,35)]	“São solos de alta fertilidade natural, com boa reserva de minerais primários facilmente decomponíveis capazes de liberar boa reserva de minerais as plantas e com acidez moderada.” Pag. 280
Podzol A fraco, moderado e proeminente textura arenosa			
[(def_ag,13), (def_ox,13)]	[(def_ret_cat,94), (def_pH,94), (def_alum,75), (def_prop_ca,13), (def_sbt,42)]	[(def_fos,100), (def_pot,100), (def_m_org,100)]	“São solos que além de sua fertilidade ser muito baixa. Com deficiência de macro e micronutrientes e acidez elevada. Requerem maciças adubações e calagens principalmente adubação orgânica.” Pag 328
Vertisol A moderado			
[(def_ag,0), (def_ox,100)]	[(def_ret_cat,36), (def_pH,35), (def_alum,100), (def_prop_ca,100), (def_sbt,41)]	[(def_fos,100), (def_pot,39), (def_m_org,100)]	“São solos de fertilidade alta, porém com sérios problemas físicos e de drenagem, ou seja, solos com grande quantidade de argila do tipo 2:1 que ressecam-se e fendilham na época seca e ficam encharcados na época chuvosa, consequentemente tronam-se de difícil manejo.” Pag 342
Solo Hipotético: Máxima deficiência			
input(areia,100). input(limo,0). input(argila,0). input(aluminio,1). input(hidrogenio,0). input(pH,14).	input(calcio,0). input(magnesio,0). input(potassio,0). input(sodio,2.4). input(fosforo,0). input(materia_organica,0).	Análises das propriedades físicas do solo [(def_ag,100), (def_ox,0)] Análises das propriedades químicas do solo [(def_ret_cat,94),(def_pH,100),(def_alum,100), (def_prop_ca,100), (def_sbt,100)] Análises das propriedades nutricionais do solo [(def_fos,100), (def_pot,100), (def_m_org,100)]	

Quanto as vantagens apresentadas, a operação pericial em PROLOG^{CC} funciona com rotinas simples, sem complexidades, uma vez que em posse dos dados da análise laboratorial do solo e sua inclusão ao sistema, solicita-se a análise pericial e obtém automaticamente os resultados.

O PROLOG^{CC} opera eficientemente quando se trata do processo de raciocínio, seja na fase de codificação e decodificação viabilizando a capacidade funcional do sistema resolver o problema usando o conhecimento específico de domínio, bem como a capacidade funcional do sistema interagir com o usuário.

Outra vantagem é o facto dos predicados lógicos serem programados em linguagem próxima da natural, o que apresenta uma vantagem em relação a outras linguagens, facilitando o entendimento e tradução do raciocínio do perito.

Entretanto, alguns desafios foram evidenciados. Vários problemas intrínsecos surgiram na construção do protótipo. Estes envolveram a representação de conhecimento e o tipo de raciocínio associado.

Quanto a representação do conhecimento, a aplicabilidade de sistemas periciais nas ciências do solo está relacionada com a quantidade e precisão dos resultados que se deseja. Tais resultados são proporcionais às regras que são executadas e aos predicados difusos incluídos. Portanto, quanto à aplicabilidade do sistema, este não produz resultados que não foram previstos pelo elaborador das regras ou o raciocínio do perito. O sistema apenas reproduz as regras e enquadra os dados inseridos na base de dados.

Portanto, o sistema pericial proposto funciona de acordo com as regras pré-estabelecidas, assumindo que tais regras é o raciocínio do perito. Uma vez que a adequação do sistema pericial está diretamente relacionada às regras, estas é que devem ser examinadas e analisadas se estão condizentes com o raciocínio do perito. Se o raciocínio do perito é falho ou a regra não está em conformidade com o perito, o sistema falha. Portanto, este sistema pericial baseado em regras depende exclusivamente da conformação das regras e do correto processamento de codificação, inferência e decodificação. Neste último, o sistema operou satisfatoriamente.

4. CONCLUSÃO

Nestes últimos tempos tem-se observado interesse crescente nas pesquisas e aplicações de sistemas difusos. Isto é devido principalmente ao sucesso das tecnologias difusas em muitos campos da engenharia. Os modelos clássicos geralmente tentam evitar informação vaga ou imprecisa por ser de difícil operacionalidade. Contudo, os sistemas difusos assemelham-se mais com o modo do raciocínio humano.

Talvez seja o tempo de repensar novos parâmetros para análise pericial nesta temática, bem como, as suas relações e raciocínios difusos.

Existe espaço para aperfeiçoar a partir deste trabalho na aplicação de sistemas periciais às ciências do solo, tais como, regras mais específicas e utilização de outras funções de propagação mais ajustadas a realidade inferencial, como também aquisição do conhecimento focado nas investigações agrárias recentes. Ou seja, conhecimento de relações de predicados difusos experimentados e definidos.

Futuramente, pretendemos expandir o sistema para outras áreas da engenharia de biosistemas, generalizando o interpretador do PROLOG^{CC} para incluir relações difusas mais complexas, incluindo processos de aprendizagem através de aquisição automática de conhecimento. Tencionamos ainda alargar o espectro de métodos de descodificação.

5. BIBLIOGRAFIA

- Brady, N.C. 1989.** *Natureza e Propriedades dos Solos*. [trad.] Figueiredo A.B.N. 7ª Edição. Rio de Janeiro : Freiras Bastos, 1989.
- Carvalho, C.C.N, Rocha,W.F.& & Ucha,J.M. 2009.** Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2009, Vol. 13 n1, pp. 46-55.
- Ferrari, G.L e Argoud, F.I. & Azevedo,F.M. 2004.** Shell para desenvolvimento de sistemas especialistas fuzzy- Estudo de Caso: Gastroenterologia. 2004.
- Jacomine, P.K, et al. 1975.** *Lavantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado de Alagoas*. Centro de Pesquisas Pedológicas, EMBRAPA. Recife,Brasil : SUDENE, 1975.
- Kavdir, Ü. & Guyer, D. E. 2003.** Apple Grading Using Fuzzy Logic. *Turk J Agric For*. 2003, Vol. 27, pp. 375-382 .
- Silva, A.S, et al. 2010.** Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon. *Revista Ciência Agronômica*. jan-mar de 2010, Vols. 41, n.1, pp. 9-17.
- Silva.A.S & Lima, J.S.S. 2009.** Lógica Fuzzy no mapeamento de variáveis indicadoras de fertilidade do solo. *IDESIA*. Septiembre - Diciembre de 2009, Vols. 27, Nº 3, pp. 41-46.
- Torre, M.L., et al. 2005.** Optimization of fertirrigation efficiency in strawberry crops by application of fuzzy logic techniques. *J. Environ. Monit.* 2005, Vol. 7, pp. 1085-1092.
- Vieira, L.S. & Vieira,M.N.F. 1983.** *Manual de Morfologia e Classificação de Solos*. 2ª Edição. São Paulo : Editora Agronômica Ceres Ltda., 1983. p. 319.
- Zadeh, L.A. 1965.** Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965, Vol. 8, pp. 338-353.
- Zadeh, L.A. 1999.** Fuzzy Sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 100 Supplement, 1999, Vols. 9-34. Reprinted from *Fuzzy Sets and Systems* 1(1978) 3-28.