

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DE EXTRATORES QUÍMICOS NA DETERMINAÇÃO DE  
SILÍCIO DISPONÍVEL EM SOLOS CULTIVADOS COM  
CANA-DE-AÇÚCAR.**

**DORIVAL PIRES DE ARRUDA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

Botucatu - SP

Agosto - 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DE EXTRATORES QUÍMICOS NA DETERMINAÇÃO DE  
SILÍCIO DISPONÍVEL EM SOLOS CULTIVADOS COM  
CANA-DE-AÇÚCAR.**

**DORIVAL PIRES DE ARRUDA**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Co-orientador: Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

Botucatu - SP

Agosto - 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

A779a Arruda, Dorival Pires de, 1962-  
Avaliação de extratores químicos na determinação de silício disponível em solos cultivados com cana-de-açúcar / Dorival Pires de Arruda. - Botucatu : [s.n.], 2009. x, 78 f. : gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009  
Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol  
Co-orientador: Dirceu Maximino Fernandes  
Inclui bibliografia.

1. Ácido acético. 2. Cloreto de cálcio. 3. Cloreto de potássio. 4. Tampão acetato de sódio pH 4.0. I. Crusciol, Carlos Alexandre Costa. II. Fernandes, Dirceu Maximino. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "AVALIAÇÃO DE EXTRATORES QUÍMICOS NA DETERMINAÇÃO DE SILÍCIO DISPONÍVEL EM SOLOS CULTIVADOS COM CANA- DE AÇÚCAR"

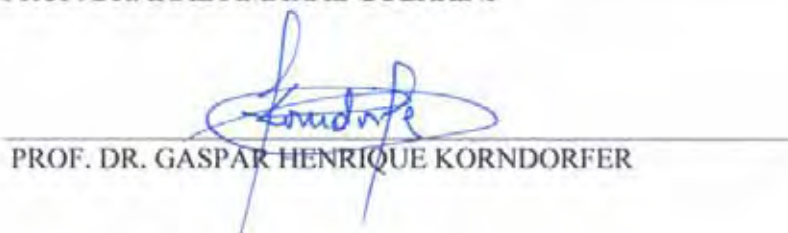
ALUNO: DORIVAL PIRES DE ARRUDA

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE C. CRUSCIOL

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE C. CRUSCIOL

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. IRAÊ AMARAL GUERRINI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. GASPAR HENRIQUE KORNDORFER

Data da Realização: 31 de agosto de 2009.

## ***AGRADECIMENTOS***

A todas as pessoas, com as quais convivi, por terem me suportado e incentivado durante todos esses anos;

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, pela orientação, ensinamentos, ética profissional e amizade;

Ao Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes do Departamento de Recursos Naturas – Solos, pelo ensinamento e amizade.

Ao Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer da Universidade Federal de Uberlândia – MG, pelo ensinamento e ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

À Usina Colombo S/A – Açúcar Álcool e Usina Açucareira Guaíra pela ajuda e apoio no desenvolvimento da pesquisa, principalmente ao Engenheiro Agrônomo Gustavo Vilas Gomes, da Usina Guaíra e Cristiane Cavalini Dias, da Usina Colombo, pelo apoio, amizade e profissionalismo.

Aos Docentes do Departamento de Agricultura, pela estrutura concedida, ensinamentos e colaboração nesta pesquisa; Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, Prof. Dr. Rogério Peres Soratto, Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, Prof. Dr. Dagoberto Martins, Prof. Dr. Norberto da Silva e Prof. Dr. Maurício Dutra Zanotto.

Aos Funcionários do Departamento de Agricultura Rubens Roberto de Souza, José Roberto Silva, Marcelo Shiono, Guilherme Cordeiro e Ciro Venâncio de Oliveira pela amizade, convivência e ajuda incessante.

Às queridas amigas Vera Lucia Rossi, Ilandir Boceto e Valéria Giandone, pela ajuda, carinho e muita paciência.

Aos amigos da Pós-graduação Rodrigo Arroyo Garcia (Bulbo), Gustavo Spadotti Amaral Castro (Spirro), Dácio Olibone, Juliano Carlos Calonego, Alexandde Merlin, Edemar Moro, Eduardo Negrisola e Marcelo Correa.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

***Dedico***

À minha esposa Solange do Carmo Martins Arruda e  
nosso filho Vinícius Augusto Pires de Arruda, pela  
confiança, para a concretização de mais uma etapa de  
nossas vidas.

**SUMÁRIO**

	<b>Pagina</b>
<b>1. RESUMO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. SUMMARY.....</b>	<b>3</b>
<b>3. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>4. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1. As principais fontes de silício.....</b>	<b>7</b>
<b>4.2. Silício no solo.....</b>	<b>8</b>
<b>4.3. Silício nas plantas.....</b>	<b>12</b>
<b>4.3.1. Silício na cultura da cana-de-açúcar.....</b>	<b>15</b>
<b>4.4. Extratores de silício do solo.....</b>	<b>15</b>
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1. Escolha das áreas.....</b>	<b>18</b>
<b>5.2. Extratores.....</b>	<b>19</b>
<b>5.3. Delineamento experimental.....</b>	<b>19</b>
<b>5.4. Condução do Experimento.....</b>	<b>20</b>
<b>5.4.1. Silicio disponível no solo .....</b>	<b>23</b>
<b>5.4.2. Extratores avaliados.....</b>	<b>23</b>
<b>5.4.2.1. Extrator cloreto de cálcio (Método padrão).....</b>	<b>23</b>
<b>5.4.2.1.1. Extração.....</b>	<b>24</b>
<b>5.4.2.1.2. Determinação quantitativa de Si.....</b>	<b>25</b>

5.4.2.2. Ácido Acético 0,5 M.....	25
5.4.2.3. Resina Trocadora de Íons.....	25
5.4.2.4. Água.....	25
5.4.2.5. Cloreto de Cálcio 0,01 M (Método modificado).....	26
5.4.2.6. Cloreto de Potássio 0,01 M.....	26
5.4.2.7. Ácido Clorídrico 0,01 M.....	26
5.4.2.7. Solução Tampão Acetato de Sódio pH 4.0.....	26
5.5. Avaliações.....	27
5.5.1. Determinação do Si no solo.....	27
5.5.2. Determinação dos óxidos de Ferro, alumínio e silício.....	27
5.5.3. Massa seca aérea de planta de cana-de-açúcar.....	27
5.6. Análise Estatística.....	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6.1. Teores de Si nos solos.....	29
6.2. Teores de Si X teores de argila.....	32
6.3. Teores de Si X pH dos solos.....	35
6.4. Teores de Si X teores de óxido de Fe.....	40
6.5. Teores de Si X teores de óxido de Al.....	46
6.6. Teores de Si X teores de óxido de Si.....	52
6.7. Teores de Si X Si acumulado na planta.....	57
6.8 Teores de Si X produtividade.....	64
7. CONCLUSÃO.....	74
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75



**LISTAS DE TABELAS**

	Paginas
<b>Tabela 1.</b> Atributos químicos do solo das áreas experimentais, nas profundidades de 0-20 e 20-cm.....	<b>21</b>
<b>Tabela 2.</b> Atributos físicos do solo das áreas experimentais, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.....	<b>22</b>
<b>Tabela 3.</b> Resultados médios dos teores de Si em solos de textura arenosa (1, 2 e 3), média (4, 5 e 6) e argilosa (7, 8 e 9) para todos os extratores avaliados.....	<b>30</b>

**LISTAS DE FIGURAS**

- Figura 1.** Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de argila nas texturas: argilosa, média e arenosa..... **34**
- Figura 2.** Correlação entre os teores de Si no solo e o pH em solos de textura argilosa, média e arenosa.....**36**
- Figura 3** Correlação entre os teores de Si no solo e o pH em solos de textura argilosa.....**37**
- Figura 4.** Correlação entre os teores de Si no solo e o pH em solos de textura média.....**38**
- Figura 5.** Correlação entre os teores de Si no solo e o pH em solos de textura arenosa.....**39**
- Figura 6.** Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de ferro em solos com textura argilosa, média e arenosa.....**42**
- Figura 7.** Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de ferro em solos com textura argilosa.....**43**

<b>Figura 8.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de ferro em solos com textura média.....	<b>44</b>
<b>Figura 9.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de ferro em solos com textura arenosa.....	<b>47</b>
<b>Figura 10.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de alumínio em solos de textura argilosa, média e arenosa.....	<b>48</b>
<b>Figura 11.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de alumínio em solos de textura argilosa.....	<b>49</b>
<b>Figura 12.</b> . Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de alumínio em solos de textura média.....	<b>50</b>
<b>Figura 13.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores óxido de alumínio em solos de textura arenosa.....	<b>51</b>
<b>Figura 14.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício em solos de textura argilosa, média e arenosa.....	<b>53</b>
<b>Figura 15.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício em solos de textura argilosa.....	<b>54</b>
<b>Figura 16.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício em solos de textura média.....	<b>55</b>
<b>Figura 17.</b> Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício em solos de textura arenosa.....	<b>56</b>

- Figura 18.** Correlação entre os teores de Si no solo e Si acumulado na planta com solos textura argilosa, média e arenosa.....**60**
- Figura 19.** . Correlação entre os teores de Si no solo e Si acumulado na planta com solos textura argilosa.....**61**
- Figura 20.** Correlação entre os teores de Si no solo e Si acumulado na planta com solos textura média.....**62**
- Figura 21.** Correlação entre os teores de Si no solo e Si acumulado na planta com solos textura arenosa.....**63**
- Figura 22.** Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade em solos de textura argilosa, média e arenosa.....**65**
- Figura 23.** Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade em solos de textura argilosa.....**66**
- Figura 24.** Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade em solos de textura média.....**67**
- Figura 25.** Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade em solos de textura arenosa.....**68**

## 1. RESUMO

Existem vários extratores que avaliam a disponibilidade de silício no solo. Nos Estados Unidos utiliza-se como extrator químico o ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , o qual já foi usado no Brasil, mas recentemente foi substituído pelo cloreto de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , o mesmo utilizado na Austrália. Os extratores, de forma geral, são dependentes das características físicas do solo, principalmente do teor de argila, e podem subestimar ou superestimar os teores de silício no solo. Na literatura não há relatos de extratores de silício que se assemelhem às raízes das plantas, como é o caso da resina trocadora de ânions usada na extração do fosfato do solo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar extratores químicos que correlacionem o silício disponível no solo com o silício absorvido por plantas de cana-de-açúcar, cultivada em solos de textura arenosa, média e argilosa. Foram avaliados 8 extratores com o objetivo de selecionar aqueles que melhor avaliam os diferentes tipos de solos encontrados no Brasil. Os extratores utilizados foram  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (Padrão),  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (modificado), ácido acético  $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ , resina trocadora de íons, água, tampão acetato de sódio pH 4,0 e  $\text{HCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ . As amostras foram coletadas entre março e dezembro de 2007 em áreas cultivadas com a cultura da cana-de-açúcar nas Usinas Guairá (Guairá-SP) e Colombo (Ariranha - SP). No momento do corte de cana-de-açúcar, em cada unidade experimental, foram realizadas coletas de solo nas profundidades 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, para avaliação de pH, M.O. H+Al, P, K, Ca, Mg, Si,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e textura do solo. Na mesma época, coletou-se a parte aérea de 10 plantas inteiras de cana-de-açúcar para determinação da produtividade e do silício acumulado nas plantas. As texturas dos solos e os

teores de óxidos de ferro e alumínio têm influência significativa na disponibilidade de Si no solo. O extrator ácido acético e tampão pH 4,0 foram os que mais extraíram silício do solo entre as texturas analisadas, principalmente na argilosa, que apresentam elevados teores de óxido de ferro e alumínio, proporcionando alta correlação com o silício acumulado na planta. Os extratores cloreto de potássio, cloreto de cálcio (padrão e modificado) e água proporcionaram baixos valores de Si disponíveis no solo, no entanto, demonstraram altas correlações com a quantidade de Si acumuladas nas plantas de cana-de-açúcar. A produtividade de cana-de-açúcar foi superior em solos de texturas média e arenosa se comparado a solos de textura argilosa.

---

Palavras chave: ácido acético, cloreto de cálcio, cloreto de potássio e tampão acetato de sódio pH 4.0.

**CHEMICAL EXTRACTANTS TO EVALUATE AVAILABLE SILICON IN SOILS CROPPED WITH SUGAR CANE. Botucatu, 2009. 86p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.**

Author: DORIVAL PIRES DE ARRUDA

Adviser: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Co-adviser DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

## **2. SUMMARY**

Many extractants evaluated silicon availability in soil. In the United States, the acetic acid 0.5 mol L<sup>-1</sup> is the most used. This Si extractant has already been used in Brazil, but it was recently replaced by the calcium chloride 0.01 mol L<sup>-1</sup>, the same used in Australia. The extractants generally depend on soil physical characteristics, mainly clay content, and thus may underestimate or overestimate Si levels in soil. There are no references in literature about silicon extractants that simulate the behavior of plant roots, like the anion exchange resin used to extract phosphate in soil. Therefore, the objective of this study was to evaluate chemical extractants that correlate Si available in soil with Si uptaken by sugar cane plants, cropped in sandy, sandy-loam and clayey soils. Eight Si extractants were tested with the aim to select the ones that most accurately evaluate different soil types in Brazil. The extractants were CaCl<sub>2</sub> 0.01 Mol L<sup>-1</sup> (standard), CaCl<sub>2</sub> 0.01 Mol L<sup>-1</sup> (modified), acetic acid 0.5 Mol L<sup>-1</sup>, KCl 0.01 Mol L<sup>-1</sup>, ion exchange resin, water, sodium acetate buffer pH 4.0 and HCl 0.01 Mol L<sup>-1</sup>. Samples were taken in Guaíra-SP, Brazil (Usina Guaíra) and Ariranha-SP, Brazil (Usina Colombo) between March and December of 2007 from areas cropped with sugar cane. At harvest, soil samples were taken from each experimental unit in the depths 0-0.20 m and 0.20-0.40 m to evaluate pH, organic matter (O.M.), H+Al, P, K, Ca, Mg, Si, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and soil texture. Also, 10 plant shoots were harvested to determine yield and Si accumulation. Soil texture, iron oxide and aluminum oxide levels significantly influence on Si availability in soil. The acetic acid and buffer pH 4.0 extracted more silicon from soil, mainly in the clayey texture, that showed high levels of iron and aluminum oxides, highly correlating with Si accumulated in plant shoot. The KCl, CaCl<sub>2</sub> (standard and modified) and water extracted

lower levels of Si available in soil; however, these extractants showed high correlation with the amount of Si accumulated in sugar cane plants. Sugar cane yield was higher in sandy and sandy-loam soils compared to the clayey texture.

---

Key words: acetic acid, calcium chloride, potassium chloride, sodium acetate buffer pH 4.0



### 3. INTRODUÇÃO

A falta de calibração de métodos tem dificultado os pesquisadores em estudar o papel desse elemento na nutrição das plantas. Sabe-se que o Si é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e que a adubação com Si pode resultar em aumentos de produtividade de várias culturas, como é o caso do arroz, cana-de-açúcar entre outras, têm sido relacionado a presença do Si na planta com resistência a pragas e doenças, maior capacidade fotossintética (as folhas ficam mais eretas e a interceptação de luz é maior) e tolerância a falta de água. Apesar disso, o Si não é considerado um elemento essencial para as planta, pois sem seu fornecimento, a planta consegue completar seu ciclo de vida.

O método de extração com  $\text{CaCl}_2$  0,01 M, segundo Korndörfer (2004) é comumente usado numa série de determinação tais com cátions e pH. Esse extrator tem a propriedade de simular a força iônica da solução, sendo que o processo químico envolvido é pouco estudado e pouco tem sido feito para entender a cinética de liberação dos íons da fase sólida para a solução. Segundo Gilbson (1994) a extração do Si com  $\text{CaCl}_2$  0,01 M é intensa nas primeiras 24 horas de contado com o solo. A partir daí a extração é essencialmente linear com o tempo. Nesse caso o autor sugere que as primeiras 24 horas de extração devem refletir melhor a disponibilidade do Si para as plantas, entretanto, reconhece que a quantidade de Si é muito dependente do tempo de extração.

Os pesquisadores japoneses são os que mais apresentam trabalhos relacionados ao desenvolvimento de métodos para análises de Si no solo. Nonaka & Takahashi (1990), concluem que o tampão de acetado a pH 4,0 foi muito forte para estimar a

disponibilidade de Si no solo. Mas é dos EUA que vem um método de extração mais utilizado para Si no solo. Snyder (1991) demonstrou que o ácido acético  $0,5 \text{ M Mol L}^{-1}$  é bastante prático e tem sido bastante eficiente em identificar solos deficientes em Si. Segundo o autor, esse extrator vai muito bem tanto nos solos orgânicos como nos solos arenosos. A solução de ácido acético é a mais utilizada no Brasil (KORNDÖRFER et al. 1999), mas alguns trabalhos têm permitido constatar que o pH pode influenciar de forma negativa, resultando em valores extraídos maiores que os realmente disponíveis às plantas (CAMARGO, 2003; QUEIROZ, 2003; DALTO, 2003).

O extrator cloreto de cálcio  $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  pode apresentar maiores correlações entre o silício extraído no solo e a quantidade de silício absorvida pela planta (VIDAL, 2003), mas ainda são necessários mais estudos sobre o assunto, pois os resultados ainda são controversos. A determinação do Si extraível, além da sua importância na identificação de solos deficientes em Si também tem interesse no estudo de fenômeno pedogenético, considerando que a remoção da sílica do perfil do solo é o principal aspecto do intemperismo químico nos trópicos. Dessa forma, acredita-se que haja outros extratores que devem ser testados, que possuam potencial semelhante e até mesmo superior, que se correlacionem com o acumulado nas plantas, e com as diferentes classes de texturas dos solos.

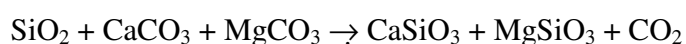
Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar oito extratores químicos para silício em solo com texturas arenosa, média e argilosa, cultivados com cana-de-açúcar e a correlação entre Si disponível no solo e o acumulado nas plantas.

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

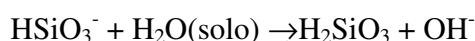
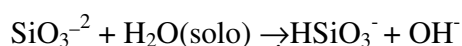
### 4.1. Principais fontes de silício

Um número grande de materiais tem sido utilizado como fonte de Si para as plantas: escórias de siderurgia, wollastonita, subprodutos da produção de fósforo elementar, em fornos elétricos, metalissicato de cálcio, metassilicato de sódio, cimento, termofosfato, silicato de magnésio (serpentinitos) e silicato de cálcio. A Wollastonita é o silicato de cálcio considerado padrão internacional, e dessa forma, muito empregado em experimentação (Nonaka & Takahashi (1990), As principais fontes de ácido silícico presentes na solução do solo são: decomposição de resíduos vegetais, dissociação do ácido silícico polimérico, liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos, adição de fertilizantes silicatados e água de irrigação. Os principais drenos incluem a precipitação do Si em solução formando minerais, a polimerização do ácido silícico, lixiviação, adsorção a óxidos e hidróxidos de Fe e Al e absorção e exportação pelas plantas (LIMA FILHO, 1999).

As escórias siderúrgicas são as fontes mais abundantes e baratas de silicatos, encontradas no mercado brasileiro. São originárias do processamento em altas temperaturas, geralmente acima de 1400° C, da reação do calcário (calcítico, magnesiano ou dolomítico) com a sílica (SiO<sub>2</sub>) presente no minério de ferro, de acordo com a formula:



Segundo Alcarde (1992), a ação neutralizante da acidez do solo pelo silicato pode ser explicada de acordo com as seguintes equações:



Assim como no calcário, a reatividade da escória varia segundo a granulométrica, dosagem utilizada, tipo de solo e com o tempo de contato, da escória com o solo (Piau, 1991; Novais et al., 1993; Amaral Sobrinho et al., 1993). Segundo Alcarde (1992) o silicato de Ca é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g dm}^{-3}$ ), o  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  se comporta como ácido fraco, de tal forma que mesmo em pH 7,0 apenas 0,2% está ionizado na forma carregada negativamente ( $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ) sendo que o grau de ionização aumenta com a elevação do pH (MC KEAGUE; CLINE, 1963A). Dentre os diversos fatores que interferem na solubilidade do Si no solo em condições aeróbicas, o pH é um dos mais estudados. (MC KEAGUE; CLINE, 1963).

#### 4.2. Silício no solo

O silício é um elemento com propriedades elétricas e físicas de um semimetal, desempenhando no reino mineral um papel com importância semelhante ao carbono nos reinos vegetal e animal. É um dos elementos mais abundantes, compreendendo 27,6% da crosta terrestre (BARBOSA FILHO, 2000).

As principais formas de Si presentes no solo, do ponto de vista agrônomo, são: os minerais silicatados (cristalinos e amorfos); o Si solúvel ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), que desprovido de carga elétrica tem interessantes consequências no comportamento do Si com relação aos vegetais e o Si adsorvido ou precipitado com óxidos de ferro e alumínio.

O Si está presente em minerais silicatados tais como feldspatos, plagioclásios, orthoclásio e principalmente como quartzo, que é a principal forma de Si no solo, sendo caracterizado pela alta estabilidade. Cerca de 80 % das rochas ígneas, das quais derivam outras rochas e das rochas metamórficas são constituídas de silicatos, enquanto em rochas sedimentares o conteúdo é menor (JACKSON, 1965), a sílica está combinada com o oxigênio e outros elementos (Al, Mg, Ca, Na, Fe e K) em mais de 95 % das rochas terrestres, meteoritos, em todas as águas, atmosfera (pó silicoso), vegetais e animais (BARBOSA FILHO, 2000).

Solos tropicais e subtropicais, sujeitos à intemperização com os cultivos sucessivos, tendem a apresentar baixos níveis de Si trocável, podendo ser de 5 a 10 vezes menores que os encontrados nos solos das regiões temperadas (MC KEAGUE; CLINE, 1963; FOY, 1992). É o caso de regiões agrícolas importantes como o Centro-Oeste brasileiro (cerrado) pobres em silício devido à dessilificação, que consiste na remoção do silício durante a intemperização das rochas. Esses solos, normalmente, apresentam baixo pH, alto teor de Al, baixa saturação por bases, além de uma atividade microbiana reduzida. A seqüência crescente de intemperização é a seguinte: Molissóis> Vertissóis> Inceptissóis> Alfissóis>Ultissóis>Oxissóis (LIMA FILHO, 1999). A sílica dissolvida nos solos é um soluto ativo, que não será obrigatoriamente lixiviada após a intemperização das rochas.

Quanto ao Si solúvel, há três principais grupos de compostos ricos em Si presente no solo: compostos organo-silícicos, ácido monossilícico e ácido polisilícico, sendo os dois últimos os mais estudados. Os compostos organo-silicosos possuem um papel importante na formação da matéria orgânica no solo, podendo vários deles servir de catalisadores e reguladores na síntese de moléculas orgânicas (STRELKO et al., 1963; VISSOCKII; POLIAKOV, 1959). O ácido monossilícico possui apenas um átomo de Si, sendo suas formas mais comuns presentes no solo o ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) e o ânion  $H_3SiO_4^-$ . O ácido meta-silícico ocorre raramente na natureza. Os mecanismos de dissolução são complexos e envolvem vários estágios intermediários até as formas mais solúveis (ILER, 1979). Na solução do solo, está presente como ácido monossilícico em concentrações variáveis de menos de 1 até mais de 100 mg dm<sup>-3</sup> em SiO<sub>2</sub>, sendo a maior parte não dissociada (pK<sub>1</sub>=9,6), o qual é prontamente absorvido pelas plantas (RAVEN, 1983; WERNER; ROTH, 1983).

Estudos têm demonstrado que 95 a 99% do Si disponível às plantas encontra-se na forma fracamente adsorvida no solo e somente 1 a 5 % na solução do solo (MATICHENKOV et al., 1997). A espécie  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  contribui significativamente para o aumento de Si na solução do solo em valores de pH acima de 8,5 (MC KEAGUE; CLINE, 1963) e, na faixa normal de pH dos solos de cerrado, o ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) é a principal espécie de silício em solução.

Num sistema fechado, o processo de polimerização inicia com uma concentração acima de  $120 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{SiO}_2$  (ILER, 1979). Na presença da fase sólida, a polimerização pode ocorrer em concentrações menores do monômero (ALVAREZ; SPARKE, 1985). Diferente do ácido monossilícico, os ácidos polissilícicos são quimicamente inertes e agem, basicamente, como adsorventes e formando partículas coloidais. A passividade química dos ácidos polissilícicos é determinada pela quantidade de cargas nos vértices da molécula, podendo ser adsorvidos por minerais e formando “pontes” de Si. (CHADKIN et al., 1987). Eles podem aumentar a plasticidade dos solos e também de horizontes sódicos quando a concentração dos mesmos for aumentada em várias vezes. A presença de cátions bivalentes em grande quantidade ( $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ ) como nos solos salinos pode destruir os ácidos polissilícicos e transformá-los em formas não-expansivas de Si (ILER, 1979). Estas considerações podem ser utilizadas na melhoria das propriedades físicas dos solos.

Embora o silício seja um dos elementos químicos de maior ocorrência nas fases sólida do solo, cultivos consecutivos podem reduzir seu teor no solo sendo necessárias adubações para obtenção de boas produções (ARANTES, 1997). A avaliação da sua disponibilidade no solo é importante para adequadas recomendações de adubação com silício, proporcionando respostas satisfatórias em produção. Em alguns países já existem definidas soluções extratoras como ácido acético  $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$  nos Estados Unidos (SNYDER et al, 2001), solução tampão de acetato a pH 4,0 no Japão (Sumida, 2002), cloreto de cálcio  $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  na Austrália (BERTHELSEN et al., 2002) e Independentemente da solução utilizada, é necessário que ela apresente correlação satisfatória entre o silício extraído e aquele absorvido pelas plantas. A solução de ácido acético foi a mais utilizada no Brasil (KORNDÖRFER et al., 1999), mas alguns trabalhos têm permitido constatar que o pH pode influenciar de forma negativa, resultando em valores extraídos maiores que os realmente disponíveis às plantas (CAMARGO, 2003; QUEIROZ, 2003; DALTO, 2003). Conforme relatado por Vidal (2003),

o extrator cloreto de cálcio ( $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ ) pode proporcionar maiores correlações entre o silício extraído no solo e a quantidade de silício absorvida pela planta, porém ainda são necessários mais estudos sobre o assunto.

Os efeitos dos silicatos nos solos são os aumentos de pH, fornecimentos de Ca e Mg, efeito residual, aumento da disponibilidade de fósforo às plantas e redução dos efeitos tóxicos de Al, Mn e Fe (KORNDÖRFER et al., 2003). Os agregados siderúrgicos (escórias) são as fontes mais abundantes e baratas de silicatos. A alta concentração de silicatos de cálcio e magnésio sugere sua utilização como corretivos de acidez do solo, além do fornecimento desses nutrientes.

A correção do pH pelos silicatos e o fornecimento de cálcio e magnésio já foi verificada em vários trabalhos em condições de casa de vegetação (PIAU, 1991; RAMOS, 2003; QUEIROZ, 2003; PUZ et al., 2008; CRUSCIOL et al. 2009) e de campo (CARDOSO, 2003; DALTO, 2003; CASTRO, 2009). Estudos têm demonstrado que a presença de silício pode aumentar o aproveitamento do fósforo às plantas, principalmente em solos muito intemperizados (SANCHEZ; UEHARA, 1980; VOLKWEISS; RAIJ, 1977; ROTHBUHR; SCOTT, 1957; ENGEL, 1958; AYRES, 1966; ALY, 1966; FASSBENDER; MOLINA, 1969; SHERMAN, 1969; ROY et al., 1971; PLUCKNETT, 1972; PULZ et al., 2008; CASTRO, 2009). O benefício dos silicatos para o aproveitamento de P, a relação entre Si solúvel em água e P disponível e as correlações entre Si adicionado como silicato, P disponível e acumulado na planta são bastante conhecidas (BIRCH, 1953; SANCHEZ; UEHARA, 1980). A utilização de silicatos como fertilizantes (silicatos de cálcio e magnésio das escórias de siderurgia e das fontes comerciais como termofosfato magnésiano) favorece o aproveitamento de P em solos ácidos. Isso ocorre pelo efeito indireto do aumento do pH e pelo bloqueamento dos sítios de adsorção ou pela redução da adsorção do fosfato com a utilização de silicato, pois há evidências de que competem pelo mesmo sítio de adsorção (SAVANT et al., 1999; PULZ et al., 2008).

A competição entre silício e fósforo é um assunto pesquisado há mais de 20 anos. No entanto, poucos trabalhos realizados que tratam do aumento da disponibilidade de fósforo pelo uso de silicato e vice-versa são relatados, tais como Lopes (1977), Oliveira (1984), Leite (1997), Carvalho (2000) e PULZ et al., (2008) O efeito do silicato no aumento

na disponibilidade de fósforo decorre mais do aumento de pH que da dessorção de fósforo, que não foi observada em vários trabalhos (MA; TAKAHASHI, 1990).

Quanto à redução dos efeitos tóxicos de ferro, manganês e alumínio com a utilização de silício no solo e em solução nutritiva, há vários trabalhos (GALVEZ et al., 1987; Horiguchi, 1988; MA; TAKAHASHI, 1991; MA; TAKAHASHI, 1990ab). Alguns autores têm sugerido que o fornecimento de Si às plantas pode aliviar a toxidez de Mn e Fe não somente pela redução na sua absorção, mas também porque aumenta o nível de tolerância interna ao excesso de Mn nos tecidos (Horiguchi, 1988; Okuda, Takahashi, 1964; MA; TAKAHASHI, 1990ab; MA; TAKAHASHI, 1991; Savant et al., 1999). Cientistas japoneses explicam que devido à alta capacidade de oxidação da sílica, o Fe e Mn tóxicos têm as suas reduções a sua disponibilidades no solo reduzidas.

### **4.3. Silício nas plantas**

O elemento silício (Si) recebeu pouca atenção dos cientistas da área de nutrição de plantas. A razão provável reside no fato de não estar incluído no grupo de elementos considerados como essenciais para as plantas. No entanto, os efeitos benéficos do Si têm sido demonstrados em várias espécies vegetais, especialmente quando estas plantas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de caráter biótico ou abiótico (Takahashi, 1995; Korndörfer et al., 1999; Faria, 2000; Datnoff et al., 2001; Pulz et al., 2008; Crusciol et al., 2009). Gramíneas em geral, são classificadas como acumuladoras de Si e os depósitos deste elemento são encontrados nas paredes celulares, no lúmen celular e em localizações extracelulares. A maior parte deste Si é incorporada nas células na parede celular, principalmente nas células da epiderme, estômatos e tricomas das folhas, ou depositada, juntamente com outros elementos, originando depósitos amorfos chamados de fitólitos (Yoshida, 1965).

O Si é absorvido pelas plantas como  $H_4SiO_4$  (Jones; Handreck, 1967). A absorção de Si da solução do solo se dá de forma preferencialmente passiva, com o elemento acompanhando o fluxo de massa que penetra pelas raízes das plantas. A água absorvida é perdida pela transpiração e o Si fica retido nos tecidos das plantas. Quando a concentração de Si na planta aumenta, o ácido monossilícico tende a polimerizar (Yoshida,



1965). A natureza química do Si polimerizado tem sido identificada como sílica gel (YOSHIDA, 1965, YOSHIDA et al., 1976) ou opala biogênica (sílica amorfa -  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) (LANNING, 1960).

O Si pode estimular o crescimento e a produção vegetal através de várias ações tais como: formação de folhas mais eretas com a conseqüente diminuição do auto-sombreamento; redução do acamamento; maior rigidez estrutural dos tecidos; proteção contra estresses abióticos tais como amenizar a toxidez de Fe, Mn, Al e Na, aumentar a tolerância ao estresse hídrico e a geada; proteção contra estresses bióticos tais como: redução do ataque de patógenos (doenças) e aumento na proteção contra herbívoros, incluindo os insetos fitófagos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995). Além disso, o silício aumenta a rigidez das células (ADATIA; BESFORD, 1986). As células epidérmicas ficam mais grossas e com um maior grau de lignificação e/ou silicificação (barreira mecânica). Isto poderia elevar o conteúdo de hemicelulose e lignina da parede celular (LEE; PARK, 1990).

O acúmulo e deposição de Si nas células da camada epidérmica constituem-se numa uma barreira física à penetração de patógenos e ataque de pragas (MARSCHNER, 1995). Nas folhas de arroz, forma-se uma camada de sílica abaixo da cutícula, nas células epidérmicas, as quais, segundo alguns autores (MALAVOLTA, 1980; MARSCHNER, 1986; TAKAHASHI, 1995) teriam a função de minimizar a perda de água. O acúmulo de sílica nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma "dupla camada" de sílica cuticular, a qual, pela redução da transpiração, faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor. Isso pode ser de extrema importância em se tratando de solos de cerrado, em que o período de estiagem é longo e severo associado às temperaturas elevadas. Agarie et al (1992) observaram um melhor aproveitamento da água do solo na presença de silicato provavelmente devido à redução na transpiração. Os mesmos autores também citam que a maior atividade fotossintética proporcionada pelo Si pode ser uma das razões para o aumento da matéria seca.

Devido ao acúmulo de silício na epiderme das folhas, além da menor transpiração se refletir em maior economia de água, as plantas de arroz mantiveram suas folhas mais eretas, promovendo maior aproveitamento da luz e, em decorrência, maior eficiência fotossintética (TAKAHASHI, 1995). O autor investigou também o efeito do Si na transpiração das plantas de arroz e observou taxa de transpiração superior nos tratamentos

sem Si. Testes conduzidos com silício radioativo ( $\text{Si}^{31}$ ) permite constatar que o Si é translocado no caule poucas horas depois de ter sido absorvido pelas raízes. A translocação do Si pode ser regulada pela taxa de transpiração (HORIGUSHI, 1988).

As plantas variam consideravelmente na quantidade de Al e Si absorvido e acumulado nos tecidos foliares e parece que a alta acumulação de Al e a alta acumulação de Si são mutuamente exclusivas. Os mecanismos sugeridos para essa exclusão são: reações entre o Si e o Al na solução do solo (formação de HAS - Hidroxi-alumino-silicatos), co-deposição (precipitação) do Si e do Al dentro da planta, atividade de certas enzimas e efeitos indiretos. Trabalhando com a adição de Si em plantas cultivadas em solução nutritiva, Galvez et al. (1987) verificaram que o efeito tóxico do Al ( $0,296 \text{ mmol L}^{-1}$ ) em solução a pH 4,0 foi bastante reduzido com a adição de Si ( $1,07 \text{ mmol L}^{-1}$  ou  $3,56 \text{ mmol L}^{-1}$ ).

O Si também aumentou a produção da parte aérea do sorgo e aliviou os sintomas de toxidez de Mn. A formação de ácidos orgânicos (ex: malato) parece que está diretamente relacionada com a tolerância de várias espécies de plantas à toxidez por Al. Foy & Lee (1987) sugerem que a maior tolerância da cevada ao Al está relacionada com a sua habilidade em formar ácidos orgânicos (incluindo malato) na presença do Al. Ryan et al. (1995) demonstraram que a exudação do malato em genótipos de trigo tolerantes, foi correlacionada positivamente com a concentração de monômeros de Al. Cocker et al (1998) trabalhando com cultivares de trigos tolerantes e sensíveis ao Al, concluíram que o Si não reduz a fitotoxidez do Al como um resultado da interação Si/Al no meio externo, mas sim no interior da planta. Os autores observaram que em presença de Al e altas concentrações de Si, a exudação de malato pela planta foi desprezível, comprovando assim o efeito do Si em aliviar a toxidez do Al.

Os referidos autores acreditam que a redução do efeito tóxico do Al esteja associado à formação de HAS (hidroxi-alumino-silicatos) dentro do apoplasto das raízes. Outra hipótese para redução do efeito tóxico do Al pelo Si foi descrita por Wallace (1993) o que afirmou que o Si por ser absorvido pelas gramíneas na forma aniônica, equivalentes quantidades de hidroxilas devem ser expelidas a partir da superfície radicular para que seja mantido o balanço de cargas, as quais podem aumentar o pH da rizosfera e reduzir a absorção de alumínio e ferro.

### **4.3.1. Silício na cultura da cana-de-açúcar**

Para o estabelecimento da cana-de-açúcar, além dos elementos essenciais outros podem ser benéficos, tal como o silício, inclusive contribuindo para o aumento de produtividade (KORNDÖFER et al., 2002). A resposta da cana-de-açúcar ao silício é favorável, particularmente nos solos pobres com esse elemento. Ross et al.(1974) citam uma exportação de até 408 kg ha<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub> para uma produtividade de 74 t ha<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar (folhas + colmos). Como resultado desta enorme extração de silício, pode ocorrer uma diminuição temporária desse elemento no solo, com reflexo direto no desenvolvimento da planta. Em pesquisas realizadas por Datnoff et al. (2001), observaram-se aumentos de produtividade de até 17% na cana planta e de até 20% na soqueira.

Devido a grande quantidade de escórias produzidas pelas siderúrgicas, esse material poderia estar sendo aproveitado na agricultura, no entanto, sua maior quantidade é utilizada como aterro ou despejadas em locais impróprios (ADATIA; BESFORD, 1986; MADEIROS et al., 2009). No Brasil, trabalhos com cana-de-açúcar evidenciaram respostas positivas (PRADO; FERNANDES, 2000), demonstrando o potencial dessa cultura para consumir parte significativa desses resíduos por ter uma vasta área cultivada, a tradição em reciclar resíduos, como a vinhaça e da torta de filtro, e a própria estrutura organizacional do setor sucroalcooleiro.

A aplicação do silício na cultura da cana-de-açúcar tem como objetivo o aumento de produtividade, economia de água e o aproveitamento das escórias siderúrgicas que, outrora, estavam sendo descartadas em aterros ao invés de serem reutilizadas como insumo agrícola, reduzindo o seu impacto ambiental. A irrigação suplementar da cana-de-açúcar, nos períodos de estiagens, se faz necessário na região Nordeste, pois essa cultura sofre grandes quedas de produtividade sob condições de estresse hídrico prolongado, no entanto, deve-se buscar formas de melhorar o aproveitamento da água irrigada

### **4.4. Extratores de silício do solo**

O solo é normalmente um sistema de natureza coloidal devido ao tamanho das partículas dos minerais que o compõem. As argilas são minerais que

desenvolvem cargas na sua superfície, sendo estas cargas responsáveis por reter os elementos nutrientes presos ao sistema. Desta forma, pode-se considerar que cargas negativas presentes nas argilas retêm elementos catiônicos, isto é, que possuem cargas positivas como no caso do cálcio, magnésio, potássio, hidrogênio e alumínio.

Da mesma forma se dá com cargas positivas, que podem reter elementos aniônicos como o fosfato, sulfato, nitratos e outros. As plantas no solo retiram para sua nutrição os elementos trocáveis, isto é, aqueles que se encontram presos às argilas através das cargas negativas ou positivas. Para a realização da análise no laboratório é necessário simular o mecanismo necessário para se disponibilizar os nutrientes. Como o solo foi retirado do local original, este sofre um tratamento químico no laboratório com o objetivo de retirar os nutrientes das cargas, para que possam ser analiticamente determinados.

Para cada tipo de elemento, esta extração é feita de forma diferente, pois depende das forças químicas que os mantêm ligados aos minerais do solo. A extração consiste basicamente em se agitar uma determinada quantidade de solo com um volume do extrator. Após a agitação, os elementos que se encontravam presos ao solo são liberados para o extrator, ficando então em solução.

Segundo Raij e Camargo (1973), o inconveniente do uso da água destilada com extrator da sílica solúvel, esta na dispersão que provoca nas partículas de argila, exigindo centrifugação a altíssima velocidade para a separação dos extratos ou floculação e separação da argila antes de determinação da sílica

Ainda de acordo com Raij e Camargo (1973), a quantidade de sílica extraída dos solos tem um pequena decréscimo com aumento da concentração da solução extratora de cloreto de cálcio, sendo que a solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  a extração foi menor que a solução  $\text{CaCl}_2$   $0,0025 \text{ Mol L}^{-1}$  e a extração com água destilada foi superior ao cloreto de cálcio. Optou-se, para as determinações subseqüentes, pela solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,0025\text{M}$  para extração da sílica solúvel. Foi feito, também, um estudo da influência da relação entre o volume da solução extratora e o peso da amostra de solo nos teores de sílica solúvel no mesmo trabalho, optando por uma relação solo solução de 1:10.

De acordo com Korndorfer et al. (2004), a relação do Si, extraído pelos diferentes extratores com o Si acumulado na planta de arroz de sequeiro, proporcionou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de: 0,88, 0,84, 0,70, 0,69, para os extratores ácido acético 0,5

Mol L<sup>-1</sup>, água, cloreto de cálcio 0,0025 Mol L<sup>-1</sup> e Tampão pH 4,0, respectivamente. O extrator que proporcionou maior coeficiente de determinação foi o ácido acético, apesar de coeficiente de determinação da água também ter sido elevado ( $R^2 = 0,84$ ). Este mesmo problema foi detectado por Raij e Camargo (1973). Os autores observaram que o ácido acético foi o extrator que mais extraiu silício do solo, portanto a maior capacidade de extração do ácido acético pode, em parte, explicar o maior coeficiente de determinação, visto que quanto maior concentração de Si na solução menos erros de leituras.

Vários autores (MCKEAQUE; CLINE, 1963; BROWN ; MAHLER, 1988) relatam que a adsorção do Si é dependente do pH e ocorre principalmente em condições de pH elevado. Examinando a influência do volume da solução extratora utilizada para um determinado peso do solo, nota-se que a quantidade de sílica solúvel é realmente dependente da relação solução: solo, na qual a melhor foi 10:1, resultado semelhante ao obtido por Raij; Camargo (1973). Tal fato é consequência da sílica solúvel não ser totalmente removida do solo em uma ou mais extrações, pois o solo apresenta uma capacidade grande de restituir as soluções extratoras com a sílica que foi removida por extrações sucessivas (GIFFORD; FRUGOLI, 1964; JONES; HANDRECK, 1965).

O extrator mais utilizado atualmente é o CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, de acordo com o método descrito por Korndörfer et al. (2004). Após a extração com o Cloreto de Cálcio 0,01 Mol L<sup>-1</sup> a determinação do teor de silício é efetuada por colorimetria.

Esse extrator tem a capacidade de extrair o silício “disponível” que se encontra principalmente na solução do solo, podendo extrair algumas formas pouco polimerizadas (KILMER, 1965; WEAVER, 1968). Segundo Gilson (1994), a extração do Si com CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> é intensa nas primeiras 24 horas de contato com o solo. A partir daí, a extração é essencialmente linear com o tempo. Nesse caso, o autor acredita que a primeira hora de extração reflete a disponibilidade do silício para as plantas, entretanto reconhece que a quantidade de Si é muito dependente do tempo de extração.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1. Escolha das áreas

As coletas de solo foram realizadas período de março de 2007 a dezembro de 2007 na usina Guairá, localizada no município Guairá (SP), apresentando como coordenadas geográficas 48°W, 21°11'S e altitude de 520m e na Usina Colombo localizada no município de Ariranha (SP), apresentando como coordenadas geográficas 48°28'W, 21°06' e altitude de 590m. As áreas encontravam-se em cultivo com cana-de-açúcar

Para representatividade da pesquisa, foram selecionadas nove áreas divididas em solos com segue:

#### **Usina Colombo:**

1° Área – Fazenda 194: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 3° corte e com aplicação de silicato em 2006.

2° Área – Fazenda 549: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 2° corte e sem aplicação de silicato.

3° Área – Fazenda 427: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 1° corte e sem aplicação de silicato.

4° Área – Fazenda 938: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 1° corte e sem aplicação de silicato.

5º Área - Fazenda 561: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 3º corte e com aplicação de silicato 2006.

6º Área – Fazenda 958: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 1º corte e sem aplicação de silicato.

#### **Usina Guaira:**

7º Área – Fazenda Flamboyant: Latossolo Vermelho férrico (LR), 2º corte e sem aplicação de silicato.

8º Área – Fazenda Paraíso: Latossolo Vermelho férrico (LR), 3º corte com aplicação de silicato em 2006.

9º Área – Fazenda São Judas Tadeu II: Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), 3º corte com aplicação de silicato em 2003.

### **5.2. Extratores**

Foram escolhidos alguns extratores já utilizados normalmente em alguns países, como é o caso tampão acetato a pH 4,0, comumente utilizado no Japão (Imaizumi & Yoshida, 1958), ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> (SNYDER, 2001) no Estados Unidos e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (KONDORFER, 2004), usado na Austrália e Brasil.

Além desses já citados, foram escolhidos outros extratores muito usados para extração de nutrientes, como é o caso do cloreto de potássio, usado na extração de cálcio e magnésio (CANTARELLA et al., 2001), a resina trocadora de íons do solo (VAN RAIJ, 1981), ácido clorídrico utilizado na extração de zinco, cobre e boro (PONNAMPERUMA et al., 1981), água usada na extração de silício do solo por Raij; Camargo (1973) e por fim o CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> método padrão modificado conforme item 5.4.2.5

### 5.3. Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 9 x 8, onde se considerou 9 áreas e 8 extratores de Si, com 24 repetições. Sendo as áreas de 1 a 3 textura arenosa, 4 a 6 textura média e 7 a 9 textura argilosa

### 5.4. Condução do experimento

As áreas selecionadas foram divididas em 4 pontos de amostragem. Num raio de 5 metros desses pontos, foram coletadas as amostras de solo nas profundidades de 0 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m. Cada amostra foi composta de 5 sub-amostras. Na mesma área de coleta de solo, foram coletadas 10 plantas de cana-de-açúcar cada ponto de amostragem, num total de 40 plantas por área.

As partes da planta foram levadas para o Laboratório Relação Solo-Planta, do Departamento de Produção Vegetal / Agricultura, da Faculdade de Ciências Agronômicas / UNESP / Botucatu, lavadas e secas a 60°C até atingir peso constante, para a determinação da matéria seca, moídas em moinho do tipo Wiley e analisadas quanto ao teor de silício, com metodologia proposta por Konrdorfer (2004).

As amostras de solos coletadas foram secas ao ar e peneiradas com malha de 2 mm e analisadas química e fisicamente. Determinou-se o pH ( $\text{CaCl}_2$  0,01 Mol L<sup>-1</sup>), bases trocáveis, acidez potencial, fósforo disponível e matéria orgânica, conforme metodologia proposta por Raij et al. (2001), os quais estão apresentados a Tabela 2.

Os teores de óxido de ferro, óxido de alumínio e óxido de silício do solo foram analisados segundo as metodologias propostas por Jackson (1958); Mehra; Jackson (1960), Kilmer (1960), Holmgren (1967) e Embrapa (1979), As análise granulométricas do solo (Tabela 2) seguiu a metodologia proposta pela Embrapa (1997).



Tabela 1. Atributos químicos do solo das áreas experimentais, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Áreas 1 à 3 com solos textura arenosa (Argissolo Vermelho Amarelo), 4 à 6 com solos textura média (Argissolo Vermelho Amarelo) e 7 à 9 com solos de textura argilosa (Latossolo Vermelho férrico)

Áreas	pH	M.O	P	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
	CaCl <sub>2</sub>	g kg	mg dm <sup>-3</sup>	-----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						%
<b>0-0, 20 m</b>										
1	5,2	18,4	15,8	19,7	2,4	12,6	5,5	20,5	40,1	51
2	6,2	19,7	34,6	13,5	3,2	25,9	9,1	38,3	51,8	73
3	5,4	17,9	39,8	18,0	3,4	19,4	6,4	29,2	47,2	60
4	5,5	20,3	47,2	21,2	2,0	36,2	9,9	48,1	69,3	67
5	5,4	20,4	10,3	40,1	2,6	22,7	8,5	33,7	73,8	52
6	5,3	22,0	11,4	25,0	2,7	16,6	7,8	27,1	52,2	52
7	5,9	47,4	32,2	36,9	1,4	64,2	14,3	79,8	116,7	68
8	5,5	33,2	31,5	35,5	1,0	30,2	12,3	43,5	79,0	51
9	4,6	23,6	12,5	52,6	0,6	19,1	7,0	26,7	51,9	53
<b>0,20-0,40 m</b>										
1	5,2	17,6	15,3	17,9	2,7	12,8	5,2	20,5	38,7	53
2	6,1	18,4	28,3	13,8	4,1	23,9	8,7	36,7	50,6	72
3	5,2	23,9	16,4	19,7	3,0	12,3	5,2	20,5	40,3	51
4	5,3	17,9	36,7	23,9	1,7	28,9	10,1	40,7	64,5	58
5	5,3	19,0	7,2	19,7	2,0	24,9	10,5	37,4	57,1	65
6	4,9	21,9	11,4	26,3	2,8	13,1	7,0	22,9	49,2	47
7	5,9	47,5	32,2	36,9	1,4	64,2	14,3	79,8	116,7	68
8	5,9	41,9	27,3	36,6	1,3	58,1	11,8	71,2	107,7	66
9	4,5	22,5	4,8	48,6	0,4	10,2	4,3	14,8	32,2	49

Tabela 2. Atributos físicos e químicos do solo das áreas experimentais, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Áreas 1 à 3 com solos textura arenosa (Argissolo Vermelho Amarelo), 4 à 6 com solos textura média (Argissolo Vermelho Amarelo) e 7 à 9 com solos de textura argilosa (Latosolo Vermelho férrico)

Áreas	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Argila	Textura
	-----g kg-----			%	
<b>0-0,20 m</b>					
1	8,0	0,7	0,3	14,0	Arenosa
2	8,9	0,5	0,3	10,7	Arenosa
3	8,4	0,6	0,2	11,7	Arenosa
4	12,0	0,7	0,4	20,2	Média
5	9,4	0,8	0,3	17,1	Média
6	13,8	1,1	0,3	21,9	Média
7	42,6	3,6	0,6	41,7	Argilosa
8	39,5	2,3	0,6	39,7	Argilosa
9	23,9	1,1	0,2	56,4	Argilosa
<b>0,20-0,40 m</b>					
1	9,8	0,6	0,4	14,9	Arenosa
2	8,9	0,4	0,4	10,3	Arenosa
3	9,7	0,7	0,3	12,7	Arenosa
4	12,6	0,6	0,4	24,1	Média
5	10,1	0,9	0,3	17,8	Média
6	11,8	0,9	0,4	23,7	Média
7	53,1	3,6	0,6	39,8	Argilosa
8	41,0	2,6	0,5	50,1	Argilosa
9	25,3	1,4	0,2	56,4	Argilosa

### 5.4.1 Silício disponível no solo

A determinação de silício disponível no solo é feita por colorimetria, podendo ser extraído do solo por diferentes métodos.

### 5.4.2. Extratores avaliados

**5.4.2.1 Extração em cloreto de cálcio (0,01 Mols L<sup>-1</sup>): método padrão**  
(KONRDORFER, 2004): (com pH da solução igual a 6,0)

O extrator cloreto de cálcio é um sal que tem a capacidade de extrair o Si "disponível" que se encontra principalmente na solução do solo, podendo extrair algumas formas pouco polimerizadas. Este extrator, ao contrário do que acontece com o ácido acético, não sofre a interferência do calcário recentemente aplicado. Este método é empregado principalmente na Austrália (KILMER, 1965; WEAVER, 1968).

Todos os extratores pesquisados seguiram os mesmos procedimentos descritos abaixo, baseado em Konrdorfer (2004).

As amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm, tomando-se o cuidado de limpar muito bem os materiais usados, pois os solos contem grandes quantidades de Si, o que pode contaminar as amostras.

O preparo das soluções seguiu-se da seguinte forma:

a) Solução de Cloreto de Cálcio - (0,01 Mol L<sup>-1</sup>): adicionou-se 1,47 g de cloreto de cálcio p.a (CaCl<sub>2</sub>.2 H<sub>2</sub>O), em balão de 1000 mL e completou-se com água destilada.

b) Solução Padrão de Si (20 mg L<sup>-1</sup>): adicionou-se 4 mL de solução padrão 1000 mg L<sup>-1</sup> de Si em balão de 200 mL e completou-se com água destilada.

c) Solução sulfo-molíbdica 75 g L<sup>-1</sup>: dissolveu-se, 7,5 g de molibdato de amônio (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>.4H<sub>2</sub>O, em 75 mL de água destilada. Adicionou-se 10 mL de ácido sulfúrico 18 N (500 g L<sup>-1</sup>). Transferiu-se a solução para balão de 100 mL e completou-se com água destilada.

d) Solução de ácido tartárico  $200 \text{ g L}^{-1}$ : dissolveu-se 20 g de ácido tartárico em 50 mL de água destilada. Transferir a solução para balão de 100 mL e completou-se com água destilada.

e) Solução de ácido ascórbico  $3 \text{ g L}^{-1}$ : dissolveu-se 0,3 g de ácido ascórbico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) p.a. em 50 mL de água destilada. Transferiu-se a solução para balão de 100 mL e completou-se com água destilada (Este reagente foi preparado toda vez que foi usado).

#### **5.4.2.1.1 Extração**

A extração do Si foi feita com uma solução de cloreto de cálcio ( $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ), pesando-se 10 g de solo e colocando-se 100 mL da solução extratora em frasco plástico (150 mL). Agitou-se em agitador horizontal a 240 rpm por um período de 1 hora. Esperou-se decantar por 15 minutos e posteriormente, filtrou-se a suspensão. Após esse procedimento deixou-se a solução em repouso por uma noite (período maior que 12 horas).

#### **5.4.2.1.2 Determinação quantitativa do Si**

Pipetou-se uma alíquota de 10 mL do extrato filtrado de cada amostra e colocou-se em um becker de 50 mL. Na curva de calibração foram usados os padrões (0 - 0,4 - 1,0 - 2,0  $\text{mg L}^{-1}$  Si). Em balão volumétrico de 100 mL pipetou-se 0 - 2 - 5 - 10 mL da solução padrão de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  de Si, e completou-se o volume dos balões com água destilada. Retirou-se uma alíquota de 10 mL de cada padrão e colocou-se em um becker de 50 mL. Acrescentou-se aos volumes dos padrões e das amostras, 1 mL da solução sulfo-molibdica ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$  - ácido ortossilícico, forma mais simples e solúvel de Si, reage com o molibdato desenvolvendo a cor amarela). Decorridos 10 minutos, acrescentou-se 2 mL da solução de ácido tartárico  $200 \text{ mg L}^{-1}$  (utilizado para complexar o P da solução). Após 5 minutos, adicionou-se 10 mL da solução de ácido ascórbico (a redução do Si transforma o complexo amarelo para a cor azul). Depois de 1 hora, fez-se a leitura em Espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm

Os teores de Si no solo foram obtidos através da equação linear, multiplicando-se os resultados pelo fator de diluição 10. Esse fator foi utilizado para os demais métodos, com exceção da resina trocadora de íons.

#### **5.4.2.2 Ácido acético 0,5 M:** (com pH da solução igual a 3,4)

Em frasco de plástico com capacidade 150 ml colocou-se 5 cm<sup>3</sup> de solo e 50ml de uma solução de ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>. Agitou-se por um hora com velocidade de 220 rpm, aguardou-se 15 minutos e em seguida filtrou-se a suspensão e deixou-se em repouso por aproximadamente 12 horas. A partir da extração, adotou-se o mesmo procedimento do método padrão.

#### **5.4.2.3 Resina trocadora de íons**

Foram utilizadas resina trocadora de ânion, tipo base forte IRA – 400 e resina trocadora de cátions, tipo ácido forte IR - 120.

Em frasco plástico de 100 ml, colocou-se 2,5 ml de solo e 2,5 ml de resina trocadora de íons. Foram adicionados 20 ml de água destilada e agitou-se por 16 horas em mesa de agitação de movimento orbital com velocidade de 240 rpm. Em seguida lavou-se a resina com água destilada em um separador de resina, recebendo a resina em frasco com capacidade 100 ml, com 50 ml de uma solução mista de NaCl 1 Mol L<sup>-1</sup> em HCl 0,1 Mol L<sup>-1</sup>. Em seguida agitou-se a solução por 1 hora em mesa agitadora com velocidade de 240 rpm . A partir da extração adotou-se o mesmo procedimento do método padrão. O fator de diluição utilizado para esse método foi 20.

#### **5.4.2.4 Água** (com pH 6,7)

Em frasco plástico de capacidade 150 ml colocou-se 5 cm<sup>3</sup> de solo e 50 ml de água destilada, agitou-se por uma hora, na rotação de 220 rpm, em seguida adicionou-se 0,2 de carvão ativado e agitou-se por aproximadamente 2 minutos em 220 rpm, aguardou-se 15 minutos e filtrou-se em papel de filtro faixa azul número 42 e deixou-se em repouso por aproximadamente 12 horas, a partir da extração mesmo procedimento método padrão.

#### **5.4.2.5 Cloreto de cálcio 0,01 M método modificado:** (com pH da solução igual a 6,0)

As amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm, tomando-se o cuidado de limpar muito bem os materiais usados, pois os solos contem grandes quantidades de Si, o que pode contaminar as amostras.

A extração do Si foi realizada com uma solução de cloreto de cálcio 0,01 mol L<sup>-1</sup>, coletou-se 5 cm<sup>3</sup> de solo e 50 ml da solução extratora em frasco plástico (150 mL). Agitou-se em agitador horizontal a 220 rpm por um período de 1 hora, e posteriormente esperou-se decantar por 15 minutos e filtrou-se a suspensão. Deixou-se em repouso por uma noite (por um período maior que 12 horas). Foi considerado a mesma relação solo solução 1:10, com alteração de massa de solo para volume de solo. Após a extração seguiu-se os mesmos procedimentos do método padrão. Os teores de Si no solo foram obtidos através da equação linear, multiplicando-se os resultados pelo fator de diluição 10.

#### **5.4.2.6 Cloreto de potássio 0,01 M:** (com pH da solução igual a 6,5)

Em frasco de plástico colocou-se 5cm<sup>3</sup> de solo e 50 ml de solução de KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, agitou-se por um hora em mesa agitadora de movimento orbital com a velocidade de 220 rpm; aguardou-se 15 minutos em seguida filtrou-se e deixou-se em repouso por aproximadamente 12 horas. A partir da extração mesmo procedimento método padrão.

#### **5.4.2.7 Ácido clorídrico 0.01 M:** (com pH da solução igual a 2,0)

Em frasco de plástico colocou-se 5cm<sup>3</sup> de solo e 50 ml de solução de, HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, agitou-se por um hora em mesa agitadora de movimento orbital na velocidade de 220 rpm; aguardou-se 15 minuto em seguida filtrou-se e deixou-se em repouso por aproximadamente 12 horas. A partir da extração mesmo procedimento método padrão.

#### **5.4.2.8 Solução Tampão de acetato de sódio pH 4.0:**

Em frasco de plástico colocou-se 5cm<sup>3</sup> de solo e 50 ml de solução tampão pH 4.0, agitou-se por uma hora em mesa agitadora de movimento orbital na velocidade de 220 rpm, aguardou-se 15 minutos em seguida filtrou-se e deixou-se em repouso por aproximadamente 12 horas. A partir da extração fez-se o mesmo procedimento do método padrão.

### **5.5. Avaliações**

#### **5.5.1. Determinação de Si no solo**

O Si foi determinado de acordo com item 5.4.2.1.

#### **5.5.2. Determinação dos óxidos de Fe, Al e Si**

As avaliações dos teores dos óxidos de ferro, alumínio e silício foram realizadas segundo as metodologias propostas por Jackson (1958); Mehra; Jackson (1960), Kilmer (1960), Holmgren (1967) e determinadas no INDUCTIVEREY COUPLED PLASMA (ICP), nos comprimentos de onda (nm) 396.152, 288.158, 239.562 para alumínio, silício e ferro, respectivamente.

#### **5.5.3. Massa seca das plantas de cana-de-açúcar**

Coletou-se 40 plantas (colmos + folhas) de cana-de-açúcar em cada área onde foram realizadas as amostragens de solo. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada à temperatura de 60°C até atingir peso constante, para a determinação da massa seca e posterior determinação do teor de Si na planta.

## **5.6. Análises estatísticas**

A extração de Si pela cultura da cana-de-açúcar foi correlacionada com o Si extraído do solo pelos diferentes extratores, obtendo-se as curvas de correlação e o coeficiente de determinação ( $r$ ). Para os gráficos de correlações foram considerados 4 pontos de coletas, 2 profundidades e 3 áreas para cada textura, ou seja áreas 1 a 3 (textura arenosa), áreas 4 a 6 (textura média) e áreas de 7 a 9 (textura argilosa).



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Teores de Si nos solos

Os teores de Si nos solos de textura arenosa, média e argilosa para todos os extratores avaliados estão contidos no Tabela 3.

Os extratores de Si apresentaram grande amplitude de extração em todas as classes de textura do solo. Berthelsen (2000), em um estudo de comparação de método de extração de Si, em diferentes classes de solos da Austrália, também encontrou diferentes magnitude entre os extratores. Segundo o mesmo autor, os extratores tendem a atacar o Si em diferentes componentes da matriz do solo; soluções diluídas salinas, como  $\text{CaCl}_2$ , mensuram a quantidade de Si disponíveis na solução do solo, enquanto resultados obtidos com o uso de tampão acetato pH 4,0 e ácido acético indicam que a solubilidade origina-se de polímeros simples.

Quando se analisa o efeito da extração sobre as diferentes texturas do solo (Tabela 3), observa-se que os teores de silício solúvel foram superiores nos solos de textura argilosa, seguidos das texturas média e arenosa, concordando com os resultados obtidos por Freitas et al. (1977). Os resultados indicaram que os extratores, ácido acético e tampão pH 4,0 proporcionaram os valores mais elevados de silício nos solos, principalmente em solos de textura argilosa que variou entre 21 e 85  $\text{mg dm}^{-3}$  para o ácido acético e entre 14 e 58  $\text{mg dm}^{-3}$  para o tampão pH 4,0.

Tabela 3. Teores de silício em solos de textura arenosa (área de 1 a 3), média (área de 4 a 6) e argilosa (área de 7 a 9) para diferentes extratores químicos.

Área	Ácido Acético	Resina	Água	Tampão pH 4,0	CaCl <sub>2</sub> 0,01 M Modif.	KCl 0,01 M	CaCl <sub>2</sub> 0,01 M Padrão	HCl 0,01 M
-----mg dm <sup>-3</sup> -----								
<b>0,0-0,20 m</b>								
1	11	9	8	6	5	3	5	6
2	19	13	10	11	6	5	5	13
3	30	10	14	15	7	7	5	7
4	37	9	16	15	9	10	9	10
5	17	6	7	6	8	4	9	5
6	30	13	12	16	8	7	7	11
7	84	10	20	58	14	15	18	15
8	21	4	9	14	7	8	8	7
9	53	9	11	32	8	8	8	8
MEDIA	33,6 a*	9,0 dc	11,8 c	19,2 b	7,9 dc	7,2 d	7,7 dc	9,4 dc
<b>0,20-0,40 m</b>								
1	31	8	14	20	7	8	7	14
2	13	11	8	7	5	4	5	4
3	16	7	10	10	5	4	5	5
4	39	18	13	20	8	8	7	8
5	37	8	15	24	8	9	8	14
6	15	5	6	6	4	4	4	7
7	33	10	15	30	10	10	17	9
8	85	20	18	54	13	12	13	13
9	24	4	8	17	6	8	5	6
MEDIA	32,8 a	10,1 dc	11,2 c	20,7 b	7,6 d	7,2 d	7,3 d	9,0dc

\*Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente pelo teste LSD à 5%.

O ácido acético foi o extrator que mais extraiu Si nas texturas analisadas, pois consegue extrair Si de formas que não estão prontamente disponíveis para as plantas, principalmente em solos de textura argilosa, onde normalmente os teores de óxido de ferro e de alumínio são elevados.

O maior poder de extração do ácido acético pode ser explicado pelo pH (1,0-2,0) necessário para a formação do complexo silico-molibdico na determinação do Si pelo método azul de molibdênio (HALLMERK, 1965).

Quanto aos solos de textura média e arenosa, a ocorrência de desses óxidos é menor e os teores de Si também diminuíram, deixando claro que o óxido de ferro e óxido de alumínio tem grande influência na disponibilidade de Si para as plantas.

Os extratores  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{KCl}$ , considerados extratores salinos, proporcionaram os menores teores de Si. A amplitude entre os resultados de extração pode influenciar na exatidão das análises, pois a faixa estreita de extração pode promover erros de interpretação.

O extrator tampão acetato de sódio pH 4,0 manteve características de extração de Si semelhante ao do ácido acético, porém com valores um pouco menores. Este extrator em solos de textura arenosa e média proporcionou resultado semelhante ao extrator água.

De acordo com Liang al. (1994), o método do acetato de sódio tamponado, ainda responde à aplicação de fertilizantes. Possivelmente, em solos calcários, o método do acetato tamponado superestima a quantidade de Si disponível nestas condições. Em geral, para solos tropicais (ácidos), o uso do acetato de sódio tamponado para extrair Si e para determinar a sua necessidade em arroz, não tem sido intensivamente estudado.

A água demonstrou ser um excelente extrator, pois extraiu mais Si disponível do que o cloreto de cálcio  $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (padrão). Resultados semelhantes foram encontrados por Raij e Camargo (1973), em que a extração pela água não foi influenciada pelos óxidos presentes no solo, principalmente nos de textura argilosa.

Os extratores cloreto de cálcio  $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (padrão), cloreto cálcio  $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (modificado), cloreto de potássio  $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  e o ácido clorídrico proporcionaram extrações semelhantes, apesar de terem extraído quantidades menores que a

água. Este fato pode ser atribuído, em parte, a ineficiência destes extratores em solubilizar o Si adsorvido ao óxido de Fe e óxido de Al. Em relação ao HCl, os resultados podem ser atribuídos ao elevado grau de ionização, o que o torna parcialmente dissociado, portanto com menor mobilidade na solução e menor extração de Si.

O extrator  $\text{CaCl}_2$  (padrão e modificado) proporcionou baixa extração de Si comparado ao extrator água, fato que possivelmente é devido a alta concentração de eletrólitos, o que gera uma força iônica elevada. Isso também ocorreu no trabalho de Raij e Camargo (1973), que observaram que a quantidade de Si extraído diminuiu com aumento da concentração de eletrólito ( $\text{CaCl}_2$ ).

A concentração de Si extraível pode ser reduzida pela adsorção de Si solúvel pelos óxidos de Fe e Al, sendo dependente do pH (BECKWITH; REEVE, 1963; MCKEAGUE; CLINE, 1963; FREITAS et al., 1977; BROWN; MAHLER, 1987). A mudança no pH do solo contribui para maior extração de Si, uma vez que essa diferença é maior com o aumento das doses de calcário aplicado.

Berthelsen e Korndorfer (2005) revisaram vários trabalhos de Si no solo e verificaram que muitos extratores apresentam excelentes curvas de respostas com Si acumulado pelas plantas, porém, após adições de silicatos nesses solos, alguns extratores passaram a superestimar a disponibilidade de Si.

A extração de Si com o uso da resina trocadora, não proporcionou resultados coerentes, demonstrando que a forma ionizável do silício é pequena, e que grande parte do silício disponível para as plantas está na forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .

## **6.2. Teores de Si x teores de Argila**

As análises de correlações entre os teores de Si disponível no solo com a soma das texturas dos solos (dados agrupados) estão apresentadas na Figura 1.

A análise de correlação foi positiva para todos os extratores usados, exceto para a resina. Os coeficientes de correlação ( $r$ ) não foram significativos para os extratores resina, água e  $\text{HCl } 0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ , como pode ser verificado nas figuras 1B, 1C e 1H, respectivamente.

Os extratores  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (padrão),  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ (modificado), tampão pH 4, 0,  $\text{KCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  e ácido acético  $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$  proporcionaram correlações significativas, porém todos com baixos coeficientes (Figura 1E, 1G, 1D, 1F, 1A).

Com os resultados obtidos, não foi possível admitir um único extrator que contemple a todas as texturas dos solos avaliados quando agrupadas, pois não proporcionaram boa correlação entre o Si disponível e o teor de argila.

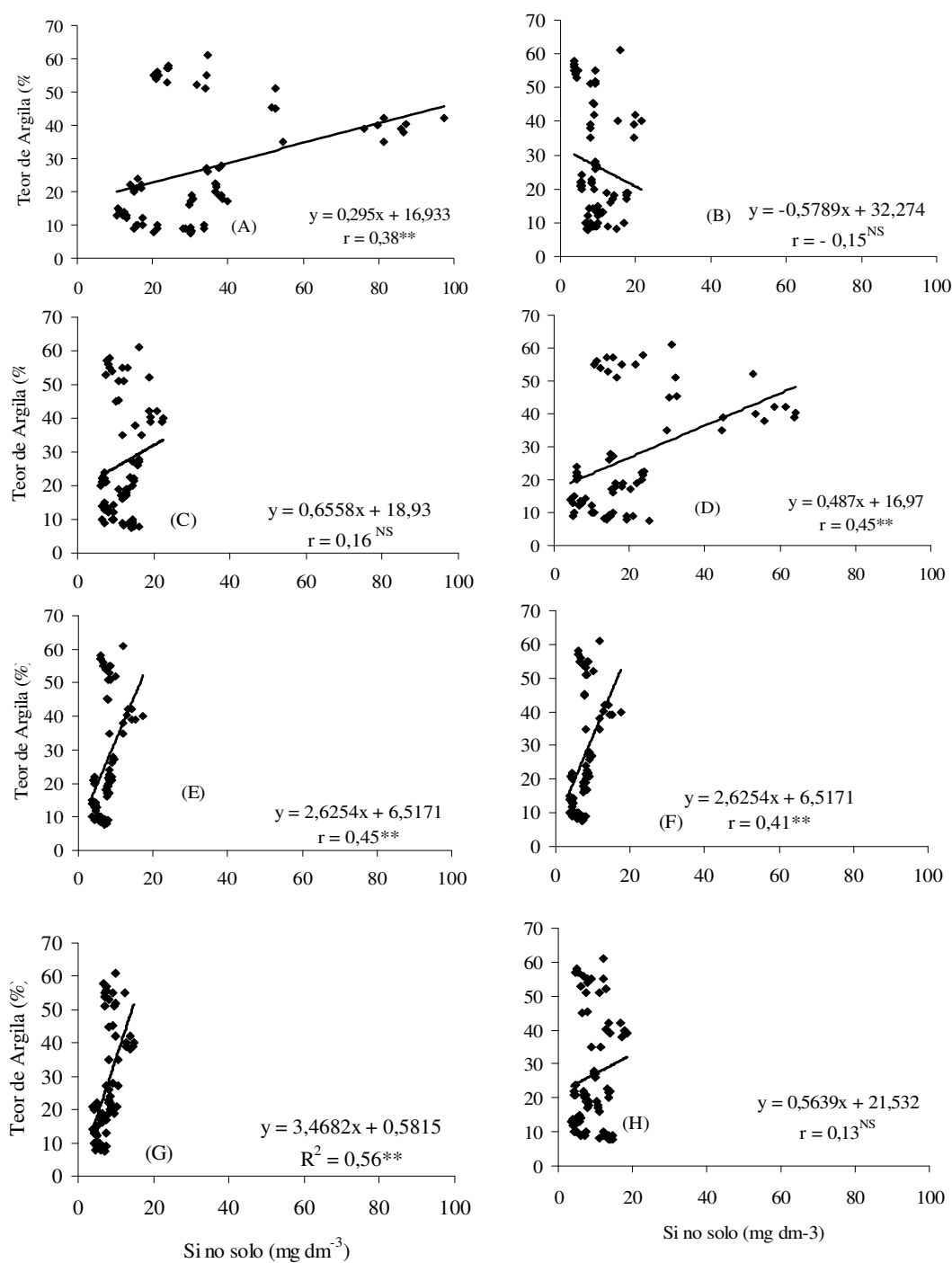


Figura 1. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de argila em solos de texturas argilosa, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

### 6.3. Teores de Si x pH dos solos

Analisando-se a correlação entre os teores de silício nos solos, em diferentes texturas, e o pH (Figura 2), observa-se que o coeficiente de correlação foi significativo apenas para o extrator  $\text{CaCl}_2$  0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), com correlação positiva.

Na Figura 3, as correlações entre os teores de silício nos solos de textura argilosa e o pH foram positivas para todos os extratores. Neste caso, foi observado o coeficiente de correlação significativo para alguns extratores, na seguinte ordem: 0,70, 0,67, 0,63, 0,54 e 0,54 para os extratores  $\text{CaCl}_2$  0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>,  $\text{CaCl}_2$  0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e água, respectivamente. Agora, para os extratores ácido acético, resina e tampão pH 4,0 as correlações não foram significativas.

A correlação entre os teores de silício nos solos de textura média e o pH, apesar de positiva para alguns não foi significativa para todos os extratores (Figura 4).

Observando-se a correlação entre os teores de silício nos solos com textura arenosa e o pH (Figura 5), nota-se que foi positiva para todos os extratores, não sendo observado coeficientes significativos em nenhum dos extratores avaliados.

De acordo com os resultados de pH (Tabela 1) os valores foram semelhantes nas texturas argilosa, média e arenosa. No entanto, somente para a textura argilosa alguns extratores tiveram os coeficientes de correlação significativos (Figura 3), quando correlacionados com silício disponível no solo e pH. A disponibilidade de silício para as plantas é regulada, em grande parte, pelas reações de adsorção que ocorrem entre o elemento e as superfícies sólidas do solo. Essas reações são influenciadas pela capacidade de troca de cátions, pH, teores de argila e matéria orgânica (MO) no perfil, superfície e óxidos. De acordo com Raij & Camargo (1973), não foi observada correlação significativa entre o teor de sílica solúvel e o pH dos solos. Agora, Beckwith e Reeve (1963) demonstraram existir para solos lateríticos da Austrália, com valores de pH que variavam de 4 a 9, um aumento de sílica solúvel com a diminuição do pH. Correlações semelhantes foram encontradas por Raij & Camargo (1973) e Beckwith e Reeve (1963), diferente da encontrada nesse trabalho em solos de texturas argilosas conforme mostra a Figura 3.

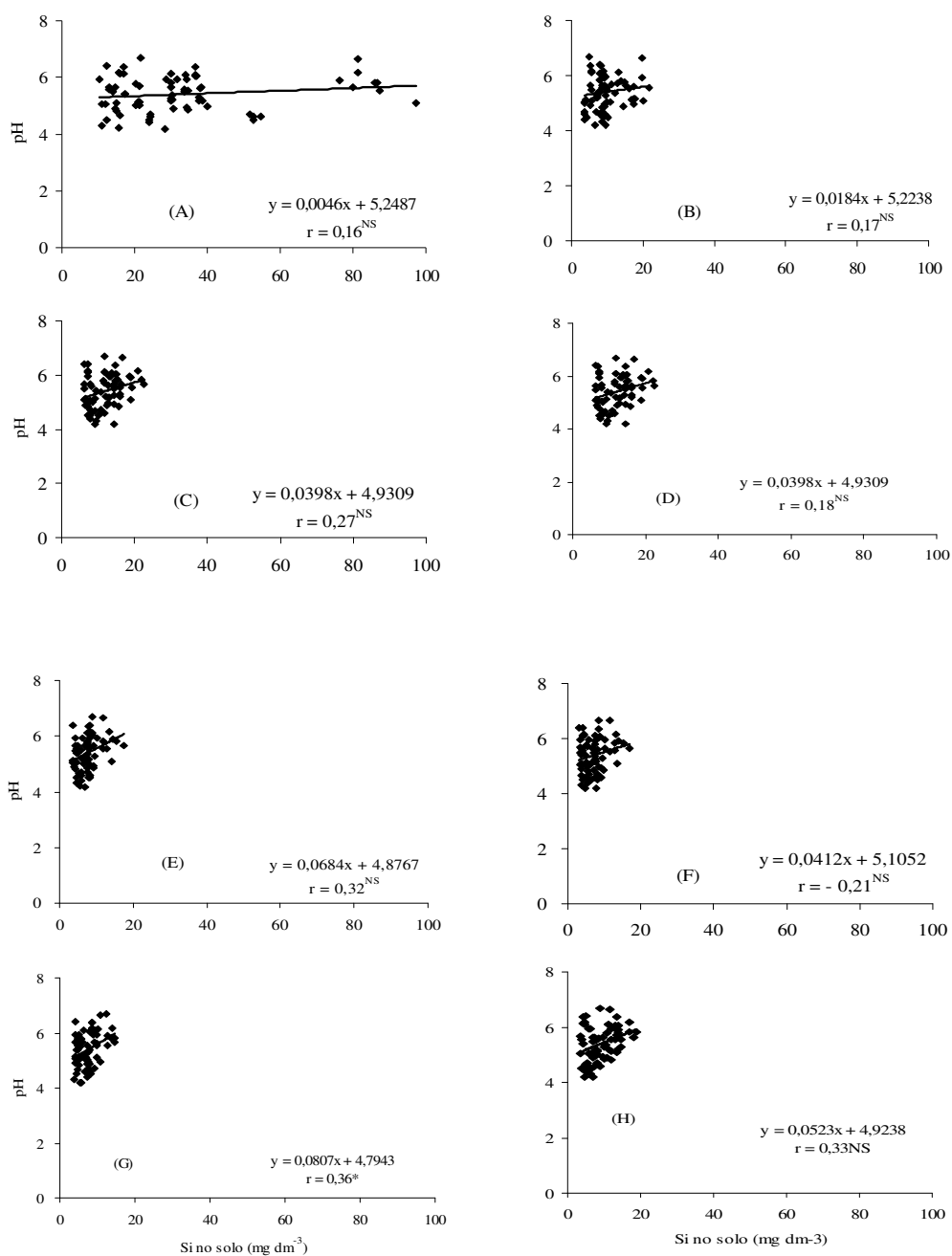


Figura 2. Correlação entre os teores de Si no solo e o pH, em solos de texturas argilosa, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.



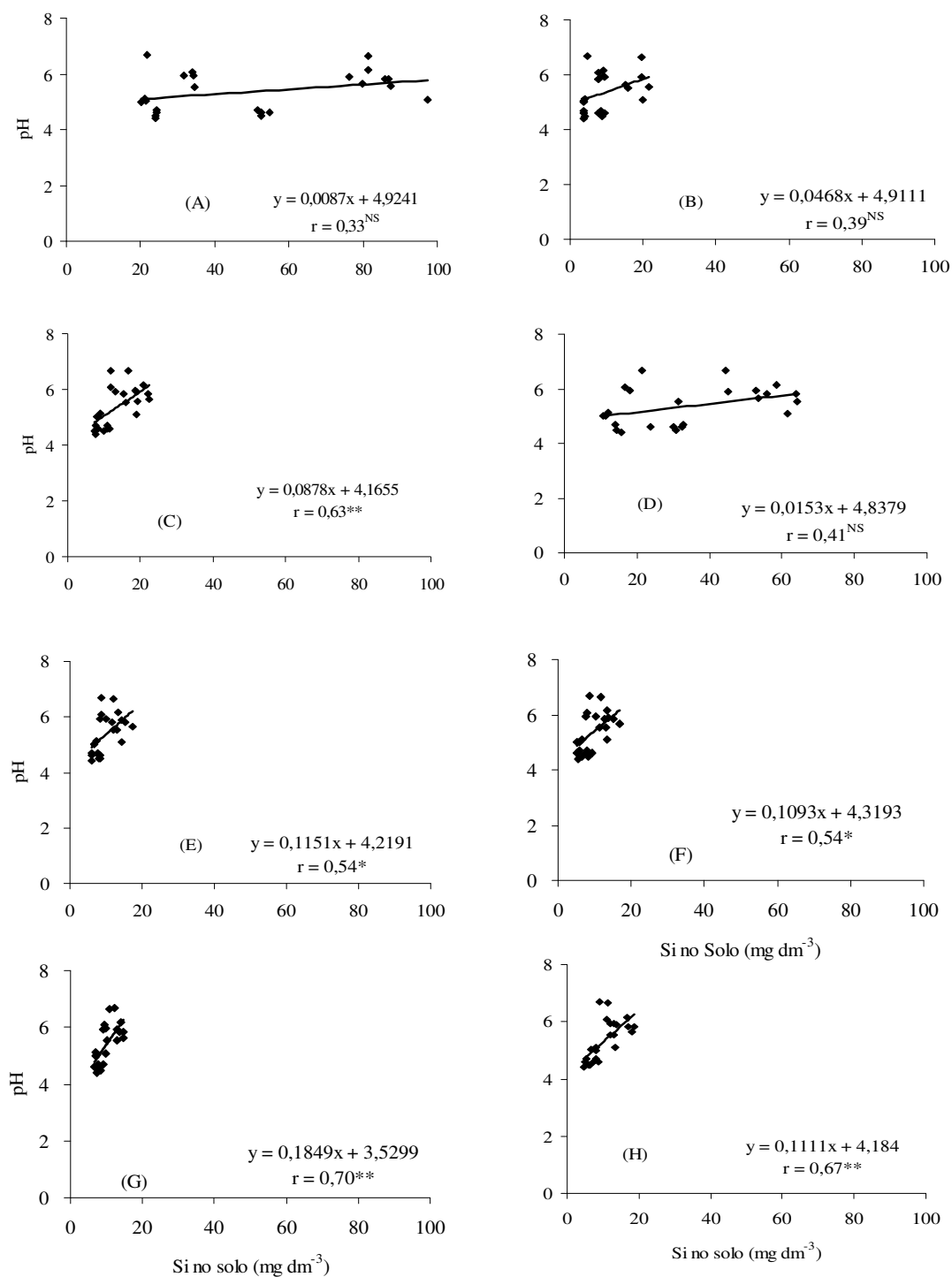


Figura 3. Correlação entre os teores de Si nos solos e o pH, em solos de textura argilosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

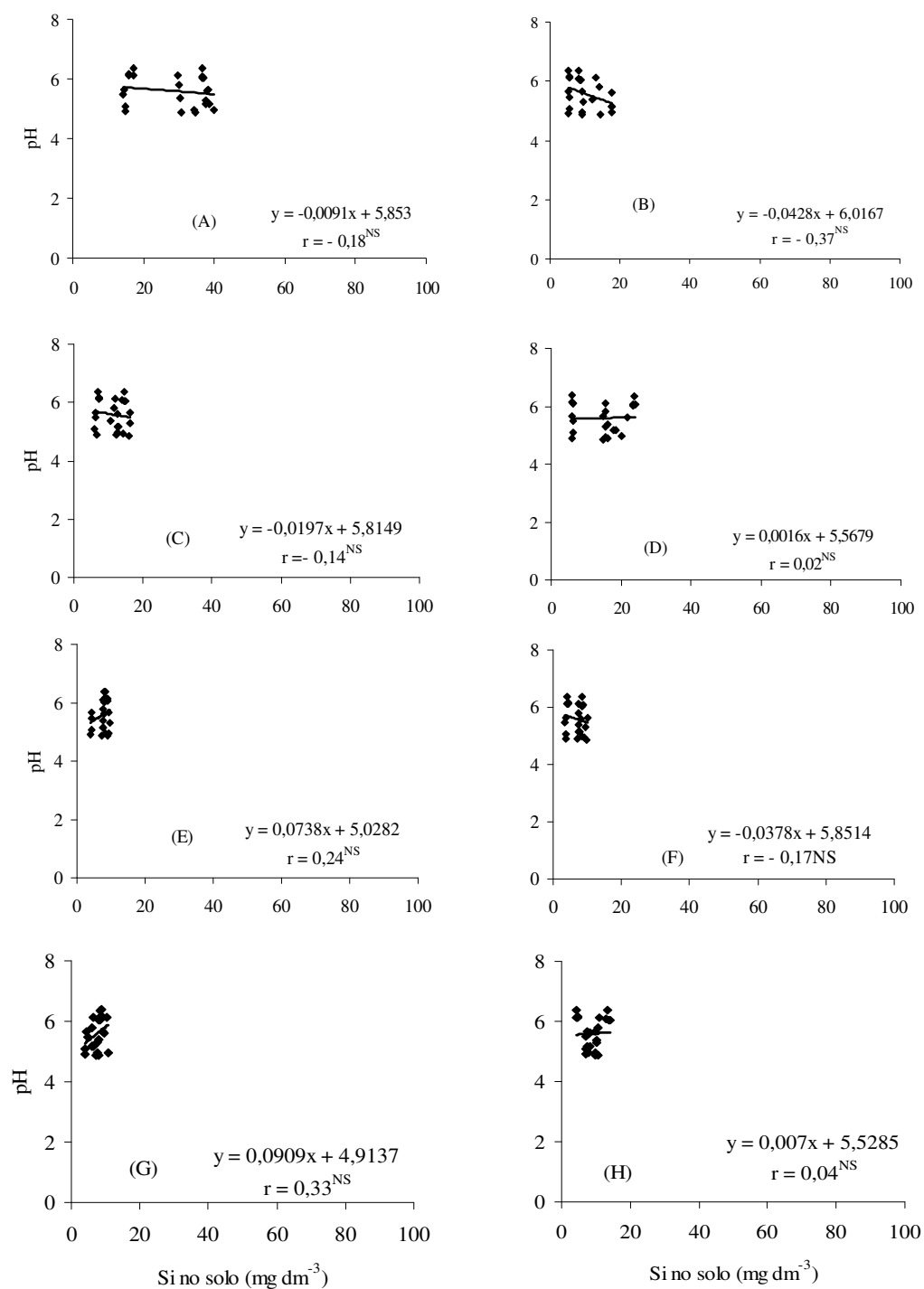


Figura 4. Correlação entre os teores de Si nos solos e o pH, em solos de textura média, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

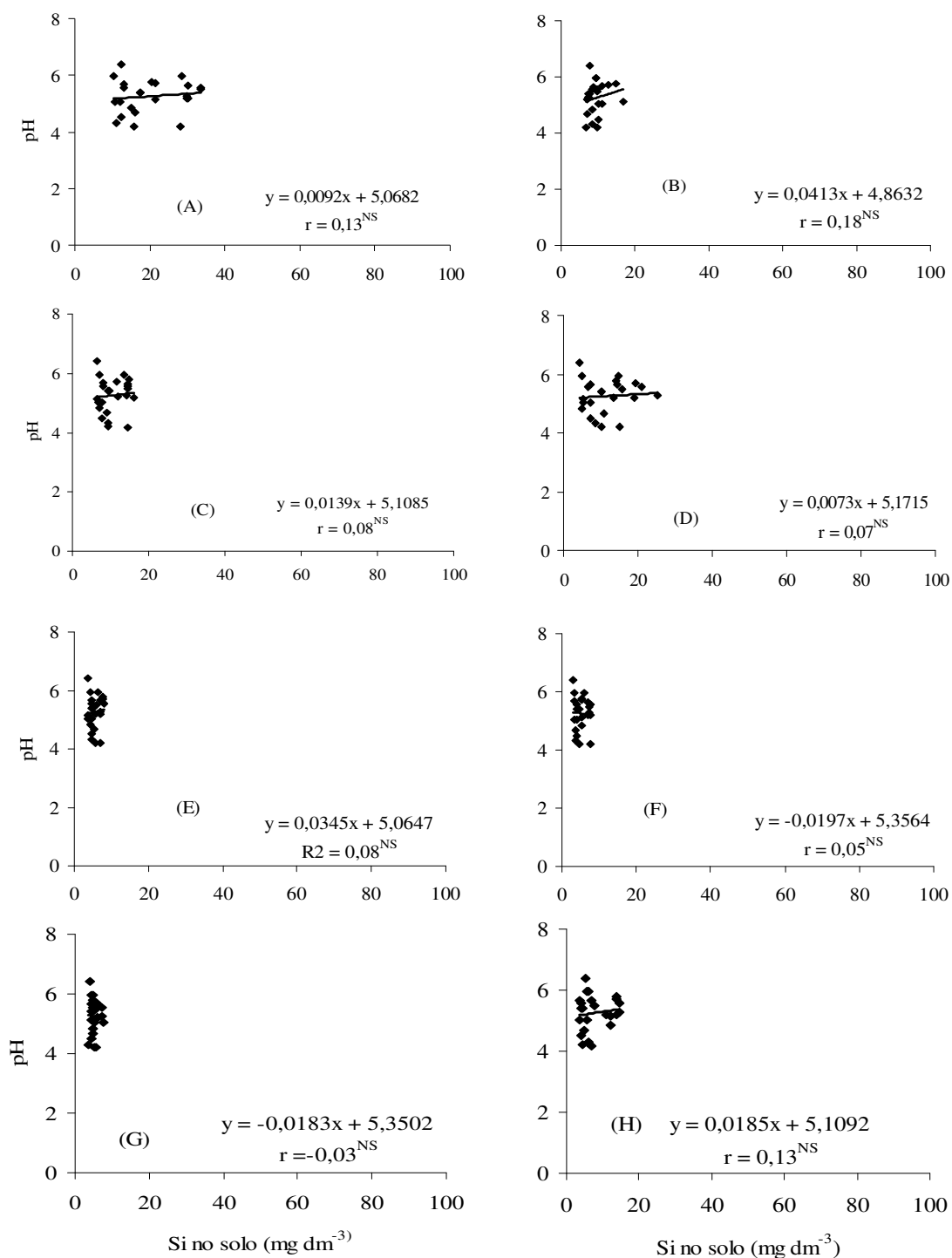


Figura 5. Correlação entre os teores de Si nos solos e o pH, em solos de textura arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

#### 6.4. Teores de Si x Óxidos de Fe

Na Figura 6, estão apresentadas correlações entre os teores de silício disponível com os teores de óxidos de ferro em solos com texturas argilosa, média e arenosa. Essa correlação foi positiva para todos os extratores, com coeficientes significativos para a maioria dos extratores, sendo 0,77, 0,73, 0,67, 0,65, 0,62 e 0,42 para os extratores tampão pH 4,0, ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, (modificado), KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e água, respectivamente. Para os extratores resina e HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> os coeficientes de correlação não foram significativos. Os teores óxido de ferro ficaram entre 7g kg<sup>-1</sup>, em solos arenosos, e 54 g kg<sup>-1</sup>, em solos argilosos

A correlação dos teores de silício com os teores de óxido de ferro nos solos de textura argilosa (Figura 7) foi positiva para todos os extratores, com valores de 0,82, 0,75, 0,70, 0,61, 0,58 e 0,57 para os extratores resina, ácido acético, tampão pH 4,0, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, modificado, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, respectivamente, e não sendo significativo para os extratores CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão) e HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>. Os teores de óxido de ferro ficaram entre 22 e 54 g kg<sup>-1</sup>.

A correlação dos teores de silício com os teores de óxido de ferro nos solos de textura média (Figura 8) foi positiva para os extratores CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão) e HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, entretanto, não significativas. Para os demais extratores, as correlações foram negativas e significativas com valores de 0,75, 0,71, 0,62, 0,59, 0,58 e 0,50, respectivamente, para os extratores resina, ácido acético, tampão pH 4,0, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, água e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado). Neste caso, os teores de óxido de ferro ficaram entre 9 e 16 g kg<sup>-1</sup>.

Analisando a correlação dos teores de silício nos solos com os teores de óxido de ferro nos solos de textura arenosa (Figura 9), constatou-se para todos os extratores que as correlações foram negativas, e não significativas. Os teores de óxido de ferro ficaram entre 8 e 13 g kg<sup>-1</sup>.

Os resultados de óxido de ferro foram maiores nos solos de textura argilosa e os coeficiente de correlação foram melhores para os extratores ácido acético e tampão pH 4,0, sendo semelhantes para os demais. Quando analisada todas as texturas (Figura9) e quando separadas em texturas argilosas (Figura 7), média (Figura 8) e arenosa

(Figura 9), as correlações foram negativa na textura média e arenosa, e não significativa para a textura argilosa.

A diferença entre a solubilidade do ácido acético e tampão pH 4,0 em solução aquosa e na solução de solo é devido ao pH e à presença de argila e de óxido de ferro e alumínio (Freitas et al., 1977; Jones Handreck, 1963), possibilitando inferir que em solos de textura argilosa, seguidos das texturas média e arenosa, os óxidos de ferro e alumínio provavelmente foram os que influenciaram os maiores teores de silício, quando extraído com ácido acético e o tampão pH 4,0, principalmente em solos argilosos.

Os teores mais elevados de Si encontrados nos solos de textura argilosa e média estão relacionados com os altos teores de óxido de ferro, o que proporcionou coeficientes positivos, o mesmo não observado nos solos arenosos.

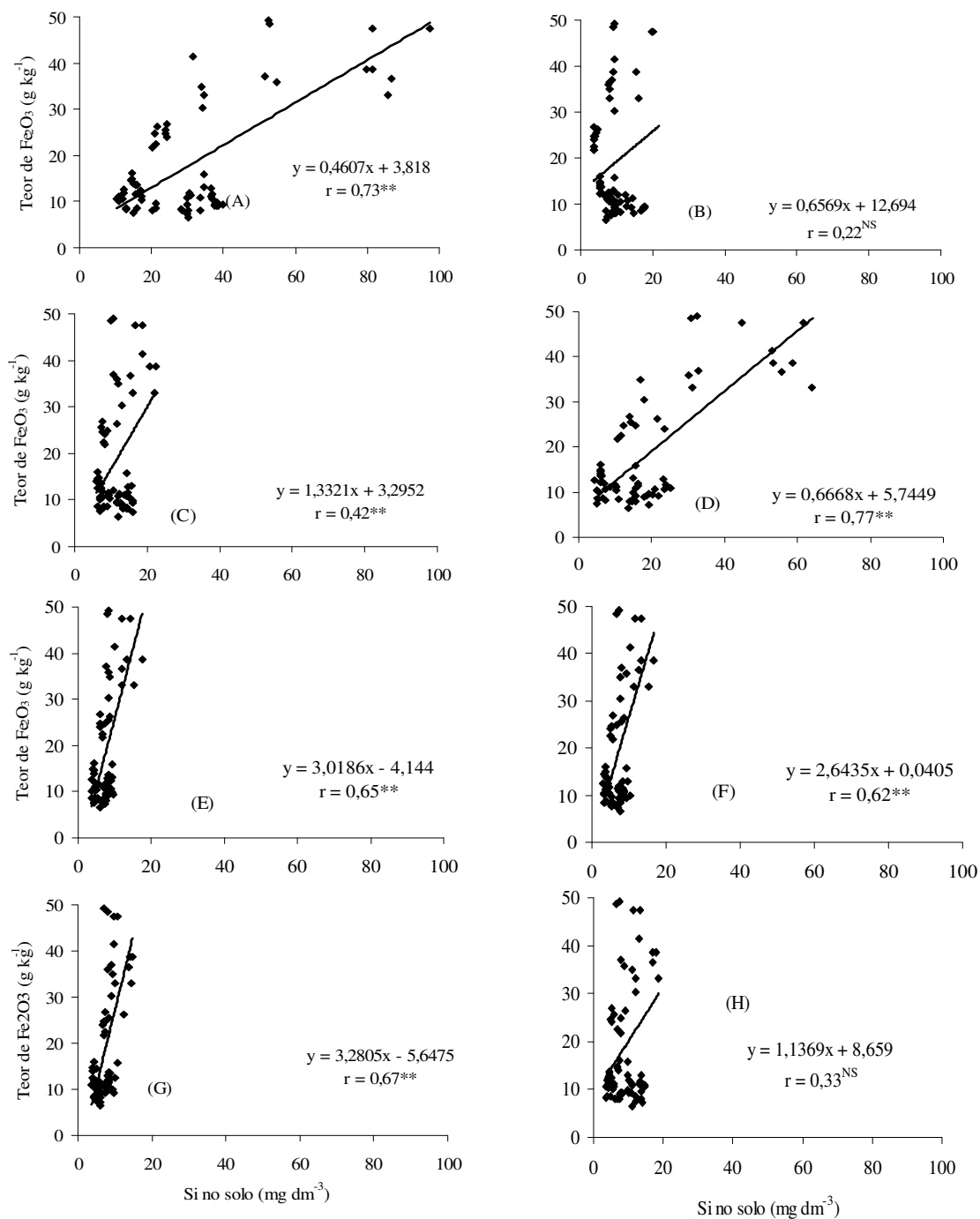


Figura 6. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de ferro, em solos de texturas argilosas, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

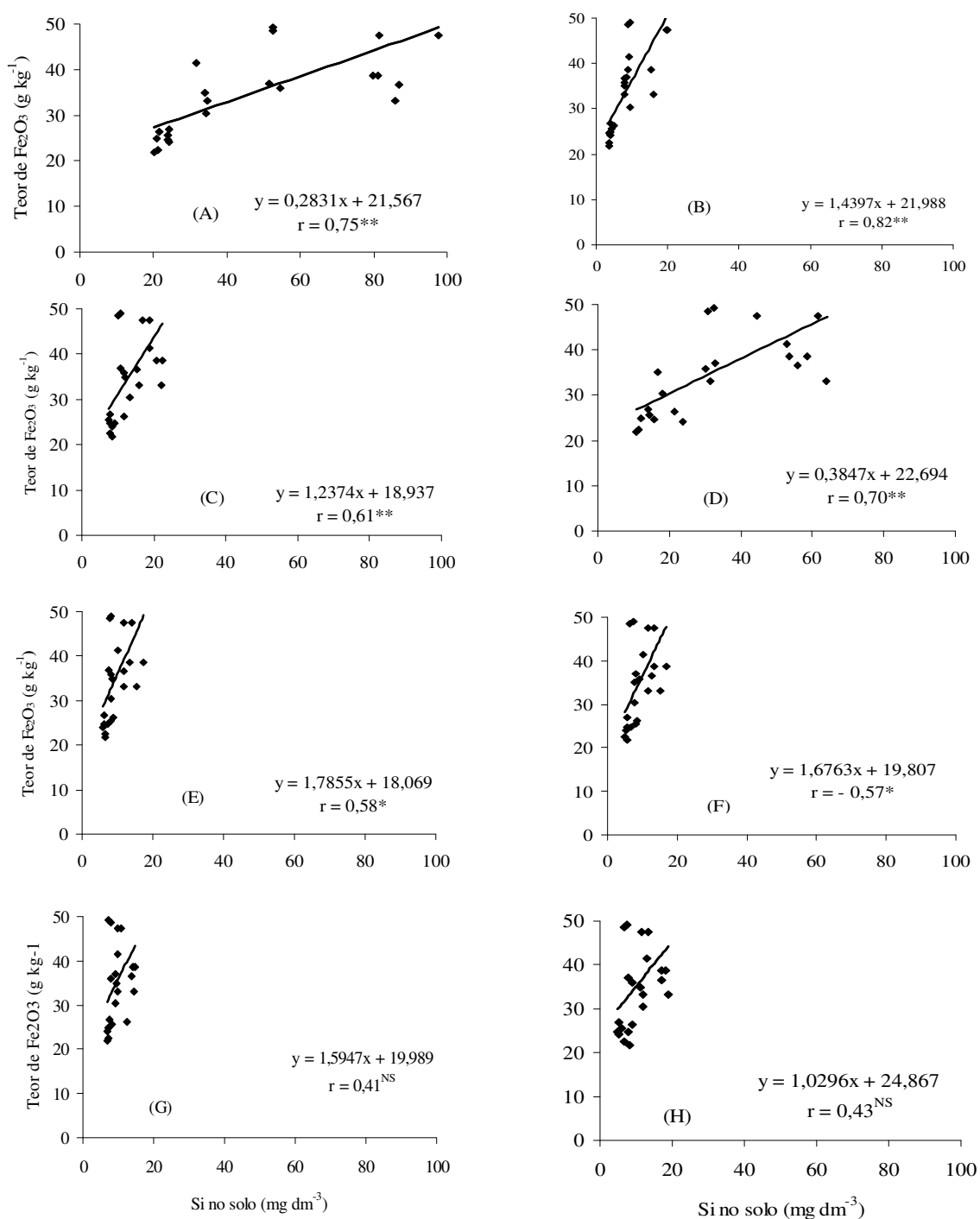


Figura 7. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de ferro, em solos de textura argilosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

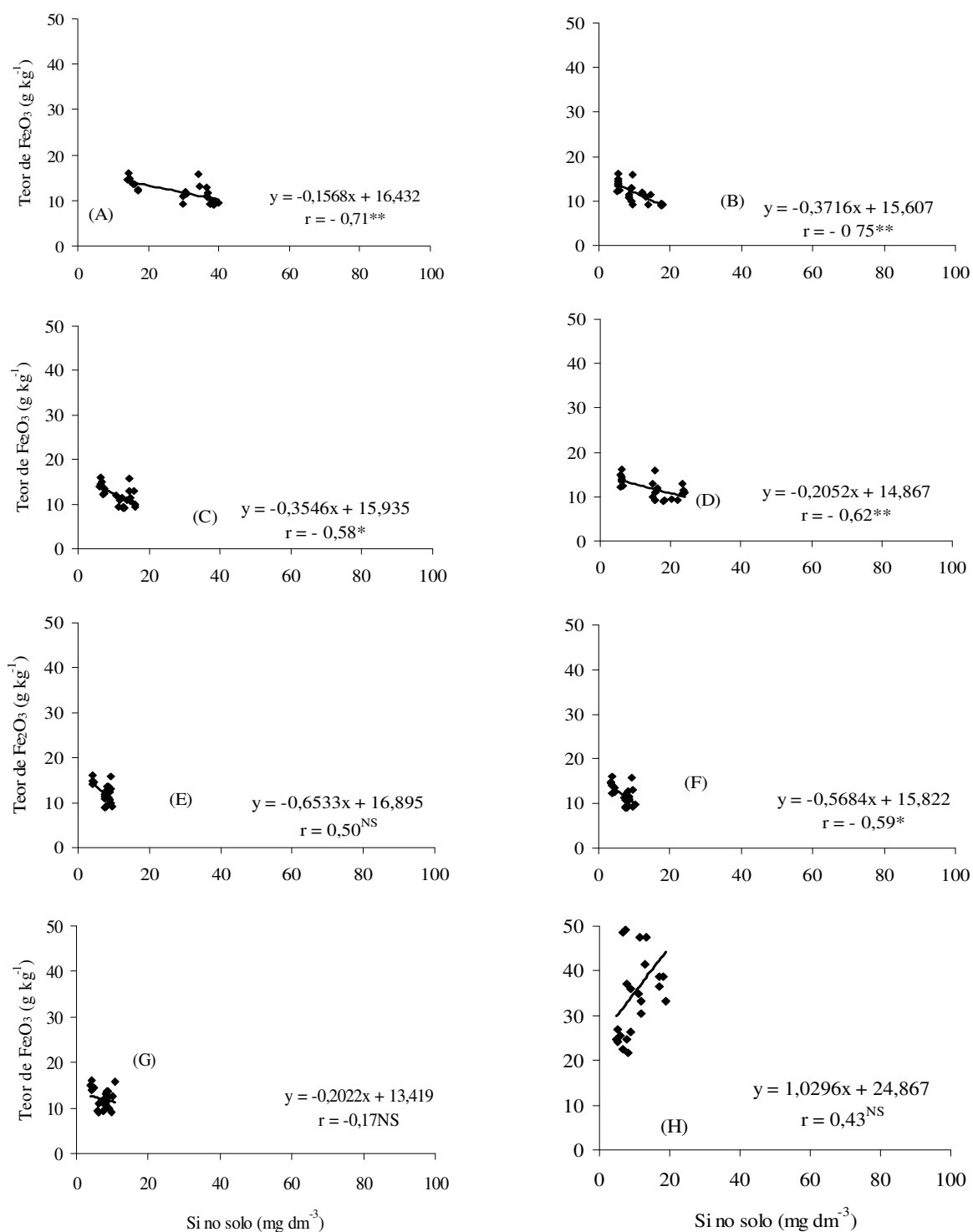


Figura 8. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de ferro, em solos de textura média, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.



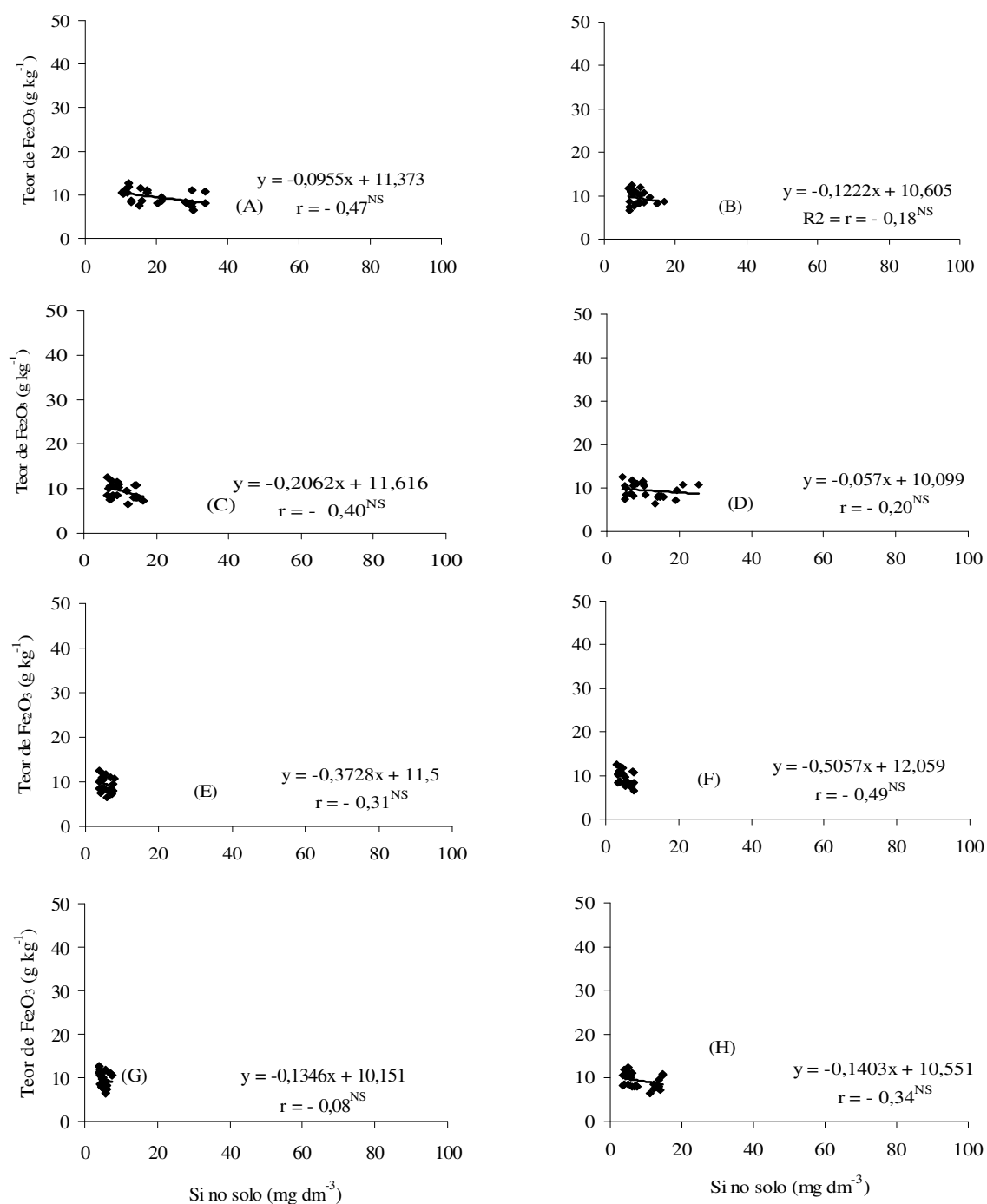


Figura 9. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de ferro, em solos de textura arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

## 6.5. Teores de Si x Óxido de Al

A Figura 10 ilustra a correlação entre os teores de silício disponível no solo e os teores de óxido de alumínio em solos com as texturas argilosas, médias e arenosas.

As correlações foram positivas, ou seja, quando se aumenta o óxido de alumínio, simultaneamente aumenta o silício no solo. Os coeficientes foram significativos para tampão pH 4,0, ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, água e HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, com  $r = 0,85, 0,84, 0,73, 0,72, 0,69, 0,52$  e  $0,47$ , respectivamente. Não foi constatado correlação significativa apenas para a resina. Os teores de óxido de alumínio foram de 0,4 g kg<sup>-1</sup> para solos arenosos até 4,0 g kg<sup>-1</sup> para solos argilosos.

Observando-se os dados de correlação entre os teores de silício disponível e os teores de óxido de alumínio em solos de textura argilosa (Figura 11), nota-se que as correlações foram positivas para todos os extratores, sendo os coeficientes significativos para ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, tampão pH 4,0, água, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), resina, HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), com (r) de: 0,91, 0,85, 0,75, 0,73, 0,72, 0,72, 0,67 e 0,60, respectivamente. Os teores de óxido de alumínio ficaram entre 1,5 e 4,0 g kg<sup>-1</sup>.

Para solos com textura média (Figura 12), as correlações foram negativas e os coeficientes não significativos para todos os extratores avaliados. Os teores de óxido de alumínio ficaram entre 0,5 e 1,5 g kg<sup>-1</sup>.

Para solos de textura arenosa as correlações foram negativas para todos os extratores avaliados e significativos apenas para os extratores KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup> (r) 0,60 e 0,55, respectivamente), conforme demonstrado na Figura 16. Os teores de óxido de alumínio ficaram entre 0,3 e 1,0 g kg<sup>-1</sup>.

Os resultados de óxido de alumínio foram maiores em solos de texturas argilosas e os coeficientes de correlação foram melhor para os extratores, ácido acético e tampão pH 4,0 e semelhantes para os demais quando analisado os dados com todos solos (Figura 13). Quando analisados separados (Figuras 11, 12 e 13, respectivamente), as correlações foram negativas e não significativa nas texturas média e arenosa. Nos solos de textura argilosa (Figura 11), os teores de alumínio são superiores em relação às outras texturas.

Os resultados apresentados deixam claro que os extratores ácido acético e tampão pH 4,0, por terem extraído mais silício nos solos com textura argilosa, principalmente aquele que estava adsorvido nos óxidos, foram os que melhor correlacionaram com os teores de alumínio. No entanto, onde os teores de alumínio foram menores, no caso de solos de texturas média e arenosa, isso não aconteceu.

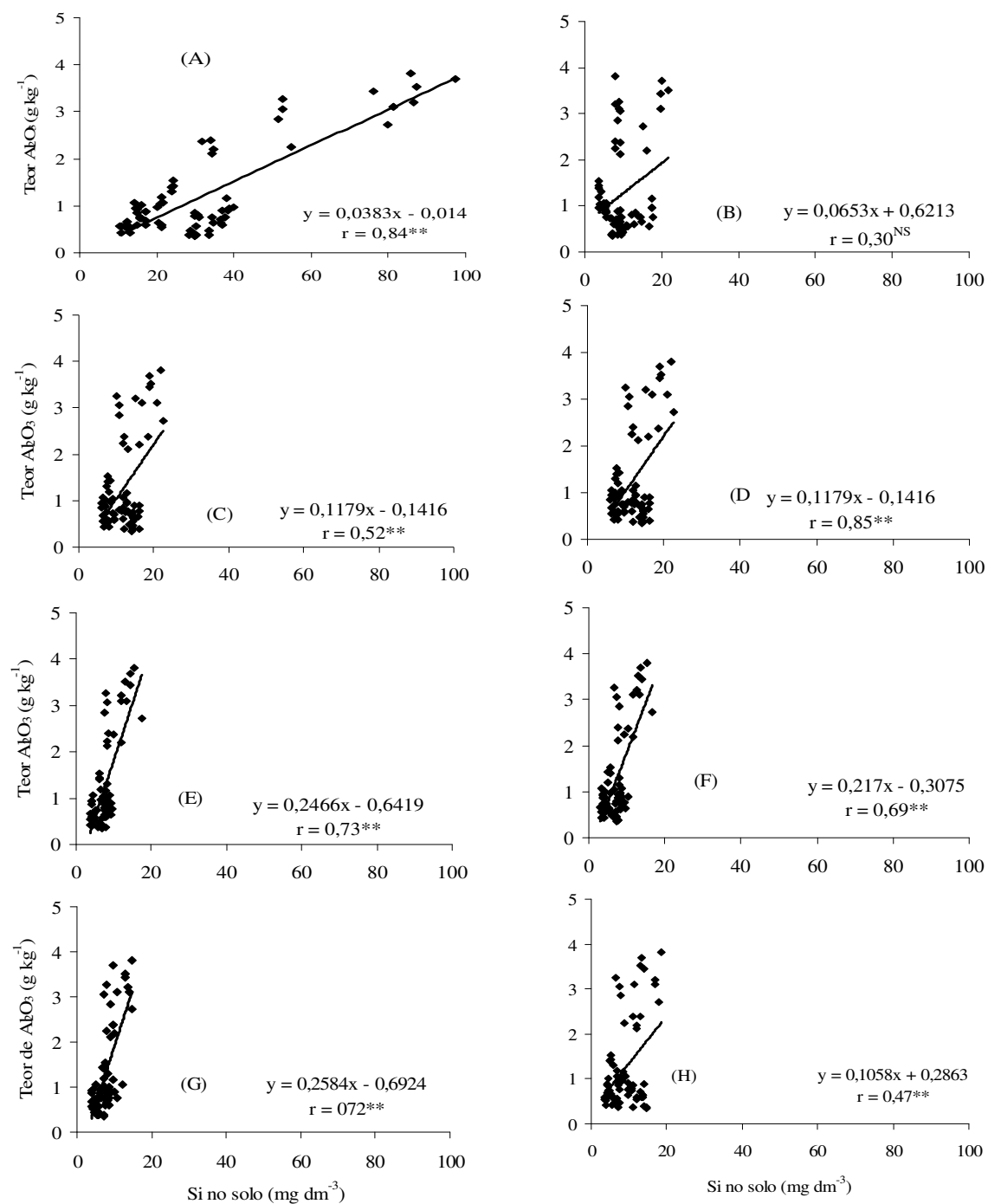


Figura 10. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de alumínio, em solos de texturas argilosa, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

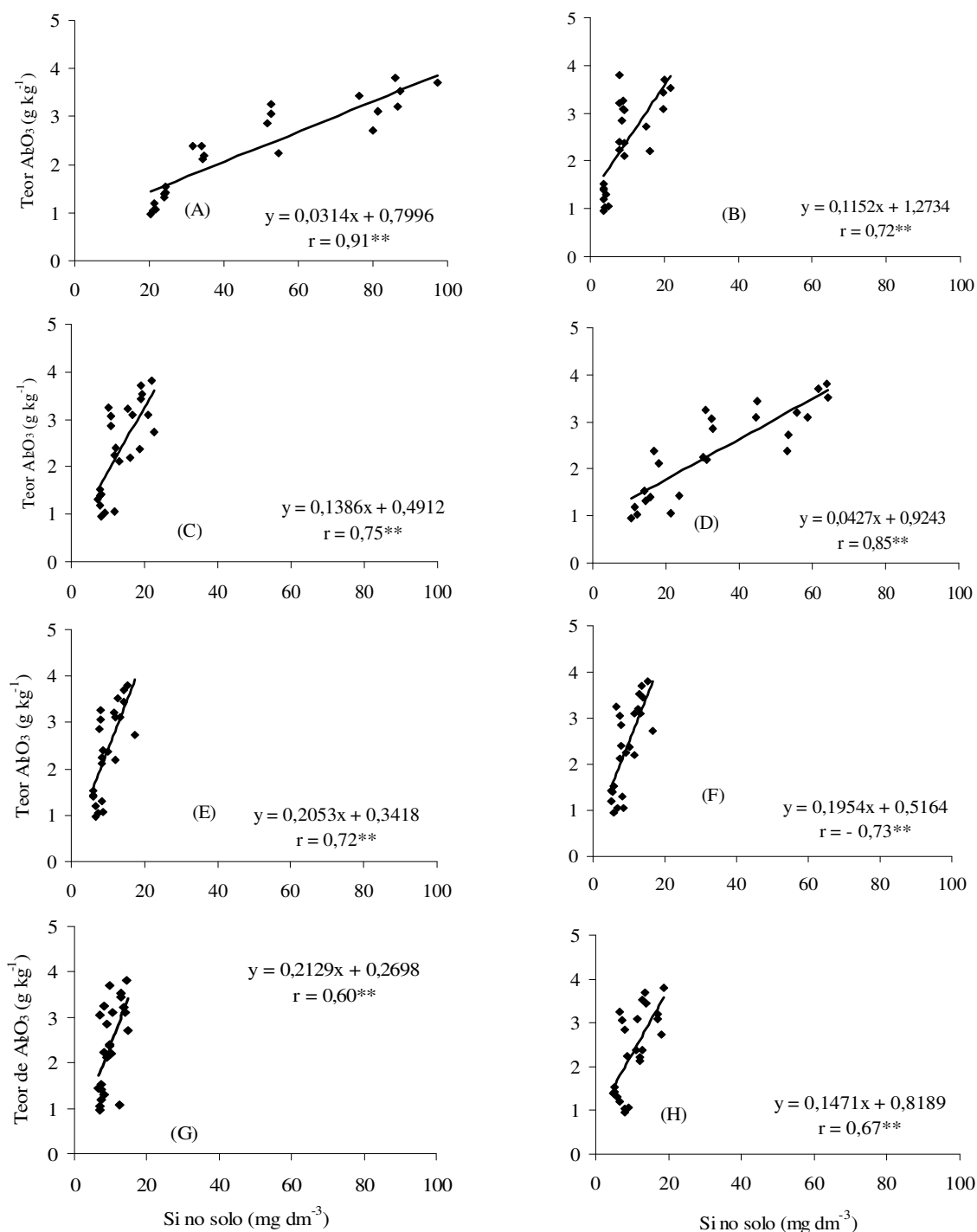


Figura 11. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de alumínio, em solos de textura argilosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

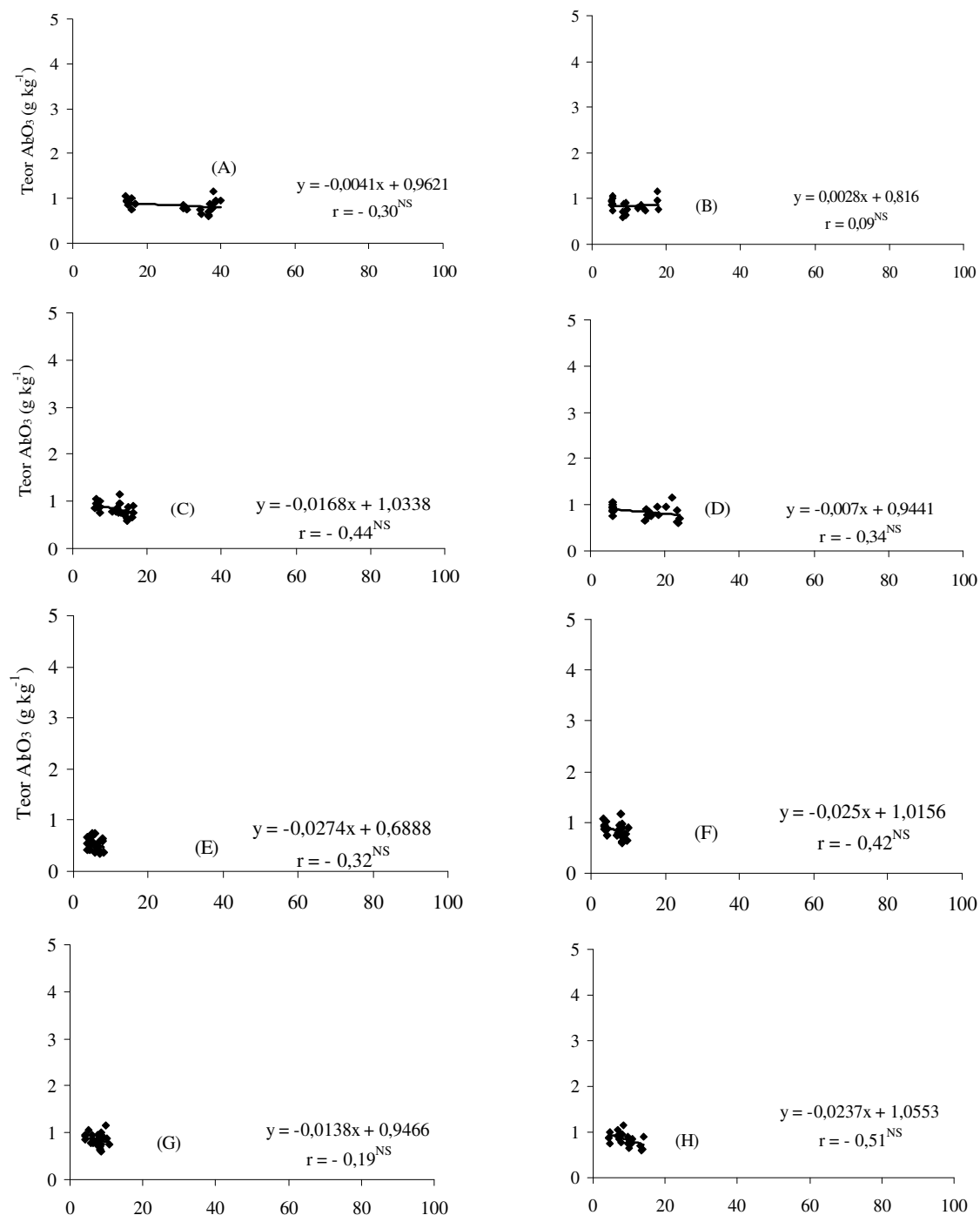


Figura 12. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de alumínio, em solos de textura média, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

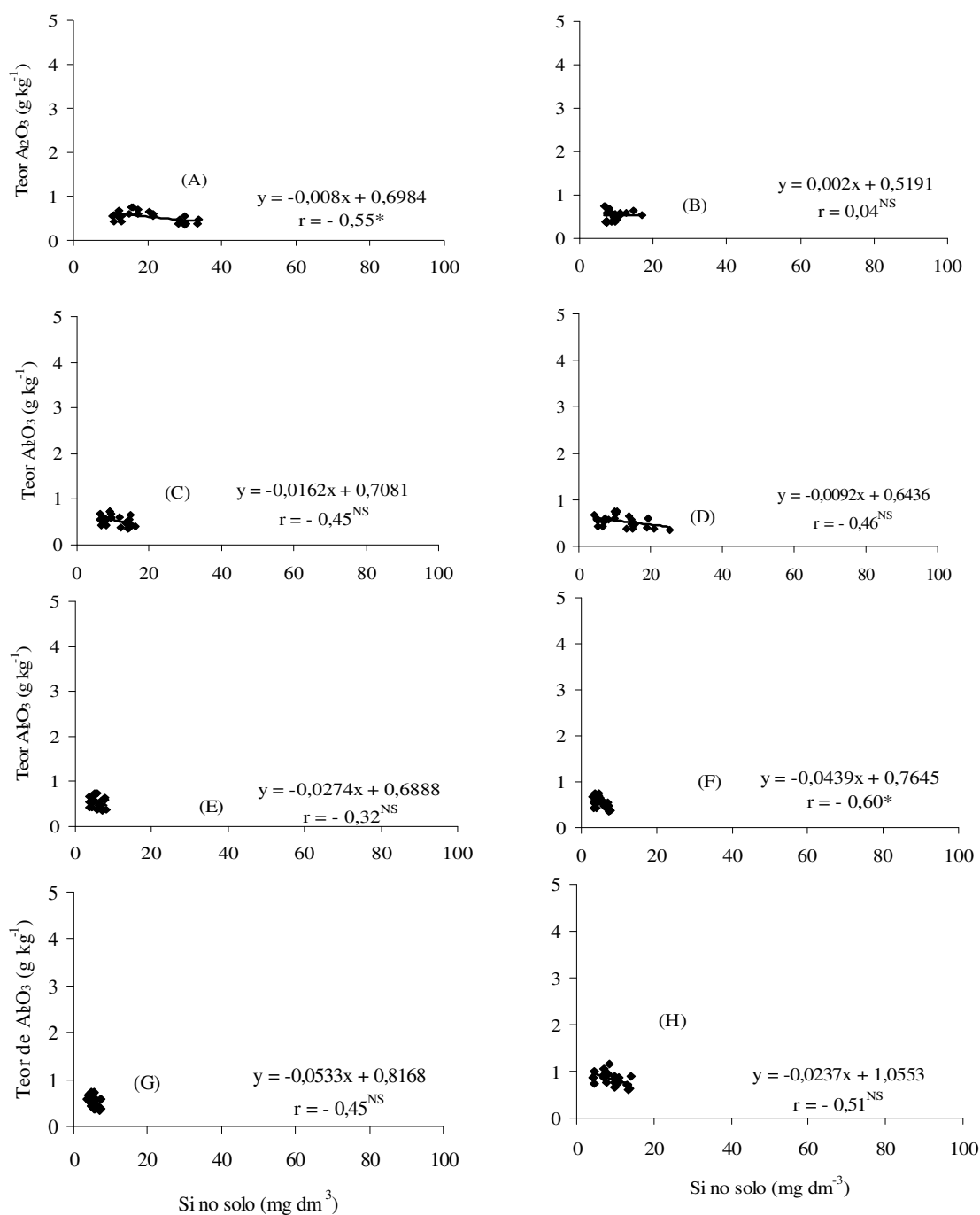


Figura 13. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido alumínio, em solos de textura arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

## 6.6. Teores de Si x Óxido de Si

Em solos com as texturas argilosa, média e arenosa, as correlações foram positivas para todos os extratores, e significativas para os extratores ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, tampão pH 4, 0, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado) e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), com  $r = 0,58, 0,58, 0,56, 0,54$  e  $0,53$ , respectivamente, e não significativo para os demais. Os teores de óxido de Si ficaram entre 0,1 e 0,6 g kg<sup>-1</sup> (Figura 14).

Observando os dados em solos de textura argilosa (Figura 15), nota-se que as correlações foram positivas e com os coeficientes significativos para todos os extratores avaliados, água, ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, resina, tampão pH 4,0, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão) com valores de 0,82, 0,80, 0,80, 0,80, 0,79, 0,78, 0,75 e 0,66, respectivamente, para os teores de óxido de silício ficaram entre 0,2 e 0,6 g kg<sup>-1</sup>.

Em solos de textura média, as correlações foram negativa somente para o extrator resina e positiva para as demais e significativo apenas para os extratores HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, água e KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> com  $r = 0,63; 0,57$  e  $0,52$ , respectivamente (Figura 16). Os teores de óxido de silício ficaram entre 0,2 e 0,6 g kg<sup>-1</sup>.

Para solos de textura arenosa (Figura 17), as correlações foram negativas para todos os extratores e não significativa para os extratores resina e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), sendo observada correlação significativa para os extratores ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, água, tampão pH 4,0, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, com valores de -0,86, -0,85, -0,81, -0,78, -0,78 e -0,72, respectivamente. Os teores de óxido de Si ficaram entre 0,1 e 0,5 g kg<sup>-1</sup>.

Os resultados de óxido de silício foram semelhantes nas texturas analisadas com as correlações positivas nas texturas argilosa e média e negativa na textura arenosa



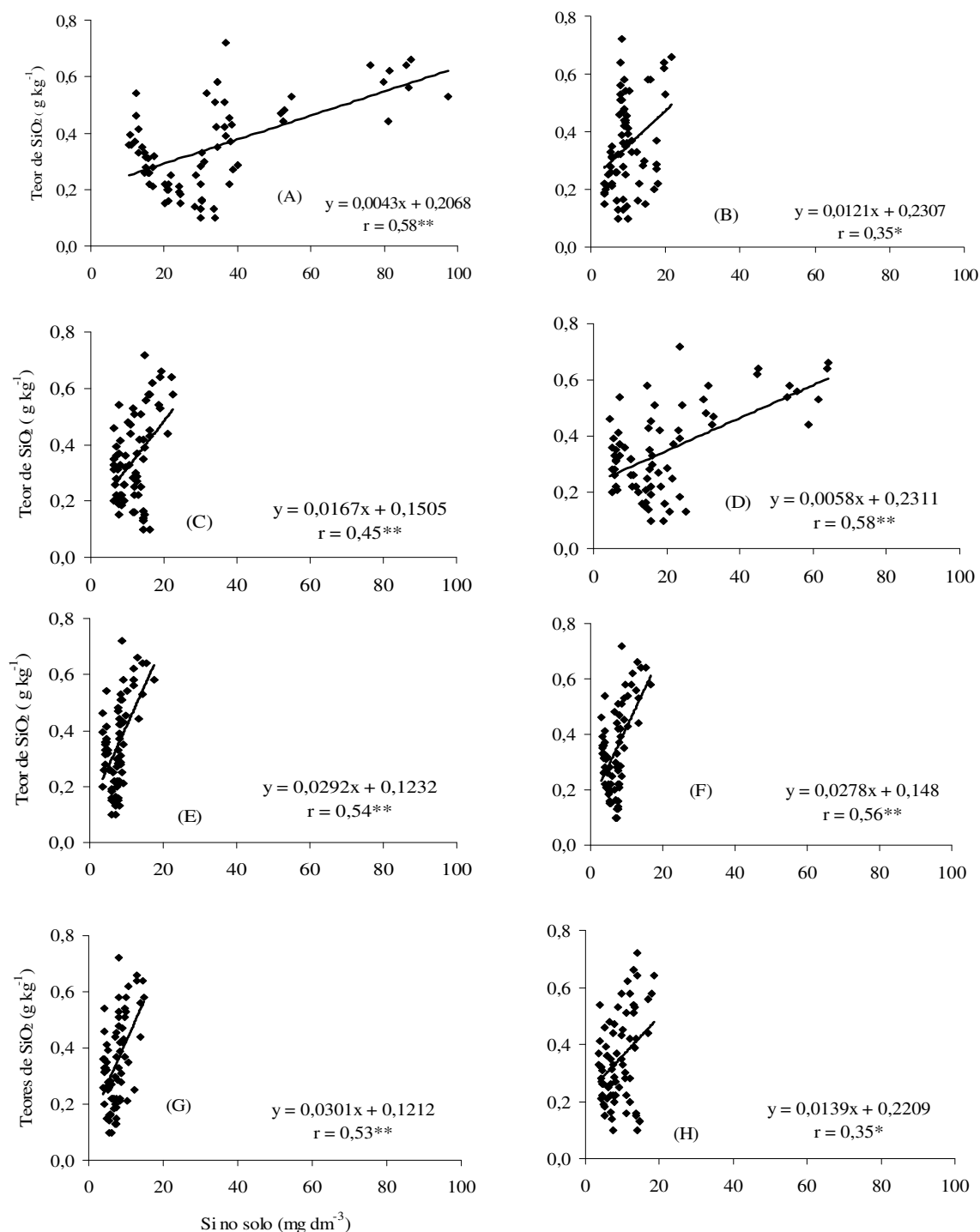


Figura 14. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício, em solos de texturas argilosa, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

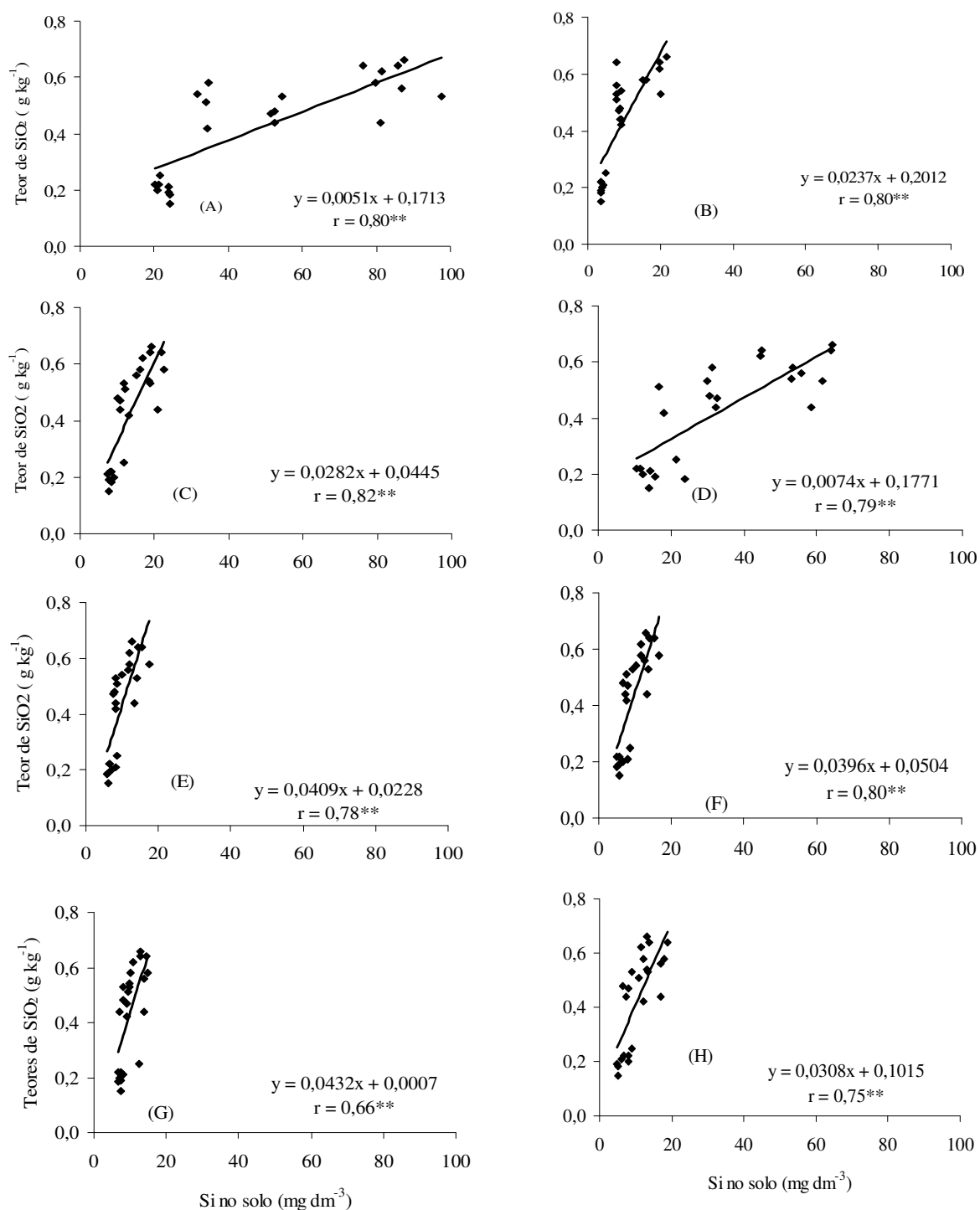


Figura 15. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício, em solos de textura argilosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico).

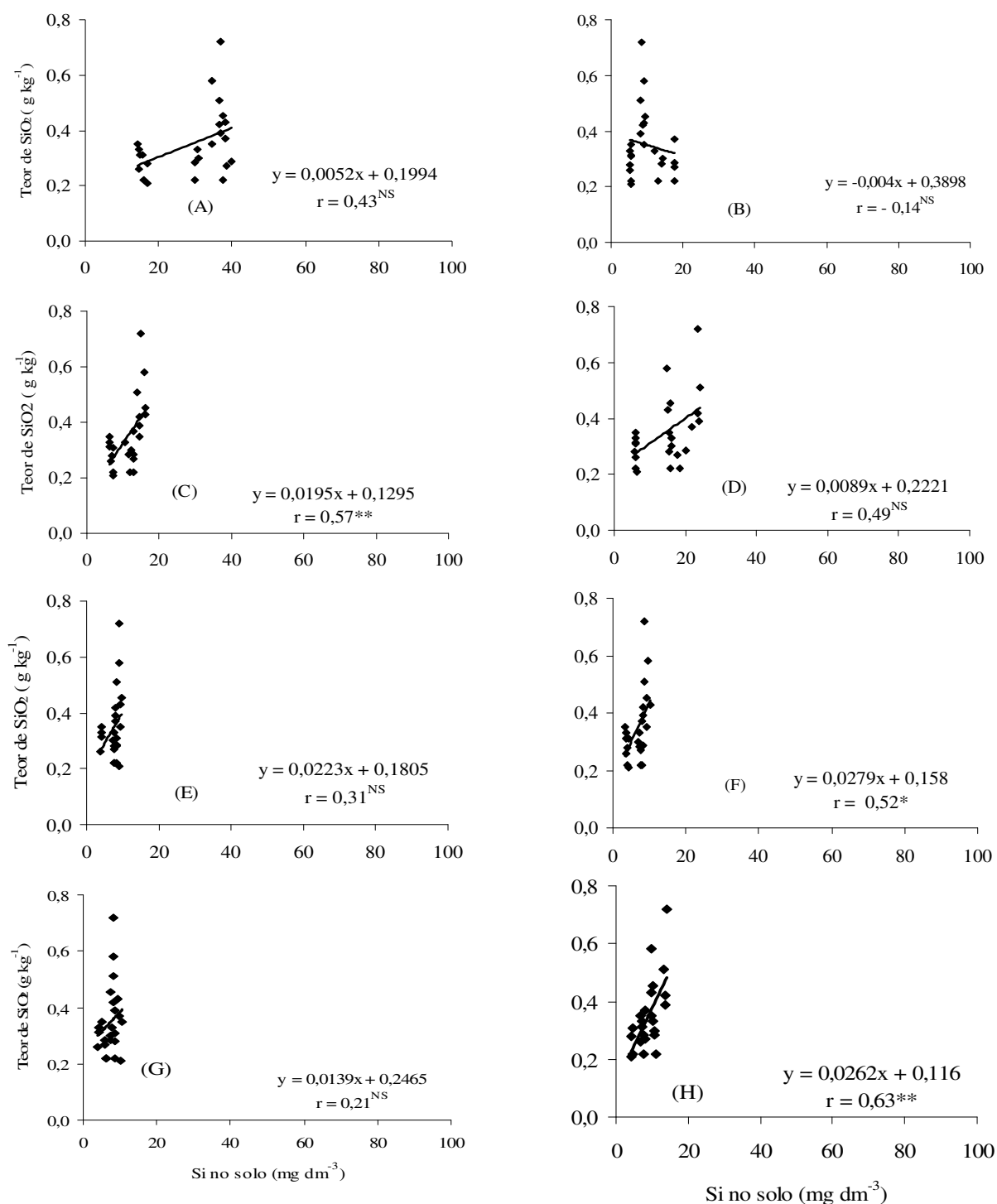


Figura 16. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício, em solos de textura média, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

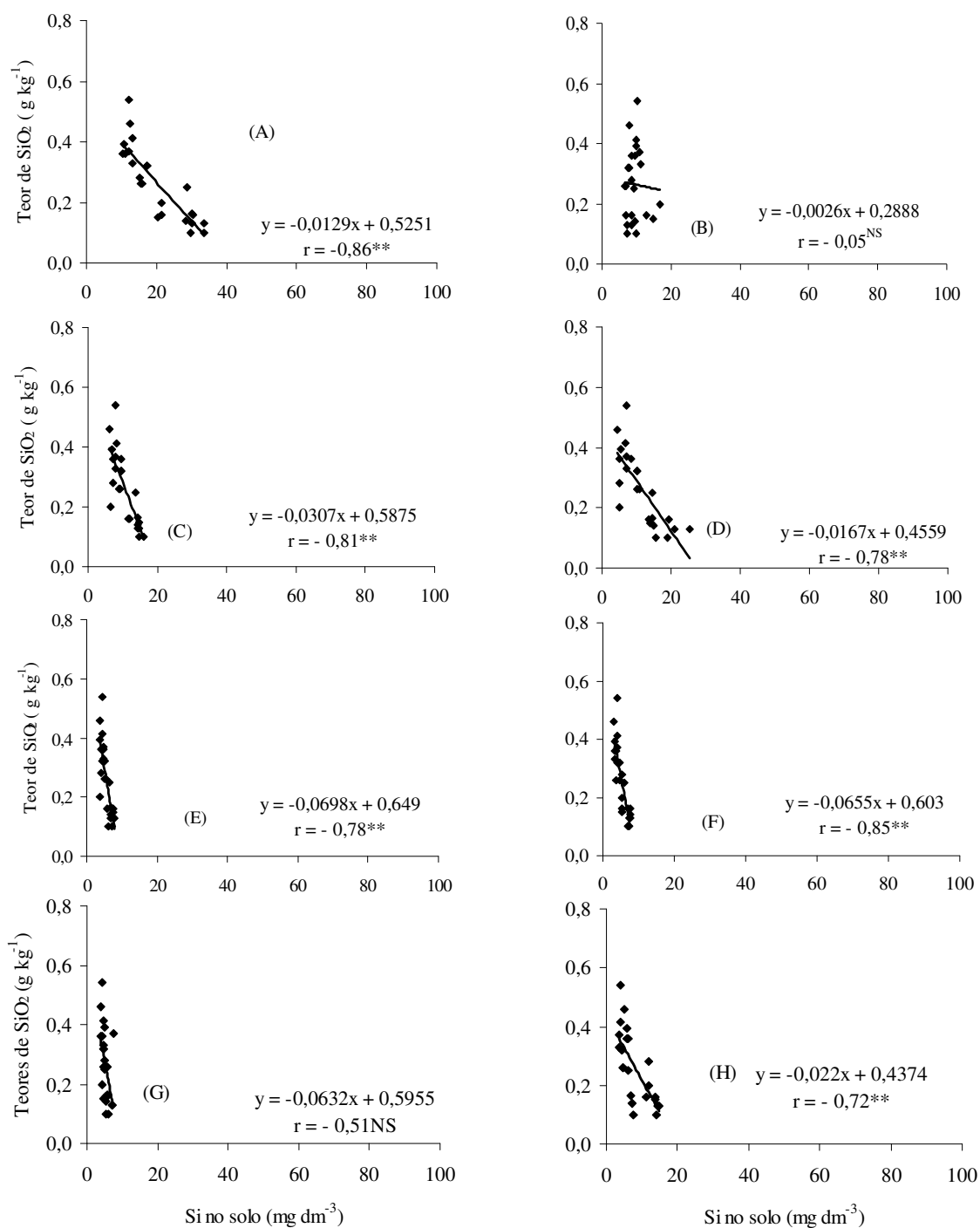


Figura 17. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de óxido de silício, em solos de textura arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

## 6.7. Teores de Si x Si acumulado na Planta

As correlações dos solos com as texturas argilosa, média e arenosa (agrupados), foram positivas para todos os extratores, conforme pode ser visualizado na Figura 18. Observou-se também que foram significativas para os extratores HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e água, porém com valor de 0,46 e 0,37, respectivamente. A quantidade de silício acumulado nas plantas ficou entre 140 e 400 kg ha<sup>-1</sup>.

Em solos de textura argilosa (Figura 19), as correlações foram positivas, sendo significativas para ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, tampão pH 4,0, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, água, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, (padrão) e resina, apresentaram valores de 0,92, 0,92, 0,91, 0,90, 0,90, 0,83, 0,78 e 0,77, respectivamente. As quantidades de silício acumuladas nas plantas, nesse tipo de solo, oscilaram entre 140 e 270 (kg ha<sup>-1</sup>).

Em solos de textura média (Figura 20), as correlações foram positivas para todos os extratores, não sendo significativas para os extratores resina e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão), e significativas para água, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, tampão pH 4,0, HCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup> e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado), com os respectivos valores de 0,83, 0,83, 0,80, 0,77, 0,70 e 0,57. A quantidade de silício acumulado nas plantas em solos de textura média ficou entre 215 e 400 kg ha<sup>-1</sup>.

Para resultados obtidos em amostras de solo com textura arenosa (Figura 21), as correlações foram negativas com coeficiente não significativo para o extrator resina e positiva para os demais extratores. Os extratores ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, KCl 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, água, tampão pH 4,0, CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (modificado) e CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup> (padrão) proporcionaram valores de 0,94, 0,92, 0,84, 0,78, 0,74 e 0,54, respectivamente. Neste caso, as quantidades de silício acumuladas nas plantas foram observados entre 180 e 360 kg ha<sup>-1</sup>.

No trabalho inicial que tratou da disponibilidade de Si para solos tropicais, Korndorfer et al. (1999) demonstraram que o ácido acético foi o extrator com melhor correlação com plantas, comparado ao CaCl<sub>2</sub> 0,0025 mol L<sup>-1</sup> e água.

A nível mundial não há um extrator considerado padrão para determinar o Si no solo. Prova disso é que, o ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup> é o mais usado nos

Estados Unidos (SNYDER et al, 2001), a solução tampão de acetato a pH 4,0 no Japão (Sumida, 2002) e cloreto de cálcio 0,01 Mol L<sup>-1</sup> na Austrália (BERTHELSEN et al., 2002).

Dessa forma, independentemente da solução utilizada, considera-se necessário que ela apresente correlação satisfatória entre o silício extraído e aquele absorvido pelas plantas. A solução de ácido acético foi a mais utilizada no Brasil (KORNDÖRFER et al.1999), mas alguns trabalhos têm mostrado que o pH pode influenciar de forma negativa, resultando em valores extraídos maiores que os realmente disponíveis às plantas (CAMARGO, 2003; QUEIROZ, 2003; DALTO, 2003). Conforme relatado por Vidal (2003), o extrator cloreto de cálcio (0,01 Mol L<sup>-1</sup>) pode apresentar maiores correlações entre o silício extraído no solo e a quantidade de silício absorvida pela planta teste, porém ainda são necessários mais estudos sobre o assunto.

De acordo com Korndorfer et al. (2004), a relação do Si extraído pelos diferentes extratores com o Si acumulado na planta de arroz de sequeiro, apresentaram coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de: 0,88; 0,84; 0,70; 0,69, para os extratores ácido acético 0,5 Mol L<sup>-1</sup>, água, cloreto de cálcio 0,0025 Mol L<sup>-1</sup> e Tampão pH 4,0, respectivamente. O extrator que apresentou maior coeficiente de determinação foi o ácido acético, apesar de coeficiente de determinação da água também ter sido elevado (R<sup>2</sup> = 0,84). Este mesmo problema foi detectado por Van raj e Camargo, (1973). Os autores observaram que o ácido acético foi o extrator que mais extraiu silício do solo. Portanto, a maior capacidade de extração do ácido acético pode, em parte, explicar o maior coeficiente de determinação, visto que quanto maior concentração de Si na solução menor os erros de leitura.

Comparativamente, pouca diferença existe entre os métodos de extração testados quanto à capacidade dos mesmos em estimar a disponibilidade do Si no solo para a cultura da cana-de-açúcar. A maioria dos extratores testados apresentou um elevado grau de correlação com o Si acumulado na planta.

Observando os valores de Si acumulado nas plantas e os teores obtidos pelo uso dos extratores, é possível admitir que houve alta correlação para os extratores ácido acético, tampão pH 4,0 e água. No entanto, o extrator KCl, mesmo não apresentando extração de Si elevada comparada aos demais extratores, proporcionou alta correlação com o Si acumulado na planta. Um fator que deve ser considerado é a amplitude de valores que o extrator é capaz de proporcionar, pois quanto maior a amplitude, menor o erro de

determinação laboratorial, o que foi observado com o extrator ácido acético e tampão pH 4,0. Por outro lado, o ácido acético pode superestimar o Si solúvel em solos que sofreram aplicação recente de fontes de silicato.

Para o estabelecimento da cana-de-açúcar, além dos elementos essenciais outros podem ser benéficos, como o silício, inclusive contribuindo para o aumento de produtividade (KORNDÖFER et al., 2002). A resposta da cana-de-açúcar ao silício é favorável, particularmente nos solos pobres com esse elemento. Ross et al. (1974) citam uma exportação de até 408 kg ha<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub> para uma produtividade de 74 t ha<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar (folhas + colmos). Como resultado desta enorme extração de silício, pode ocorrer uma diminuição temporária desse elemento no solo, com reflexo direto no desenvolvimento da planta. Em pesquisas realizadas por Datnoff et al. (2001), observaram-se aumentos de produtividade na cana-de-açúcar de até 17% na cana planta, e de até 20% na soqueira com a adição de silicatos.

Neste experimento, o SiO<sub>2</sub> acumulado foi em torno de 750 kg ha<sup>-1</sup> para uma produtividade de 110 t ha<sup>-1</sup>.

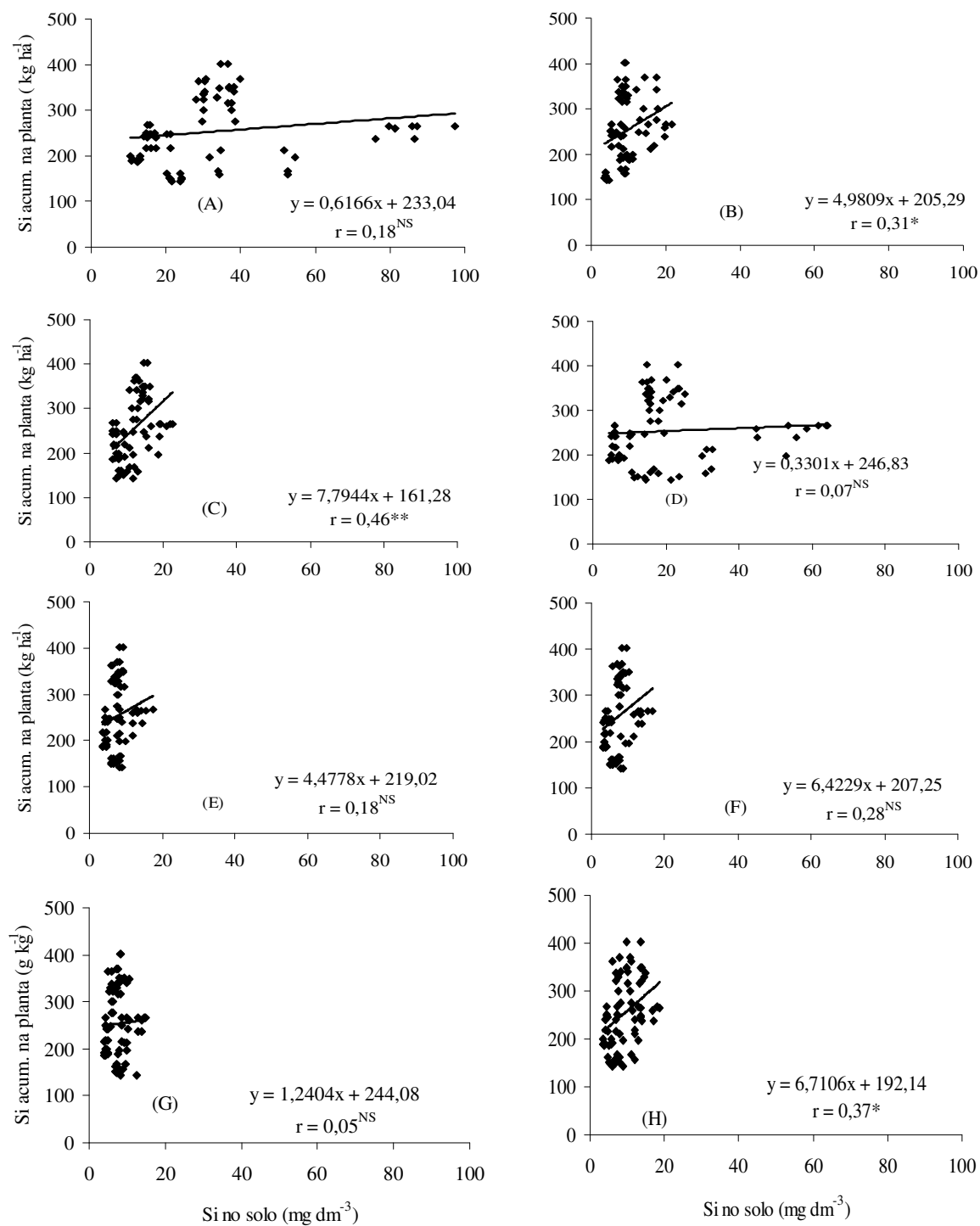


Figura 18 Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de Si na planta, em solos de texturas argilosa, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.



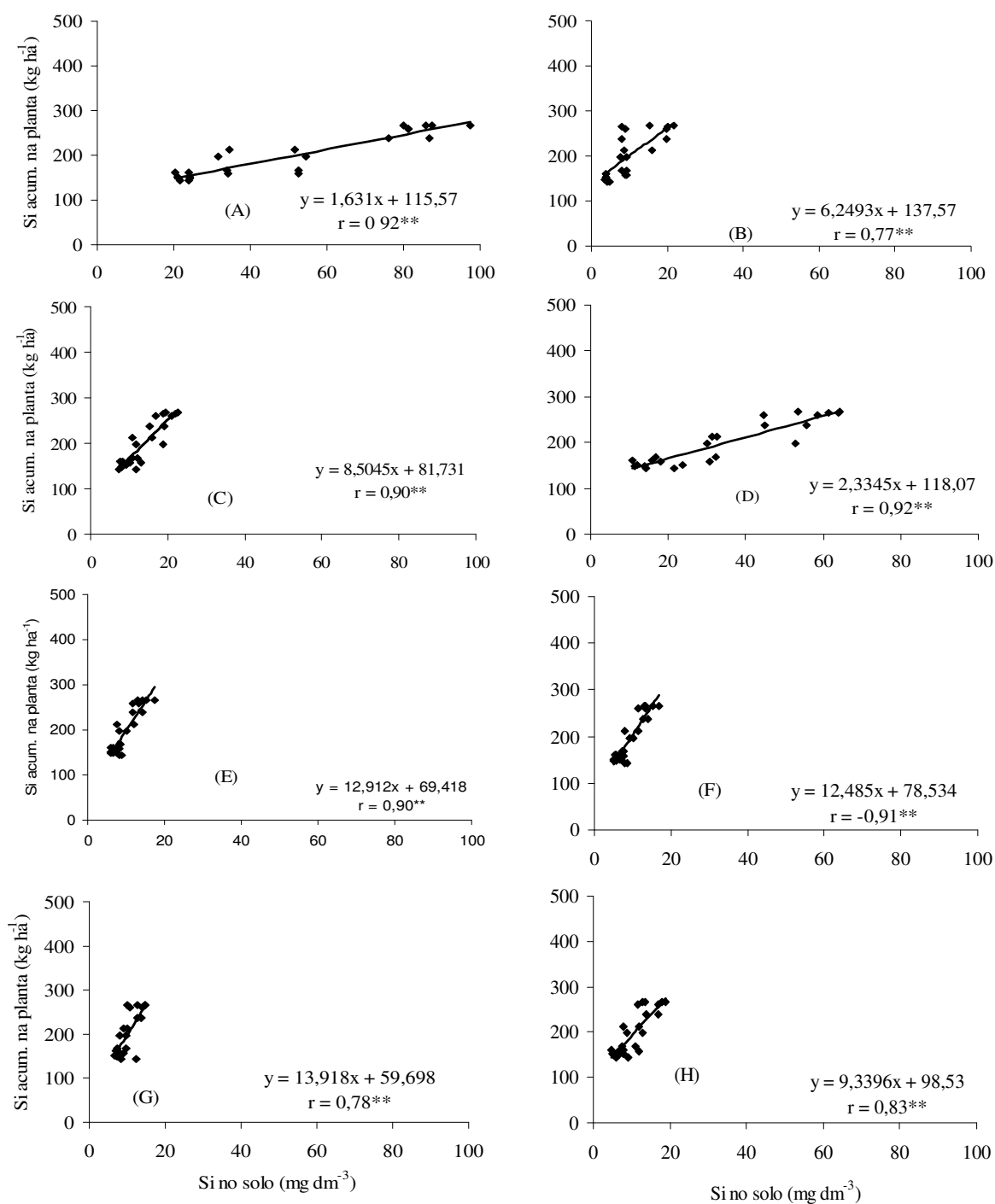


Figura 19. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de Si na planta, em solos de textura argilosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

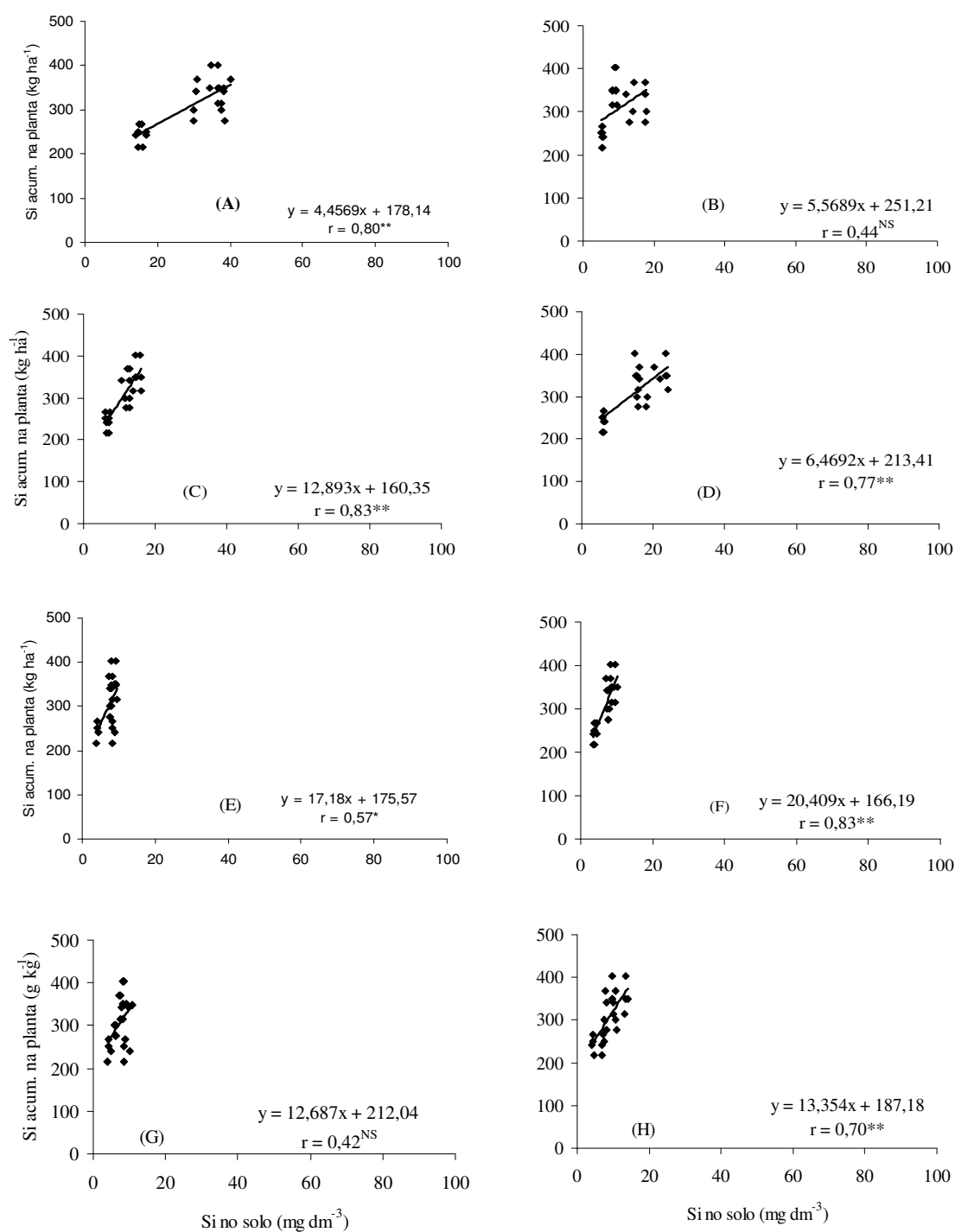


Figura 20. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de Si na planta, em solos de textura média, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

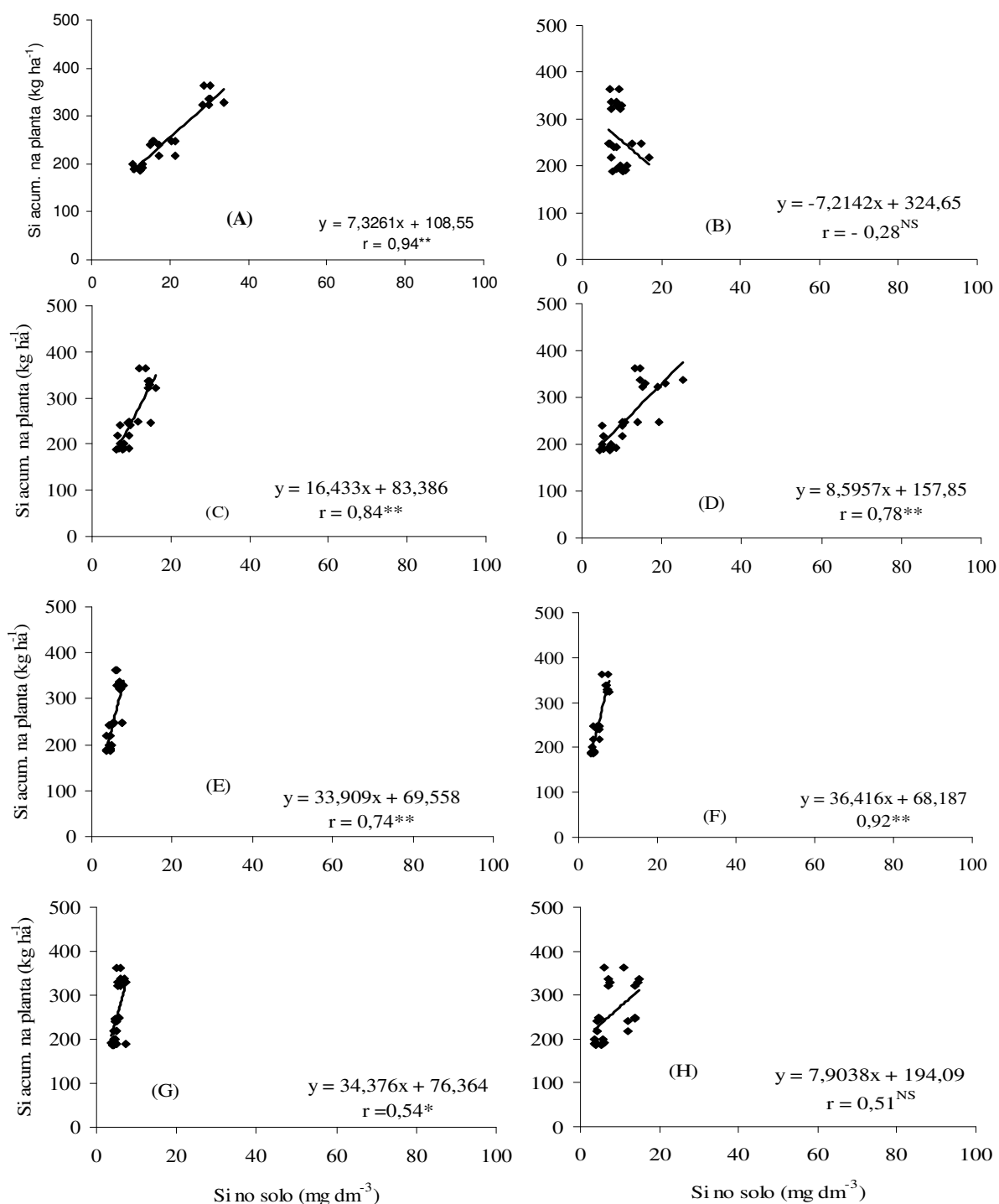


Figura 21. Correlação entre os teores de Si no solo e os teores de Si na planta, em solos de textura arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

## 6.8. Teores de Si x Produtividade

Conforme visualizado na Figura 22, considerando todos os solos a correlação foi negativa somente para o extrator  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (padrão), e positivo para todos os demais extratores, porém não sendo significativo para todos os extratores analisados.

Na Figura 23, estão contidas as correlações entre os teores de Si disponível no solo e a produtividade da cana-de-açúcar com solos de textura argilosa. Pode ser observado que as correlações foram positivas e significativas para todos os extratores na seguinte ordem: ácido acético  $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ , tampão pH 4,0,  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (modificado),  $\text{HCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ , água e resina com valores de 0,89, 0,83, 0,82, 0,82, 0,79, 0,76, 0,75 e 0,63, respectivamente. A produtividade foi de 70 a  $110 \text{ ton ha}^{-1}$ .

As correlações entre os teores de silício disponível no solo e a produtividade de cana-de-açúcar com solos de textura média estão na Figura 24. A correlação foi negativa somente para resina e positiva para os demais extratores. O coeficiente foi significativo somente para ácido acético  $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$  e resina com o valor de 0,86 e  $-0,48$ . Nesta textura, a produtividade variou de 100 a  $150 \text{ ton ha}^{-1}$ .

Em solos de textura arenosa (Figura 25), as correlações foram positivas para todos os extratores e não significativa somente para resina trocadora. Analisando os extratores ácido acético  $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$ , água,  $\text{KCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ , tampão pH 4,0,  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (modificado),  $\text{HCl}$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  e  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$  (padrão), observa-se valores de  $r = 0,86, 0,83, 0,83, 0,81, 0,81, 0,58$  e  $0,47$ , respectivamente. A produtividade variou entre 90 a  $140 \text{ ton ha}^{-1}$ .

Podemos observar que a produtividade em solos de textura médias e arenosa foi superior ao de textura argilosa isso pode ser explicado por se tratar de um Argissolo Vermelho Amarelo (LVA).

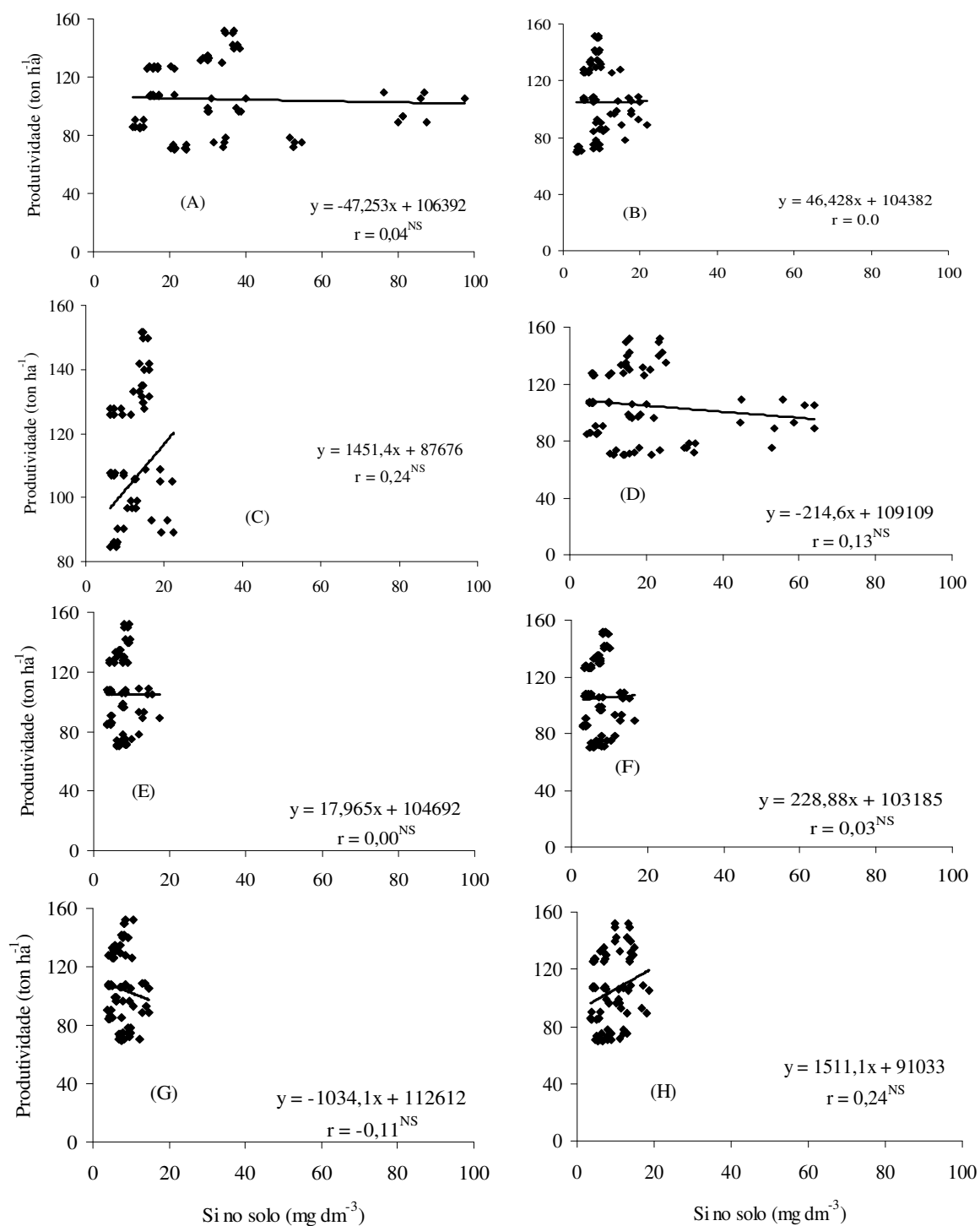


Figura 22. Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade, em solos de texturas argilosa, média e arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4.0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

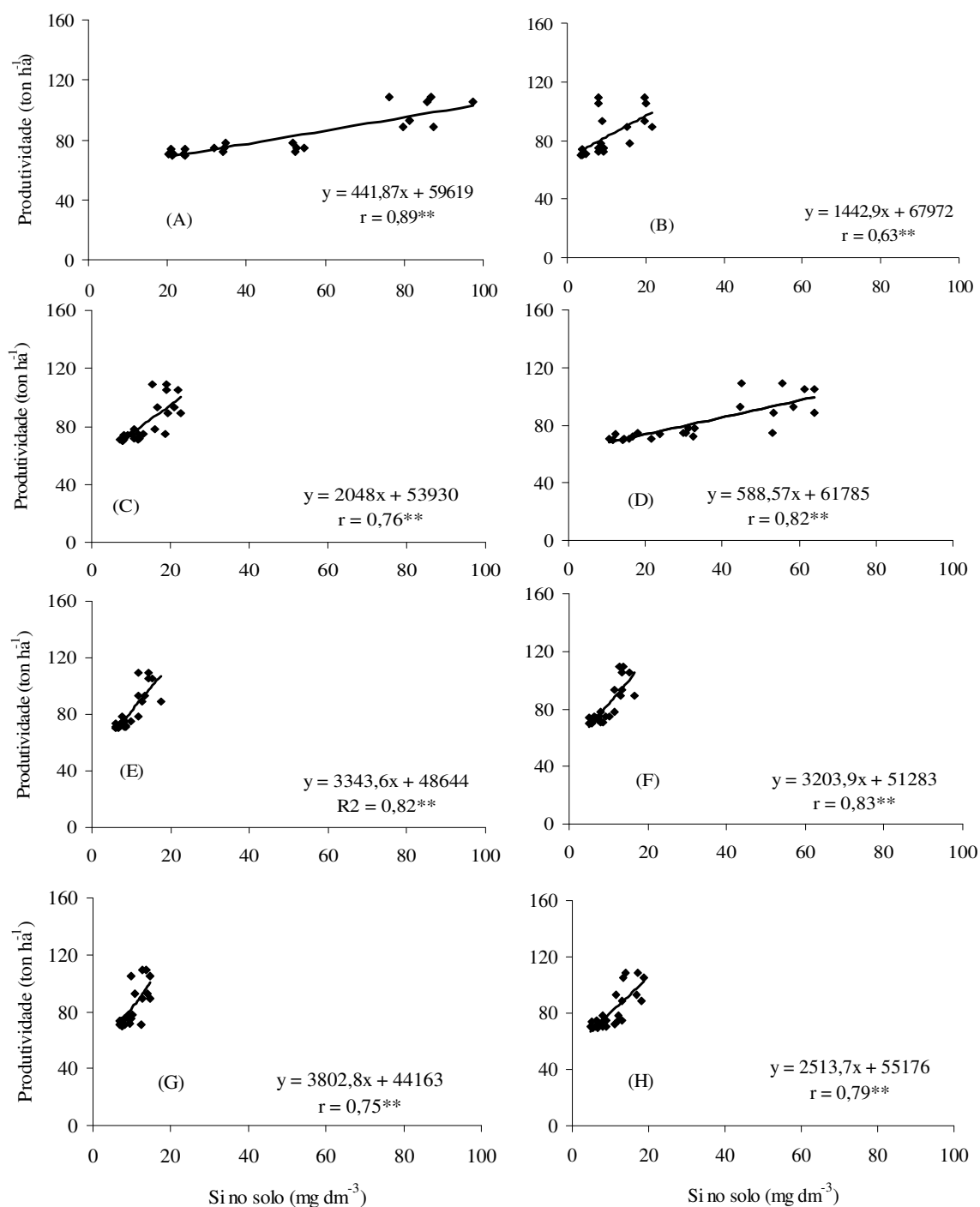


Figura 23. Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade, em solos de textura argilosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

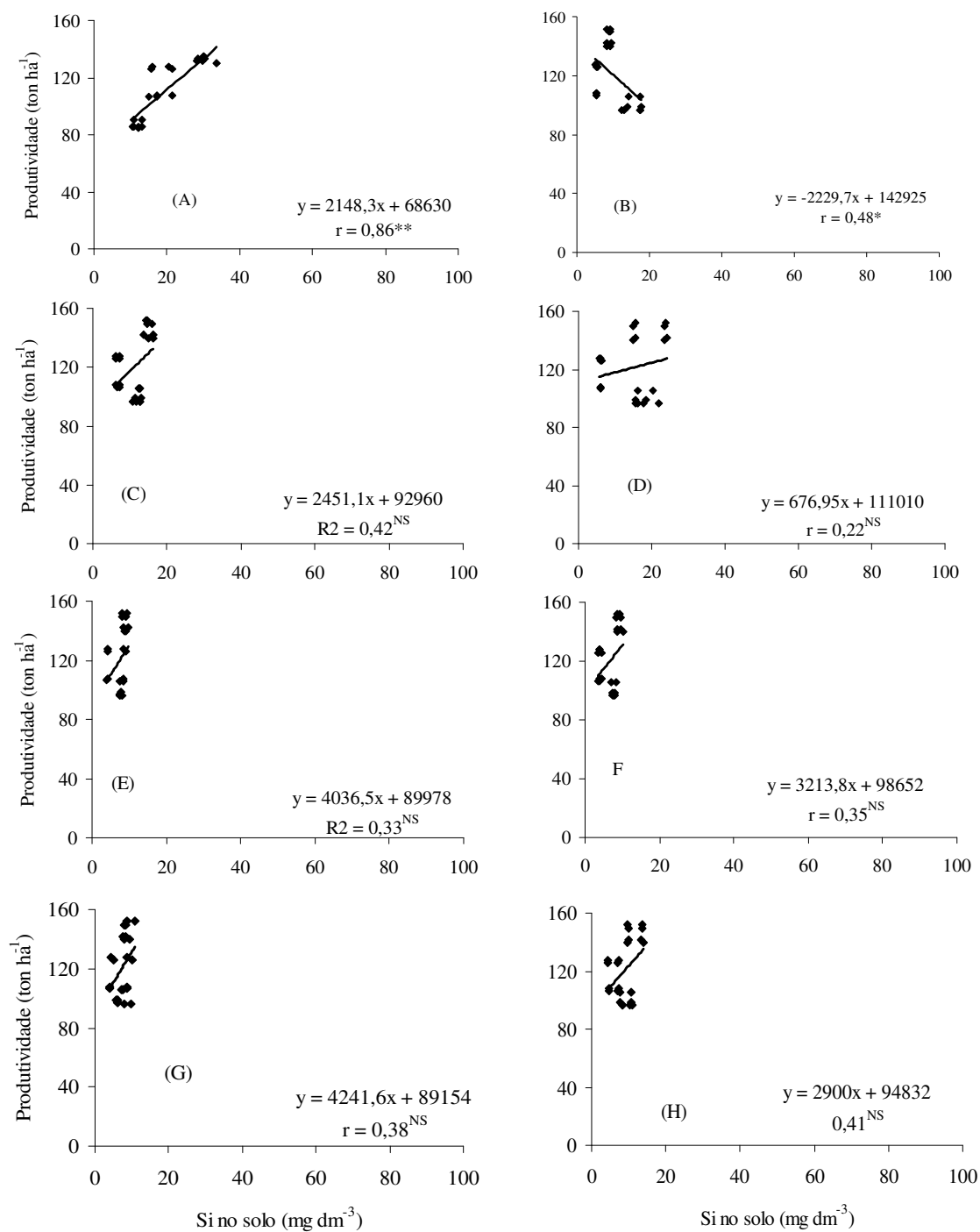


Figura 24. Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade, em solos de textura média, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.

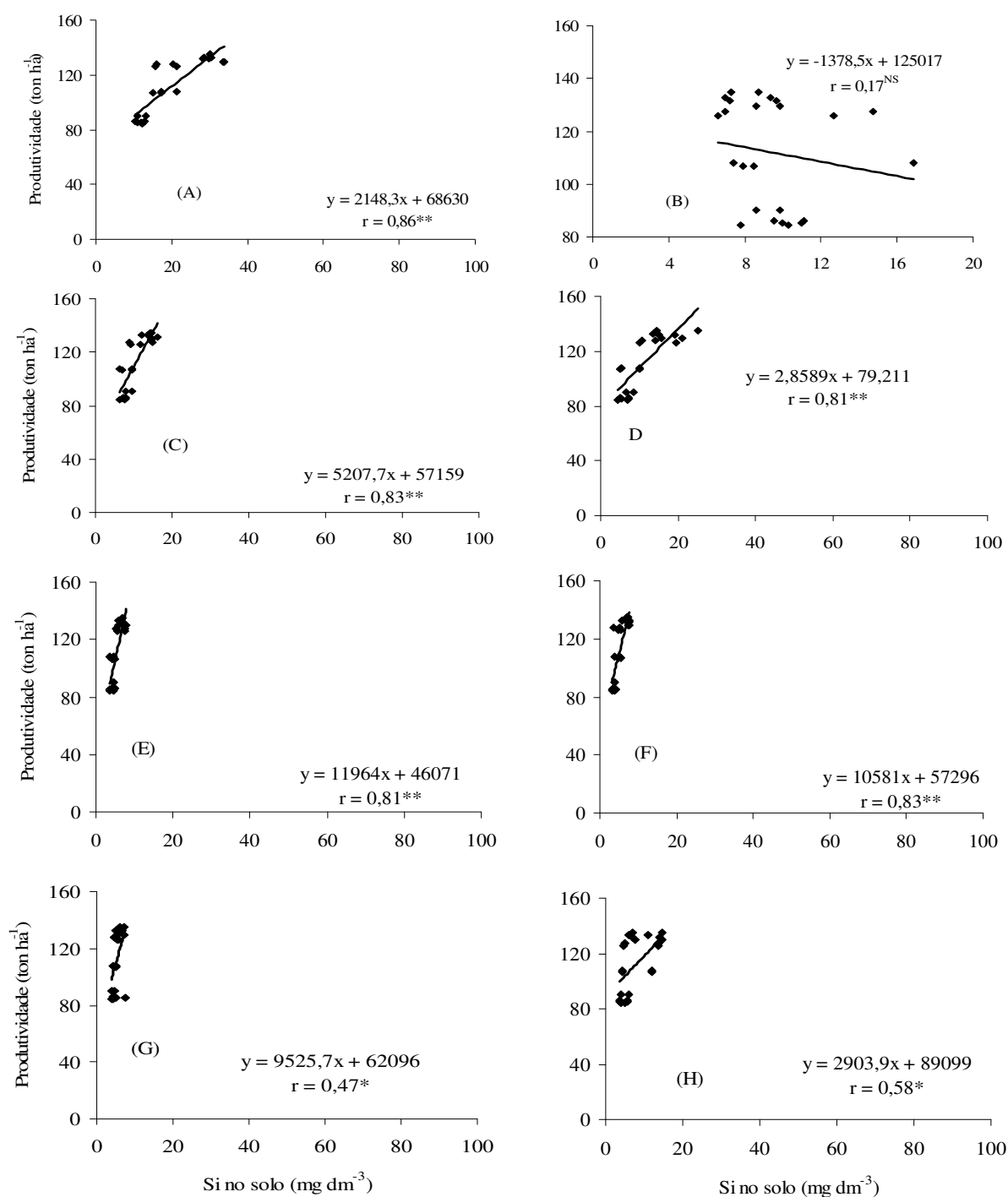


Figura 25. Correlação entre os teores de Si no solo e a produtividade, em solos de textura arenosa, com os extratores: (A) ácido acético, (B) Resina, (C) Água, (D) Tampão pH 4,0, (E) cloreto de cálcio modificado, (F) cloreto potássio, (G) cloreto de cálcio padrão e (H) ácido clorídrico.



## 7. CONCLUSÕES

A textura do solo e os teores de óxidos de ferro e alumínio têm influência significativa na disponibilidade de Si no solo.

O extrator ácido acético e tampão pH 4,0 foram os que mais extraíram silício do solo entre as texturas analisadas, principalmente na argilosa, que apresentam elevados teores de óxido de ferro e alumínio, proporcionando alta correlação com o silício acumulado na planta.

Os extratores cloreto de potássio, cloreto de cálcio (padrão e modificado) e água proporcionaram baixos valores de Si disponíveis no solo, no entanto, demonstraram altas correlações com a quantidade de Si acumuladas nas plantas de cana-de-açúcar.

Com os resultados obtidos, não foi possível admitir um único extrator que avalie de forma adequada a disponibilidade de silício em solos com diferentes texturas.

A produtividade de cana-de-açúcar foi superior em solos de texturas média e arenosa se comparado a solos de textura argilosa.

## 8. REFERÊNCIAS

ADATIA, M H.; BESFORD, R. T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, London, v. 58, n. 3, p. 343-351, 1986.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**. São Paulo: ANDA, 1992. 26 p. (Boletim Técnico, 6).

ALVAREZ, R.; SPARKS, D. L. Polymerization of silicate anions in solutions at low concentrations. **Nature**, Londres, England. 318-649, 1985

ARANTES, V. A. de. **Aplicação de silício para arroz de sequeiro cultivado em material de solos fase Cerrado**. 1997. 42p. Monografia (Graduação em Agronomia)- Universidade Federal de Uberlândia.

BARBOSA FILHO, M. P. Importância do silício para a cultura do arroz. Informações Agronômicas, (**Encarte técnico**), Piracicaba. n. 89, p. 1-8, 2000.

BERTHELSEN, S. **An assessment of the silicon status of soil in North Queensland, and the impact of sub-optimal plant available soil silicon on sugarcane production systems**. 2000. 261p. Thesis (M.Sc.) - James Cook University, Townsville.

BERTHELSEN, S. et al. Effect of Ca silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, **Anais**. Tsuruoka, Japão, Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002, p.57.

BERTHELSEN, S.; KORNDÖRFER, G.H. Methods for Si analysis in plant, soil and fertilizers. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. **Anais**. Uberlândia: UFU, 2005. p.85-91.

BIRCH, H. F. Phosphate response, base saturation and silica relationship in acids soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, United Kingdom. v. 43, p. 229-235, 1953.

BROWN, T. H. & MAHLER, R. L.. Relationships between soluble silica and plow pans in Palouse silt loam soils. **Soil Science**, Philadelphia, USA. v. 145, p. 359-364, 1988.

CAMARGO, M. S. **Aplicação de silicato de cálcio na recuperação de pastagem degradada de Brachiaria decumbens**. 2003. 49 p. Monografia (Graduação em Agronomia)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2003. 49p.

CANTARELLA, H. et al. Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In: B. van. et al . (Org.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001, v. p. 213-223.

CARVALHO, R. et al. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 69-74, 2000.

CASTRO, G. S. A. **Alterações físicas e químicas do solo em função do sistema de produção e da aplicação superficial de silicato e calcário**. Botucatu. UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2009. 150 p.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. **Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato**. **Crop Science**, v. 49, p. 949-954, 2009.

DALTO, G. **Manejo de silicato e calcário em soja cultivada sobre palhada de cana-de-açúcar**. 1997. 60 P. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1997

DALTO, G. **Manejo de silicato e calcário em soja cultivada sobre palhada de cana-de-açúcar**. 2003. 102 p. Tese (Doutorado)-Universidade Federal Uberlândia, 2003.

DATNOFF, L. E; SNYDER, G. H; KORNDÖRFER, G. H. Silicon in agriculture.

Amsterdam: Elsevier science, 2001. v. 8, 424 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro, 1979. 80p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ENGEL, W. Contribution to the function of silica in plant tissues.

**Naturwissenschaften**, Berlin, Germany. v.45, p. 316-317, 1958

EPSTEIN, E. **The anomaly of silicon in plant biology**. Proceedings of the National Academy of Sciences, Washington, v.91, n.1, p.11-17, 1994.

FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FREITAS, L.C.; COSTA FILHO, J.F. da; ALOISI, R.R.; MELO, W.J. Contribuição ao estudo da sílica solúvel em alguns perfis de solos. **Científica**, v.5, p.296-305, 1977.

GIBSON, J.A.E. Kinetics of silicon and aluminum release from soils during extration with 0,01 M calcium chloride. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25:3393-3403, 1994.

HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. VI. Effect of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. *Soil Science Plant Nutrition*, v. 34, n. 1, p. 65-73, 1988.

JACKSON, M. L. Soil chemical analysis. Advanced course. Madison, Univ. of Wisconsin, Department. Soils, 1956. 991 p.

JACKSON, M.L. Clay transformation in soil genesis during the quaternary. *Soil Science*, Philadelphia, USA, v. 99, p. 15-22, 1965.

JONES, L .H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants and animals. *Advances in Agronomy*, Devon, United Kingdom, v.19, p. 107-149, 1967.

KILMER, V. J. Silicon. In: BLACK, C. A. ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. ), 1965. 63 p. (Monograph, 9)

KORNDÖRFER, G. H. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n.1, p. 101-106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n.1, p. 101-106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. Viçosa: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23,n. 1, p. 101-106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 7, p. 1071-1084, 2001.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 70, p. 1-5, 1995.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi-ICIAG; UFU, 2002. 23 p. (Boletim Técnico, 1).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CORRÊA, G. F. Disponibilidade de silício em solos:efeito do pH, Si e extratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. 2003. **Anais...** Ribeirão Preto, UNESP, 2003,CD-Rom

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34 p. (Boletim técnico, 2).

KORNDÖRFER, G. H. et al. Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo. In: FERTBIO 2002. Rio de Janeiro, 2002. **Anais...** Rio de Janeiro: CPGA-CS/UFRJ, 2002. 1 CD-ROM.

LANNING, F. C. Nature and distribution of silica in strawberry plants. **Journal of American Society for Horticultural Science**, v.76, p. 349-358, 1960.

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em Latossolo Roxo cultivado em casa-de-vegetação**. 1997. 87p, Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, 1997

LEMES E. M. et al. O silício no solo pode ser determinado com extratores utilizados na análise de fósforo, 2004.

LEE, T.S.; KWON, T.O.; PARK, K.H. **Influence of nitrogen and silicon on the yield and the lodging related traits of paddy rice**. Soil and Fertilizers, Wallingford, v.32, n.2, p.15-23, 1990.

LIANG, Y.C.; MA, T.S.; LI, F.J.; FENG, Y.J. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, p.2285-2297, 1994.

LIMA FILHO, O. F. et al. **Silício na agricultura**. Informações Agronômicas, n. 87, p. 1-7, 1999. Encarte técnico.

MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. **Plant Soil**, Amsterda, Netherlands, v. 133,n. 2, p. 151-155, 1991.

MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicic acid on rice in P-deficient soil. **Plant Soil**, v.126, p.121, 125, 1990 a.

MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on growth and phosphorus uptake of rice. **Plant Soil**, v. 126, p. 115-119, 1990 b.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres,1980. 251p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 nd. ed. New York: Academic Press,1995. 889 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1986.

MATICHENKOV, V.V.; AMMOSOVA, Y.A.M.; BOCHARNIKOVA, E.A. The method for determining of plant available silica in soil. **Agrochemistry**, Oldenburg, Germany n.1, p.76-84, 1997.

MC KEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. **Advances in Agronomy**, Devon, United Kingdom. v. 15, p. 339-397, 1963.

NONAKA, K. & TAKAHASHI, K. A method of assessing the need of silicate fertilizers in paddy soils. In: XIV INTERN. CONGR. SOIL SCI., 14, Kioto, 1990. *Proceedings*. Kioto, 1990. 513-514.

OLIVEIRA, E. L. et al. Avaliação da eficiência agrônômica dos fosfatos naturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, cidade, v. 8, p. 63-67, 1984.

PIAU, W. C. **Viabilidade do uso de escórias como corretivo e fertilizantes**. 1991. 99 p. . Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991

PLUNCKNETT, D. L. The use soluble silicate in Hawaiian agriculture. **University of Queensland Papers**, Brisbane, Australia. v. 1, n.6, p. 203-233, 1972.

PONNAMPERUMA, F. N.; CAYTON, M. T.; LANTIN, R. S. Dilute hydrochloric acid as a extractant for available zinc, cooper an baron in rice soils. **Plant and soil**, v. 61, n. 1, p. 297-310, 1981.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F.M. **Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso**. *Scientia Agrícola*, v.57, p.739-744, 2000.

PULZ, et al. **Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 2008, p. 1651-1659, 2008.

QUEIROZ, A. A. **Reação de fontes de silício em uatro solos de cerrado**, 2003. 40 p. Monografia (Graduação em Agronomia) -Universidade Federal de Uberlândia, 2003, Uberlândia.



RAIJ, B. van **Avaliação da fertilidade do solo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1981. 200 p.

RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, 32, n. 3, p. 223-231, jun. 1973.

RAMOS, L. A **Corretivos e condicionadores na correção do solo através de colunas de lixiviação**. 2003. 43 p. Monografia (Graduação em Agronomia)-Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of Cambridge Philosophical Society**, Cambridge, United Kingdom. v. 58, p. 179-207, 1983.

ROSS, R. A.; VANFLEET, H. B.; DECKER, D. L. Diffusion of zinc in lead. *Phys. Rev. B* 9, 4026 – 4029, 1974.

ROTHBUHR, L.; SCOTT, F. A study of the uptake of silicon and phosphorus by wheat plants with radio chemical methods. **Biochemie Journal**, Amsterdam, Netherlands. v. 65, p. 641-645, 1957.

ROY, A. C. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian latossols. In: SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUATION, 1971, Honolulu. Proceedings... New Delhi : University of Hawaii, 1971. p. 756-765.

SANCHEZ, P.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. IN: KHASAWNECH, F. E. ; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, 1980. p. 471-514

SAVANT, N. K. et al. E Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal Plant Nutrition*. New York, v. 12, n. 22, p. 1853-1903, 1999.

SHERMAN, G. D. Crop growth response applications of calcium silicate to tropical soil in Hawaiian Islands. **Agricultural Digest**, Coventry, v. 18, p. 11-19, 1969.

SILVA, F. C.. **Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes. Embrapa Solos**, Brasília – DF: EMBRAPA SOLOS, 1999. In: SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. Silicon in agriculture. Elsevier, p. 105-187, 2001.

SNYDER, G.H. Methods for silicon analysis in plants, soils and fertilizers. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. Silicon in agriculture. Amsterdam: Elsevier, 2001. p.185-196.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, EPF, 24 p, 1969. (Boletim técnico, 7).

VIDAL, A .A **Fontes de silício para a cultura do arroz**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2003. 34 p.

VISSOCKII, Z. Z.; POLIAKOV, V. M. The change of pore structure of silica-gel under the form created substances in steam forms. **Doklady Academic Science**, Moscow, URSS, v. 129, p. 831-834, 1959.

WEAVER, R. M.; SYERS, J. K.; JACKSON, M. L. Determination of silica in citrate-bicarbonate-dithionite extracts of soils. **Proceedings of the Soil Science Society of America**, Madison, v. 32, n. 5, p. 497-501, Sept./Oct. 1968.

YOSHIDA, S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences**, Ibaraki, v. 15, p. 1-58, 1965.

YOSHIDA, S.; FORNO, D.A.; COOK, J.H.; GOMEZ, K.A. **Laboratory manual for physiological studies of rice**. 3.nd ed. Los Banos: IRRI, 1976. 83p.