

PRODUTIVIDADE DO CACAUEIRO EM FUNÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO SOLO.

I. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS⁽¹⁾

J. O. SOUZA JR.⁽²⁾, J. W. V. MELLO⁽³⁾,
V. H. ALVAREZ V.⁽³⁾ & J. C. L. NEVES⁽³⁾

RESUMO

Avaliaram-se as produtividades em sete anos (1989 a 1995) de 36 talhões de cacauzeiros (*Theobroma cacao* L.) de uma propriedade no município de Itagibá, Bahia. As médias das três maiores (anos mais chuvosos) e das três menores (anos mais secos) produtividades de cada talhão foram consideradas como variáveis principais na análise de trilha. As variáveis explicativas foram as características químicas (pH em H₂O e em KCl, carbono orgânico, N-total, Al, Ca, Mg, P, K, Na, Cu, Zn, Mn, Fe, H + Al e P remanescente), em duas profundidades (0-20 e 30-50 cm), de solos com diferentes texturas. Dados de análise de rotina de solo (pH, Ca, Mg, P e K), do ano de 1995 foram correlacionados com valores dessas mesmas variáveis obtidos nos anos de 1988 e de 1991, com a finalidade de verificar se a fertilidade atual refletiria uma condição passada. O K e o P do solo, nutrientes que foram fornecidos pelas adubações, modificaram-se muito ao longo desses sete anos, enquanto o pH, o Ca e o Mg mantiveram-se mais estáveis ao longo do tempo. Cobre foi o nutriente que mais restringiu a produtividade do cacauzeiro; Ca, P e N também limitaram a produtividade da cultura, principalmente em anos chuvosos. Os níveis de pH, K e Mg apresentaram-se altos em alguns talhões, tendo efeitos significativos e negativos sobre a produtividade. Em anos mais secos, os talhões menos produtivos estavam sobre solos mais férteis (possivelmente mais jovens), com menor capacidade tampão e com menor teor de matéria orgânica. Independentemente da quantidade de chuva, dentre os talhões com solos argilosos os mais produtivos tinham maior capacidade tampão de P.

Termos de indexação: cacau, produtividade, fertilidade do solo, análise de trilha.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em junho de 1997 e aprovado em setembro de 1999.

⁽²⁾ Professor Assistente do Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rod. Ilhéus/Itabuna, km 16, CEP 45650-000 Ilhéus (BA). E-mail: olimpio@jacaranda.uescba.com.br.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36571-000, Viçosa (MG).

SUMMARY: CACAO TREE PRODUCTIVITY AS A FUNCTION OF SOIL CHARACTERISTICS. I: CHEMICAL CHARACTERISTICS

The yield of 36 cacao trees (Theobroma cacao L.) on a farm in Itagibá, Bahia, Brazil were evaluated during the period of 1989-1995. The averages of the three highest yields (rainier years) and of the three lowest yields (drier years) of each area were considered the main variables. The variables were the chemical characteristics (pH in H₂O and in KCl, organic carbon, total N, Al, Ca, Mg, P, K, Na, Cu, Zn, Mn, Fe, H + Al and the remaining P) inrelative to two depths (0-20 and 30-50 cm) of soils with different textures. Data obtained from routine analysis (pH, Ca, Mg, P and K), in 1995, were correlated with the values of these variables obtained in 1988 and 1991, to verify whether the present fertility would be correlated to a past condition. Soil P and K supplied by fertilization, underwent changes through this seven year period, while the pH, Ca and Mg remained more proportional. Copper was the nutrient which most restricted cacao tree; Ca, P and N also limited yield, mainly during the rainy years. K, Mg and pH were high in some areas, showing significant and negative effects on yield. In drier years, the less productive areas presented more fertile soil (probably the younger ones), with less buffering capacity and less organic matter content. Regardless of rain availability, among the areas with loamy soils, the most productive had higher buffering P capacity.

Index terms: cacao, productivity, alteration in soil fertility, path analysis.

INTRODUÇÃO

O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) é uma espécie nativa da Floresta Amazônica. Atualmente, encontra-se difundida por vários países de clima tropical úmido. O Brasil detém alta tecnologia entre os países produtores de cacau, apresentando alto potencial de produtividade para essa lavoura. Contudo, é comum observar diferenças expressivas de produtividades entre anos e áreas. Por exemplo, Cadima Z. & Alvim (1973), trabalhando em áreas de baixa e alta produtividade de 14 fazendas de diferentes municípios do sul da Bahia, verificaram que a média da produtividade de três anos das melhores áreas foi de 909 kg ha⁻¹, enquanto a das áreas menos produtivas foi de 335 kg ha⁻¹.

No processo produtivo, as características químicas do solo revestem-se de importância capital, pois são a base para um equilíbrio nutricional adequado e, conseqüentemente, uma produtividade satisfatória. Contudo, o teor de nutrientes no solo por si só não indica necessariamente produtividade elevada, a qual depende de outros fatores ambientais, bem como de suas interações. Neste contexto, a disponibilidade de água coloca-se como variável primordial, pois ela é o veículo de transporte de nutrientes, além de garantir a turgidez da planta e ser responsável por processos metabólicos e fisiológicos essenciais. Historicamente, o clima, em especial a precipitação pluvial, é o principal fator que tem explicado as oscilações de produtividades de cacau em determinada área, entre os anos (Alvim, 1960; 1988; Almeida, 1986). Na propriedade estudada

neste trabalho, a chuva compreendida entre março e fevereiro chegou a explicar 94,5% das variações de produtividade anual da lavoura de cacau entre 1988 e 1995 (Souza Jr., 1997).

Neste trabalho, pretendeu-se, inicialmente, verificar se a fertilidade atual de 36 talhões de cacau refletiria uma condição passada. Posteriormente, objetivou-se identificar os nutrientes ou características químicas que explicassem as diferenças de produtividades desses talhões, em anos mais secos e mais chuvosos.

MATERIAL E MÉTODOS

Na Fazenda Oceania, pertencente à empresa Mendonça Agropecuária Ltda., no município de Itagibá (BA), foram selecionados 36 talhões de cacau, com média de 5,0 ha, 920 plantas/ha, 95% de plantas consideradas produtivas (plantas acima de sete anos de idade). Em cada talhão predominou uma unidade de solo. As plantas não apresentavam problemas genéticos (cacauzeiros auto-intercompatíveis de grande vigor vegetativo, chamados de Belo-antônio).

Segundo a classificação de Köppen, o clima local é Am, tropical chuvoso de floresta com um a três meses secos (SEI, 1998). Os solos sob os povoamentos em estudo eram: Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolos e solos com B textural.

As produtividades anuais de 1989 a 1995, de cada talhão, foram obtidas pela divisão da produção pelo

número de plantas consideradas produtivas de cada talhão e ano. Foram calculadas as médias das três maiores e das três menores produtividades anuais de cada talhão, ou seja, condições de maior e menor disponibilidade de chuva, respectivamente (Souza Jr., 1997).

Retiraram-se 20 amostras simples de solo por talhão, nas profundidades de 0-20 e 30-50 cm. Essas amostras foram homogeneizadas, secas ao ar, peneiradas ($\phi = 2,0$ mm) e caracterizadas quimicamente: pH em H_2O e em KCl $1\ mol\ L^{-1}$, ambos com relação solo:solução de 1:2,5; carbono orgânico (CO), pelo método Walkley - Black (Defelipo & Ribeiro, 1981); nitrogênio total (N), pelo método Kjeldahl por destilação a vapor (EMBRAPA, 1997); Al, Ca e Mg, pelo extrator KCl $1\ mol\ L^{-1}$; P, K, Na, Cu, Zn, Mn e Fe, pelo extrator Mehlich-1 (Defelipo & Ribeiro, 1981), e H + Al, pelo extrator $Ca(OAc)_2$ $0,5\ mol\ L^{-1}$, pH 7,0 (EMBRAPA, 1997). Determinou-se, também, o P remanescente (P_{rem}), que é o teor de fósforo da solução de equilíbrio, após a agitação por uma hora, de $5\ cm^3$ de solo com $50\ mL$ de solução de $CaCl_2$ $0,01\ mol\ L^{-1}$ contendo $60\ mg\ L^{-1}$ de P, repouso de 5 min e filtragem (Alvarez V. & Dias, 1999).

Os elementos foram assim dosados: P, por colorimetria, pela redução do fosfomolibdato pela vitamina-C (Braga & Defelipo, 1974); K e Na, por fotometria de chama; Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, por espectrofotometria de absorção atômica; CO, por titulometria com $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$, e N, Al e (H + Al), por titulometria.

As amostras de terra fina seca ao ar também foram caracterizadas quanto à textura, com dispersão em $NaOH$ $0,5\ mol\ L^{-1}$ (Moura Filho, 1964). Foram separados os talhões de textura mais grosseira, com teor médio de argila nas duas camadas menor que 35%, dos de textura mais fina ou argilosa, que apresentavam teor médio de argila nas duas camadas superior ou igual a $350\ g\ kg^{-1}$.

Características químicas (pH, Ca, Mg, K e P disponíveis) do solo determinadas no ano de 1995 foram correlacionadas com seus respectivos valores obtidos nas análises de solo, dos anos de 1988 e 1991, com a finalidade de verificar até que ponto a fertilidade atual refletiria uma condição passada.

As médias de produtividade de cada talhão nos anos mais secos (média das menores) e nos anos mais chuvosos (média das maiores) foram consideradas, separadamente, como variáveis principais (dependentes) na análise de trilha, enquanto as características químicas, em cada profundidade (0-20 e 30-50 cm) e grupos de textura (mais grosseira e mais fina) foram utilizados como variáveis explicativas (independentes). Para reduzir a multicolinearidade da análise, sempre que duas variáveis explicativas apresentassem coeficiente de correlação maior que 0,80, excluía-se aquela que menos explicasse a produtividade. Finalmente, permaneciam no modelo apenas as variáveis cujos

efeitos diretos apresentassem significância a pelo menos 10%.

A análise de trilha consiste no desdobramento de coeficientes de correlação entre a variável principal e cada variável explicativa, em efeitos diretos e indiretos destas em relação àquela (Cruz & Regazzi, 1994). Os efeitos diretos das variáveis independentes sobre a variável principal são os coeficientes do modelo de regressão padronizada. Os efeitos indiretos de uma variável independente sobre a principal, via outras variáveis independentes, são aqueles proporcionados pelas correlações entre essas variáveis independentes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precipitação entre os meses de março e fevereiro, período de 12 meses de chuva que mais se correlacionou com a produção anual da lavoura em estudo (Souza Jr., 1997) variou de 723 a 897 mm, nos três anos mais secos, e de 1.136 a 1.590 mm, nos três anos mais chuvosos. Dos 36 talhões de cacau estudados, 14 apresentaram teor médio de argila nas duas camadas superior a $350\ g\ kg^{-1}$ e produtividades médias (em kg por 1.000 plantas produtivas) variando de 705 a 1.976, nos anos mais secos, e de 1.447 a 2.675, nos anos mais chuvosos. Variação semelhante, porém com menor oscilação, foi observada para os 22 talhões com textura mais grosseira: a produtividade média (em kg por 1.000 plantas produtivas) variou de 720 a 1.665, para os anos mais secos, e de 1.460 a 2.512, para os anos mais chuvosos.

De modo geral, os solos estudados são relativamente férteis, com altos valores de pH, P remanescente, matéria orgânica e bases trocáveis, além de baixo Al trocável e acidez potencial. A variação de muitas características é grande, principalmente as bases, micronutrientes e P. Embora a variação entre os dois grupos de textura tenha sido pequena, os talhões com solos de textura mais grosseira apresentaram maiores teores de P disponível e remanescente e de micronutrientes e foram mais pobres em matéria orgânica (Quadro 1).

Na figura 1, verifica-se que os valores de pH, Ca e Mg, do ano de 1995, correlacionaram-se significativamente com os valores dessas mesmas características avaliadas nos anos de 1988 e 1991. Isso evidencia a proporcionalidade dessas características ao longo dos anos avaliados. Um dos fatores que afetaram este resultado foi a não-aplicação de calcário ou gesso agrícola nesse período, apenas um pouco de Ca foi fornecido via superfosfato triplo; em torno de $0,5\ mmol_c\ dm^{-3}$ de Ca por ano.

O teor médio de K no solo dos 36 talhões, na camada de 0-20 cm de profundidade, apresentou pequena oscilação ao longo dos anos: 121, 101 e $99\ mg\ dm^{-3}$,

Quadro 1. Valores médios (MD), mínimos (MI) e máximos (MX) das características químicas⁽¹⁾ de solos de diferentes texturas, em duas profundidades, de 36 talhões no ano de 1995

Característica	Textura argilosa (14 talhões)						Textura média e arenosa (22 talhões)					
	0-20 cm			30-50 cm			0-20 cm			30-50 cm		
	MD	MI	MX	MD	MI	MX	MD	MI	MX	MD	MI	MX
pH _{H₂O}	6,16	5,44	6,79	5,40	4,86	6,04	6,23	5,74	7,23	5,87	5,11	6,75
pH _{KCl}	5,23	4,44	5,81	4,49	4,01	5,12	5,21	4,71	6,41	4,62	4,10	5,61
CO (g kg ⁻¹)	20	17	24	12	09	16	17	12	23	11	08	14
N (g kg ⁻¹)	1,6	1,4	1,9	0,9	0,6	1,1	1,4	1,2	1,7	0,9	0,6	1,1
Ca ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	44	30	60	25	13	36	41	23	75	35	18	57
Mg ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	16	11	26	07	04	11	15	05	27	12	04	22
Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)	00	00	01	03	00	12	00	00	00	01	00	04
H + Al (mmol _c dm ⁻³)	33	21	60	33	22	53	30	15	44	27	10	41
P (mg dm ⁻³)	8,6	2,7	22,5	2,0	0,8	4,4	12,4	7,0	21,6	2,7	1,4	5,7
K (mg dm ⁻³)	95	64	166	60	37	131	102	53	215	67	37	168
Na (mg dm ⁻³)	56	40	90	38	27	72	60	32	120	46	24	90
Cu (mg dm ⁻³)	1,4	0,8	2,3	1,4	0,4	2,6	1,9	0,4	3,7	2,2	0,5	3,8
Fe (mg dm ⁻³)	69	36	115	68	40	111	105	40	230	139	71	242
Mn (mg dm ⁻³)	243	65	411	82	13	146	265	78	485	119	32	215
Zn (mg dm ⁻³)	4,1	1,9	7,6	2,4	1,0	4,4	6,2	2,7	16,3	4,6	1,2	18,1
P _{rem} (mg L ⁻¹)	43	38	50	36	30	45	47	43	52	41	32	48

⁽¹⁾ Método de extração ou determinação: pH em H₂O e em KCl 1 mol L⁻¹; relação solo:solução de 1:2,5; carbono orgânico (CO): Walkley - Black; nitrogênio total (N): Kjeldahl; Al, Ca e Mg: KCl 1 mol L⁻¹; P, K, Na, Cu, Zn, Mn e Fe: Mehlich-1; H + Al: Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0; e P remanescente (P_{rem}) segundo Alvarez V. & Dias, 1999.

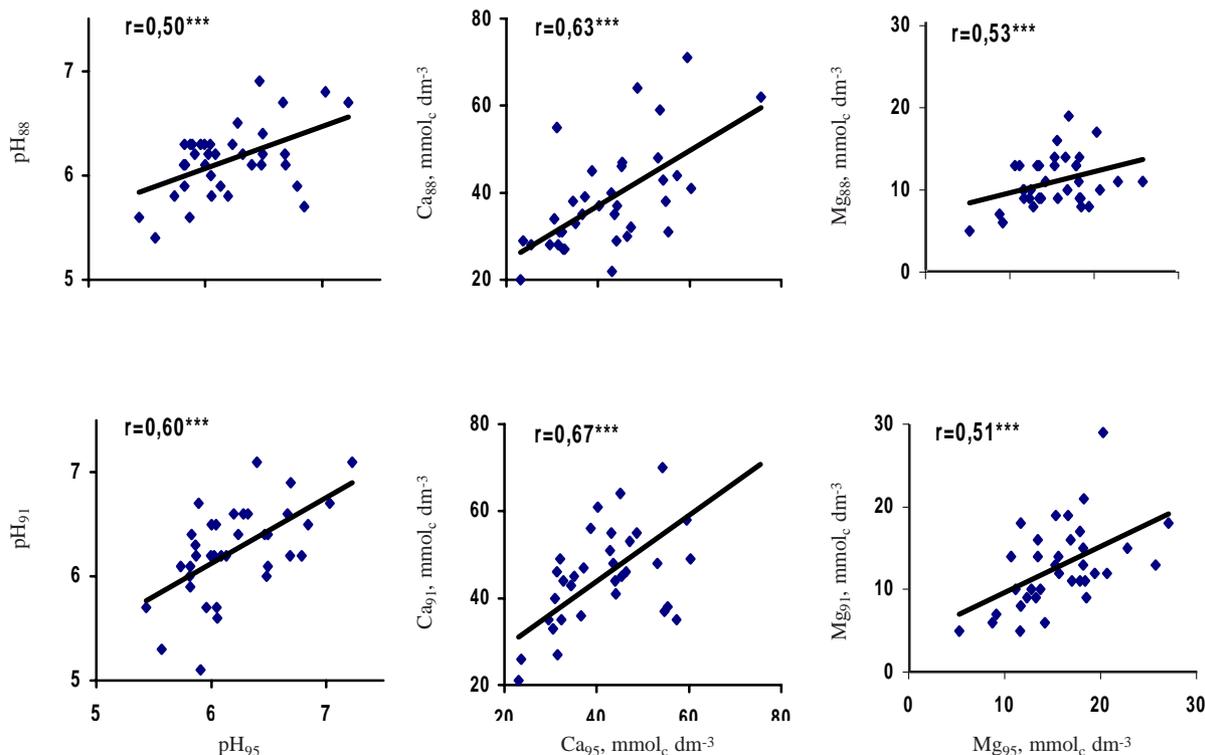


Figura 1. Correlações entre uma mesma característica química do solo (pH, Ca ou Mg) no ano de 1995 com os anos de 1988 e 1991, para 36 talhões de cacau. * significativo a 0,1%.**

nos anos de 1988, 1991 e 1995, respectivamente. Contudo, não se verificou proporcionalidade de K entre os anos, considerando as baixas correlações obtidas ($r_{(95/88)} = 0,30$, $p < 0,05$ e $r_{(95/91)} = 0,10^{ns}$), evidenciando maiores alterações desse nutriente no solo no tempo, provocadas pelas entradas ou pelas perdas. Provavelmente, as adubações, que vêm sendo feitas de acordo com análises de solo e variam de zero a $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O , constituem o fator mais importante para a ausência de correlação entre os teores de K ao longo dos anos.

O teor de P avaliado em 1995 não se correlacionou significativamente com os de anos anteriores ($r_{(95/88)} = 0,15$ e $r_{(95/91)} = -0,09$) e, diferentemente do K, verificou-se que houve aumento do P disponível no solo, com seu teor médio passando de $3,2 \text{ mg dm}^{-3}$, em 1988, para 5,7 e $10,9 \text{ mg dm}^{-3}$, em 1991 e 1995, respectivamente. Isto deveu-se ao efeito residual das adubações fosfatadas, que atingiram em média $71 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5 . Cabala-Rosand et al. (1982), avaliando o efeito da adubação em oito plantações de cacau, durante um período de dez anos, também verificaram expressivos aumentos nos teores de P disponível no solo, principalmente nas parcelas que receberam maiores doses desse nutriente.

Apesar de os teores de P e de K atuais não se correlacionarem com os teores encontrados em 1988 e 1991, eles podem ser analisados sobre o enfoque de seu maior ou menor acúmulo no solo, principalmente por serem nutrientes fornecidos pelas adubações, as quais foram baseadas em combinações de NPK. Independentemente da disponibilidade de água, da textura e da profundidade do solo, o P disponível sempre apresentou efeito direto, significativo e positivo, apesar de apresentar algumas correlações lineares negativas e significativas com as produtividades (Quadros 2, 3, 4 e 5). Cadima Z. & Alvim (1973) encontraram correlação positiva entre o P disponível nos horizontes A e C e a produtividade do cacau em 14 fazendas de cacau do sul da Bahia.

Observa-se que não houve efeito direto significativo do P da camada subsuperficial sobre a produtividade em anos secos (Quadros 3 e 5). Os efeitos positivos do P foram, de modo geral, mais significativos para a produtividade nos anos mais chuvosos (Quadros 2, 4 e 5), provavelmente por ser ele transportado no solo basicamente por difusão, mecanismo comandado pela disponibilidade de água no solo. A maior significância dos efeitos diretos do

Quadro 2. Desdobramentos das correlações em efeitos diretos e indiretos⁽¹⁾, entre as produtividades médias do cacau e características químicas na profundidade de 0-20 cm, para 14 talhões com solos de textura argilosa

Variável	N	P	Cu	Fe	Zn	P _{rem}	Total ⁽²⁾	
Considerando a média das maiores produtividades (anos mais chuvosos)								
N	<u>1,32**</u>	-0,02	-0,29	-0,52	-0,10	0,00	0,39°	
P	-0,05	<u>0,54**</u>	-0,88	0,27	0,08	-0,20	-0,24	
Cu	-0,19	-0,24	<u>1,98**</u>	-0,63	-0,34	0,07	0,64**	
Fe	-0,69	0,14	-1,24	<u>1,01**</u>	0,27	-0,04	-0,55**	
Zn	0,29	-0,09	1,52	-0,61	<u>0,45*</u>	-0,03	0,63**	
P _{rem}	-0,01	0,31	-0,40	0,12	-0,04	<u>-0,35**</u>	-0,36°	
R ² = 0,95**; efeito da variável residual = 0,22.								
	CO	N	P	Cu	Fe	Zn	P _{rem}	Total ⁽²⁾
Considerando a média das menores produtividades (anos mais secos)								
CO	<u>-0,40°</u>	0,94	0,15	-0,93	0,12	0,06	-0,04	-0,11
N	-0,24	<u>1,57**</u>	-0,01	-0,23	-0,46	-0,13	0,00	0,50*
P	-0,16	-0,06	<u>0,35*</u>	-0,72	0,23	0,11	-0,21	-0,46*
Cu	0,23	-0,23	-0,16	<u>1,62**</u>	-0,55	-0,47	0,07	0,52*
Fe	-0,05	-0,82	0,09	-1,01	<u>0,87**</u>	0,37	-0,04	-0,59*
Zn	0,04	0,35	-0,06	1,25	-0,53	<u>-0,61*</u>	-0,03	0,40°
P _{rem}	-0,05	-0,02	0,20	-0,33	0,11	<u>-0,05</u>	<u>-0,36*</u>	-0,50*
R ² = 0,93**; efeito da variável residual = 0,27.								

⁽¹⁾ Leituras dos efeitos diretos na diagonal (sublinhado) e dos efeitos indiretos na horizontal. ⁽²⁾ Coeficiente de correlação linear simples (r). **, * e ° significativos a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 3. Desdobramentos das correlações em efeitos diretos e indiretos⁽¹⁾, entre as produtividades médias do cacaueteiro e características químicas na profundidade de 0-20 cm, para 22 talhões com solos de texturas média ou arenosa

Variável	pH	Ca	Mg	K	Cu	Total ⁽²⁾
Considerando a média das maiores produtividades (anos mais chuvosos)						
pH	<u>-0,56</u> [°]	0,52	-0,12	-0,19	0,22	-0,13
Ca	-0,46	<u>0,64</u> *	-0,22	-0,16	0,32	0,12
Mg	-0,18	0,37	<u>-0,38</u> [°]	-0,11	0,35	0,05
K	-0,28	0,27	-0,11	<u>-0,38</u> *	0,21	-0,29 [°]
Cu	-0,20	0,32	-0,21	-0,12	<u>0,64</u> **	0,43*

R² = 0,52*; efeito da variável residual = 0,69

	pH	CO	Mg	P	K	Mn	Zn	Total ⁽²⁾
Considerando a média das menores produtividades (anos mais secos)								
pH	<u>-0,82</u> **	0,14	-0,13	0,27	-0,53	0,64	0,11	-0,32 [°]
CO	-0,16	<u>0,72</u> **	-0,03	0,17	-0,51	-0,09	-0,09	0,02
Mg	-0,26	0,05	<u>-0,39</u> *	0,14	-0,31	0,47	0,02	-0,29 [°]
P	-0,35	0,20	-0,09	<u>0,61</u> *	-0,75	0,10	-0,02	-0,30 [°]
K	-0,41	0,35	-0,12	0,44	<u>-1,06</u> **	0,52	0,09	-0,19
Mn	-0,48	-0,06	-0,17	0,05	-0,50	<u>1,10</u> **	0,20	0,15
Zn	-0,20	-0,15	-0,02	-0,02	-0,23	0,50	<u>0,44</u> *	0,32 [°]

R² = 0,71**; efeito da variável residual = 0,53

⁽¹⁾ Leituras dos efeitos diretos na diagonal (sublinhado) e dos efeitos indiretos na horizontal. ⁽²⁾ Coeficiente de correlação linear simples (r). **, * e ° significativos a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 4. Desdobramentos das correlações em efeitos diretos e indiretos⁽¹⁾, entre as produtividades médias do cacaueteiro e características químicas na profundidade de 30-50 cm, para 14 talhões com solos de textura argilosa

Variável	CO	Ca	Mg	P	K	Cu	Fe	Zn	P _{rem}	Total ⁽²⁾
Considerando a média das maiores produtividades (anos mais chuvosos)										
CO	<u>0,69</u> **	-0,18	-0,11	-0,13	-0,36	-0,04	0,18	-0,05	0,03	0,03
Ca	-0,10	<u>1,22</u> **	-0,39	0,15	-0,14	0,25	0,12	-0,24	-0,47	0,40 [°]
Mg	0,13	0,78	<u>-0,60</u> **	0,07	-0,15	0,17	0,16	-0,18	-0,23	0,16
P	-0,16	0,33	-0,08	<u>0,56</u> *	-0,05	-0,11	-0,22	0,10	-0,68	-0,31
K	0,45	0,32	-0,16	0,05	<u>-0,54</u> *	0,15	0,31	-0,12	-0,30	0,16
Cu	-0,06	0,57	-0,20	-0,12	-0,15	<u>0,53</u> *	0,43	-0,43	0,06	0,62**
Fe	-0,20	-0,24	0,15	0,20	0,28	-0,36	<u>-0,62</u> **	0,30	-0,20	-0,69**
Zn	0,05	0,42	-0,15	-0,08	-0,10	0,33	0,26	<u>-0,70</u> **	0,24	0,27
P _{rem}	-0,02	0,60	-0,14	0,40	-0,17	-0,03	-0,13	0,18	<u>-0,95</u> **	-0,26

R² = 0,97**; efeito da variável residual = 0,17

	CO	Ca	Mg	K	Fe	Zn	P _{rem}	Total ⁽²⁾
Considerando a média das menores produtividades (anos mais secos)								
CO	<u>0,47</u> **	-0,14	-0,13	-0,22	0,25	-0,04	0,02	0,21
Ca	-0,07	<u>0,93</u> **	-0,44	-0,09	0,16	-0,16	-0,26	0,07
Mg	0,09	0,60	<u>-0,68</u> **	-0,09	0,21	-0,12	-0,13	-0,12
K	0,31	0,24	-0,19	<u>-0,34</u> [°]	0,42	-0,08	-0,16	0,20
Fe	-0,14	-0,18	0,17	0,17	<u>-0,83</u> **	0,20	-0,11	-0,71**
Zn	0,04	0,32	-0,17	-0,06	0,35	<u>-0,47</u> **	0,13	0,14
P _{rem}	-0,02	0,46	-0,16	-0,11	-0,17	0,12	<u>-0,52</u> *	-0,40 [°]

R² = 0,93**; efeito da variável residual = 0,27

⁽¹⁾ Leituras dos efeitos diretos na diagonal (sublinhado) e dos efeitos indiretos na horizontal. ⁽²⁾ Coeficiente de correlação linear simples (r). **, * e ° significativos a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 5. Desdobramentos das correlações em efeitos diretos e indiretos⁽¹⁾, entre as produtividades médias do cacaueteiro e características químicas na profundidade de 30-50 cm, para 22 talhões com solos de texturas média ou arenosa

Variável	CO	pH	P	K	Cu	Total ⁽²⁾
Considerando a média das maiores produtividades (anos mais chuvosos)						
CO	<u>-0,30*</u>	0,19	0,12	0,05	-0,27	-0,22
pH	0,13	<u>-0,43*</u>	0,06	-0,21	0,41	-0,04
P	-0,07	-0,06	<u>0,47**</u>	0,04	-0,27	0,11
K	0,03	-0,18	-0,04	<u>-0,49**</u>	0,36	-0,32°
Cu	0,09	-0,19	-0,14	-0,19	<u>0,91**</u>	0,48*

R² = 0,72**; efeito da variável residual = 0,52

	pH	N	Ca	Cu	Fe	Zn	P _{rem}	Total ⁽²⁾
Considerando a média das menores produtividades (anos mais secos)								
pH	<u>-1,55**</u>	-0,05	0,57	0,30	0,18	0,03	0,07	-0,45*
N	0,34	<u>0,24°</u>	-0,18	0,07	0,13	0,01	-0,21	0,39*
Ca	-1,25	-0,06	<u>0,71*</u>	0,41	0,14	0,02	-0,22	-0,25
Cu	-0,69	0,03	0,43	<u>0,67**</u>	0,24	0,09	-0,44	0,31°
Fe	0,37	-0,04	-0,14	-0,21	<u>-0,75**</u>	0,21	0,26	-0,30°
Zn	-0,11	0,01	0,03	0,13	-0,37	<u>0,44*</u>	-0,10	0,03
P _{rem}	-0,14	-0,07	-0,20	-0,39	-0,26	-0,05	<u>0,77**</u>	-0,34°

R² = 0,80**; efeito da variável residual = 0,45

⁽¹⁾ Leituras dos efeitos diretos na diagonal (sublinhado) e dos efeitos indiretos na horizontal. ⁽²⁾ Coeficiente de correlação linear simples (r). **, * e ° significativos a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste F.

P na superfície (Quadros 3, 4, 5 e 6) justifica-se pelo fato de a maior parte do sistema radicular do cacaueteiro, principalmente das raízes finas, encontrar-se até à profundidade de 10 cm (Cadima Z., 1970; Cadima Z. & Coral, 1972; Kummerow et al., 1981). Isto indica que o P disponível dos primeiros centímetros do solo é muito importante para a nutrição dessa planta.

Na superfície, onde os teores de P refletem o efeito residual das adubações, as correlações lineares simples entre o P e as produtividades dos anos mais secos mostram-se significativas e negativas (Quadros 2 e 3). Correlações simples, negativas, como essas entre a produtividade e o P do solo, nutriente que dificilmente atinge níveis tóxicos às plantas, confirmam que os coeficientes de correlação, apesar de serem de grande utilidade na quantificação da magnitude e direção da relação natural entre fatores, não dão a exata importância relativa dos efeitos diretos e indiretos desses fatores (Cruz & Regazzi, 1994). Isto pode gerar equívocos a respeito da relação entre eles por não avaliar o efeito conjunto de vários fatores (Santos et al., 1995). Contudo, o desdobramento dessa correlação, por meio da análise de trilha, apontou efeito direto positivo do P sobre a produtividade (Quadros 2 e 3).

As correlações negativas e significativas entre as produtividades verificadas nos anos secos e o P disponível certamente estão relacionados com o fato

de que o extrator Mehlich-1, sensível à capacidade tampão de P, extrai mais facilmente o P em solos com menor capacidade tampão. Esses solos geralmente têm menor capacidade de armazenamento de água, apresentando menor potencial produtivo em anos secos. Esse fato é evidenciado pela correlação significativa entre o P disponível e o P_{rem} da camada superficial (r = 0,47, p < 0,01).

Independentemente da disponibilidade de chuva, o K não mostrou efeito, direto ou total, positivo e significativo (p > 0,10) sobre a produtividade. Seu efeito, quando significativo, sempre foi negativo (Quadros 3, 4 e 5) e, de modo geral, mais significativo para os talhões com solo de textura mais grosseira (Quadros 3 e 5) do que para os talhões mais argilosos (Quadro 4), uma vez que, naqueles talhões, os teores de K apresentavam-se mais altos (Quadro 1). Esses efeitos negativos possibilitam formular algumas hipóteses: (1) a exportação de K nos talhões menos produtivos seria menor e, conseqüentemente, o nutriente acumular-se-ia mais; (2) as adubações potássicas seriam elevadas em alguns talhões, o que contribuiria para elevar os teores de K no solo, havendo efeito antagônico entre esse nutriente e outros nutrientes no processo de absorção, e (3) os teores mais altos de K no solo estariam acima do nível crítico e, ou, outros nutrientes seriam mais limitantes, não permitindo a obtenção de maiores produtividades.

Um fato é evidente: os teores médios de K e de Na, independentemente da textura e da profundidade do solo, são relativamente altos (Quadro 1), os quais podem estar apresentando, de certo modo, efeito competitivo por sítios de absorção com outros nutrientes ou provocando um desbalanço nutricional na planta. Gama-Rodrigues (1993), em revisão sobre o K na cultura cacaueteira, apontou que, apesar do K ser o nutriente que geralmente mais se acumula nos tecidos do cacaueteiro, várias observações e pesquisas de campo indicavam poucas ou nulas respostas à adubação potássica. Esse relato pode ser confirmado, até certo nível, pelos trabalhos que apontam ausência de correlação significativa entre a produtividade do cacaueteiro e o K disponível do solo (Cadima Z. & Alvim, 1973) ou pouca contribuição das adubações potássicas para aumento da produtividade (Morais et al., 1978). Contudo, respostas positivas do cacaueteiro à adubação com K têm sido verificadas para solos com teores de K bem mais baixos do que aqueles encontrados neste trabalho (Cabala-Rosand et al., 1982).

O magnésio foi outro nutriente que apresentou efeito direto negativo e significativo sobre as produtividades (Quadros 3 e 4), indicando que esse elemento também estaria elevado no solo de alguns talhões. Apesar de seu teor médio estar dentro da faixa de 13 a 16 mmol_c dm⁻³, considerada como adequada para a cultura (Malavolta, 1987), há talhões com valores bem altos de Mg (Quadro 1). Alguns trabalhos, como o de Cadima Z. & Alvim (1973), apontam o cacaueteiro como uma planta exigente em Mg, mas, segundo Cabala-Rosand et al. (1989), ainda são necessários estudos para definir faixas de respostas de plantações adultas de cacau, tanto para o Mg como para o Ca.

O Ca, principalmente o da camada mais profunda, mostrou efeito direto positivo e significativo sobre a produtividade do cacaueteiro, independentemente da disponibilidade de chuva (Quadros 3, 4 e 5). Contudo, correlações lineares simples entre o teor de Ca e a produtividade só foram significativas para os anos mais chuvosos, principalmente para os talhões de textura argilosa. Os coeficientes de correlação encontrados foram de 0,42 ($p < 0,10$) e 0,40 ($p < 0,10$), respectivamente, nas camadas de 0-20 e 30-50 cm de profundidade. Para os talhões de textura mais grosseira, o Ca na camada de 30-50 cm também se correlacionou significativamente com a produtividade dos anos mais chuvosos ($r = 0,29$, $p < 0,10$).

Para os talhões mais argilosos, o N-total da superfície apresentou efeitos, direto e total, positivos e significativos (Quadro 2) e o CO da subsuperfície também apresentou efeito direto positivo e significativo (Quadro 4). O teor de N na camada de 30-50 cm, dos talhões mais argilosos, apesar de também se correlacionar significativamente com a produtividade dos anos mais secos ($r = 0,50$, $p < 0,05$), não foi mantido no modelo porque seu efeito direto não foi significativo ($p > 0,10$).

De modo geral, os efeitos positivos do N e do CO foram mais significativos para os talhões mais argilosos (Quadros 2 e 4) do que para os de textura mais grosseira (Quadros 3 e 5), possivelmente em virtude da intrínseca relação entre matéria orgânica e granulometria do solo.

Para os talhões com solo de textura mais grosseira, o CO da camada de 0-20 cm também apresentou efeito direto positivo e significativo sobre a produtividade dos anos mais secos (Quadro 3). Todavia, seu efeito direto mostrou-se negativo na camada de 0-20 cm, para os talhões mais argilosos e em anos mais secos (Quadro 2), e na camada de 30-50 cm, para os talhões menos argilosos e em anos mais chuvosos (Quadro 5).

Coefficientes de correlações lineares simples, significativos, entre a produtividade e os teores de N ou de CO, dos talhões com textura mais grosseira, só foram observados na subsuperfície e para anos secos, sendo iguais a 0,30 ($p < 0,10$) para o N e 0,39 ($p < 0,05$) para o CO.

O pH apresentou-se elevado em algumas talhões, principalmente para os solos de textura mais grosseira (Quadro 1), o que certamente favoreceu o efeito direto negativo do pH sobre a produtividade (Quadros 3 e 5). Ressalta-se que, em anos mais secos, seus efeitos, direto e total, sempre mostraram-se mais significativos que em anos mais chuvosos. De modo geral, isto também foi observado para o Mg e o K, o que indica que as plantas dos talhões mais férteis sofreram mais os efeitos da falta de água em anos secos. Possivelmente, tais solos são mais jovens, mais rasos e, em muitos casos, mais siltosos, com menor capacidade de armazenar água disponível.

Na Bahia, o predomínio do cultivo do cacaueteiro em solos de média a alta fertilidade não motivou muitos estudos com micronutrientes. Contudo, a inclusão de solos de menor fertilidade no processo produtivo, o uso intensivo de corretivos e adubos apenas com macronutrientes, aliado às exportações da cultura e às perdas naturais de nutrientes, podem provocar redução na disponibilidade de micronutrientes e sua consequente deficiência para o cacaueteiro (Santana & Igue, 1972; Nakayama et al., 1988), especialmente para solos com pH elevado (Lindsay, 1979). Vários solos representativos da região cacaueteira da Bahia apresentam teores bastante variados de micronutrientes (Santana & Igue, 1972). Neste contexto, o Cu, independentemente da textura e da profundidade do solo, foi o nutriente que mais apresentou efeitos, direto e total, significativos sobre as produtividades, principalmente em anos mais chuvosos (Quadros 2, 3, 4, e 5). De modo geral, os efeitos do Cu foram mais significativos que os efeitos de outros nutrientes, indicando ter esse nutriente limitado mais a produtividade.

Santana & Igue (1972) observaram baixos teores de Cu e também de Zn nos Latossolos da região cacauzeira da Bahia. Neste trabalho, os teores médios de Cu extraídos pelo Mehlich-1, na profundidade de 0-20 cm (Quadro 1), foram inferiores aos obtidos em parcelas de um experimento com adubação NPK, realizado por Cabala-Rosand et al. (1982). Esses autores revelaram que as pulverizações periódicas com fungicidas cúpricos, realizadas durante o período experimental, devem ter contribuído para aumentar a disponibilidade desse nutriente no solo, visto que, em áreas circunvizinhas, os teores de Cu foram bem menores, na ordem de 2,0 mg kg⁻¹, semelhantes aos encontrados neste estudo. É interessante lembrar que o ataque de doenças ao cacauzeiro é mais severo na região litorânea (mais úmida) e, conseqüentemente, o controle via pulverizações com Cu é mais intenso que em áreas do interior, como é o caso do município de Itagibá.

Dos micronutrientes extraídos pelo Mehlich-1, Zn, Mn e Cu mostraram alta correlação entre si. Os coeficientes de correlação linear simples foram, na camada superficial, de 0,58 ($p < 0,01$) entre Cu e Zn; de 0,76 ($p < 0,01$) entre Cu e Mn e de 0,53 ($p < 0,01$) entre Zn e Mn; na camada subsuperficial, foram de 0,36 ($p < 0,05$), 0,83 ($p < 0,01$) e 0,44 ($p < 0,01$) entre esses mesmos nutrientes. Essas correlações significativas e positivas indicam que os solos mais ricos em Cu também foram mais ricos em Zn e Mn. Como o Cu apresentou alta correlação com a produtividade, conseqüentemente, o Zn e o Mn também se correlacionaram com a produtividade, porém seus efeitos diretos não mostraram relação clara entre seus teores no solo e a produtividade. O efeito direto do Mn só foi significativo para os talhões com solo de textura mais grosseira e em anos mais secos, justamente numa das poucas análises de trilha em que o Cu não foi mantido no modelo (Quadro 3); o efeito direto do Zn mostrou-se positivo para os talhões com solo de textura mais grosseira (Quadros 3 e 5) e negativo para os de textura mais fina (Quadros 2 e 4).

Neste trabalho, os teores médios de Zn e de Mn extraídos pelo Mehlich-1 (Quadro 1), na profundidade de 0-20 cm, mostraram-se superiores, enquanto os de Fe foram semelhantes aos observados por Cabala-Rosand et al. (1982).

Para os talhões de textura mais argilosa, o Fe extraível pelo Mehlich-1 correlacionou-se negativa e significativamente com a produtividade (Quadros 2 e 4), apresentando seu teor na camada de 30-50 cm de profundidade efeito direto negativo e significativo (Quadro 4). Na camada de 0-20 cm, o efeito direto do Fe mostrou-se positivo, porém, nesse caso, a alta correlação entre Cu e Fe ($r = -0,63$, $p < 0,01$) propiciou, na análise de trilha, elevados efeitos indiretos do Fe via Cu (Quadro 2).

Para as áreas de textura mais grosseira, o Fe só se correlacionou significativa e negativamente com

a produtividade dos anos mais secos, tendo sido, na subsuperfície, seu efeito direto também negativo (Quadro 5). O Fe é um nutriente cuja atividade depende do pH, do potencial de oxirredução e do mineral de Fe mais solúvel presente no solo (Lindsay, 1979). Na verdade, ele acaba influenciando em uma série de características e propriedades do solo, dificultando uma interpretação mais enfática e conclusiva. De certo modo, o Fe extraível pelo Mehlich-1 também está relacionado com o teor de matéria orgânica e com a textura do solo, refletindo também sua capacidade tampão, como pode ser visto pelos coeficientes de correlações lineares simples (r) significativos, entre os teores de Fe das camadas de 0-20 e 30-50 cm de profundidade, respectivamente, de: -0,53 ($p < 0,01$) e -0,48 ($p < 0,01$), com o CO; -0,59 ($p < 0,01$) e -0,24 ($p < 0,10$), com o N; 0,64 ($p < 0,01$) e 0,76 ($p < 0,01$), com a areia fina; e -0,27 ($p < 0,10$) e -0,75 ($p < 0,01$), com a argila. Ou seja, maiores teores de Fe extraível pelo Mehlich-1 foram verificados em solos mais arenosos e mais pobres em matéria orgânica, conseqüentemente, com menor capacidade tampão.

Os valores do P_{rem} (Quadro 1), propriedade que também reflete a capacidade tampão do solo (Alvarez V., 1996), foram bastante superiores aos comumente apontados na literatura. Para os talhões com solos argilosos, independentemente da profundidade e da disponibilidade de chuva, o P_{rem} também apresentou efeitos, direto e total, negativos sobre a produtividade (Quadros 2 e 4), indicando que, para o grupo de talhões com solos argilosos, os mais produtivos tinham maior capacidade tampão de P.

CONCLUSÕES

1. O sistema de produção de cacau mostrou ser um ambiente conservacionista nutricionalmente, visto que, de modo geral, a fertilidade atual refletiu uma condição pretérita de, no mínimo, sete anos; exceção foi verificada para P e K, nutrientes que vêm sendo fornecidos pelas adubações.
2. O cobre foi o nutriente que mais limitou a produtividade do cacauzeiro. Cálcio, P e N também limitaram a produtividade da cultura, principalmente em anos mais chuvosos.
3. Os valores de pH, K e Mg do solo apresentaram-se altos em alguns talhões, refletindo efeitos negativos dessas características sobre a produtividade.
4. De modo geral, em anos mais secos, os talhões mais produtivos estavam sobre solos menos férteis, com maior capacidade tampão de P e com maior teor de matéria orgânica.
5. Para os talhões com solos argilosos, os mais produtivos, independentemente da disponibilidade de chuva, tinham maior capacidade tampão de P.

LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, H.A. Influência de elementos meteorológicos no lançamento foliar, na floração e frutificação do cacauero (*Theobroma cacao* L.). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1986. 111p. (Tese de Mestrado)
- ALVAREZ V., V.H. Correlação e calibração de métodos de análise de solo. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.615-646.
- ALVAREZ V., V.H. & DIAS, L.E. Manual de determinações químicas e físico-químicas de solos. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 1999. (no prelo)
- ALVIM, P.T. Las necesidades de agua del cacao. Turrialba, 10:6-16, 1960.
- ALVIM, P.T. Relações entre fatores climáticos e produção do cacauero. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EM CACAO, 10., Santo Domingo, 1987. Actas. Lagos, Cocoa Producers' Alliance, 1988. p.159-167.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em estrato de solo e material vegetal. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- CABALA-ROSAND, P.; SANTANA, C.J.L. & MIRANDA, E.R. Resposta do cacauero "Catongo" a doses de fertilizantes no Sul da Bahia, Brasil. R. Theobroma, 12:203-216, 1982.
- CABALA-ROSAND, P.; SANTANA, M.B.M. & SANTANA, C.J.L. Exigências nutricionais e adubação do cacauero. Campinas, Fundação Cargil, 1989. 71p.
- CADIMA Z., A. Estudo do sistema radicular do cacauero em alguns tipos de solos da região cacauera do Sul da Bahia. Itabuna, CEPLAC/CEPEC, 1970. 31p. (Boletim Técnico, 05)
- CADIMA Z., A. & ALVIM, P.T. Algunos factores del suelo asociados con la productividad del cacaoero en Bahia, Brazil. R. Theobroma, 3:13-26, 1973.
- CADIMA Z., A. & CORAL, F.J. Sistema radicular do cacauero em duas unidades de solos do estado de São Paulo. R. Theobroma, 2:16-22, 1972.
- CRUZ, C.D. & REGAZZI, A.J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento de plantas. Viçosa, UFV, 1994. 390p.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo (metodologia). Viçosa, UFV, 1981. 17p. (Boletim de Extensão 29)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- GAMA-RODRIGUES, A.C. O potássio na cultura do cacau. Agrotrópica, 5:1-12, 1993.
- KUMMEROW, J.; KUMMEROW, A. & ALVIM, P. Root biomass in a mature cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation. R. Theobroma, 11:77-85, 1981.
- LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York, John Wiley & Sons, 1979. 449p.
- MALAVOLTA, E. Manual de calagem e adubação das principais culturas. São Paulo, Agronômica Ceres, 1987. 496p.
- MORAIS, F.I.; SANTANA, C.J.L. & CHEPOT, R.E. Reposta do cacauero ao nitrogênio, fósforo e potássio em solos da região cacauera da Bahia, Brasil. R. Theobroma, 8:31-41, 1978.
- MOURA FILHO, W. Métodos de campo e laboratório: levantamento e física do solo. Viçosa, Universidade Rural do Estado de Minas Gerais, 1964. 24p.
- NAKAYAMA, L.H.I.; SANTANA, C.J.L. & PINTO, L.R.M. Resposta do cacauero em desenvolvimento à calagem. R. Theobroma, 18:229-240, 1988.
- SANTANA, C.J.L. & IGUE, K. Formas de micronutrientes em solos da região cacauera da Bahia. Turrialba, 22:73-80, 1972.
- SANTOS, C.A.F.; REIS, M.S.; CRUZ, C.D.; SEDIYAMA, C.S. & SEDIYAMA, T. Adequação de modelos no estudo do coeficiente de trilha dos componentes primários e secundários de progênies F₆ de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). R. Ceres, 42:111-121, 1995.
- SUPERINTENDENCIA DE ESTUDO ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA - SEL. Atributos climáticos do estado da Bahia. Salvador, 1988. 85p. (Série estudos e Pesquisas, 38)
- SOUZA Jr., J.O. Fatores edafoclimáticos que influenciam a produtividade do cacauero cultivado no sul da Bahia, Brasil. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 146p. (Tese de Mestrado)