

ISSN 0104-1347

Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento

Operational problems with a weighing lysimeter during a rainy season and dry windy days

Antonio Roberto Pereira², Alailson Venceslau Santiago³, Selma Regina Maggioletto⁴ e Marcos Vinicius Folegatti⁵

Resumo - Um lisímetro de pesagem acoplado a três células de carga foi instalado em Piracicaba, SP, visando a medir rotineiramente a evapotranspiração de referência (ET_o) para se ter um conjunto de dados que fossem úteis nas avaliações de desempenho de modelos de estimativa. Houve dificuldades operacionais com esse tipo de lisímetro em dias com chuvas intensas, em seqüência de dias com chuvas intermitentes, e também em dias sem chuvas mas com ventos intermitentes. No caso de dias chuvosos, os problemas foram devidos ao design do lisímetro que resultou em incertezas e erros na medida da ET_o diária. Em dias secos, mas com rajadas de vento, flutuações bruscas e freqüentes na massa do lisímetro, que são impostas pelo transporte vertical de momento, inviabilizaram medidas de ET_o em escalas de tempo inferiores a uma hora. Aumentando-se o período de amostragem de 10min para 60min, eliminaram-se as pequenas flutuações, perdendo-se detalhes de medida. Para a escala diária, a medida lisimétrica foi menos crítica, mas seu valor foi afetado pelo período usado para amostragem (10, 30, ou 60min), embora as diferenças tenham sido pequenas (< 2%). Os resultados indicam que medidas lisimétricas nem sempre são tão exatas quanto se espera de um sistema admitido como padrão.

Palavras-chave: evapotranspiração, célula de carga.

Abstract - A weighing lysimeter coupled with three load cells was built for measuring reference evapotranspiration (ET_o) on a routine basis, in Piracicaba, SP, Brazil, in order to have a data set available for testing evapotranspiration models. Operational difficulties with this kind of lysimeter during days with high intensity rainfall, during a sequence of days with intermittent rains, and also during dry windy days are discussed. During rainy days, the problems were due to the design of the lysimeter which resulted in uncertainties and errors in the measured ET_o values. During dry but windy days the lysimeter output is not steady, and the frequent and large weight fluctuations affected the lysimeter performance in time scales smaller than 1 hour. Increasing the average period from 10min to 60min eliminated the small fluctuations but the details of the short time scales were also lost. For the daily time scale the lysimeter performance was less critical, but the daily ET_o values were affected by the averaging period (10, 30, or 60min), even though the differences were less than 2%. The results indicate that lysimeter measurements are not always as accurate as it is expected from a measuring system taken as standard.

Key words: evapotranspiration, load cell.

¹ Extraído da Dissertação de Mestrado do segundo autor

² Prof. Associado, Dep. Ciências Exatas (DCE), ESALQ – USP; Piracicaba, SP, 13418-900; arpereir@esalq.usp.br

³ CPG em Física do Ambiente Agrícola, Esalq/USP, DCE, santiago@esalq.usp.br

⁴ Pesq. Visitante, DCE, ESALQ/USP; srmaggio@hotmail.com

⁵ Prof. Associado, Dep. Eng. Rural, ESALQ/USP; mvfolega@esalq.usp.br

Introdução

A evapotranspiração de referência (ET_o), apesar de bem-definida e simples do ponto de vista teórico, é complexa e de difícil determinação no que tange à sua medida direta a campo (PEREIRA et al., 1997), não só quanto à variabilidade espacial da superfície, que introduz incertezas quanto à representatividade das medidas, mas também quanto às dificuldades operacionais dos métodos. Medida direta de ET_o requer instalações e equipamentos especiais (lisímetros) que medem variações de massa de um grande volume de solo vegetado, sendo também onerosa porque tais estruturas requerem sensores de muita sensibilidade. Tais estruturas se justificam apenas em condições experimentais com observações rigorosas das condições de contorno que visam a minimizar os efeitos advectivos em época (ou região) de deficiência hídrica. CAMARGO (1962) e van BAVEL & MYERS (1962) sugerem que sejam utilizados três lisímetros para que se tenha uma estimativa do erro de medida, embora isso nem sempre seja viável na prática. GANGOPADHYAYA et al. (1966), ABOUKHALED et al. (1982), e ALLEN et al. (1991a) recomendam os lisímetros de pesagem como sendo aqueles de resultados mais confiáveis.

PRUITT & ANGUS (1960), CAMARGO (1962), GANGOPADHYAYA et al. (1966), PRUITT & LOURENCE (1985), e ALLEN et al. (1991b) alertam para o problema de se manter idênticas as condições dentro e fora do lisímetro para se evitar os efeitos oásis (área úmida circundada por área seca) e buquê (plantas maiores dentro do lisímetro). Visualmente, a presença do lisímetro deve ser pouco perceptível para que tais efeitos se minimizem.

Um lisímetro de pesagem determina diretamente a evapotranspiração (ET), durante um intervalo de tempo, pela variação da massa de um volume de solo vegetado e confinado por paredes impermeáveis. Dependendo da sensibilidade da balança pode-se medir a ET em intervalos de tempo inferiores a um dia, e a variação da massa tem sido medida por células de carga que alteram uma corrente elétrica variando sua resistência em função de microdeformação causada pela variação da massa sustentada. A microeletrônica deu grande impulso aos sistemas de aquisição e armazenamento de dados e novos materiais têm sido utilizados na construção das células de carga tornando-as cada vez mais sensíveis. A exatidão de um lisímetro de pesagem depende da resolução que é o número de casas decimais da

mensuração; da precisão que é a estabilidade da mensuração; e da acurácia que é a diferença entre valor mensurado e o valor verdadeiro (HOWELL et al., 1991). A acurácia desses sistemas depende das características da célula de carga e do sistema de coleta de dados (SILVA et al., 1999).

Lisímetro de pesagem também apresenta alguns problemas que dificultam sua operação em escalas de tempo reduzido. PRUITT & ANGUS (1960), van BAVEL & MYERS (1962), ROSENBERG (1969), WANG´ATI (1972), e BERGAMASCHI et al. (1997) relatam problemas causados por ventos que provocam oscilações nas medidas do lisímetro em função de flutuações intermitentes resultantes da interação dos ventos com a vegetação. Quanto mais sensível for o sistema de medida, maior será esse efeito, e o lisímetro também pode ser adaptado para medir transporte de momento (GODDARD, 1970; PRUITT & LOURENCE, 1985).

O problema causado por vento fica bem evidente em dias sem chuva, mas com rajadas de vento, e foi aqui abordado mostrando-se os efeitos resultantes da adoção de diferentes períodos de amostragem sobre o valor medido da evapotranspiração. O presente trabalho objetiva também relatar dificuldades de operação de um lisímetro de pesagem em dias chuvosos, condição freqüente nas épocas tradicionais de cultivo no sudeste brasileiro.

Material e métodos

As medidas lisimétricas foram realizadas na área experimental de irrigação da Fazenda Areão, da ESALQ - USP, situada em Piracicaba, SP (22°42'S; 47°30'W; 546 a.n.m.m.) num lote de 35m x 90m cujo solo foi classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), com declividade média de 2,3%. A área era toda vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé) cuja altura foi mantida próxima a 0,12m por meio de cortes para simular as condições de superfície de referência (ALLEN et al., 1989 e 1998), e irrigada freqüentemente para manter o solo próximo da capacidade de campo.

O lisímetro de pesagem e sua calibração estão descritos em SILVA et al. (1999) e consistiu de um tanque interno de cimento-amianto retangular (1,20 x 0,85 x 0,65m) que se apoiava sobre uma placa de compensado naval (1,25 x 0,90 x 0,03m) de alta resistência mecânica e à umidade. Esse conjunto

era sustentado por três células de carga em forma de S (Omega Engineering, model LCCA-2K) com capacidade de pesagem de até 910kg e precisão de 0,037% da sua capacidade total.

Os sinais elétricos das células de carga foram monitorados a cada segundo por um “datalogger” (CR10, Campbell Sci., Inc.), gerando médias a cada 10min de medidas. Com esses valores médios, pode-se gerar médias para períodos maiores de integração (i.e., 30min e 60 min). Esse sistema de medida permite acompanhar a variação temporal da variação da massa do lisímetro. A evapotranspiração de um dia pode ser calculada pela diferença entre a massa no início e no fim do dia, e também pelo somatório das diferenças entre períodos consecutivos ao longo do dia.

Devido ao formato irregular da borda, a área da superfície superior do lisímetro equivale a 0,92m², e uma variação negativa de massa igual a 0,92kg corresponde à evapotranspiração (ET) de 1,0mm, isto é, $ET = \text{variação de massa}/0,92$.

Resultados e discussão

Sistemas de pesagem (células de carga) mais precisos, e mais sensíveis a pequenas variações de massa têm sido adaptados para medidas lisimétricas a campo e inúmeros são os relatos de resultados assim obtidos. No entanto, maior sensibilidade dos sensores e resolução do “datalogger” não implica necessariamente em melhor qualidade dos resultados, pois fatores incontornáveis afetam significativamente a exatidão das medidas chegando mesmo a inviabilizá-las. Por exemplo, rajadas de vento provocadas por turbilhonamentos resultam em variações intermitentes na massa do lisímetro (pressão dinâmica) gerando acréscimos e decréscimos alternados em curto intervalo de tempo sem que tenha realmente ocorrido saída ou entrada de água no lisímetro (PRUITT & ANGUS, 1960; van BAVEL & MYERS, 1962; ROSENBERG, 1969; WANG´ATI, 1972; FRITSCHEN et al., 1977). Quanto mais alta for a vegetação dentro do lisímetro maior será esse efeito, e no caso relatado por FRITSCHEN et al. (1977), uma árvore de 28m de altura teve que ser amarrada com guias elásticas às suas vizinhas para aumentar a estabilidade e distribuição de massa do lisímetro. As micro-variações positivas nas medidas inviabilizam a determinação da perda de água em escala de tempo curta (segundos), não permitindo comparações com

estimativas de modelos micrometeorológicos. Uma alternativa é diminuir a frequência das medidas, filtrando variações bruscas (van BAVEL & MYERS, 1962), e outra é aumentar o período de integração (BERGAMASCHI et al., 1997), suavizando as flutuações em períodos inferiores a uma hora.

Usando-se médias de 10min, a influência da ação do vento é mostrada na Figura 1, embora uma correlação direta não seja muito evidente. A velocidade média a intervalos de 10min foi sempre inferior a 4m s⁻¹ suavizando os picos das rajadas que foram perdidos na coleta dos dados. Nesse dia não houve chuva ou orvalho e as variações positivas na massa do lisímetro resultaram apenas do transporte de momento. Considerando-se a variação da massa entre o início e o fim do dia, resultou em $ET_o = 4,67\text{mm}$; sendo que as variações negativas de massa foram iguais a 6,37mm, e as positivas somaram a 1,70mm. Aumentando-se o período de integração para 30min, conforme sugestão de BERGAMASCHI et al. (1997), obtiveram-se os seguintes valores: $ET_o = 4,71\text{mm}$; somatório dos valores negativos = 5,51mm; e soma dos valores positivos = 0,8mm. Com período de integração de 60min, a suavização foi maior, e a diferença entre início e fim subiu para 4,77mm, a soma dos valores negativos diminuiu para 5,22mm, e o total dos valores positivos caiu para 0,45mm.

Embora os valores diários de ET_o não tenham mudado muito com os diferentes períodos de integração (menos que 2%), as diferenças encontradas para esse dia servem para ilustrar as dificuldades encontradas com um lisímetro de pesagem. Essas limitações evidenciam que tais medidas não podem ser tomadas como padrão para comparações com esti-

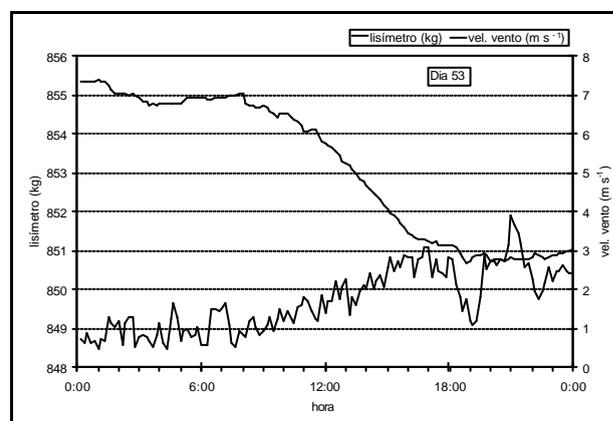


Figura 1. Velocidade média do vento (10min) a 2m de altura e variação da massa do lisímetro ao longo de um dia sem chuva.

mativas para períodos inferiores a um dia. Por limitação do “datalogger” e da quantidade de instrumentos monitorados, não foi possível verificar qual seria o efeito de se diminuir a frequência de amostragem (aumento no intervalo entre duas medidas consecutivas da mesma célula de carga) sobre o valor medido de ETo.

Outro fator externo que afeta a qualidade das medidas lisimétricas é a chuva, e, freqüentemente, os dias com ocorrência de chuvas são descartados das análises dos relatos. Mas, um sistema tão sensível deveria permitir medidas mesmo nesses dias, pois a chuva efetiva captada pelo lisímetro fica registrada pela coleta contínua de sua variação de massa, dispensando inclusive a medida da chuva em pluviômetro. No entanto, em situações em que as chuvas são muito intensas ou muito prolongadas, o lisímetro, estando sempre com umidade próxima da capacidade de campo, chega a transbordar. Por si só esse fato não deveria causar problema na medida da variação de massa do lisímetro, mas na configuração do sistema aqui utilizado ele resulta em erro significativo na determinação da evapotranspiração, pois a água transbordada pode ficar armazenada entre o fundo da caixa de cimento-amianto e a placa de compensado naval que era ligeiramente maior que a caixa (1,125m²). Essa caixa tinha as bordas externas arredondadas e uma concavidade na parte inferior facilitando o acúmulo de água nessa câmara externa. Posteriormente, essa água evapora ou escorre representando uma saída de água que não estava dentro da caixa, mas fazia parte da massa medida, resultando em erro na medida de ETo.

Um exemplo desse tipo de situação pode ser visto na Figura 2, em que houve uma seqüência de três dias com chuvas intensas e intermitentes. No primeiro dia (Dia 2) houve um acúmulo de 79,76kg resultante de uma chuva de 86,7mm, que se iniciou por volta das 4 horas da manhã e durou até as 19h30min. Daí em diante a massa do lisímetro permaneceu praticamente constante até por volta da meia-noite. Portanto, nesse dia a evapotranspiração foi muito pequena e não quantificável por esse sistema de medida. No início do próximo dia, a chuva recomeçou adicionando mais 9,41kg (10,2mm) até as 4h10. Dessa hora até as 10h30min houve decréscimo de 1,55kg (1,7mm), quando nova chuva acrescentou mais 2,87kg (3,1mm) até as 11 horas, com o lisímetro registrando 998,78kg. Com a parada da chuva, a massa do lisímetro diminuiu 2,36kg (2,6mm) até as 13h30min. Com o retorno de outra chuva intensa, o

sistema de drenagem foi acionado extraindo 79,7kg em uma hora. Mesmo com a drenagem acionada, a chuva intensa acrescentou 20,35kg em meia hora, e o lisímetro já encharcado não foi capaz de absorver tanta água em tão pouco tempo, havendo transbordamento. Às 15h30min horas o sistema de drenagem foi desligado e a chuva acrescentou mais 2,65kg até as 16 horas.

Dessa hora até as 23h20min, houve decréscimo de 14,95kg, equivalente a 16,3mm. Essa perda de água não foi devido a evapotranspiração pois, ela ocorreu no período noturno (Detalhe na Figura 2). Outra chuva de 17,9mm acrescentou mais 16,45kg em 50min, mas desde o fim dessa chuva até às 11h50min, houve uma perda de 10,08kg (11mm), com uma taxa de perda semelhante ao período noturno anterior, e também não pode ser inteiramente atribuída à evapotranspiração.

Outro exemplo desse tipo de anomalia, agora em menores proporções, pode ser visto em outra seqüência de três dias com chuvas intermitentes (Figura 3). No primeiro dia (dia 7) houve apenas acúmulo de 6,78kg resultante de uma chuva de 7,37mm, que se iniciou as 14h50min e durou até às 17h30min, apresentando em seguida um leve decréscimo de 0,7kg (0,76mm) até o final da tarde (18h30min). Daí em diante, a massa do lisímetro permaneceu constante até as 8h50min do dia seguinte, quando o sistema de drenagem extraiu 20,44kg em meia hora. Após a drenagem, a massa do lisímetro decresceu 2,11kg (2,29mm) por evapotranspiração até às 14h30min, quando ocorreu chuva forte, e o sistema de drenagem extraiu 15,66kg em meia hora. Mesmo com a drena-

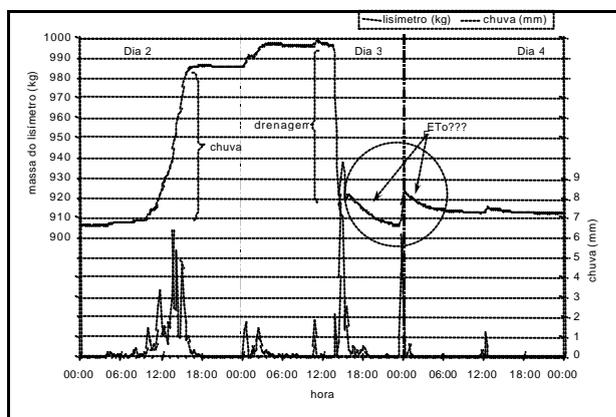


Figura 2. Variação da massa de um lisímetro de pesagem em relação à precipitação e à drenagem ocorrida no período de 02 a 04 de janeiro de 1996, apresentando valores irrealistas de ETo (Detalhe).

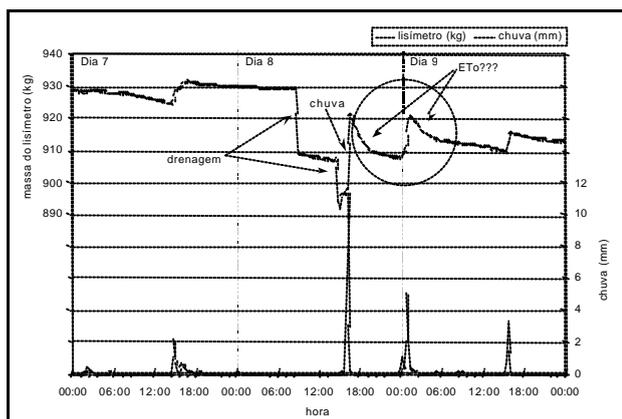


Figura 3 Variação da massa de um lisímetro de pesagem em relação à precipitação e à drenagem ocorrida no período de 07 a 09 de janeiro de 1996, apresentando valores irrealis de ETo (Detalhe).

gem ainda acionada, a chuva intensa acrescentou 4,55kg (4,95mm) em vinte minutos. Às 16 horas, o sistema de drenagem foi desligado e a chuva forte acrescentou mais 25,03kg até às 16h40min, fazendo com que o lisímetro, já encharcado, não absorvesse tanta água em intervalo de tempo tão pequeno, havendo transbordamento. Desse instante até às 23h50min, houve decréscimo de 13,29kg (14,44mm). Assim como no exemplo anterior, ficou evidente que essa perda de água não foi devido a evapotranspiração já que ela ocorreu no período noturno (detalhe na Figura 3). Outra chuva de 12,73mm acrescentou mais 11,72kg em 90min, e desde o fim desta até às 8h20min, houve perda de 8,17kg (8,88mm), com taxa de perda semelhante ao período noturno anterior e que também não pode ser inteiramente atribuída à evapotranspiração. Essa seqüência de dias de chuvas intensas e intermitentes enfatiza as dificuldades de medida da ETo em período chuvoso, mesmo com lisímetro de pesagem com registro eletrônico.

Conclusões

Embora considerado como sistema-padrão, por permitir mensuração detalhada da variação da massa, as medidas com lisímetro de pesagem com célula de carga apresentam problemas operacionais que podem resultar em valores questionáveis da evapotranspiração.

Em dias de chuvas intensas e prolongadas, o design do lisímetro de caixa de cimento-amianto apoi-

ado em compensado naval resultou em evapotranspiração de referência incompatível com os níveis de energia disponível, e esse problema é facilmente resolvido substituindo-se o material utilizado. Em dias sem ocorrência de chuvas, a medida diária da evapotranspiração é mais confiável; no entanto, a alta sensibilidade da célula de carga impossibilitou a obtenção de valores em escala de tempo menor que 60min em função do transporte vertical de momento imposto pelo vento que induziu variações positivas na massa do lisímetro sem que houvesse qualquer acréscimo real de água.

Em medidas a campo, tem pouco valor prático o uso de sistemas de pesagens mais sensíveis que o aqui relatado.

Referências bibliográficas

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and Drainage Paper, 39).
- ALLEN, R.G. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p.650-662. 1989.
- ALLEN, R.G. et al. (Ed.). **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991a. 444 p.
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R.G. et al. (Ed.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of New York Civil Engineers, 1991b. p.170-181.
- ALLEN, R.G., et al. **Crop Evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BERGAMASCHI, H., et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, Piracicaba, 1997. **Anais...** Piracicaba: SBA, 1997. p. 222-224.
- CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 163-213, 1962.
- FRITSCHEN, L.J.; HSIA, J; DORAISWAMY, P. Evapotranspiration of a Douglas fir determined with

a weighing lysimeter. **Water Resources Research**, Washington, v. 13, n. 1, p. 145-148, 1977.

GANGOPADHYAYA, M., et al. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Geneve: WMO, 1966. 121 p. (Tech. Note N° 83, WMO - N° 201, TP 105).

GODDARD, W.B. A floating drag-plate lysimeter for atmospheric boundary layer research. **Journal of Applied Meteorology**, Lancaster, v. 9, n. 2, p. 373-378, 1970.

HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; JENSEN, M.E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R.G. et al. (Ed.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 1-9.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PRUITT, W.O.; ANGUS, D.E. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. **Transactions of the American Society of**

Agricultural Engineers, Saint Joseph, v. 3, n. 2, p. 13-18, 1960.

PRUITT, W.O.; LOURENCE, F.J. Experiences in lysimetry for ET and surface drag measurements. In: **Advances in Evapotranspiration**. **American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, p. 51-69, 1985.

ROSENBERG, N.J. Evaporation and condensation on bare soil under irrigation in the East Central Great Plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, p. 557-561, 1969.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-58, 1999.

Van BAVEL, C.H.M.; MYERS, L.E. An automatic weighing lysimeter. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 43, p. 580-583, 586-588, 1962.

WANG´ATI, F.J. Lysimeter study of water use of maize and beans in East Africa. **East African Agricultural and Forestry Journal**, Nairobi, v. 2, p. 141-156, 1972.

