

REGIONALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE FU PARA ESTIMATIVA DE SÉRIES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM BACIAS SEM MONITORAMENTO

Rodrigo G. Otsuki^{1} & Dirceu S. Reis Jr.² & Francisco V. Barros³ & Eduardo S. Martins⁴*

Resumo – A equação de Fu (1981), baseada nas hipóteses de Budyko, relaciona, em escalas temporais longas, E/P com E_0/P , permitindo a estimativa da vazão média de longo período em bacias sem monitoramento. Este artigo apresenta resultados preliminares de um estudo que pretende avaliar se tal equação é também capaz de estimar séries anuais de evapotranspiração real, o que permitiria, entre outras coisas, adicionar informação valiosa para reduzir incertezas na calibração de modelos hidrológicos em bacias sem monitoramento. Para isto, foi necessário o desenvolvimento de um modelo regional do único parâmetro da equação, ω . Quatro modelos regionais, com diferentes graus de complexidade, foram derivados para o estado do Ceará. Verificou-se que o percentual da bacia sobre o embasamento cristalino, o CN, a capacidade de armazenamento de água do solo, e o grau de sazonalidade da chuva na bacia explicam 85% da variabilidade de ω observada no estado. A equação de Fu, empregada com o valor de ω estimado pelo modelo regional, foi capaz de simular a evapotranspiração anual com coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) acima de 0,90 em 10 das 16 bacias estudadas, enquanto que em apenas 2 bacias o NS ficou abaixo de 0,50.

Palavras-Chave – Bacias sem monitoramento, regionalização, equações tipo Budyko.

REGIONALIZATION OF FU'S EQUATION FOR ESTIMATION OF ANNUAL EVAPOTRANSPIRATION SERIES IN UNGAUGED BASINS

Abstract – Fu's equation (1981), based on Budyko's hypothesis, relates long term estimates of E/P and E_0/P , allowing estimation of the long term mean annual flow in ungauged basins. This paper presents preliminary results of a study whose objective is to evaluate the performance of Fu's equation in estimating annual series of evapotranspiration. This estimation can, among other things, add valuable information into the calibration of hydrologic models in ungauged basins, and perhaps reduce uncertainties in parameter estimates. In order to do so, a regional regression study for the parameter (ω) of Fu's equation was carried out. Four regional models were developed. Results show that the percentage of drainage area over the crystalline embasement, curve-number, soil water storage capacity, and the degree of seasonality of rainfall explained 85% of the observed variability of ω in the region. Fu's equation, employed with ω estimated by the regional models, was able to estimate annual series of evapotranspiration with Nash-Sutcliffe coefficient greater than 0.90 in 10 out of 16 basins used in the study, whereas in only 2 basins the NS was lower than 0.50.

Keywords – Ungauged basins, regionalization, budyko-like equations.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - PTARH, UnB, rodrigo.otsuki@gmail.com.

² Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - PTARH, UnB, dirceu.reis@gmail.com.

³ Pesquisador do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - DEHA, UFC, veniciusfb@gmail.com.

⁴ Presidente da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, espr.martins@gmail.com.

1- INTRODUÇÃO

Em escalas temporais suficientemente longas, de forma que seja possível desconsiderar as variações do armazenamento de água na bacia, pode-se afirmar que a média de longo período das vazões anuais (Q) seja igual à diferença entre as médias anuais de longo período da precipitação (P) e da evapotranspiração real (E), sendo E um dos principais componentes do balanço de energia, junto com o fluxo de calor sensível (H). Nessas escalas de tempo, é razoável admitir que o fluxo de radiação líquida disponível na superfície terrestre (R_n) será transformado em fluxo de calor latente de evaporação ($L_e E$) e fluxo de calor sensível (H), de forma que $R_n = L_e E + H$, sendo L_e o calor latente de vaporização da água. Essa clara relação entre o balanço hídrico e o balanço de energia numa dada bacia hidrográfica tem sido objeto de estudo de hidrólogos há algum tempo.

Budyko (1974) apresentou uma análise bastante elucidativa das relações entre Q e os componentes básicos do balanço de energia em escalas temporais longas, que acabou se tornando a base sobre a qual modelos mais sofisticados foram desenvolvidos. Zhang *et al.* (2004), baseados em Fu (1981, apenas em chinês), desenvolveram uma expressão analítica que mostra como as características do clima e da bacia hidrográfica interferem na repartição de P em Q e E . A abordagem empregada por Fu (1981), e seguida por Zhang *et al.* (2004), emprega os conceitos levantados por Budyko (1974), mas utiliza apenas métodos matemáticos para derivar a equação final, se diferenciando de outras abordagens empíricas publicadas anteriormente. Essa expressão final, denominada aqui de equação de Fu, possui apenas um parâmetro, ω , que está supostamente relacionado com características da bacia.

A estimativa de valores de Q e E , a partir de modelos ou equações baseadas nas hipóteses de Budyko, pode ter um papel importante em problemas de predição em bacias não monitoradas, permitindo, por exemplo, a determinação do limite superior de regularização de um rio por meio da implantação de uma barragem. Além disso, abordagens baseadas nas hipóteses de Budyko vêm sendo empregadas para determinar a sensibilidade das vazões de um rio a mudanças na temperatura e nas precipitações sobre uma bacia hidrográfica (Sankarasubramanian *et al.*, 2001; Arora, 2002; Niemann, 2005; Fu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2009; Renner *et al.*, 2011; Roderick e Farquar, 2011; Yang e Yang, 2011; Donohue *et al.*, 2012).

Além das aplicações descritas acima, o uso da equação de Fu pode ter um papel importante na descrição da variabilidade anual das vazões, assim como na predição de séries de vazão em bacias não monitoradas. Isto pode ser possível, caso a mesma apresente bom desempenho em escalas temporais menores. Por exemplo, séries anuais de evapotranspiração poderiam reduzir as incertezas na estimativa de parâmetros de modelos hidrológicos em bacias sem monitoramento de vazão.

Para que essas aplicações possam ser materializadas, é necessário criar um modelo regional que seja capaz de estimar o valor do parâmetro da equação de Fu em bacias não monitoradas. Este artigo apresenta os resultados preliminares de um estudo de regionalização do parâmetro ω , e uma avaliação do desempenho da metodologia na estimativa de séries anuais de evapotranspiração em 16 bacias hidrográficas do estado do Ceará.

2- O MODELO DE BUDYKO E A EQUAÇÃO DE FU

Budyko (1974) partiu de duas situações extremas para desenvolver sua análise que identificou a relação entre as médias de longo período de P e Q com componentes do balanço de energia, uma situação extremamente árida e outra com umidade abundante. Com base nessas duas situações extremas, Budyko (1974) propôs que:

$$\frac{E}{P} = \Phi\left(\frac{R_n}{L_e P}\right) \quad (1)$$

sendo necessário definir a função Φ . Estudos anteriores (Schreiber, 1904; Ol'dekop, 1911), baseados em análises puramente empíricas, já haviam proposto algo parecido, conforme indicado pelo próprio Budyko. Zhang *et al.* (2004), baseados em Fu (1981) e nas hipóteses levantadas por Budyko, apresentaram a derivação de uma equação totalmente analítica, que relaciona E/P com E_0/P , denominada aqui de equação de Fu, em que E_0 é a evapotranspiração potencial. Esta equação possui um parâmetro, ω , que está supostamente englobando todos os fatores ou características da bacia que possuem relação com o processo de repartimento da precipitação em evapotranspiração e vazão. O emprego de métodos matemáticos e a aplicação de condições de contorno, Zhang *et al.* (2004) chegaram à equação de Fu, sendo ω o parâmetro da equação,

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (2)$$

3- REGIONALIZAÇÃO DO PARÂMETRO ω DA EQUAÇÃO

Otsuki *et al.* (2012), numa tentativa de entender como a equação de Fu poderia ser utilizada para estimar séries anuais de vazão em bacias sem monitoramento no semiárido cearense, concluíram que a região não é homogênea o suficiente para que o emprego do valor médio regional de ω possa proporcionar resultados adequados em bacias sem monitoramento, o que sugere a necessidade de um modelo regional, que explique a variabilidade espacial observada do parâmetro.

Os modelos regionais desenvolvidos neste estudo empregaram o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (WLS). O método WLS é mais adequado ao problema em questão, pois leva em consideração que as estimativas do parâmetro ω em cada posto fluviométrico possuem precisão diferente. Devido à limitação de espaço, detalhes dos métodos não serão apresentados, mas podem ser encontrados em Tasker (1980).

4- ESTUDO DE CASO

A metodologia foi empregada no estado do Ceará, e contemplou 16 bacias hidrográficas com monitoramento de vazão, cujas áreas de drenagem variam aproximadamente entre 590 a 20.700 km².

As séries mensais de precipitação média nas bacias foram calculadas utilizando o método de Thiessen, empregando dados de postos da FUNCEME e da extinta SUDENE. A determinação dos períodos empregados neste estudo se basearam em Barros (2012), que identificou os períodos sob influência de reservatórios. Anos com falhas nos dados de vazão em meses típicos de período úmido também foram excluídos do estudo.

Como a variação interanual de E_0 é pequena, quando comparada com a variação da precipitação, decidiu-se trabalhar com a E_0 de longo período, procedimento adotado em outros estudos publicados na literatura (Potter e Zhang, 2009). O valor de E_0 de cada bacia foi estimado também aplicando o método de Thiessen, levando em consideração os dados disponíveis em INMET (2012). A série anual de E , empregada na avaliação de desempenho, foi calculada a partir do balanço hídrico.

Para que fosse possível construir um modelo regional do parâmetro ω , as seguintes características de cada bacia foram levantadas: percentual da bacia sobre o embasamento cristalino (Cr), curva-número (CN), capacidade de armazenamento de água do solo (SAT), pseudo chuva efetiva (Pef), razão entre a chuva acumulada no segundo semestre e o total acumulado no ano (P_{sem2}/P_y), razão entre o total acumulado no seis anos mais secos e o total acumulado no ano (P_d/P_y), razão entre o total acumulado nos seis meses com a maior evapotranspiração potencial e o total acumulado no ano (P_{maxETP}/P_y), a área da bacia (A), a precipitação média diária calculada dos dias chuvosos (P_c), razão entre P_c e SAT (P_c/SAT), e o coeficiente de variação médio das chuvas diárias (Cv).

5- RESULTADOS

O estudo de regionalização gerou cinco modelos regionais com diferentes graus de complexidade, desde o modelo mais simples (Modelo 0), que considera apenas a média regional ponderada de ω , até o mais complexo (Modelo 4), que emprega quatro variáveis explanatórias, quais sejam, Cr, CN, SAT e P_{sem2}/P_y . A Tabela 1 apresenta as características do referido modelo, que possui o menor valor de AVP entre todos os modelos avaliados. AVP é variância média de predição do modelo, e foi utilizada no processo de seleção do melhor modelo. As quatro variáveis explanatórias empregadas explicam 85% da variabilidade espacial de ω observada na região.

Tabela 1 – Modelo regional 4 (desvio-padrão em parênteses)

Modelo	Coeficientes					σ^2_ε	ASV	AVP	R^2
	β_0	Cr	CN	SAT	P_{sem2}/P_y				
4	2,950 (0,105)	-0,033 (0,007)	0,147 (0,030)	- 0,047 (0,016)	14,253 (4,471)	0,164	0,057	0,222	0,85

Com base nos valores de ω , obtidos pelo modelo regional 4, estimou-se as séries de vazão e evapotranspiração real de todas as 16 bacias empregadas no estudo. O desempenho na estimativa dessas séries é apresentado na Tabela 2 e nas figuras 1 e 2. A Tabela 2 apresenta os valores de Bias (mm), RMSE (mm) e do coeficiente de Nash-Sutcliff (NS) obtidos na estimativa da série de evapotranspiração real. De uma forma geral, os resultados para a evapotranspiração foram animadores, com 10 bacias com NS acima de 0,90, e apenas 2 com NS abaixo de 0,50. Quanto à

estimativa das vazões, os resultados não foram tão bons, conforme pode ser visto pelos coeficientes NS apresentados na Tabela 2. Algumas bacias que apresentaram bom desempenho para evapotranspiração não obtiveram bons resultados na estimativa de vazão.

Tabela 2 - Estações fluviométricas consideradas

Estação	Ad (km ²)	No. Anos	(E ₀ /P) _{LP}	ω_{cal}	Modelo Regional 4				
					ω	Bias _E	RMSE _E	NS _E	NS _Q
34730000	1.062	34	2,54	2,32	2,41	8,3	304,2	0,94	0,68
35125000	1.501	14	1,92	2,67	2,70	3,3	133,0	0,98	0,91
35170000	3.967	26	1,64	2,46	2,31	-33,9	673,7	0,80	0,67
35210000	1.567	17	2,14	2,27	1,78	-105,3	582,3	0,35	0,57
35223000	693	9	1,97	2,11	2,50	89,9	620,4	-1,57	0,23
35240000	1.533	23	2,98	2,46	2,85	25,3	262,1	0,92	0,39
35260000	2.876	19	2,26	2,75	2,41	-31,3	245,8	0,96	0,87
35263000	588	23	1,75	2,30	2,45	37,0	457,5	0,69	0,84
36020000	5.852	55	3,37	2,59	2,69	5,5	214,4	0,95	0,65
36125000	3.533	30	2,30	3,48	2,84	-31,3	221,4	0,96	0,26
36130000	2.043	20	2,04	2,47	2,69	34,3	463,8	0,58	0,67
36160000	20.664	69	2,82	2,94	3,07	5,4	211,6	0,97	0,74
36220000	1.565	10	2,13	6,63	5,90	-1,1	17,5	1,00	-1,09
36250000	4.241	19	2,08	4,36	4,62	5,4	83,4	0,99	0,76
36290000	12.382	30	2,04	3,17	3,68	24,7	212,9	0,96	0,75
36470000	4.551	53	2,73	2,46	2,30	-15,0	586,3	0,85	0,60

A Figura 1 apresenta os gráficos de desempenho dos modelos na estimativa de evapotranspiração real E (mm). Os Biais obtidos no primeiro gráfico indicam para a utilização do Modelo 4 que, em relação ao Modelo 3, apresentou ganho significativo na representatividade regional. O mesmo não pode ser verificado nas demais métricas, onde os Modelos 3 e 4 apresentaram desempenho semelhantes.

A Figura 2 ilustra os resultados da estimativa das séries de E (mm) para quatro das bacias estudadas. Os valores observados estão também indicados para fins comparativos. Nota-se que, em geral, o desempenho foi satisfatório, uma vez que o modelo conseguiu representar o comportamento de subidas e descidas das séries. A bacia representada pelo último gráfico apresentou resultados muito ruins, possivelmente em função do curto registro histórico ou falhas nas observações.

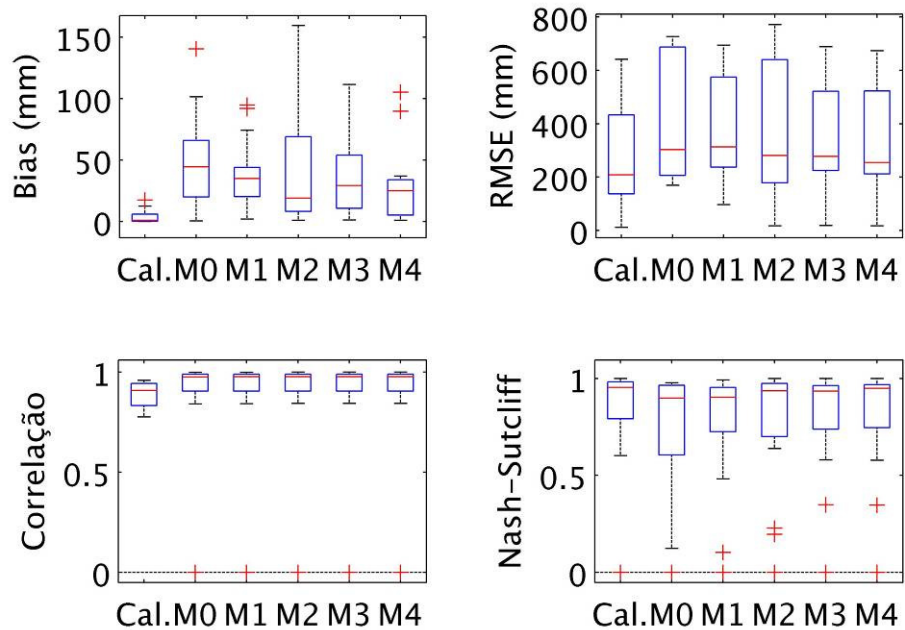


Figura 1: Métricas de desempenho de estimativa das séries anuais de evapotranspiração real obtidas com base em ω estimado na calibração (cal.), e pelos modelos regionais (M0, M1, M2, M3, M4).

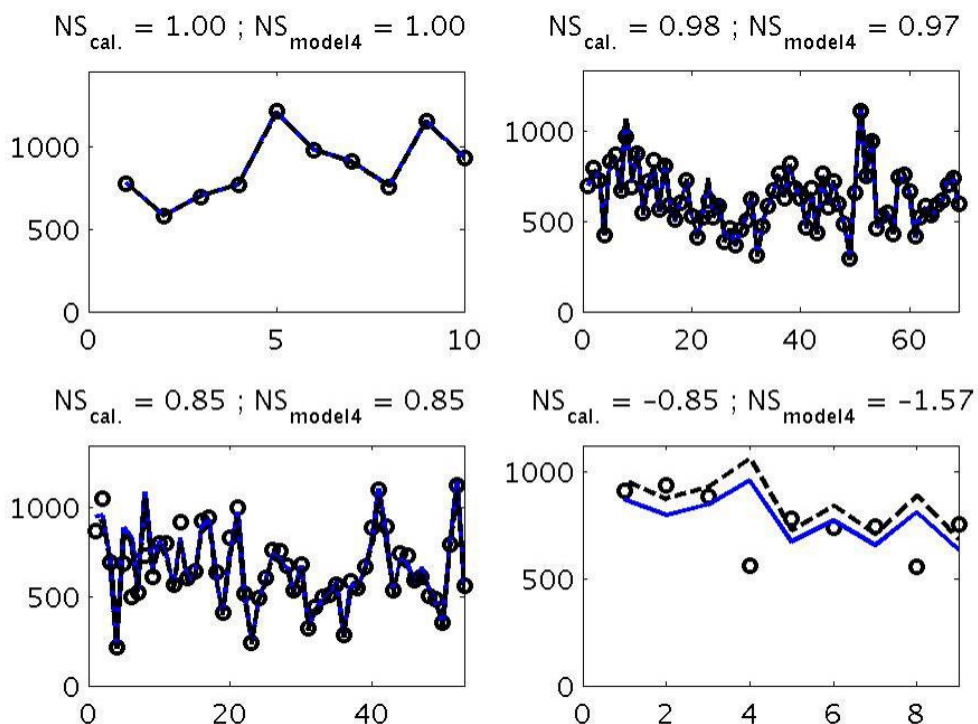


Figura 2: Séries anuais de evapotranspiração real de um sub-conjunto dos postos fluviométricos utilizados. (o: série observada, linha cheia: série estimada com ω calibrado, linha tracejada: série estimada com ω do modelo regional 4).

6- CONCLUSÕES

Este artigo apresenta os resultados preliminares de um estudo que pretende avaliar o desempenho da equação de Fu na estimativa de séries anuais de evapotranspiração real em bacias sem monitoramento de vazão. Para que seja possível realizar tais estimativas é necessário criar um modelo que seja capaz de estimar o valor do parâmetro ω em bacias sem monitoramento.

Um estudo de regressão regional do parâmetro ω foi realizado para o estado do Ceará. Verificou-se que o percentual da bacia sobre o embasamento cristalino, o CN, a capacidade de armazenamento de água no solo, e o grau de sazonalidade das chuvas explicam 85% da variabilidade de ω observada na região, e que o modelo regional possui uma boa capacidade de predição.

A equação de Fu, quando empregada com o valor de ω estimado pelo modelo regional, obteve um desempenho satisfatório na estimativa de séries anuais da evapotranspiração real, com valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) acima de 0,90 em 10 das 16 bacias empregadas, enquanto que em apenas 2 delas o valor de NS ficou abaixo de 0,50.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP pelo financiamento do Projeto GERHINE.

REFERÊNCIAS

ARORA, V.K. (2002). The Use of the Aridity Index to Assess Climate Change Effect on Annual Runoff. *Journal of Hydrology* 265 (1): 164–177.

BARROS, F.V. (2012). Estudo de Calibração dos Postos Fluviométricos do Estado do Ceará. Relatório Técnico. FUNCEME e COGERH.

BUDYKO, M.I. (1974). *Climate and Life*. Academic Press, Nova Iorque.

DONOHUE, R; J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T.R. (2012). Roots, Storms and Soil Pores: Incorporating Key Ecohydrological Processes Into Budyko's Hydrological Model. *Journal of Hydrology* 436-437 (C) (May 2): 35–50.

FU; GUOBIN; CHARLES, S.P.; CHIEW, F.H.S. (2007). A Two-Parameter Climate Elasticity of Streamflow Index to Assess Climate Change Effects on Annual Streamflow. *Water Resources Research* 43 (11) (November 24): 1–12.

FU; GUOBIN; STEPHEN, P. C.; JINGJIE, Y.; CHANGMING, L. (2009). Decadal Climatic Variability, Trends, and Future Scenarios for the North China Plain. *Journal of Climate* 22 (8) (April): 2111–2123.

INMET (1992). Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília.

NIEMANN, J. D. (2005). Sensitivity of Regional Hydrology to Climate Changes, with Application to the Illinois River Basin. *Water Resources Research* 41 (7): 1–15.

OL’DEKOP, E. M. (1911). On Evaporation from the Surface of River Basins. Tr. Meteorol. Univ. Tartu, 4.

OTSUKI, R.G.; COSTA, M.E.L., REIS, D.S. JR. (2012). É Possível Estimar Séries Anuais de Vazão em Bacias Não Monitoradas Utilizando Equações Baseadas nas Hipóteses de Budyko?. In *Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, João Pessoa, Nov. 2012.

POTTER, N. J.; ZHANG, L. (2009). Interannual Variability of Catchment Water Balance in Australia. *Journal of Hydrology* 369 (1-2) (May 5): 120–129.

RENNER, M.; SEPPELT, R.; BERNHOFER, C. (2011). A Simple Water-Energy Balance Framework to Predict the Sensitivity of Streamflow to Climate Change. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8 (5): 8793–8830.

RODERICK, M.L.; FARQUHAR, G.D. (2011). A Simple Framework for Relating Variations in Runoff to Variations in Climatic Conditions and Catchment Properties. *Water Resources Research* 47 (June 21).

SANKARASUBRAMANIAN, A.; VOGEL, R. M.; LIMBRUNNER, J. F. (2001). Climate Elasticity of Streamflow in the United States. *Water Resources Research* 37 (6): 1771–1781.

SCHREIBER, P. (1904). Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasser führung der Fliisse in Mitteleuropa. *Z. Meteorol.* 21, Pt. 10.

TASKER (1980). Hydrologic Regression with Weightned Least Squares. *Water Resources Research*, 14(2), 373-376.

WANG, S.; ZHANG, Z.; SUN, G.; MCNULTY, S.G.; ZHANG, H.; LI, J.; ZHANG, M. (2008). LongTerm Streamflow Response to Climatic Variability in the Loess Plateau, China. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 44 (5): 1098–1107.

YANG; HANBO; YANG, D. (2011). Derivation of Climate Elasticity of Runoff to Assess the Effects of Climate Change on Annual Runoff. *Water Resources Research* 47 (7) (July 14): 1–12.

ZHANG, L.; HICKEL, K.; DAWES, W.R.; CHIEW, F.H.S.; WESTERN, A.W.; BRIGGS, P.R. (2004). A Rational Function Approach for Estimating Mean Annual Evapotranspiration. *Water Resources Research* 40 (2): W02502.