

Relações Regionais entre Precipitação e Evapotranspiração Mensais

Bruno Collischonn¹, Carlos Eduardo Morelli Tucci²

bruno.collischonn@ana.gov.br; tucci@rhama.net

Recebido: 04/09/13 - revisado: 29/10/13 - aceito: 09/05/14

RESUMO

Neste trabalho, investigou-se a relação entre evapotranspiração (ETP) e precipitação, por meio da avaliação dos dados disponibilizados recentemente pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em 290 estações meteorológicas no país. A ETP tende a ser menor durante períodos chuvosos e vice-versa. Esta relação foi investigada tanto do ponto de vista físico, por meio da avaliação das variáveis meteorológicas necessárias para aplicação do modelo de Penman-Monteith, quanto do ponto de vista estatístico, por meio do ajuste de curvas entre a ETP e precipitação mensais. Estas relações podem ser úteis em situações nas quais séries de ETP não estão disponíveis, tais como projeto de reservatórios de regularização, previsão de vazões e gerenciamento de irrigação.

Palavras-chave: *Evapotranspiração, INMET, Penman-Monteith*

INTRODUÇÃO

A evaporação e a evapotranspiração (E/ETP) são componentes do ciclo hidrológico, correspondendo à transferência de água da superfície terrestre para a atmosfera, pela mudança de estado da água, do líquido para o gasoso.

Informações quantitativas destes processos são utilizadas na resolução de numerosos problemas que envolvem o manejo d'água, seja o planejamento de áreas agrícolas (irrigadas ou de sequeiro), o dimensionamento e operação de reservatórios ou a previsão de vazões (TUCCI, 1998). No entanto, a disponibilidade de dados de ETP é baixa no espaço e no tempo, tanto na forma de medidas diretas quanto das variáveis meteorológicas (radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura e pressão atmosférica) necessárias para sua estimativa por métodos consagrados como o de Penman-Monteith.

Aliado a isto, é fato que a ETP apresenta uma variabilidade menor do que a precipitação, para uma mesma localidade. Desta forma, a variação da vazão (cuja magnitude é governada pela relação entre estas duas variáveis) é mais dependente da chuva do que da ETP.

Estes dois fatores (a pouca disponibilidade de dados de ETP e a menor variabilidade desta componente do ciclo hidrológico) fazem com que muitas metodologias correntes na hidrologia brasileira utilizem médias mensais de longo prazo da ETP, normalmente obtidas de normais climatológicas do INMET. Estas médias mensais de evaporação serão doravante denominadas vetores de evaporação, conforme nomenclatura usualmente adotada pelo setor elétrico (ONS, 2010)

No dimensionamento de reservatórios de regularização, nos quais a ETP é um componente importante na estimativa da vazão regularizada, a utilização de vetores de ETP é a prática mais comum, sendo raros os estudos que utilizam séries desta variável.

Ora, é relativamente simples de concluir que esta abordagem leva a uma superestimativa da vazão regularizada (portanto contra a segurança), uma vez que, em uma sequência de anos secos, que são os que definem a magnitude da vazão regularizada, a ETP real é mais alta do que a média. Já nos anos mais úmidos, em que a ETP é mais baixa do que a média, normalmente há vertimento, de forma que os excedentes hídricos não se compensam interanualmente.

Novamente, pelo fato da variabilidade da ETP ser baixa, costuma-se considerar que esta variação seja inferior à própria incerteza da estimativa desta e de outras variáveis (principalmente a série de vazões afluentes), de forma que esta simplificação (adotar um vetor médio de ETP) é amplamente a-

¹ Agência Nacional de Águas/ANA

² RHAMA Consultoria, Pesquisa e Treinamento Ambiental

ceita. Entre os trabalhos que adotaram um vetor médio de evaporação para estudos de regularização, citam-se Studart e Campos (2001), Collischonn e Lopes (2008), Ministério da Integração (2001), entre outros, incluindo aí o planejamento e operação do setor elétrico brasileiro (ONS, 2010).

No entanto, como mencionado, mesmo que seja inferior à de outras componentes do ciclo hidrológico, esta variabilidade existe, e está de certa forma ligada à variabilidade da precipitação. De forma geral, quanto mais chuvoso é um intervalo de tempo (por exemplo, um mês), menor é a ETP do mesmo intervalo, e vice-versa. Tucci (1998) afirma que isto faz com que o processo de transformação chuva-vazão seja não-linear. Ou seja, um aumento de, digamos, 100mm na chuva leva a um aumento superior a 100mm no escoamento, pois além do aumento da chuva, há uma diminuição na ETP (além de outros aumentos decorrentes de não-linearidades na transformação chuva-vazão). Esta relação inversa entre as duas variáveis foi investigada por Mudiare (1985).

Portanto, uma forma de contornar a falta de dados de ETP em climas tropicais é o estabelecimento de relações entre precipitação e ETP. Caso esta relação exista, basta dispor-se de uma série de precipitações médias, e a série de ETP é obtida pela equação de regressão entre ambas.

Outro campo em que estas relações podem ser úteis é a previsão hidroclimática de vazões, na qual se acoplam modelos chuva-vazão com previsões de chuva obtidas de modelos climáticos ou meteorológicos. Ora, como os modelos chuva-vazão requerem dados de ETP como entrada, há a necessidade de prevê-la nos mesmos intervalos de tempo da chuva prevista. Alternativamente ao uso de vetores de ETP, ou de sua estimativa com base nas demais variáveis meteorológicas previstas pelo modelo (o que poderia levar a uma acumulação excessiva de erros), o uso destas relações seria útil para estimar a ETP com base na precipitação prevista para o intervalo de tempo. Neste caso, a utilidade destas previsões é ainda maior, por se tratar de previsão e não simulação. Ou seja, mesmo que o monitoramento de ETP tivesse boa cobertura, haveria necessidade de estimativa indireta em uma aplicação operacional.

Recentemente, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibilizou o acesso às séries históricas de dados meteorológicos diários, desde o ano de 1961, em 290 estações de monitoramento em 26 estados do país (não há dados no estado de Rondônia), atendendo a anseios de longa data da comunidade de recursos hídricos e outros grupos científicos no Brasil.

Neste trabalho, foram calculadas algumas estatísticas a partir dessa massa de dados, buscando-se identificar uma explicação mais física para a relação inversa entre precipitação e ETP, por meio da quantificação da magnitude das variáveis explicativas desta última em dias secos e chuvosos.

Além disso, foram calculadas séries de evaporação e evapotranspiração de referência em todas as estações do INMET, e estabelecidas regressões entre a ETP e a precipitação médias mensais.

O objetivo deste trabalho é uma melhor compreensão da relação inversa entre estas variáveis, bem como sua confirmação com base nos dados existentes. Além disso, pretende-se que os resultados constituam-se em uma base de dados para refinar estudos hidrológicos, disponibilizada ao público em geral, como alternativa ao uso de vetores médios de ETP.

PRECIPITAÇÃO E ETP

Tomando-se a equação de Penman-Monteith, que é considerada a metodologia mais adequada para quantificação da ETP (SMITH, 1991), pode-se expressar esta componente do ciclo hidrológico como uma função de cinco variáveis meteorológicas (para uma mesma cultura/meio):

$$E / ETP = f(T_{med}, UR, PA, VV, RAD)$$

onde T_{med} é a temperatura média do ar, UR é a umidade relativa do ar, PA é a pressão atmosférica, VV é a velocidade do vento e RAD é a radiação solar incidente na superfície. Esta última variável em geral é estimada com base no tempo de insolação.

A relação inversa entre a precipitação e a ETP pode ser explicada fisicamente, por meio da variação das diversas variáveis meteorológicas que influenciam a ETP. Em primeiro lugar, dias mais chuvosos necessariamente são mais encobertos, fazendo com que uma menor quantidade de radiação solar atinja a superfície. Este é o principal fator que explica a relação inversa entre as variáveis, uma vez que a radiação solar (ou, quando esta não está disponível, o tempo de insolação em horas) é a principal governante do processo de evaporação e evapotranspiração (SHUTTLEWORTH, 2012).

Dias mais chuvosos teoricamente também apresentam umidade relativa do ar mais alta. Consequentemente, a ETP é menor, uma vez que o au-

mento da umidade aumenta também a pressão de vapor, ou seja, a quantidade de vapor no ar está mais próxima da saturação.

Portanto, estas duas variáveis (radiação e umidade relativa) estão diretamente ligadas à relação entre precipitação e ETP. As demais variáveis têm efeitos não tão evidentes nesta relação.

A temperatura é diretamente correlacionada com a ETP, uma vez que aumenta a pressão de saturação do vapor, ou seja, a quantidade de vapor que pode ser armazenada no ar circundante.

A recomendação da FAO é que seja usada, como medida da temperatura média do dia, a média entre as temperaturas máxima e mínima. Em dias chuvosos, a nebulosidade faz com que a radiação incidente seja menor, tendendo a diminuir a máxima. No entanto, durante a noite, a maior nebulosidade acaba por reter o calor que deixa a superfície terrestre (radiação termal ou de onda longa), fazendo com que a temperatura mínima tenda a ser um pouco mais alta do que seria em uma noite de céu claro (ALLEN et al. 1998). Assim, a importância da temperatura do ar na relação entre precipitação e ETP é relativa.

Não obstante, alguns fatos permitem estabelecer uma ligação entre nebulosidade e temperatura (ou precipitação e ETP). Nas regiões tropicais, nos meses de verão do hemisfério sul (dezembro a março), que correspondem ao trimestre mais úmido, as chuvas atuam como uma espécie de regulador da temperatura, sendo comum o declínio em alguns graus da temperatura após as chuvas convectivas de verão. Da mesma forma, os chamados “veranicos”, períodos de uma ou duas semanas sem chuva nesta época, são períodos de temperaturas médias mais altas, e consequentemente alta ETP.

A pressão atmosférica tende a ser mais baixa em períodos antecedentes a chuvas, e mais alta em períodos de tempo bom (e, portanto, de maior ETP). No entanto, a pressão atmosférica é, provavelmente, a variável que menos influencia a ETP. Por um lado, um aumento na pressão aumenta a massa específica do ar, permitindo que uma maior quantidade de vapor seja retida em um mesmo volume de ar circundante. Por outro lado, aumenta também a constante psicrométrica, que consta no denominador da equação de Penman-Monteith, diminuindo a ETP.

Por fim, a velocidade do vento é, provavelmente, a única variável que concorre para um aumento da ETP mesmo em dias chuvosos, uma vez que a ocorrência de chuvas é frequentemente precedida de ventos fortes. O vento aumenta a ETP na

medida em que remove a umidade da superfície, trazendo ar menos saturado.

Ainda assim, essa relação é muito tênue, sendo igualmente comuns dias claros com vento forte, nos quais a ETP é particularmente alta.

Em resumo, portanto, a relação inversa entre precipitação e ETP é devida principalmente à variação na radiação incidente e na umidade relativa do ar, e em alguma medida também na temperatura, pelo menos nos trópicos. A pressão atmosférica, inversamente relacionada com dias mais chuvosos, tem pouco efeito na ETP. Já a velocidade do vento, embora muito correlacionada com a ETP, não pode ser associada com mais frequência ao tempo bom ou chuvoso.

As assertivas feitas neste capítulo, sobre a maior ou menor intensidade de cada variável meteorológica em dias secos e chuvosos, foram testadas estatisticamente neste trabalho.

Análise estatística das variáveis meteorológicas **Metodologia**

No capítulo anterior, foi feita uma série de assertivas sobre a maior ou menor intensidade de cada variável meteorológica em dias secos e chuvosos, sem uma maior validação destas afirmações, seja em referências bibliográficas ou em estatísticas. Sendo assim, julgou-se necessário testar estas assertivas estatisticamente, por meio de testes de hipóteses.

Para cada estação de monitoramento do INMET, foram identificados os dias chuvosos, definidos como aqueles em que a precipitação diária foi superior a 5mm. Com isso, foi possível separar a série de dados meteorológicos em dias chuvosos e secos. Para cada variável, foi feito então um teste de hipótese das médias de Student, no qual a hipótese nula é de que as médias das variáveis nas duas séries são iguais, a 5% de significância. Caso a hipótese nula fosse rejeitada, verificava-se ainda se a média da variável nos dias chuvosos foi inferior ou superior à média dos dias secos.

Para retirar o efeito da sazonalidade na média de cada variável, os testes de hipótese foram feitos para cada mês do ano, ou seja, considerando apenas dias secos e chuvosos em janeiro, em fevereiro e assim por diante.

Foram descartados meses em que o número de dias chuvosos foi inferior a 5% do total de dias com medições. Isto foi feito para não levar em conta meses em que dias chuvosos são muito raros, tipicamente os meses de julho a setembro na maior parte do país, nos quais a comparação entre dias chuvosos e secos não faria sentido. Nestes, possivelmente o

teste de hipótese teria dificuldade em rejeitar a hipótese nula, devido somente à pequena extensão de uma das amostras, e não a um possível equilíbrio entre dias secos/chuvosos.

As estações foram agrupadas de acordo com os climas zonais do país (conforme IBGE, 2013), e para cada variável calculou-se em que porcentagem dos meses/estações a intensidade foi mais alta nos dias secos e nos dias chuvosos, bem como a porcentagem em que não houve distinção, correspondente aos meses/estações em que o teste de hipótese não pôde ser rejeitado. Por simplificação, neste último caso considerou-se que as médias não apresentam diferença significativa.



Figura 1 - Climas zonais do Brasil (IBGE, 2013)

RESULTADOS

Velocidade do vento (ou: “dias chuvosos têm vento mais forte?”)

A Tabela 1 mostra os resultados dos testes de hipóteses para a variável meteorológica velocidade do vento. Para cada zona climática, é indicada a frequência de meses/estações em que o vento foi mais forte com tempo seco, com tempo chuvoso e nos quais não houve diferença significativa. A média geral do país corresponde à ponderação pelo número de estações em cada zona, sendo 36 estações na zona temperada, 116 na zona tropical central, 13 na zona tropical nordeste oriental (denominado litoral do nordeste por simplificação), 85 no clima tropical

zona equatorial (denominado semi-árido) e 40 na região equatorial.

Tabela 1 - Frequência em que vento foi mais intenso em dias secos, chuvosos ou indiferente

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|------------|------------|------------|
| Temperado | 15% | 40% | 46% |
| Brasil Central | 27% | 59% | 14% |
| NE litoral | 41% | 49% | 10% |
| Semi-árido | 55% | 38% | 7% |
| Equatorial | 32% | 56% | 12% |
| Brasil | 34% | 50% | 15% |

Como se vê, na maioria das regiões, o resultado mais frequente foi a impossibilidade de rejeitar a hipótese nula, no qual se considerou que não há diferença significativa entre as médias da velocidade do vento em dias chuvosos e secos. Este resultado confirma a afirmativa feita anteriormente, de que a relação entre velocidade do vento e a ocorrência de chuvas é muito tênue. No litoral nordestino e no semi-árido, o vento mais intenso ocorre mais frequentemente com tempo seco. Já na região temperada, com maior frequência o vento mais intenso ocorreu em tempo chuvoso. De forma geral, observou-se uma tendência de vento mais intenso com tempo seco em cidades litorâneas, como Florianópolis, Torres (RS), Vitória, Recife e Natal. Já em cidades serranas de todo Brasil, como Campos do Jordão (SP), Diamantina (MG), Lençóis (BA) e Caxias do Sul (RS), a relação foi contrária, com ventos mais intensos associados a tempo chuvoso, sinalizando que a topografia tem um papel importante na relação entre intensidade do vento e a ocorrência de dias secos e chuvosos.

Temperatura (ou “dias chuvosos são mais quentes?”)

A análise estatística relativa à temperatura foi feita para a temperatura mínima, máxima e média do dia.

Com relação à temperatura máxima do dia, a análise estatística confirma a noção intuitiva, também manifestada por Allen (1998), de que dias mais secos têm temperatura máxima mais alta do que dias chuvosos (Tabela 2).

Em quase 90% dos casos, dias mais secos tiveram temperatura máxima significativamente mais alta do que dias chuvosos.

A análise foi feita também levando em conta as temperaturas mínimas do dia, de forma a validar

a afirmativa de Allen (1998), de que dias mais nublados/chuvosos tendem a ter temperaturas mínimas mais altas, devido à retenção da radiação de onda longa. A Tabela 1 mostra os resultados para a temperatura mínima.

Tabela 2 - Frequência em que a temperatura máxima diária foi maior em dias secos e chuvosos

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|------------|------------|-----------|
| Temperado | 98% | 2% | 0% |
| Brasil Central | 95% | 5% | 0% |
| NE litoral | 80% | 20% | 0% |
| Semi-árido | 79% | 20% | 1% |
| Equatorial | 60% | 38% | 2% |
| Brasil | 85% | 15% | 1% |

Tabela 3 - Frequência com que a temperatura mínima foi mais alta em dias secos e chuvosos

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|------------|------------|------------|
| Temperado | 3% | 18% | 79% |
| Brasil Central | 27% | 38% | 36% |
| NE litoral | 24% | 60% | 16% |
| Semi-árido | 26% | 60% | 14% |
| Equatorial | 43% | 51% | 6% |
| Brasil | 26% | 44% | 30% |

A tabela mostra que a afirmação de Allen (1998) é válida para regiões temperadas, porém não se aplica a regiões tropicais e equatoriais.

Evidentemente, nesta abordagem não se leva em conta o fato de que há dias nublados que não necessariamente são chuvosos. No entanto, dada a alta correlação da insolação com tempo seco (como será visto adiante), esta aproximação é bastante razoável.

Por fim, a Tabela 4 mostra os resultados dos testes de hipóteses para a temperatura média.

Tabela 4 - Frequência em que a temperatura média foi mais alta em dias secos e chuvosos

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|------------|------------|-----------|
| Temperado | 61% | 34% | 5% |
| Brasil Central | 79% | 18% | 2% |
| NE litoral | 46% | 53% | 1% |
| Semi-árido | 46% | 51% | 2% |
| Equatorial | 42% | 56% | 2% |
| Brasil | 61% | 37% | 3% |

Os resultados permitem concluir que, de forma geral, dias chuvosos tendem a ser um pouco mais frios. Apenas em 3% dos locais/meses, dias chuvosos foram significativamente mais quentes em média. Esse resultado é mais evidente na região temperada, que apresentam chuvas mais distribuídas ao longo do ano. Foi mais expressivo também nos meses de verão (dezembro a março), confirmando a assertiva feita anteriormente, de que as chuvas convectivas atuam no sentido de amenizar a temperatura em regiões tropicais.

Houve também uma frequência relativamente alta (37%) de situações em que o teste não pôde ser rejeitado. No entanto, isto ocorreu principalmente nos meses de junho a setembro, em que os dias chuvosos são muito raros na maior parte do país. Assim, a dificuldade de rejeição da hipótese se deve provavelmente ao tamanho amostral muito pequeno das séries de dias chuvosos nestes meses, e não a um eventual equilíbrio da temperatura em dias secos e chuvosos.

Como visto, um outro fator que leva a um maior equilíbrio no caso da temperatura média é a correlação inversa entre temperatura máxima e temperatura mínima, observada nas regiões subtropicais.

Insolação (ou “dias chuvosos são mais nublados?”)

Neste caso a correlação é bastante direta e intuitiva, e a análise estatística confirma este resultado, uma vez que, em praticamente 100% dos meses/estações, a insolação média foi maior com tempo seco do que com tempo chuvoso, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Frequência em que o tempo de insolação foi maior em dias secos e chuvosos

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|------------|-----------|-----------|
| Temperado | 100% | 0% | 0% |
| Brasil Central | 100% | 0% | 0% |
| NE litoral | 100% | 0% | 0% |
| Semi-árido | 100% | 0% | 0% |
| Equatorial | 98% | 2% | 0% |
| Brasil | 99% | 1% | 0% |

Umidade relativa do ar (ou “dias chuvosos são mais úmidos?”)

Da mesma forma que no caso anterior, esta correlação é intuitiva e é confirmada pela análise estatística, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Frequência em que a umidade relativa do ar foi mais alta em dias secos e chuvosos

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|-----------|-----------|-------------|
| Temperado | 0% | 0% | 100% |
| Brasil Central | 0% | 0% | 100% |
| NE litoral | 0% | 0% | 100% |
| Semi-árido | 0% | 0% | 100% |
| Equatorial | 0% | 0% | 100% |
| Brasil | 0% | 0% | 100% |

Pressão atmosférica

Por fim, no caso da variável pressão atmosférica, a análise estatística é sintetizada na Tabela 7.

Tabela 7 - Frequência em que a pressão atmosférica foi mais alta durante dias secos e chuvosos

| Região | Seco | Igual | Chuvoso |
|----------------|------------|------------|------------|
| Temperado | 88% | 7% | 5% |
| Brasil Central | 65% | 27% | 8% |
| NE litoral | 9% | 60% | 31% |
| Semi-árido | 18% | 57% | 24% |
| Equatorial | 8% | 71% | 21% |
| Brasil | 44% | 41% | 15% |

Neste caso, percebe-se também uma diferenciação dos resultados conforme a região do país. Em latitudes maiores, é válida a correlação direta entre tempo seco e pressão alta. No entanto, em regiões próximas ao equador, esta correlação desaparece, não havendo, na maior parte dos casos, diferença estatística entre a pressão atmosférica média em dias secos e chuvosos.

Relações estatísticas entre precipitação e ETP
Metodologia

As séries diárias de ETP foram calculadas por meio do método de Penman-Monteith, conforme síntese apresentada em Collischonn (2001), utilizando-se as séries de dados meteorológicos diários disponibilizadas recentemente pelo INMET, em 290 estações no Brasil.

Os dados de radiação solar incidente não estão disponíveis, de forma que foram estimados com base no tempo de insolação diário, também conforme as estimativas sintetizadas em Collischonn (2001).

Foram calculadas séries de evapotranspiração de referência, usando-se um albedo de 0,23, uma resistência superficial de 70 s.m⁻¹ e uma altura da cultura de 0,12m (ALLEN et al., 1998).

Nos intervalos de tempo em que houve falha na medição de alguma variável, a ETP não foi calculada, adotando-se falha. A exceção foi quando apenas a pressão atmosférica apresentou falha. Neste caso, a pressão atmosférica foi estimada com base em uma regressão linear entre altitude e pressão atmosférica média do mês, estabelecida com base nas normais do INMET. Optou-se por preencher apenas esta variável devido ao fato de sua variação não influenciar fortemente a ETP, conforme já mencionado. Além disso, esta variável é uma das que apresenta falhas mais frequentes, de forma que seu preenchimento agrega bastante informação às regressões. A Figura 2 mostra a regressão entre pressão atmosférica média e altitude para o mês de janeiro.

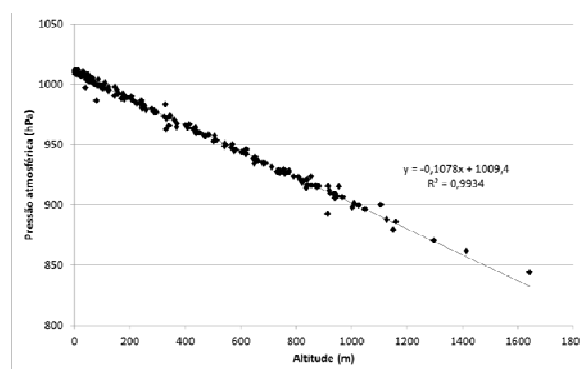


Figura 2 - Regressão entre pressão atmosférica média e altitude da estação, mês de janeiro

Os dados de ETP foram então acumulados mensalmente. No caso do número de falhas do mês ser inferior a 5 dias, utilizou-se a média dos demais dias para preencher. Do contrário, o mês em questão não foi incluído nas estatísticas. O mesmo foi feito com a precipitação medida na estação.

Uma vez definida uma série de pares de dados de ETP e precipitação mensais, foram ajustadas curvas de regressão entre ambas, no tipo linear.

Estas curvas foram definidas para cada mês do ano, de forma a contemplar a sazonalidade. Naturalmente, para validar a premissa de uma relação inversa entre precipitação e ETP, as curvas resultantes deveriam resultar decrescentes, ou seja, com parâmetro angular negativo.

RESULTADOS

Como mencionado, foram geradas curvas de regressão lineares e potenciais entre a ETP e precipitação médias em cada estação e para cada mês do ano. Setenta e duas estações não foram incluídas nesta análise por terem extensão muito curta ou número de falhas muito alto, de forma que a massa de dados mensais para ajuste das regressões era muito pequena (menos de 10 pares de dados).

A Figura 3 mostra um exemplo das regressões, para a estação de monitoramento do INMET de Brasília, para o mês de janeiro.

Inicialmente, observa-se que, conforme previsto, a variabilidade da precipitação em geral é muito maior do que a da evapotranspiração. No caso mostrado, enquanto a precipitação variou entre 29 e 577 mm/mês, a ETP variou entre 85 e 145 mm/mês.

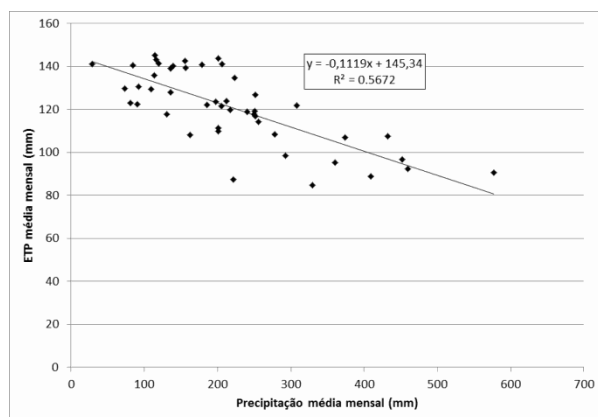


Figura 3 - Regressão linear entre precipitação e ETP mensais em Brasília, mês de janeiro

O coeficiente angular negativo, obtido na regressão mostrada, também foi obtido em todas as regressões, reforçando a relação inversa existente entre precipitação e ETP. O conjunto de coeficientes de regressão, para todas as estações e todos os meses, pode ser disponibilizado por meio de contato com o autor principal deste artigo.

Embora a dispersão dos dados seja relativamente alta, e os coeficientes R² em geral sejam baixos, deve-se lembrar que as relações mostradas são alternativas ao uso da ETP média em simulação hidrológica, quando não existem séries de ETP disponíveis.

Este tipo de relação é mais útil em meses de transição entre as estações de estiagem e de chuvas, como os meses de maio e outubro na região sudeste

e centro-oeste, que podem ser muito chuvosos ou muito secos, a depender do atraso do início de cada período. É útil também em regiões cuja estação de chuvas pode apresentar “veranicos”, períodos de 10 a 15 dias sem chuvas. Estes períodos, usualmente nos meses de dezembro a março, podem ter ETP bastante alta, devido à radiação solar ser mais intensa.

A maior variabilidade da precipitação só não é válida nos meses de seca das regiões tropicais, como julho e agosto, em que a variabilidade da precipitação é baixa. A Figura 2 mostra o exemplo do mês de agosto em Brasília. Observa-se um grande agrupamento de pontos em torno da precipitação nula.

Não por acaso, nestes meses ocorreram com mais frequência ajustes com coeficiente angular positivo, ao contrário do esperado. No total, isso ocorreu em 7% dos meses/estações, porém entre os meses de julho, ocorreu em 15% dos meses, e em 13% dos meses de agosto. No caso do ajuste potencial, os resultados foram semelhantes.

Em situações como essa, em que a precipitação média em geral é nula e a variabilidade da precipitação é baixa, as relações são pouco úteis, sendo mais prática a adoção da ETP média do mês.

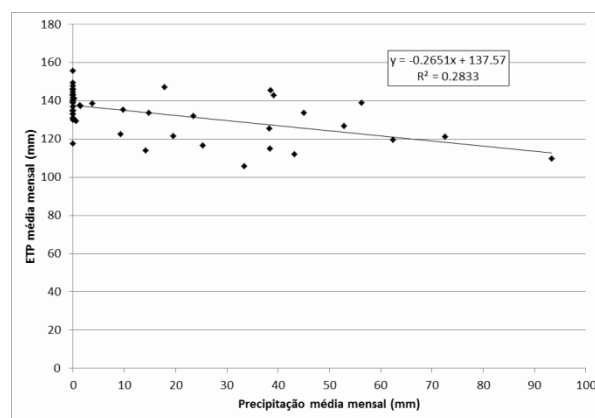


Figura 4 - Regressão linear entre precipitação e ETP mensais em Brasília, mês de agosto –

A Figura 5 mostra, de forma especializada para o país, os coeficientes de determinação para os meses de março e outubro.

De forma geral, os maiores coeficientes de determinação foram obtidos na região de clima tropical. Em termos médios anuais, os melhores ajustes foram encontrados nas estações de Água Branca e Pão de Açúcar (AL) e Correntina (BA). Bons ajustes

1

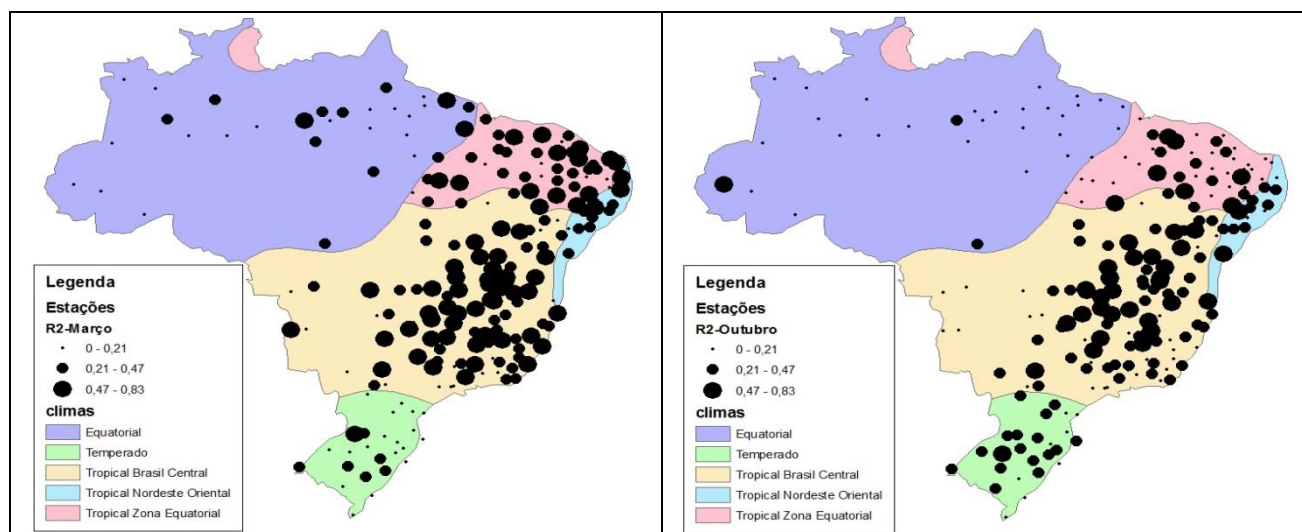


Figura 5 - Espacialização do coeficiente de determinação para os meses de março (esquerda) e outubro (direita)

(superiores a 0,8) foram obtidos para os meses de interesse (outubro a maio) também nas estações de Barreiras (BA), Montes Claros, Itamarandiba, Divinópolis e Ibirité (MG).

Nas regiões temperada e equatorial, possivelmente as relações entre precipitação e ETP não são tão evidentes, devido a uma maior frequência de dias nublados, porém sem chuva. A espacialização dos resultados para outros meses leva a conclusões similares.

Por fim, a Tabela 8 mostra a média por região dos coeficientes R2 dos ajustes realizados.

Tabela 8 - Média por zona climática dos coeficientes R2 da regressão linear, mês a mês

| | T | BC | NL | SA | E | média |
|--------------|------|------|------|------|------|-------|
| Jan | 0,26 | 0,51 | 0,54 | 0,45 | 0,29 | 0,41 |
| Fev | 0,29 | 0,46 | 0,51 | 0,43 | 0,25 | 0,37 |
| Mar | 0,19 | 0,41 | 0,33 | 0,35 | 0,20 | 0,32 |
| Abr | 0,31 | 0,29 | 0,37 | 0,43 | 0,21 | 0,29 |
| Mai | 0,18 | 0,16 | 0,41 | 0,45 | 0,27 | 0,23 |
| Jun | 0,08 | 0,19 | 0,34 | 0,27 | 0,20 | 0,18 |
| Jul | 0,17 | 0,15 | 0,38 | 0,32 | 0,22 | 0,19 |
| Ago | 0,11 | 0,15 | 0,32 | 0,17 | 0,18 | 0,15 |
| Set | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,14 | 0,13 | 0,23 |
| Out | 0,28 | 0,33 | 0,38 | 0,23 | 0,11 | 0,26 |
| Nov | 0,31 | 0,33 | 0,43 | 0,21 | 0,18 | 0,28 |
| Dez | 0,27 | 0,31 | 0,30 | 0,25 | 0,27 | 0,28 |
| Média | 0,22 | 0,30 | 0,38 | 0,31 | 0,21 | |

*T=temperado; BC=Brasil Central; NL=Nordeste Litoral; AS=Semi-árido; E=Equatorial

Os ajustes foram piores nos meses de inverno no hemisfério sul, em especial junho a agosto, devido à pouca variabilidade da precipitação.

CONCLUSÕES

Recentemente, o INMET disponibilizou as séries históricas de dados meteorológicos, para fins de pesquisa, por meio do banco BDMEP. Este trabalho procura explorar, em uma primeira abordagem, esta massa de dados, cujo potencial de investigação científica é bastante grande.

A seguir são sintetizadas as conclusões específicas, referentes às duas vertentes de análise abordadas.

Análise estatística

A análise estatística das variáveis climáticas monitoradas e recentemente disponibilizadas pelo INMET reforçou a compreensão dos mecanismos que explicam a relação inversa entre precipitação e ETP. A principal variável explicativa da ETP, que é a radiação incidente (aqui medida indiretamente por meio do tempo de insolação) é claramente maior em dias secos do que em dias chuvosos. A umidade do ar, que também influencia muito a magnitude da ETP, sendo inversamente relacionada com esta, é maior em tempo chuvoso do que em tempo seco.

Estes dois resultados são bastante intuitivos e a análise apenas reforça este fato.

A temperatura média do ar (média aritmética das temperaturas máxima e mínima do dia), também diretamente correlacionada com a ETP, é geralmente maior em tempo seco do que em tempo chuvoso, principalmente devido ao aumento da temperatura máxima em condições de tempo seco. Isto ocorre a despeito de a temperatura mínima em algumas regiões ser superior em tempo chuvoso, devido à maior retenção do calor.

A velocidade do vento, igualmente uma variável cujo aumento leva a uma maior ETP, não pode ser associada com mais frequência a tempo chuvoso do que seco, uma vez que na maioria dos casos, não foi possível rejeitar a hipótese de que as intensidades médias foram iguais nas duas condições. Observando-se os resultados individuais nas diferentes estações, verificou-se uma tendência do vento ser mais forte em tempo chuvoso em diferentes localidades serranas do país, e uma tendência inversa em regiões planas e costeiras.

Por fim, a pressão também apresenta resultados variáveis de acordo com a região do país. Esta variável é pouco importante na explicação da relação entre precipitação e ETP, pois, além dos resultados mistos, influencia pouco na ETP, aparecendo tanto no numerador quanto no denominador da equação de Penman-Monteith.

Portanto, a relação inversa entre precipitação e ETP é explicada, principalmente, pela maior insolação e menor umidade do ar em dias secos, e em menor parte, pelo maior temperatura média do ar nestas condições.

Relações ETP x precipitação

Foram estabelecidas regressões lineares entre a ETP e a precipitação mensal, para cada mês do ano, em todas as estações com dados disponíveis.

De forma geral, os resultados das regressões confirmaram a relação inversa existente entre estas duas variáveis, uma vez que os coeficientes angulares das regressões foram negativos, em sua maioria.

Embora os coeficientes de determinação das regressões tenham sido baixos, deve ser levado em conta que estas são usadas como alternativa ao uso de vetores médios, ou seja, valores monotônicos de ETP, no intuito de representar minimamente a variabilidade temporal desta variável. Assim, enquanto as relações aqui obtidas explicam muitas vezes menos de 50% da variabilidade da ETP, o uso de um valor médio para o mês explicaria 0% desta variabi-

lidade (visto que a variância da variável independente seria nula neste caso).

Os maiores coeficientes de determinação foram obtidos para as regiões de clima tropical, notadamente o Brasil Central. Nas regiões temperada e equatorial, os ajustes foram piores.

Naturalmente, as relações estatísticas não expressam toda a complexidade dos processos que governam a relação entre estas variáveis, existindo diversos intervalos de tempo em que não houve precipitação e nem por isso a ETP foi alta (em particular dias nublados, porém sem chuva).

As relações obtidas são particularmente úteis nas regiões tropicais, nos meses de transição entre os períodos úmido e seco do ano, que podem ser muito ou pouco chuvosos, e portanto apresentar ETP variável. São úteis também nos meses de verão do hemisfério sul, em regiões com propensão à ocorrência de “veranicos”.

Este tipo de estimativa indireta pode ser útil em estudos como dimensionamento de reservatórios e estimativa de capacidade de regularização. Em muitas regiões do Brasil, o período crítico para definição de capacidade de regularização corresponde à década de 1950 (GUETTER E BUBA, 2003, MME, 2004), período em que muito poucas séries históricas de ETP se encontravam disponíveis.

Outro potencial de uso destas relações é no manejo de irrigação, uma vez que permitem que a evapotranspiração seja estimada somente com a medição da precipitação ocorrida na área de cultivo. Naturalmente, estas estimativas não substituem medições de evaporação *in situ*, porém ainda é rara a instalação de estações climatológicas ou tanques de evaporação para fins de manejo de irrigação.

DISCLAIMER

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade do autor e não refletem necessariamente o ponto de vista da Agência Nacional de Águas (ANA).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.; PEREIRA L.; RAES, D.; SMITH, M. *Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO, 1998. 310p. (FAO - Irrigation and drainage paper, 56).

COLLISCHONN, B; LOPES, A. V. *Efeito da açudagem a montante sobre a disponibilidade hídrica do Açude Epitácio Pessoa (PB)*. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador (BA).

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 2, 2001.

GUETTER, A. BUBA, H. (2004). *Previsão climática de afluências para os aproveitamentos hidrelétricos do Sistema Interligado Nacional*. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/clima.pdf - consulta em 19/12/2013

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2000): *Projeto de Transposição de águas do rio São Francisco para o nordeste setentrional – estudos de inserção regional*. Relatório, 263p, anexos.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2004). *Garantia Física de Energia e Potência – Metodologia, Diretrizes e Processo de Implantação*. Nota Técnica MME/SPD/05.

MUDIARE, O. J. (1985): *Influence of light rainfall and cloud cover on evapotranspiration demands*. PhD Thesis, University of Saskatchewan.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2010) *Critérios para estudos hidrológicos*. Relatórios de Procedimento de rede.

SHUTTLEWORTH, W. J (2012): *Terrestrial Hydrometeorology*. Wiley-Blackwell, 448p.

SMITH, M. (1991) *Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. Relatório.

STUDART, T.M.C. E CAMPOS, J.N.B. " Incertezas nas Estimativas das Vazões Regularizadas por um Reservatório". Revista Brasileira de Recursos Hídricos-RBRH Vol.7 n°3, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, setembro de 2001

TUCCI, C. (1998): *Modelos Hidrológicos*. Editora da UFRGS/ABRH, 678p.

through the evaluation of data from 290 meteorological stations belonging to INMET, which were recently made available to the public. ETP tends to be lower during rainy periods. We try to assess this relationship both physically, through the evaluation of the meteorological variables needed to run the Penman-Monteith equation, as well as statistically, through the adjustment of curves between monthly E/ETP and monthly precipitation. Those relations can be useful in situations where ETP time series are not available, such as reservoir design, flow forecast and irrigation management.

Key-words: *Evapotranspiration, INMET, Penman-Monteith*

Regional Empirical Relations Between Monthly Evapotranspiration And Precipitation

ABSTRACT

In this work we investigate the relations between evaporation/evapotranspiration (ETP) and precipitation,