

Vulnerabilidade de reservatórios superficiais às mudanças climáticas: o caso de rios com deflúvios anuais de alta variabilidade

Surface reservoirs' vulnerability to climate change: the case of rivers with annual run-offs of high variability

Andréa Pereira Cysne
andreacysne@gmail.com
Instituto Federal do Ceará

**Ticiano Marinho de
Carvalho Studart**
ticiano@ufc.br
Universidade Federal do
Ceará

Renata Mendes Luna
renata@ufc.br
Universidade Federal do
Ceará

Resumo

As mudanças climáticas globais e seus efeitos têm gerado grande preocupação por parte da comunidade científica, dos tomadores de decisão e da sociedade em geral, notadamente nas últimas décadas. Apesar de se poder prever, em escala global, as possíveis consequências das alterações climáticas (elevação dos níveis dos mares e mudança do padrão das precipitações, por exemplo), existe uma grande dificuldade em quantificar, em escala local, esses impactos. Regiões mais vulneráveis, como o semiárido brasileiro, têm se mostrado ainda mais fragilizadas quando submetidas às adversidades climáticas. Considerando a relevância de estudos que avaliam os impactos dessas prospectivas mudanças climáticas, o presente trabalho avalia a influência da mudança dos padrões da precipitação e da evaporação na vazão regularizada dos reservatórios. Avaliou-se a relação conjunta da evaporação e precipitação, através da lâmina líquida (E_L), no balanço hídrico do reservatório, simulado a nível mensal, com retiradas acontecendo simultaneamente. O estudo concluiu que os rios que apresentam alta variabilidade (CV entre 1,2 e 1,6), característicos das regiões semiáridas, são mais sensíveis a qualquer mudança que venha a ocorrer na precipitação ou evaporação dessa região. Uma vez que a maioria dos rios do Nordeste Semiárido apresenta coeficientes de variação dos deflúvios anuais em torno de 1,2 a 1,6, e praticamente a disponibilidade hídrica da região depende de reservatórios superficiais, a gestão desses reservatórios deverá ser realizada de maneira criteriosa, uma vez que são bastante sensíveis a essas variações climáticas.

Palavras-chave: Reservatórios, Vazão Regularizada, Mudanças Climáticas.

Abstract

The global climatic changes and its effects have brought great worry in the last decades, to the scientific community, from the stakeholders and society in general. Although it's predictable, in global scale, the possible consequences of the climatic changes – for example, the elevation of the sea levels and change of pattern of the precipitations – there's great difficulty in quantify in local scale, these impacts. More vulnerable regions, like the Brazilian semiarid, have been shown even more weakened when gone through climatic adversities. Considering the relevance of the studies that evaluate the impacts of these prospective climatic changes, this study evaluates the influence of the change of patterns of precipitation and the evaporation of the reservoir yield. It was evaluated the conjunct relation of the evaporation and precipitation, through the net blade, in the water balance of the reservoir, simulated on monthly level, with removals happening simultaneously. The study concluded that the rivers which presents high variability (CV between 1,2 and 1,6) that are characterized by the semiarid regions, are more sensible to any changes which comes to occur on precipitation or evaporation of this region. Once the great majority of the rivers from the semiarid northwest present coefficient of variation of the annual runoff between 1,2 and 1,6 and, basically the water availability of the region depends of superficial reservoirs, the management of these reservoirs should be done carefully, since they are very sensible to these climatic variation.

Keywords: Reservoir. Reservoir Yield. Climate Change.

1 Introdução

As mudanças climáticas globais e seus efeitos, notadamente nas últimas décadas, têm gerado grande preocupação por parte da comunidade científica, dos tomadores de decisão e da sociedade em geral. Essa preocupação é justificada pelas alterações, pela frequência com que se vem observando eventos críticos – enchentes, secas, ondas de calor, tempestades – e

pela incerteza dos padrões climáticos, os quais poderão trazer, como consequências, maior incidência de doenças, falta de abastecimento de água, perda de biodiversidade, queda da produção agrícola, dentre outras.

A utilização da temperatura média global é o modo mais simples de mensurar a variabilidade e a mudança do clima global (Back, 2001; Braganza *et al.*, 2003). Conforme Santos *et al.* (2010), ao considerar-se o cenário de aumento da temperatura, pode-se esperar mudanças no regime de precipitação pluvial em diferentes regiões do globo, com a ocorrência de secas e enchentes. Esses são alguns desastres naturais relacionados às mudanças climáticas, em função da grande vulnerabilidade dos sistemas naturais (Marengo e Valverde, 2007).

Apesar de se poder prever, em escala global, as possíveis consequências das alterações climáticas (elevação dos níveis dos mares e mudança do padrão das precipitações, por exemplo), existe uma grande dificuldade em quantificar, em escala local, esses impactos. Regiões mais vulneráveis têm se mostrado ainda mais fragilizadas quando submetidas às adversidades climáticas.

O semiárido brasileiro é uma delas, principalmente devido às suas peculiaridades: grande variabilidade temporal e espacial das precipitações (com média anual em torno de 800 mm) e altas taxas de evaporação (da ordem de 2.000 mm). Ocupando uma área de 969.589,4 km² (MI, 2005), abrange oito dos nove estados da Região Nordeste, incluindo totalmente o estado do Ceará.

No Ceará, devido ao predomínio de embasamento cristalino e rios intermitentes, o armazenamento de água subterrânea se restringe às zonas fraturadas. Sendo assim, o abastecimento da população só se faz possível através das águas acumuladas em reservatórios superficiais. Segundo Araújo (2003), 93% da água ofertada aos usuários no Ceará são provenientes dos açudes. Essas características hidroclimatológicas tornam essa região bastante vulnerável às mudanças climáticas, em especial no que diz respeito aos seus estoques de água. Sendo assim, a investigação das prováveis consequências das alterações do clima, especialmente na precipitação e na evaporação, e seus reflexos nos estoques de água é fundamental para a gestão dos recursos hídricos da região.

No estudo desenvolvido, analisou-se o impacto das mudanças climáticas no regime de vazões, através do aumento e diminuição da evaporação. Para isso, utilizaram-se dados de vazões afluentes de um rio característico da região semiárida. O estudo, no entanto, não se restringe ao rio em questão, uma vez que foram simulados diferentes coeficientes de variação (0,6 a 1,6), típicos de rios do semiárido.

2 As Mudanças Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos

A análise do comportamento das chuvas na Região Nordeste do Brasil (NEB) é de grande relevância, devido à grande irregularidade apresentada em escala de tempo e espaço, não somente sob o ponto de vista climático, mas também pelas consequências de ordem econômica, social e cultural advindas (Lucena *et al.*, 2011). O autor ainda ressalta que a variabilidade do clima sobre o Nordeste é modulada por padrões atmosféricos e oceânicos de grande escala que se processam (conjuntamente ou não) sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais. Um exemplo clássico de interação atmosfera/oceano são os fenômenos El Niño (La Niña), caracterizados pelo aquecimento (esfriamento) anormal das águas superficiais no Pacífico Tropical (Lázaro, 2011).

O El Niño (La Niña) tem forte influência sobre a variabilidade interanual das precipitações do Nordeste. Conforme Haylock *et al.* (2006), modificações nas condições do fenômeno do El Niño/Oscilação Sul entre 1960 e 2000, indicadas por condições mais negativas do Índice de Oscilação Sul (IOS), tiveram papel importante nas mudanças detectadas nas séries temporais de precipitação.

Outro sistema importante na geração da precipitação na região equatorial é a Zona de Convergência Tropical (ZCIT). O Nordeste, localizado na região equatorial, apresenta duas estações bem definidas: a chuvosa e a seca. Esta ocorre quando a ZCIT está na sua posição mais ao norte, cerca de 14°N, em agosto-setembro; e aquela, quando a ZCIT migra para a posição mais ao sul, cerca de 4°S, durante março/abril. A determinação das estações é influenciada tanto pela ZCIT como pelos ventos alísios e pelo aquecimento das águas do Pacífico – fenômenos La Nina/El Niño (Lázaro, 2011; Haylock *et al.*, 2006). Um estudo desenvolvido por Santos e Manzi (2011) analisou as tendências dos eventos extremos de precipitação sobre o estado do Ceará, associando-os às anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos Oceanos Pacífico e Atlântico. Os resultados mostraram que existem características de aumento nas intensidades das secas e diminuição dos eventos de precipitação forte, e que o aumento nas anomalias de TSM no Pacífico e ao norte do equador, no Oceano Atlântico, acarreta em um aumento do número de dias secos consecutivos no norte do Ceará.

As consequências das mudanças climáticas na precipitação, evaporação, umidade e circulação atmosférica, entre outras, ainda são difíceis de prever, principalmente na região semiárida. No entanto, diversos estudos pelo mundo são desenvolvidos nessa linha, como se pode conferir a seguir.

A variabilidade climática em longo prazo tem sido estudada pelos centros climáticos do Brasil e do Nordeste (Marengo, 2002 e Souza Filho, 2003). Segundo Marengo (2009), é necessário conhecer primeiramente a variabilidade associada às incertezas das futuras mudanças climáticas, seja devido à variação natural do clima ou à ação antropogênica. O mesmo autor ressalta que as mudanças climáticas provavelmente tornarão mais difíceis o acesso à água no semiárido. Um cenário de pouca chuva (ou de ausência dela), acompanhado das altas temperaturas (e conseqüente elevação das taxas de evaporação), acarretará uma crise de abastecimento em níveis catastróficos, atingindo diretamente os agricultores mais pobres da região, em especial os de subsistência.

Os impactos das mudanças climáticas nas disponibilidades hídricas no Nordeste foram avaliados por Campos *et al.* (2003) na bacia hidrográfica do açude Várzea do Boi, no Ceará. Duas metodologias foram utilizadas para estimar as disponibilidades hídricas do reservatório. Na primeira, a vazão regularizada foi estimada por intermédio da solução do balanço hídrico do reservatório, utilizando o método de Monte Carlo. Na segunda, a vazão regularizada foi estimada para um reservatório infinito, segundo a formulação de Campos e Ibiapina (1997). Os impactos avaliados pelos autores seguiram dois padrões. O Padrão I considerou que a precipitação e a evaporação cresceram a uma mesma taxa, enquanto o Padrão II considerou que, além do crescimento a uma mesma taxa da precipitação e evaporação, o coeficiente de escoamento superficial crescerá de acordo com uma regra polinomial.

O estudo concluiu que, considerando o Padrão I, existe tendência de redução tanto nas vazões regularizadas quanto na eficiência do açude, porém, ao considerar o reservatório infinito, existe uma tendência de aumento na vazão regularizada e diminuição na sua eficiência. Para o Padrão II, há tendência de crescimento nas vazões regularizadas tanto para a topologia existente da bacia hidrográfica do açude quanto para a consideração do reservatório infinito, porém, observaram que houve uma diminuição na eficiência do reservatório.

Um estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2009) observou o impacto na evapotranspiração e na vazão da bacia hidrográfica do rio Ipojuca, em Pernambuco, considerando o aumento de 1 °C na temperatura. Os resultados indicaram que o comportamento da evapotranspiração acompanha a tendência de aumento de temperatura, tanto durante os períodos de menor disponibilidade hídrica quanto nos de maior. Para os períodos de maior vazão, observou-se uma tendência da sua diminuição com o aumento da temperatura; para os períodos de menor vazão, não foi observado um padrão. Concluíram que, apesar dos resultados obtidos serem para um modelo hidrológico de dois parâmetros, essa tendência de variação na vazão é preocupante.

As variações que ocorrem na temperatura global podem ser detectadas e quantificadas. Entretanto, os impactos delas nos padrões da circulação atmosférica, da umidade, da precipitação, da evaporação e, principalmente, nas disponibilidades hídricas de uma determinada região ainda são muito difíceis de prever. Um estudo desenvolvido por Souza *et al.* (2010), utilizando o *software* Stella, analisou os possíveis efeitos das mudanças climáticas na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. Considerando os acréscimos de 1 °C na temperatura e de 6,9% na precipitação no período de 1995-2060, foi verificada uma tendência de redução de -15,16% na “precipitação direta” e significativas alterações nas taxas evapotranspirométricas para diferentes tipos de uso: “pasto” (+33,34%), “cultivo” (+23,77%), “cerrado” (+8,54%) e “mata” (-9,49%).

Samuels *et al.* (2010), aplicando técnicas de *downscaling*, avaliaram o efeito das futuras mudanças climáticas na quantidade e na forma de precipitação (chuva ou neve), seus efeitos na vazão do rio Jordão e seus afluentes, que são os principais recursos hídricos da região do Oriente Médio. Constataram que as mudanças esperadas na forma de precipitação foram quase insignificantes. Porém, os resultados indicaram um futuro aumento da evaporação e diminuição da precipitação média anual.

Na Região Amazônica, um estudo desenvolvido por Liberato e Brito (2011) analisou os impactos das mudanças climáticas, através dos cenários A2 e B2 do IPCC, nos componentes do balanço hídrico climático para os estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima. A partir dos dados de temperatura e precipitação do INMET (1961-2005), da CEPLAC (1983-1999) e da reanálise do NCEP/NCAR (1983-1995), os autores aplicaram o método de Thornthwaite & Mather (1957) para realizar o balanço hídrico. As projeções mostraram tendência de clima mais seco, diminuição na umidade do solo, redução na vazão dos rios, aumento no risco de incêndio e diminuição no escoamento superficial e subsuperficial para a Amazônia Ocidental até 2100.

Um estudo desenvolvido pelos pesquisadores do oeste da América do Norte, publicado por Fobes *et al.* (2011), diagnosticou que os recursos hídricos ao sul de Alberta, no Canadá, são vulneráveis às mudanças climáticas. O estudo

parametrizou e verificou o sistema de modelagem agro-hidrológica para uma pequena bacia ao sul de Alberta. Além disso, simulou as mudanças para o futuro hidrológico da bacia. Utilizaram séries de cerca de 30 anos para simular cinco futuros cenários hidrológicos e comparar com os dados de 1961-1990. As projeções anuais de um clima mais quente e úmido na maior parte da região resultaram em uma mudança na distribuição de vazões sazonais, com um aumento do volume das vazões no inverno e na primavera e uma redução no verão. Ainda observaram que, para quatro dos cinco cenários, houve uma queda do volume da vazão em relação ao cenário de referência (1961-1990). Além disso, ocorreu um pequeno aumento na evapotranspiração real e na média do escoamento anual, atribuídos aos invernos mais quentes.

Considerando a relevância desses estudos que avaliam os impactos dessas prospectivas mudanças climáticas nos padrões de precipitação, evaporação, vazão regularizada, e a importância de se verificar a influência dessas mudanças na variabilidade das precipitações do semiárido e nos estoques de água para o abastecimento, o presente trabalho avalia a influência da mudança dos padrões da precipitação e da evaporação na vazão regularizada dos reservatórios da região semiárida. Isto é, avalia-se a relação conjunta da evaporação e precipitação, através da lâmina líquida (E_L), no balanço hídrico do reservatório, simulado a nível mensal, com retiradas acontecendo simultaneamente.

Um estudo semelhante foi desenvolvido por Souza *et al.* (2001), utilizando a metodologia de solução do balanço hídrico e levando em consideração apenas duas estações: uma estação úmida (quando ocorre todo o aporte de água aos reservatórios) e uma estação seca (quando os rios permanecem secos e consideram-se todas as retiradas acontecendo neste período). A partir disso, analisou-se a influência do fator de evaporação (f_E) proposto por Campos (1987) e a variabilidade dos deflúvios anuais.

3 Metodologia

A metodologia adotada no presente trabalho procurou avaliar os impactos das mudanças climáticas na vazão regularizada por um reservatório sob dois cenários. Para tanto, foi coletada a série de dados de vazão afluente de um rio característico da região semiárida para geração das séries sintéticas com a utilização do programa SIMRES, que simula o comportamento de um reservatório pelo Método de Monte Carlo.

E ainda foram necessários dados de evaporação e precipitação para a composição dos cenários, além de serem dados de entrada para a simulação do programa SIMRES.

A seguir, são apresentados os dados utilizados nas simulações do programa SIMRES e os cenários de mudanças climáticas adotados.

3.1. Vazões Afluentes

Para a geração das séries sintéticas, foram utilizados os dados de vazão afluente de um rio característico da região, com regime intermitente, escoamento predominante entre os meses de fevereiro e maio, e com grande variabilidade interanual (Figura 1). Considerou-se neste estudo que as características hidrológicas dos rios são as que se seguem:

- Volume afluente médio anual (μ): 126,3 hm³/ ano
- Desvio padrão dos deflúvios anuais (σ): 151,4 hm³/ ano
- Coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV): 1,2

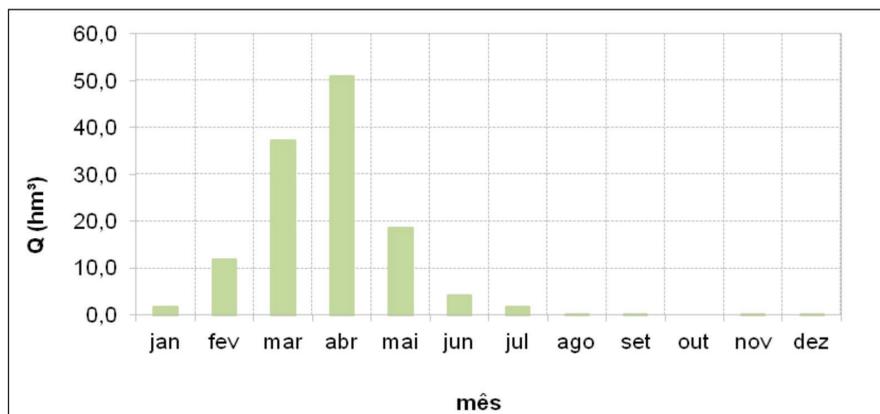


Figura 1: Vazões médias mensais de um rio característico da região semiárida.

3.2 Precipitação

Foram utilizados os dados do posto pluviométrico de Pentecoste (código 2871549), que caracteriza bem as precipitações da região semiárida. Na Tabela 1, apresentam-se as precipitações médias mensais e a distribuição destas ao longo dos meses.

Tabela 1: Precipitação mensal média na estação climatológica de Pentecoste.

| Estação | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Total (mm) |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|-----|-----|-----|------|------------|
| Pentecoste | 66,80 | 121,4 | 235,1 | 212,8 | 143,5 | 58,1 | 40,40 | 6,1 | 4,6 | 5,2 | 5,5 | 18,5 | 918,00 |

Fonte: Ceará (1996).

3.3 Evaporação

Para o estudo, utilizou-se o posto de Sobral como característico da evaporação em uma bacia da região semiárida. A evaporação anual média observada foi de 1.840 mm (tubo Piché), distribuída ao longo dos meses, segundo a Tabela 2.

Tabela 2: Evaporação média na estação de Sobral

| Mês | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Total |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Ei (mm) | 158 | 105 | 75 | 71 | 78 | 108 | 154 | 199 | 215 | 247 | 220 | 210 | 1.840 |

Fonte: INMET (1992).

3.4. Evaporação líquida no lago

O dado de evaporação líquida (E_L) utilizado na simulação da vazão regularizada é uma síntese das tabelas de precipitação e evaporação apresentadas. A evaporação líquida nada mais é do que o balanço entre a evaporação e a precipitação (Tabela 3).

Tabela 3: Evaporação líquida

| Mês | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Total |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|
| Ei (mm) | 158 | 105 | 75 | 71 | 78 | 108 | 154 | 199 | 215 | 247 | 220 | 210 | 1.840 |
| Pi (mm) | 66,8 | 121,4 | 235,1 | 212,8 | 143,5 | 58,1 | 40,4 | 6,1 | 4,6 | 5,2 | 5,5 | 18,5 | 918 |
| Ei-Pi (mm) | 91 | -16 | -160 | -142 | -65 | 50 | 114 | 193 | 210 | 242 | 215 | 192 | 922 |

3.5 A simulação do reservatório utilizando o programa SIMRES

Utilizando a série sintética ou histórica das vazões afluentes ao reservatório, é possível simular quanto um reservatório regularizará, mediante a solução da equação do seu balanço hídrico.

Nesse experimento, as vazões regularizadas foram calculadas mediante a simulação estocástica, considerando o reservatório em seu estado de equilíbrio, para não haver interferência das condições iniciais.

Inicialmente, geraram-se séries de vazão de 5.000 anos para obtenção da vazão de equilíbrio do reservatório, com a utilização do programa SIMRES, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (Campos *et al.*, 1999), que simula o comportamento de um reservatório pelo Método de Monte Carlo.

O método utiliza uma distribuição de probabilidade teórica para a representação dos valores, no caso, as vazões anuais, serialmente independentes. A distribuição Gamma II é comumente usada para a representação das vazões anuais na região. Segundo Yevjevich (1972), as distribuições Gamma III e Lognormal de três parâmetros não possuem vantagens significativas quando comparadas com as distribuições de dois parâmetros, motivo pelo qual foi escolhida a função Gamma II.

Studart (2000), ao estudar o comportamento da vazão regularizada, observou que, embora as condições iniciais tenham grande influência nos valores da vazão regularizada, com o passar do tempo, essa influência diminui e, após um

longo período, o processo se estabiliza em uma condição de equilíbrio. Então, concluiu que o processo de armazenamento passaria por dois estados distintos:

- estado transiente: $Q_r = f(\mu, \sigma, V_0, H, K, G, E_L, \alpha)$
- estado de equilíbrio: $Q_r = f(\mu, \sigma, K, G, E_L, \alpha)$

em que Q_r é a vazão a ser regularizada pelo reservatório em questão; μ é a média dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório; σ é o desvio padrão dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório; V_0 é o volume inicial assumido para o reservatório; H é o horizonte de planejamento (em anos); K é a capacidade do reservatório; G é a garantia (em %); E_L é a evaporação líquida no reservatório; e α é o fator de forma do reservatório.

Pode-se ainda agrupar alguns parâmetros utilizando-se os fatores adimensionais de capacidade (f_k) e de retirada (f_M), definidos por Campos (1987):

$$f_k = K/\mu \tag{1}$$

$$f_M = M/K \tag{2}$$

em que M é o volume anual regularizado. Assim, sabendo que o coeficiente de variação das séries dos deflúvios afluentes ao reservatório é dado por:

$$CV_{def} = \sigma/\mu \tag{3}$$

Então, tem-se:

$$\text{estado transiente: } f_M = f(CV_{def}, V_0, H, f_k, G, E_L, \alpha)$$

$$\text{estado de equilíbrio: } f_M = f(CV_{def}, G, f_k, E_L, \alpha)$$

No presente trabalho, considerou-se que $G=90\%$ e $\alpha= 14.259$ (característico de um açude do semiárido). E os parâmetros CV_{def} , f_k e E_L sofreram alterações. CV_{def} e f_k assumiram os seguintes valores:

$$f_k = 1,0, 1,5, 2,0 \text{ e } 2,5$$

$$CV_{def} = 0,6 \text{ a } 1,6$$

3.6. Cenários de mudanças climáticas avaliados

No presente artigo, analisou-se a influência das alterações climáticas em rios do semiárido a partir da alteração na lâmina líquida, sob dois cenários de variabilidade das vazões, conforme explicitado a seguir:

- **Cenário a:** a evaporação cresce em uma taxa maior do que a precipitação, e os novos valores de E_L variam entre 10% e 100%. (Tabela 4)
- **Cenário b:** a evaporação cresce em uma taxa menor do que a precipitação, e os novos valores de E_L variam entre 10% e 90%. (Tabela 5)

As novas lâminas líquidas (E_L) utilizadas na simulação do reservatório para o Cenário a e Cenário b podem ser observadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

O reservatório não foi simulado para um decréscimo na lâmina de 100%, pois o balanço entre evaporação e precipitação de sua lâmina líquida resultou em zero, tornando a simulação inviável.

Tabela 4: Lâminas de evaporação líquida considerando o Cenário a.

| Aumento da Lâmina | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 100% |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Relação Ei-Pi (m) | 1,01 | 1,11 | 1,20 | 1,29 | 1,38 | 1,47 | 1,57 | 1,66 | 1,75 | 1,84 |

Tabela 5: Lâminas de evaporação líquida considerando o Cenário b.

| Relação Ei-Pi (mm) | Decréscimo da lâmina | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--|
| | -10% | -20% | -30% | -40% | -50% | -60% | -70% | -80% | -90% | -100% | |
| Ei-Pi (mm) | 0,83 | 0,74 | 0,65 | 0,55 | 0,46 | 0,37 | 0,28 | 0,18 | 0,09 | 0,0 | |

4 Resultados e discussão

Para a análise dos cenários, foram calculados os desvios relacionando a vazão adimensional atual (f_M^A) com as vazões para os dois cenários individuais (f_M), conforme a equação 4:

$$\delta f_M = [(f_M - f_M^A) / f_M^A] \times 100 \quad (4)$$

Desvios negativos significam que f_M é inferior a f_M^A , ou seja, houve uma perda em termos de vazão regularizada. Por outro lado, desvios positivos indicam um ganho do reservatório em termos de vazão regularizada. Os hachurados nas Tabelas 6 a 9 indicam desvios de no máximo 10% para os dois cenários.

No Cenário a, com a evaporação crescendo a uma taxa mais rápida do que a precipitação, aumentaram-se as perdas na vazão regularizada, principalmente à medida que o CV aumentou.

Para esse cenário, observa-se que, caso as mudanças climáticas interfiram no balanço entre a evaporação e a precipitação, traduzida pela lâmina líquida E_L , haverá uma diminuição da quantidade de água ofertada pelos reservatórios da região. Os resultados dos desvios nas vazões regularizadas para o aumento da lâmina para $f_k = 1,5$ e 2,5 podem ser vistos nas Tabelas 6 e 7 e nas Figuras 2 e 3.

Tabela 6: Desvios das vazões regularizadas para o Cenário a para $G=90\%$ e $f_k=1,5$

| Aumento da lâmina (%) | Perdas na Vazão Regularizada (f_M) | | | | | |
|-----------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | CV = 0,6 | CV = 0,8 | CV = 1,0 | CV = 1,2 | CV = 1,4 | CV = 1,6 |
| 10% | 1,6% | 1,7% | 2,4% | 2,6% | 2,8% | 3,3% |
| 20% | 3,4% | 3,7% | 4,9% | 5,2% | 6,1% | 7,0% |
| 30% | 4,9% | 5,2% | 6,8% | 7,6% | 8,7% | 10,3% |
| 40% | 6,3% | 6,9% | 8,8% | 10,0% | 11,6% | 13,4% |
| 50% | 7,9% | 8,6% | 11,0% | 12,2% | 14,2% | 16,4% |
| 60% | 9,4% | 10,3% | 12,8% | 14,8% | 16,5% | 19,2% |
| 70% | 11,0% | 12,1% | 15,2% | 17,4% | 19,4% | 22,6% |
| 80% | 12,3% | 13,9% | 17,2% | 19,8% | 22,2% | 25,6% |
| 90% | 13,8% | 15,6% | 19,4% | 21,8% | 24,8% | 28,1% |
| 100% | 15,3% | 17,3% | 21,3% | 23,8% | 27,4% | 30,9% |

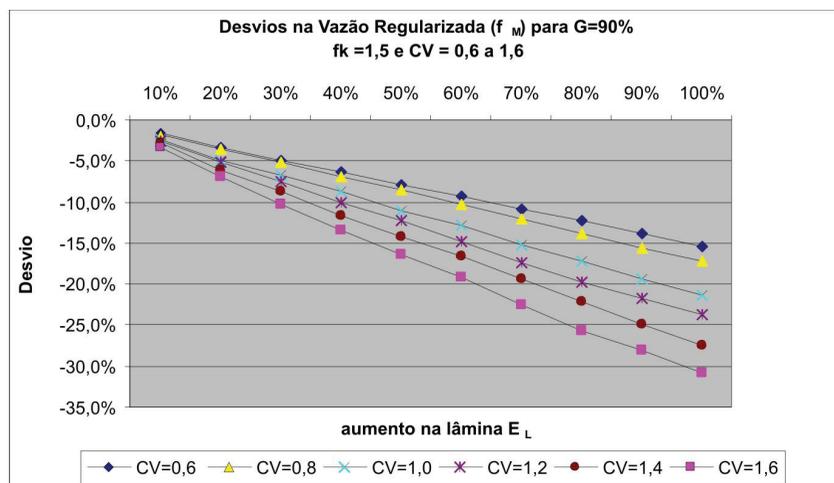


Figura 2: Desvios na vazão regularizada para $G=90\%$, $f_k=1,5$ e $CV = 0,6$ a $1,6$.

Tabela 7: Desvios das vazões regularizadas para o Cenário a para $G=90\%$ e $f_k=2,5$

| Aumento da lâmina (%) | Perdas na Vazão Regularizada (f_M) | | | | | |
|-----------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | CV = 0,6 | CV = 0,8 | CV = 1,0 | CV = 1,2 | CV = 1,4 | CV = 1,6 |
| 10% | 1,7% | 1,9% | 2,2% | 2,7% | 3,1% | 3,6% |
| 20% | 3,3% | 4,0% | 4,6% | 6,0% | 6,6% | 7,6% |
| 30% | 5,1% | 5,9% | 6,9% | 8,3% | 9,5% | 10,6% |
| 40% | 6,7% | 7,9% | 9,0% | 11,1% | 12,6% | 13,8% |
| 50% | 8,3% | 9,5% | 11,2% | 13,7% | 15,3% | 16,6% |
| 60% | 9,9% | 11,3% | 13,5% | 16,2% | 18,1% | 19,7% |
| 70% | 11,6% | 13,5% | 15,8% | 18,8% | 21,2% | 23,1% |
| 80% | 13,2% | 15,4% | 18,0% | 21,2% | 23,7% | 26,1% |
| 90% | 14,9% | 17,1% | 19,8% | 23,5% | 26,3% | 29,1% |
| 100% | 16,6% | 18,9% | 22,2% | 25,7% | 28,6% | 32,5% |

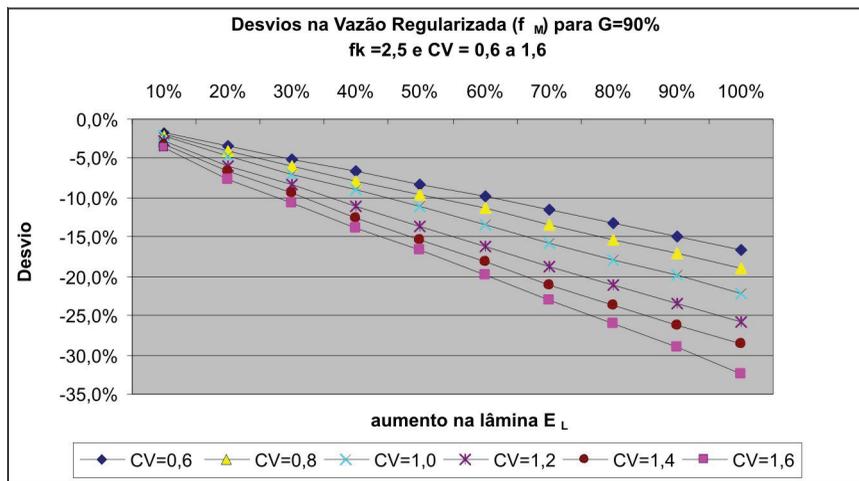


Figura 3: Desvios na vazão regularizada para $G=90\%$, $f_k=2,5$ e $CV = 0,6$ a $1,6$.

Para o Cenário b (evaporação crescendo a uma taxa menor que a precipitação), observou-se que a vazão regularizada aumentou com a diminuição da lâmina líquida (E_L), comportamento contrário ao observado no Cenário a. Percebe-se também que, nos rios com alta variabilidade – CVs mais altos –, esse ganho seria maior. O comportamento da vazão regularizada pode ser observado nas Tabelas 8 e 9 e nas Figuras 4 e 5, para um $f_k = 1,5$ e $2,5$.

Tabela 8: Desvios das vazões regularizadas para o Cenário b para $G=90\%$ e $f_k=1,5$

| Aumento da lâmina (%) | Perdas na Vazão Regularizada (f_M) | | | | | |
|-----------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | CV = 0,6 | CV = 0,8 | CV = 1,0 | CV = 1,2 | CV = 1,4 | CV = 1,6 |
| 10% | 1,6% | 1,8% | 2,2% | 2,6% | 3,1% | 3,3% |
| 20% | 3,2% | 3,8% | 4,7% | 5,4% | 5,9% | 7,0% |
| 30% | 4,9% | 5,8% | 6,9% | 8,0% | 9,0% | 10,3% |
| 40% | 6,7% | 7,7% | 9,5% | 10,8% | 12,3% | 14,2% |
| 50% | 8,4% | 9,4% | 12,0% | 13,4% | 15,4% | 17,5% |
| 60% | 10,1% | 11,4% | 14,4% | 16,4% | 18,4% | 21,4% |
| 70% | 11,9% | 13,3% | 16,7% | 19,0% | 21,7% | 25,1% |
| 80% | 13,9% | 15,6% | 19,4% | 22,0% | 25,5% | 29,2% |
| 90% | 15,6% | 17,6% | 22,0% | 24,4% | 28,6% | 32,6% |
| 100% | 1,6% | 1,8% | 2,2% | 2,6% | 3,1% | 3,3% |

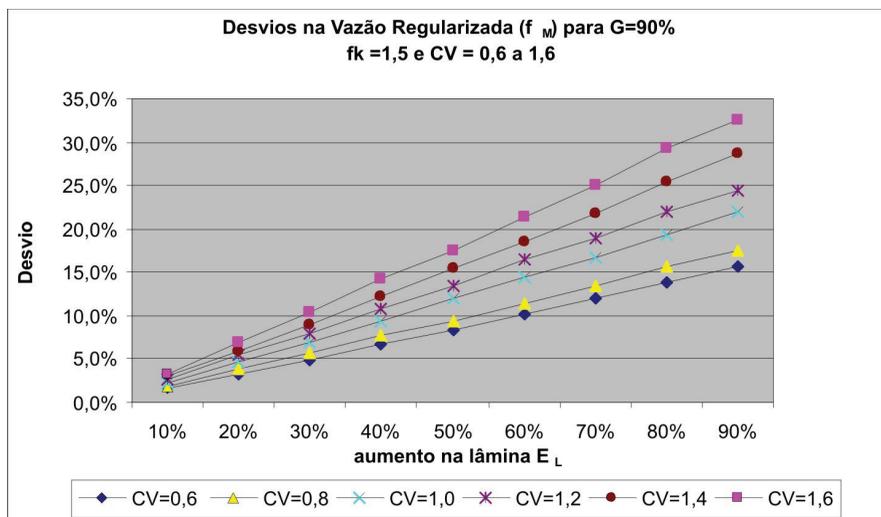


Figura 4: Desvios na vazão regularizada (f_M) para $G=90\%$, $f_k=1,5$ e $CV = 0,6$ a $1,6$.

Tabela 9: Desvios das vazões regularizadas para o Cenário b para $G=90\%$ e $f_k=2,5$

| Aumento da lâmina (%) | Perdas na Vazão Regularizada (f_M) | | | | | |
|-----------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | CV = 0,6 | CV = 0,8 | CV = 1,0 | CV = 1,2 | CV = 1,4 | CV = 1,6 |
| 10% | 1,6% | 1,8% | 2,3% | 2,7% | 3,3% | 3,4% |
| 20% | 3,4% | 3,8% | 4,6% | 5,3% | 6,2% | 7,0% |
| 30% | 5,2% | 5,6% | 6,9% | 8,0% | 9,1% | 10,4% |
| 40% | 7,0% | 7,9% | 9,5% | 10,8% | 12,2% | 14,4% |
| 50% | 8,7% | 9,8% | 11,9% | 13,5% | 15,1% | 18,3% |
| 60% | 10,5% | 11,8% | 14,2% | 16,0% | 18,2% | 21,9% |
| 70% | 12,3% | 13,8% | 16,5% | 18,8% | 21,4% | 25,7% |
| 80% | 14,3% | 16,0% | 19,2% | 21,8% | 25,0% | 29,7% |
| 90% | 16,1% | 17,8% | 21,8% | 24,6% | 28,3% | 33,5% |
| 100% | 1,6% | 1,8% | 2,3% | 2,7% | 3,3% | 3,4% |

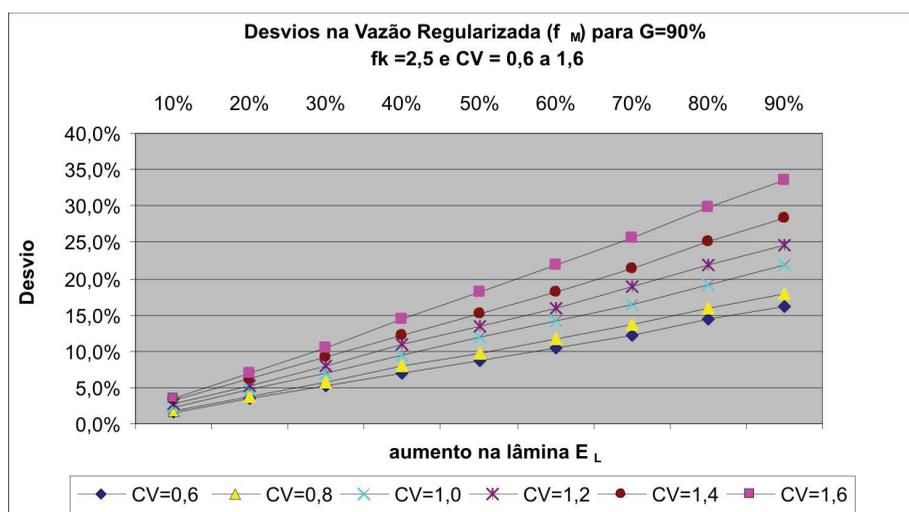


Figura 5: Desvios na vazão regularizada (f_M) para $G=90\%$, $f_k=2,5$ e $CV = 0,6$ a $1,6$.

Ressalta-se que foram simuladas as capacidades $f_k = 1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$, no entanto, como os resultados não apresentaram sensibilidade a esse parâmetro, optou-se por apresentar apenas os resultados para $f_k = 1,5$ e $2,5$.

Conforme observado nas Figuras de 2 a 5, os reservatórios situados em rios de maior variabilidade (CV=1,2, 1,4 e 1,6) são mais vulneráveis às variações climáticas do que os demais. Tais CVs são típicos do Nordeste Semiárido, conforme se observa na Tabela 10, a qual apresenta coeficiente de variação de diversos rios das regiões semiáridas.

Tabela 10: Coeficiente de variação dos deflúvios anuais em rios de regiões semiáridas.

| Rio | País | CV |
|---------------------------|-------------|------|
| Diamantina | Austrália | 1,19 |
| Warrangaba | Austrália | 1,11 |
| Jaguaribe Orós | Brasil – CE | 1,24 |
| Banabuiú – Senador Pompeu | Brasil – CE | 1,76 |

5 Conclusão

Os solos da região semiárida, em sua maioria, rasos, com rochas quase aflorantes, comprometem a existência de aquíferos e sua recarga. As altas temperaturas previstas pelo IPCC (2007) conduzem a altas taxas de evaporação, o que poderá afetar o balanço hídrico e a maioria dos rios intermitentes da região. Além disso, devido ao fato de a região concentrar uma das maiores populações entre os semiáridos do mundo, vai gerar grande pressão sobre os recursos hídricos da região.

O estudo concluiu que os rios que apresentam alta variabilidade (CV entre 1,2 e 1,6), como é característico das regiões semiáridas, são mais sensíveis a qualquer mudança que venha a ocorrer na precipitação ou evaporação dessa região. E que a vazão regularizada nos cenários analisados, para um mesmo CV, não é sensível à variação de f_k .

Além disso, observa-se que, em rios menos variáveis – CV iguais a 0,6 e 0,8 –, no Cenário a, é necessário que a lâmina líquida (E_L) aumente 60% para que o reservatório perca cerca de 10% de sua vazão regularizada. E para rios de alta variabilidade – CV iguais a 1,4 e 1,6 –, E_L só precisaria sofrer um aumento de 30% para que o reservatório sofresse essa mesma redução na vazão regularizada.

O mesmo comportamento foi observado no Cenário b. Em rios de menor variabilidade – CV's entre 0,6 e 0,8 –, seria necessário diminuir 50% da lâmina líquida para obter-se um ganho de 10% na vazão regularizada; em rios de maior variabilidade, basta um decréscimo de 20% na lâmina líquida do reservatório para que este obtenha ganhos cerca de 10% de sua vazão regularizada.

Uma vez que a maioria dos rios do Nordeste Semiárido apresenta coeficientes de variação dos deflúvios anuais em torno de 1,2 a 1,6, e praticamente a disponibilidade hídrica da região depende de reservatórios superficiais, cuidados maiores deverão de se ter com esses reservatórios perante as variabilidades climáticas, pois eles, como mostrado no presente estudo, são bastante sensíveis a essas variações.

Sendo assim, se as previsões realizadas pelo IPCC (2007) de mudanças na evaporação e precipitação se concretizarem, a região semiárida será bastante afetada.

O presente artigo ressalta a importância de medidas preventivas e mitigadoras que considerem os cenários e os efeitos das mudanças climáticas na gestão dos recursos hídricos.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenadoria de Capacitação de Recursos Humanos Programa de Demanda Social – CAPES pelo apoio à pesquisa.

Referências

- ARAÚJO, J. C. Assoreamento em reservatórios do Semiárido: modelagem e validação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, abr./jun. 2003, 39–56.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 36, n. 5, p. 717-726, maio 2001.
- BRANGANZA, K. et al. Simple indices of global climate variability and change: Part I – variability and correlation structure. *Climate Dynamics*, v. 20, 491-502, 2003.

- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. *Nova delimitação do semiárido brasileiro*. 2005. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/desenvolvimentoregional/publicacoes/delimitacao.asp>>. Acesso em: 13 maio. 2011.
- CAMPOS, J. N. B. A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rate. Tese (Doutorado) - Fort Collins, Colorado State University. PhD thesis, 1987.
- CAMPOS, J. N. B. et al. *SIMRES: um laboratório computacional de teoria da estocagem de águas*. Fortaleza, 1999. Disponível em: <www.deha.ufc.br/nilson>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- HAYLOCK, M. et al. Trends in total and extreme south american rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, Apr. 2006.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais climatológicas: 1961/1990*. Brasília, DF, 1992. 84 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ALLEY, R., BERNTSEN, T., BINDOFF, N. L., CHEN, Z., et al. (Ed.). Disponível em: <http://www.ipcc.ch>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- LÁZARO, Y. M. C. *Mudança climática no Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia da Prata: avaliação dos modelos do IPCC e cenários para o século XXI*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- LIBERATO, M. A.; BRITO, B. I. J. Influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 3, p.170-180, 2010.
- LUCENA, B. D.; FILHO, G. F. M.; SERVAIN, J. Avaliação do impacto de eventos climáticos extremos nos oceanos Pacífico e Atlântico sobre a estação chuvosa no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 297-312, 2011.
- MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, Campinas, SP, v. 8, p. 5-28, 2007.
- MARENGO, J. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, SP, n. 16, p. 1-18, 2002.
- MARENGO, J. Vulnerability, impacts and adaptation (VIA) to climate change in the semi-arid region of Brazil. In: BRAZIL and climate change: vulnerability, impacts and adaptation. *Center for Strategic Studies and Management*, Brasília, 2009. p. 137-164.
- SAMUELS, R. et al. Climate change impacts on Jordan river flow: downscaling application from a regional climate model. *J. Hydrometeor*, v. 11, p. 860-879, 2010.
- SANTOS, C. A. C.; MANZI, O. A. Eventos extremos de precipitação no estado do Ceará e suas relações com a temperatura dos oceanos tropicais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, SP, v. 26, n. 1, p. 157-165, mar. 2011.
- SANTOS, N. D. et al. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n.5, p. 492-500, 2010.
- SILVA, F. I.; NÓBREGA, S. R.; GALVÍNCIO, D. J. Impacto das mudanças climáticas nas respostas hidrológicas do Rio Ipojuca (Pe) – Parte 2: cenários de aumento de temperatura. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 2, n. 2, p. 19-30, maio/ago. 2009.
- SOUZA FILHO, F. Variabilidade e mudança climática nos semiáridos brasileiros. In: TUCCI, C. E.; BRAGA, B. Clima e recursos hídricos no Brasil. Porto Alegre: *Associação Brasileira de Recursos Hídricos FBMC/ANA*, 2003. v. 9, p. 117-161.
- SOUZA, N. M. et al. Software Stella e o Comportamento Hidrológico na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros, afluente do rio Paracatu, em Cenário de Mudança Climática. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, Aracaju, v. 1, n.1, 2010.
- YEVJEVICH, V. *Probability and statistics in hydrology*. Fort Collins: Water Resources Publications, 1972. 302 p.

Sobre os autores

Andréa Pereira Cysne

Engenheira Civil pela Universidade de Fortaleza – UNIFOR. Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Professora do Instituto Federal do Ceará – Campus Limoeiro do Norte. Doutoranda do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Ticiana Marinho de Carvalho Studart

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestre e Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Professora Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Renata Mendes Luna

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará. Especialista em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Mestre e Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Professora Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará – UFC.