



## Water loss in transit in an intermittent river in Brazilian semi-arid

### *Perda d'água em trânsito em um rio intermitente no semiárido brasileiro*

Cristian Epifânio de Toledo<sup>1</sup>, Emanuely de Moura Silva Almeida<sup>2</sup>, Alexandre Vicente Lopes Neto<sup>3</sup>, Thályta Lharyssa Gonçalves Rodrigues Silva<sup>4</sup>, Filipe Augusto Rodrigues Santos<sup>5</sup>

**Abstract:** Riverwater often comes into contact with the underground flow in aquifers. When this contact occurs, the river and aquifer are considered to be hydraulically connected. In recent decades, there has been great interest in trying to improve understanding of the interactions occurring between superficial and subterranean water systems. A variety of analytical solutions have been proposed to describe the interaction of confined and free aquifers with adjacent rivers, including the quantification of the decrease of river flow along its course. The objective of the current study was to calibrate and validate a loss-in-transit flow model for rivers, and to evaluate the minimum flow that still permits connectivity between water sources in the Alto Jaguaribe basin. The methodology used was based on the equation of continuity and mass balance along the study river. A modified Araújo and Ribeiro equation showed strong applicability to loss-in-transit generation, with a mean loss in transit of 3.6% km<sup>-1</sup>, and a Nash and Sutcliffe Efficiency value of 0.29. On the other hand, the class-based loss of upstream flow generated 4 classes with a mean of 2.6% km<sup>-1</sup> and showed great improvement, reaching an NSE of 0.74 - high efficiency. Minimum flows were below the regular flow recorded by the Ceará Secretariat of Water Resources, showing that the ability exists in the region hydrological connectivity between reservoirs in the Alto Jaguaribe basin and for alluvial aquifers to be recharged.

**Key words:** Loss in transit; River flow; Hydrological connectivity; Jaguaribe River.

**Resumo:** A água de rios, em muitos casos, entra em contato com o escoamento subterrâneo nos aquíferos, quando isso ocorre, diz-se que rio e aquífero estão conectados hidráulicamente. Nas últimas décadas, houve grande interesse em compreender melhor essa interação que ocorre entre sistemas superficiais e subterrâneos de água. Diversas soluções analíticas podem ser encontradas para descrever a interação de aquíferos confinados e livres com rios adjacentes, como a quantificação da diminuição da vazão dos rios ao longo do seu curso. Assim, o propósito desse estudo foi calibrar e validar um modelo de perda em trânsito em rios, além de avaliar a vazão mínima que possibilite a conectividade entre reservatórios na bacia do Alto Jaguaribe. A metodologia utilizada foi baseada na equação da continuidade e no balanço de massa ao longo do rio. A equação de Araújo e Ribeiro modificada demonstrou grande aplicabilidade na geração da perda em trânsito, com valor médio de perda em trânsito de 3,6% km<sup>-1</sup> e uma Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) na validação de 0,29. Já a perda com base em classe da vazão a montante gerou 4 classes com médias de 2,6% km<sup>-1</sup> e apresentou grande melhoria na validação, chegando a um NSE de 0,74 – alta eficiência. As vazões mínimas ficaram abaixo da vazão regularizada colocada pela Secretaria de Recursos Hídricos - Ceará, demonstrando a capacidade de ocorrer a conectividade hidrológica entre açudes na bacia do Alto Jaguaribe e recarga dos aquíferos aluvionais.

**Palavras-chave:** Perda em trânsito. Escoamento fluvial. Conectividade hidrológica. Rio Jaguaribe.

\*Corresponding author

Submitted for publication on 04/07/2018 and approved 31/08/2018

<sup>1</sup>Professor da Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Palmeiras de Goiás, CEP 76.190-000, Palmeiras de Goiás, GO, Brasil, cristian.toledo@ueg.br

<sup>2</sup>Acadêmica do curso de Agronomia da da Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Palmeiras de Goiás, CEP 76.190-000, Palmeiras de Goiás, GO, Brasil, emanuely\_msa@hotmail.com

<sup>3</sup>Acadêmico do curso de Agronomia da da Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Palmeiras de Goiás, CEP 76.190-000, Palmeiras de Goiás, GO, Brasil, alexandre.lopes.neto@hotmail.com

<sup>4</sup>Acadêmica do curso de Agronomia da da Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Palmeiras de Goiás, CEP 76.190-000, Palmeiras de Goiás, GO, Brasil, lharyssa99@gmail.com

<sup>5</sup>Acadêmico do curso de Agronomia da da Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Palmeiras de Goiás, CEP 76.190-000, Palmeiras de Goiás, GO, Brasil, filipeaugustorodriguesantos@hotmail.com

## INTRODUCTION

The main hydrographic characteristics of the Brazilian semi-arid region are related directly to the low effective level of water availability, shallow soils with a crystalline basement and the concentration of rainfall within a few months, causing almost all regional rivers, streams and brooks to be ephemeral or temporary. Normally, rivers in this region cease their surface flow one month after the rains (ANDRADE *et al.*, 2010; VILLENEUVE *et al.*, 2015; MVANDABA *et al.*, 2018).

River-carried water will, in many cases, come into contact with the underground flows of local aquifers. When such contact occurs, the river and aquifer are considered to be hydraulically connected. In recent decades, there has been great interest in improving understanding of the interactions that occur between superficial and subterranean water systems. Some studies have sought to understand the physical processes governing river-aquifer interactions, developing analytical solutions for the related descriptive equations. Other studies, due in large part to the complexity of the phenomena inherent in river-aquifer systems, have sought to quantify river-aquifer interactions (LIMA *et al.*, 2007; WALTERS, 1990; HUANG *et al.*, 2015).

Several analytical solutions can be found in the literature to describe the interaction of confined, semi-confined and free aquifers with their adjacent rivers. For example, Jordan (1977), Lane (1983) and Vasconcelos *et al.* (2013), analyzed specific river-aquifer systems, and quantified the decrease of river flow along its course. In the Brazilian semi-arid region, the works of Araújo and Ribeiro (1996), Lima *et al.* (2007) and Costa *et al.* (2012; 2013) have been pioneering in this line of research.

An approach to water loss in transit along rivers in semi-arid regions, has used a continuity equation along the river course. A continuity equation is based on the mass balance, taking into account water removal and losses resulting from infiltration and evaporation along a watercourse (ARAÚJO; RIBEIRO, 1996).

The determination of loss in transit values is of key importance when calculating the flow rate required for hydrological connectivity between river sections. Hydrological connectivity, that is, the perennialization of the river promotes great gains to the human and wildlife populations that live along its banks since, in addition to enriching the landscape, year-round availability of riverine waters guarantees a perpetually green river-margin flora. Greening can also extend to a variety of irrigated crops, thus promoting increases in the local agricultural production and rural employment availability (TOLEDO *et al.*, 2014; VILLENEUVE *et al.*, 2015; MVANDABA *et al.*, 2018).

## INTRODUÇÃO

A principal característica hidrográfica do semiárido brasileiro está ligada diretamente a baixa taxa de disponibilidade hídrica efetiva, solos rasos em embasamento cristalino e a concentração da precipitação em alguns meses, o que faz com que os rios, riachos e córregos em quase sua totalidade sejam efêmeros ou temporários. Normalmente, os rios param de ter escoamento fluvial um mês depois das últimas chuvas (ANDRADE *et al.*, 2010; VILLENEUVE *et al.*, 2015; MVANDABA *et al.*, 2018).

A água de rios, em muitos casos, entra em contato com o escoamento subterrâneo nos aquíferos, quando ocorre esse contato, diz-se que rio e aquífero estão conectados hidráulicamente. Nas últimas décadas, houve grande interesse em compreender melhor essa interação que ocorre entre sistemas superficiais e subterrâneos de água. Alguns trabalhos buscaram, prioritariamente, o entendimento do processo físico da interação entre rios e aquíferos, desenvolvendo soluções analíticas para as equações governantes do problema. Outros trabalhos, devido, em grande parte, à complexidade dos fenômenos inerentes aos sistemas rio-aquífero, procuraram quantificar a interação rio-aquífero (LIMA *et al.* 2007; WALTERS, 1990; HUANG *et al.*, 2015)

Diversas soluções analíticas podem ser encontradas na literatura para descrever a interação de aquíferos confinados, semiconfinados e livres com rios adjacentes. Por exemplo, Jordan (1977), Lane (1983) e Vasconcelos *et al.* (2013), analisaram sistemas rio-aquífero específicos a partir da quantificação da diminuição da vazão dos rios ao longo do seu curso. No Semiárido brasileiro, os trabalhos de Araújo e Ribeiro (1996), Lima *et al.* (2007) e Costa *et al.* (2012; 2013) apresentam-se como pioneiros nessa linha de pesquisa.

Uma abordagem para perda de água em trânsito ao longo do rio para o semiárido tem sido realizada com base na equação da continuidade ao longo do rio. A equação da continuidade tem embasamento no balanço de massa, considerando retirada e perdas d'água distribuídas por infiltração e evaporação ao longo de um curso d'água (ARAÚJO; RIBEIRO, 1996).

A determinação da perda em trânsito em rio é de fundamental importância para se atingir a vazão que promove a conectividade hidrológica em trecho de rios. A conectividade hidrológica, ou seja, perenização do rio promove impactos social e econômico positivos nas populações instaladas às suas margens, além de mudar a paisagem, afinal, por ter água nos rios, a flora permanece sempre verde. Esse verde pode ainda se espalhar em diversas lavouras irrigadas, promovendo um incremento na produção e no trabalho rural (TOLEDO *et al.*, 2014; VILLENEUVE *et al.*, 2015; MVANDABA *et al.*, 2018).

The objective of the current study was to calibrate and test a model of water loss in transit for the Alto Jaguaribe basin, in addition to evaluating the minimum flow required for hydrological connectivity between water reservoirs, so allowing the Rio Jaguaribe above the Orós reservoir to run throughout the year.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The study was conducted in the Upper Jaguaribe sub-basin, in the southwestern portion of the State of Ceará (Figure 1), north-eastern Brazil. The Upper Jaguaribe drainage basin has a area of 24,639 km<sup>2</sup>. Average annual rainfall varies from 500 mm to 900 mm, with most rainfall occurring from January to May, and with marked irregularity in time and space. Average annual temperature is around 28°C. Geologically the region is comprised of pre-Cambrian crystalline basement rocks (81.28%), and sedimentary deposits (18.72%). According to Toledo *et al.* (2014) the basin had 4717 public and private reservoirs in the year 2011, which provided a potential holding volume of 3646 hm<sup>3</sup>.

Este estudo tem assim por propósito calibrar e validar um modelo de perda de água em trânsito para a bacia do Alto Jaguaribe, além de avaliar a vazão mínima que possibilita a conectividade hidrológica entre açudes, perenizando, desse modo, o rio Jaguaribe acima do açude Orós.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo é a sub-bacia do Alto Jaguaribe localizada na porção sudoeste do estado do Ceará (Figura 1). A bacia do Alto Jaguaribe abrange uma área de drenagem de 24.639 km<sup>2</sup>, a precipitação média anual varia de 500 mm a 900 mm, ocorrendo de janeiro a maio, e com acentuada irregularidade no tempo e no espaço. A temperatura média anual fica em torno de 28°C, e a geologia é constituída de rochas do embasamento cristalino pré-cambriano – 81,28% e depósitos sedimentares – 18,72%. Segundo Toledo *et al.* (2014), a bacia apresentou 4717 reservatórios públicos e particulares no ano de 2011, o que proporcionava um volume potencial de acumular 3646 hm<sup>3</sup>.

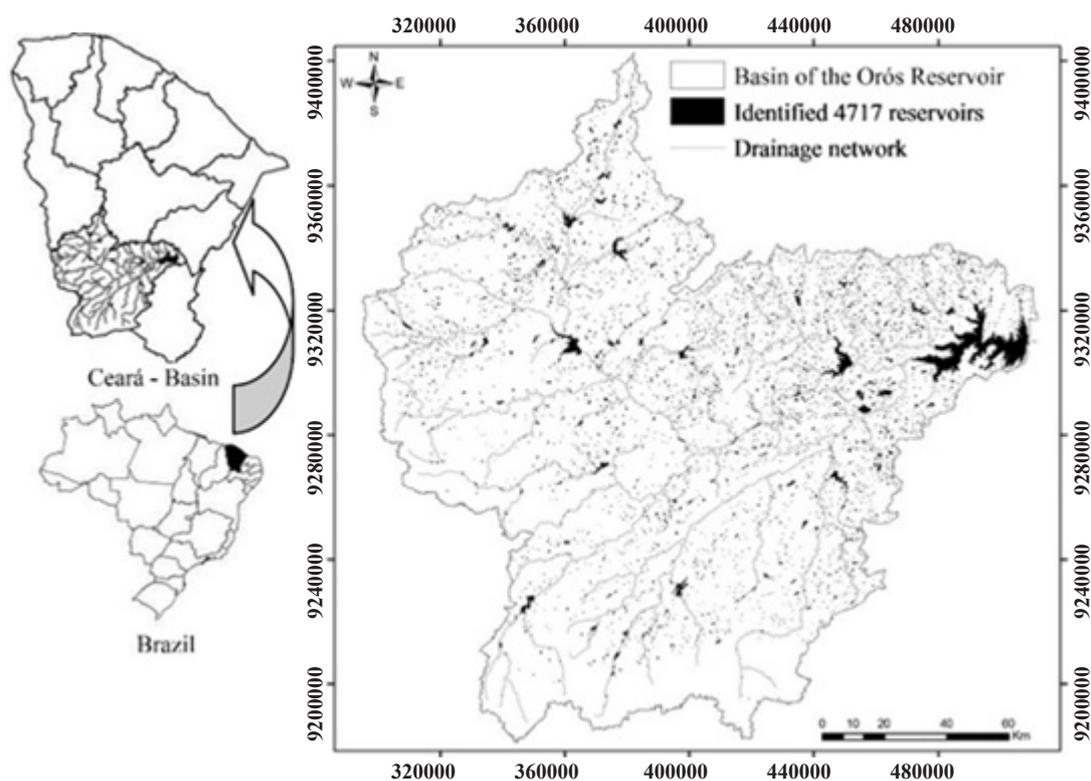


Figure 1 – Localization of the Upper Jaguaribe Basin, showing the drainage network and the main reservoirs in the area.

*Figura 1 - Localização da Bacia do Alto Jaguaribe, destacando a rede de drenagem e os principais reservatórios da bacia.*

The Rio Jaguaribe rises in the municipality of Tauá, although it receives the name of Jaguaribe only when within some 4 km of the city of Tauá. It runs into the Atlantic Ocean and has a length of some 264 km from its junction with the streams Carrapateiro and Trici to the Orós reservoir.

### Calibration of Loss in Transit ( $\rho$ )

Data to determine loss in transit values for the Rio Jaguaribe from to the Orós dam were obtained from the fluvial stations Posto Sítio Patos, located in the municipality of Jucás and Posto Iguatu, located in the municipality of Iguatu. The distance between the stations is 49 km from river, and they are both installed on the main course of the Rio Jaguaribe, on the final third of the river (Figure 2). The two stations are monitored by the Companhia de Serviço Geológico do Brasil (CPRM) and made available on the HidroWeb database (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>), under the control of the National Water Agency. From this a historical series of 10 years of data, across the period 2000 to 2009 was extracted.

O rio Jaguaribe tem sua nascente no município de Tauá, no entanto, o rio passa a receber o nome de Jaguaribe a aproximadamente 4 km da cidade de Tauá e deságua no Oceano Atlântico. Tem uma extensão 264 km da junção dos riachos Carrapateiro e Trici até alcançar o açude Orós.

### Calibração da Perda em Trânsito ( $\rho$ )

Os dados para determinar a perda em trânsito do rio Jaguaribe até o açude Orós foram obtidos nos postos fluviométricos Posto Sítio Patos, localizado no município de Jucás, e Posto Iguatu, que está localizado no município de Iguatu, sendo que a distância entre as seções é de 49 km de rio, e ambos estão instalados no rio Jaguaribe, ficando no terço final do rio (Figura 2). Os dois postos são monitorados pela Companhia de Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e disponibilizado no banco de dados HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>), sob gestão da Agência Nacional de Águas. Assim, foi levantada uma série histórica de 10 anos, que compreende os anos de 2000 a 2009.

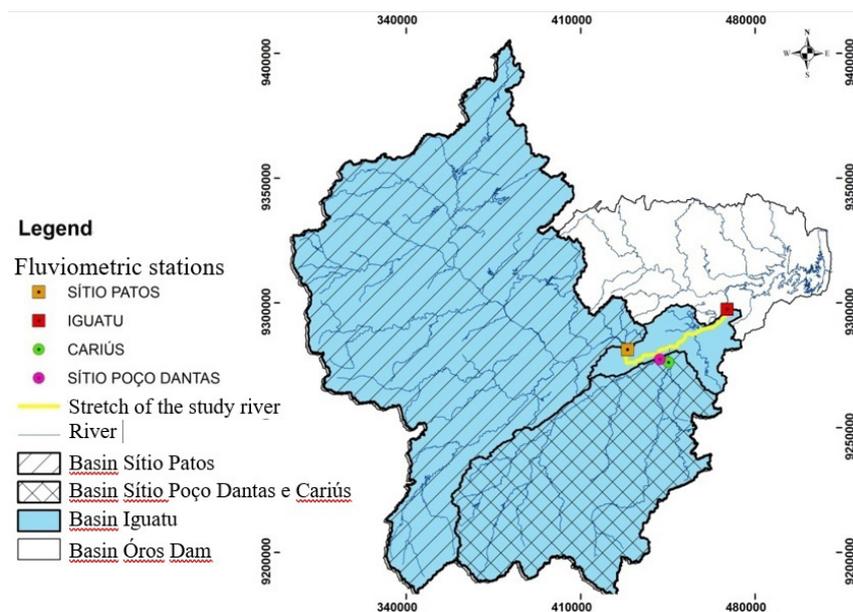


Figure 2 – Location of the study stretch and of the fluviometric stations used to estimate loss in transit.

*Figura 2 - Localização do trecho em estudo e dos postos fluviométricos utilizados na estimativa da perda em trânsito.*

The model (Equation 1 and 2) chosen to estimate loss in transit is based on the continuity equation (ARAÚJO; RIBEIRO, 1996), which is derived from an equation based on mass balance, considering the distribution of withdrawals and water loss along a watercourse.

$$Q_F = Q_I \cdot e^{-p \cdot l} \quad \text{Equation 1}$$

where parameters  $p$  and  $l$  represent the loss of water in transit, ( $L^{-1}$ );  $Q_I$  is the flow of the first section, ( $L^3 \text{Tempo}^{-1}$ );  $Q_F$  is the flow of the following section, ( $L^3 \text{Tempo}^{-1}$ ), and  $l$  is the distance between the sections, ( $L$ ).

$$p' = \frac{\ln\left(\frac{Q_I}{Q_F}\right)}{l} \quad \text{Equation 2}$$

where  $p'$  represents the loss and gain values, ( $\% \text{ km}^{-1}$  of the river);  $Q_I$  is the daily flow rate at the start of the sample stretch, ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ );  $Q_F$  is the flow rate on the final study section of the river, ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) and  $l$  is the length of the river, ( $\text{km}$ ).

In order to calibrate the loss of water in transit ( $p$ ), flow data from the Patos station were used as  $Q_I$ , and flow data from the Iguatu station for the  $Q_F$ , for each of the ten years of the calibration study. Equation 2 allows values of  $p'$  to be generated that are positive, negative or equal to 0, so only positive  $p'$  values were used to obtain  $p$  and  $p$  mean ( $p_{\text{general}}$ ), with other values being discarded.

To explain the  $p$  values obtained for the Jaguaribe/Upper Jaguaribe Basin, analyzes of  $p'$ : interactions with the daily precipitation were undertaken, comparing flow values from the beginning (upstream) and the end of the stretch (downstream). The average precipitation data used were obtained from three pluviometric stations - Jucás, Quixadá and Iguatu, available for the study period from the Funceme (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - Cearense Foundation of Meteorology and Water Resources) archives.

An upstream flow analysis was performed by class, obtaining an average  $p$  value for each class ( $p_{\text{class}}$ ), these classes being generated according to the log of upstream flows.

## Model Testing

$p_{\text{general}}$  and  $p_{\text{class}}$  were used to test the model for  $p$  (Equation 3), thus assaying for the the best response model. Data for  $Q_I$  values were obtained from the Sítio Patos station, with a change only for the dates for one year to data (01/01/2010 - 04/30/2011). Values obtained for flow modeling for downstream flow ( $Q_{\text{Fmodeling}}$ ), were compared with medium flow values ( $Q_{\text{Fmeasured}}$ ) obtained from Iguatu flowstation, using the Nash and Sutcliffe Equation – NSE (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{Equation 3}$$

O modelo (Equação 1 e 2) escolhido para estimar a perda em trânsito é baseado na equação da continuidade (ARAÚJO; RIBEIRO, 1996), baseada no balanço de massa, considerando que as retiradas e perda d'água são distribuídas ao longo de um curso d'água.

$$Q_F = Q_I \cdot e^{-p \cdot l} \quad \text{Equation 1}$$

onde  $p$  é o parâmetro real de perda d'água em trânsito, ( $L^{-1}$ );  $Q_I$  é a vazão na seção inicial, ( $L^3 \text{Tempo}^{-1}$ );  $Q_F$  é a vazão na seção subsequente, ( $L^3 \text{Tempo}^{-1}$ ); e  $l$  é a distância entre as seções, ( $L$ ).

$$p' = \frac{\ln\left(\frac{Q_I}{Q_F}\right)}{l} \quad \text{Equation 2}$$

onde  $p'$  representa os valores de perdas e ganha de fluxo, ( $\% \text{ km}^{-1}$  de rio);  $Q_I$  é a vazão diária no início do trecho, ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ );  $Q_F$  é a vazão diária no final do trecho, ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ); e  $l$  é o comprimento do trecho do rio, ( $\text{km}$ ).

Para calibrar a perda de água em trânsito ( $p$ ), utilizou-se como  $Q_I$  os dados de vazão do posto Sítio Patos e  $Q_F$  os dados de vazão do posto Iguatu, para os dez anos de estudo da calibração. A equação 2 possibilita a geração de valores de  $p'$  positivos, negativos e iguais a 0, assim, apenas os valores de  $p'$  positivos foram admitidos na obtenção de  $p$  e de  $p$  médio ( $p_{\text{geral}}$ ), sendo os demais valores descartados.

Na busca da explicação do fenômeno de  $p$  no trecho do rio Jaguaribe/Bacia do Alto Jaguaribe, foram feitas análises das interações de  $p'$ : com a precipitação diária, com a vazão no início do trecho (montante) e com a vazão no final do trecho (jusante). Sendo que os dados de precipitação média utilizados foram gerados de 3 postos pluviométricos – Jucás, Quixadá e Iguatu, disponibilizados na série histórica da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – Funceme, para o período de estudo.

Foi realizado ainda uma análise da vazão a montante em classe, obtendo assim um valor  $p$  médio para cada classe ( $p_{\text{classes}}$ ), sendo essas classes geradas conforme o log das vazões a montante.

## Validação do modelo

Para a validação do modelo de  $p$  (Equação 3) foi usado o  $p_{\text{geral}}$  e  $p_{\text{classes}}$ , verificando assim a melhor resposta na validação. A fonte de valores para  $Q_I$  também foram os postos Sítio Patos, mudando apenas as datas dos dados que vão de 01/01/2010 a 30/04/2011. Os valores obtidos na modelagem de vazão no final do trecho ou vazão a jusante ( $Q_{\text{Fmodelado}}$ ) foram comparados com os valores de vazão medida ( $Q_{\text{Fmedido}}$ ), obtidos no posto Iguatu, pelo Teste Nash e Sutcliffe – NSE (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{Equation 3}$$

where  $\bar{Q}_o$  = median observed flow-rate;  $Q_s'$  = simulated at the moment of discharge  $t$  and  $Q_o'$  = flow rate observed at the moment of discharge  $t$ .

NSE values can vary between  $-\infty$  and 1. An efficiency of 1 corresponds to a perfect match between simulated and observed data. An efficiency of 0 indicates that the predictions of the model are as accurate as the mean of the observed data, while an efficiency less than zero occurs when the observed mean is a better predictor than the model. Essentially, the closer the model efficiency is to 1, the more accurate the model.

## Hydrological Connectivity

In order to test for the occurrence of connectivity between the strategic dams installed on the Rio Jaguaribe basin in the Alto Jaguaribe sector (Table 1 and Figure 3), the lowest reservoir release flow rate that could result in hydrological connectivity or perenization of the river to the next dam was sought. To that end, final flow ( $Q_f$ ) was considered to be that capable of providing a minimum daily volume, capable of supplying a community of 1000 people with an adequate public water supply.

onde  $\bar{Q}_o$  = vazão observada média;  $Q_s'$  = vazão simulada no momento da descarga  $t$  e  $Q_o'$  = vazão observada no momento da descarga  $t$ .

O NSE pode variar de  $-\infty$  a 1. Uma eficiência de 1 corresponde a uma combinação perfeita entre os dados simulados com os observados. Uma eficiência de 0 indica que as previsões do modelo são tão precisas como a média dos dados observados, enquanto que uma eficiência menor que zero ocorre quando a média observada é um melhor preditor do que o modelo. Essencialmente, quanto mais perto a eficiência do modelo é de 1, mais preciso é o modelo.

## Conectividade Hidrológica

Para verificar a ocorrência da conectividade entre os açudes estratégicos instalados na calha do rio Jaguaribe dentro da bacia do Alto Jaguaribe (Tabela 1 e Figura 3), buscou-se a menor vazão a ser liberada nos açudes que promoveria a conectividade hidrológica ou perenização do trecho do rio até o próximo açude. Para isso, considerou-se que a vazão final ( $Q_f$ ) é aquela vazão capaz de proporcionar um volume mínimo diário, que abastece uma comunidade de 1000 pessoas com abastecimento de água pública.

Table 1 – Reservoirs used in the perenization of the rio Jaguaribe above the Orós Reservoir

Tabela 1 - Açudes utilizados para perenização do rio Jaguaribe a montante do açude Orós

Reservoir	River/Stream impounded	Volume stored (hm <sup>3</sup> )	Permitted flow rate (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )*	Sector (km)
Forquilha II	Rc Carrapateiras	3,40	0,01	35,12
Várzea do Boi	Rc Carrapateiro	51,91	0,10	46,01
Arneiroz II	Jaguaribe River	197,06	1,57	49,02
Caldeirão	Jaguaribe River	5,00	-----	119,14
Orós	Jaguaribe River	1.940,00	20,40	-----

\* Permitted flow rate per reservoir according to the Atlas Eletrônico da Secretária dos Recursos Hídricos do Ceará (<http://atlas.srh.ce.gov.br/>).

\* Vazão regularizada conforme a ficha técnica do açude do Atlas Eletrônico da Secretária dos Recursos Hídricos do Ceará (<http://atlas.srh.ce.gov.br/>).

According to Döll and Hauschild (2002), in the Upper Jaguaribe basin, a person connected to the public water supply consumes around 140 L day<sup>-1</sup>, thus requiring a daily volume of 140 m<sup>3</sup>. This volume distributed over time results in a flow rate of 0.002 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, which is considered as minimum flow ( $Q_f$ ). According to the authors, this volume would also be able to supply about 2800 people who were not connected to the public water supply (at 50 L dia<sup>-1</sup>).

With  $Q_f$  established, and  $p_{\text{general}}$  and  $p_{\text{class}}$  calibrated and tested via the model, it was possible to calculate the lowest flow rate in the initial stretch required to maintain a river flow between the reservoirs, that is, the flow released by the upstream reservoir allows hydrological connectivity to the downstream reservoir.

Conforme Döll e Hauschild (2002), na região da bacia do Alto Jaguaribe, uma pessoa com abastecimento público consome cerca de 140 L dia<sup>-1</sup>, necessitando assim de um volume diário de 140 m<sup>3</sup>. Esse volume distribuído no tempo, resulta em uma vazão de 0,002 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, considerada como vazão mínima ( $Q_f$ ). Lembro ainda que, segundo os autores, esse volume seria capaz de abastecer também cerca de 2800 pessoas sem abastecimento de água pública (50 L dia<sup>-1</sup>).

Com o  $Q_f$  estabelecido, o  $p_{\text{geral}}$  e  $p_{\text{classes}}$  calibrado e validados dentro do modelo, calculou-se a menor vazão no inicial do trecho, aquela que manteria um escoamento fluvial entre os açudes, ou seja, a vazão que liberada pelo açude a montante possibilitaria a conectividade hidrológica até o açude a jusante.

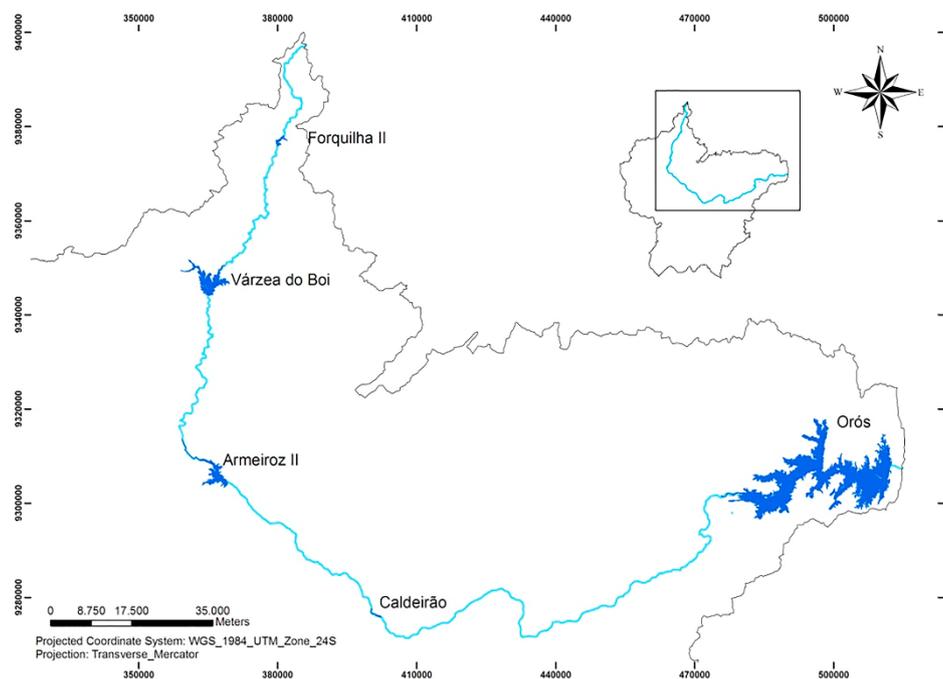


Figure 3 – Location of strategic reservoirs on the stretch of the rio Jaguaribe to be perennialized.  
 Figura 3 - Localização dos açudes estratégicos e do trecho o rio Jaguaribe a ser perenizado.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Calibration of lost-in-transit coefficient

Of the 3653 days evaluated (01/01/2000 to 12/31/2009),  $p'$  values different from 0 ( $p' \neq 0$ ) (that is either positive or negative values) were obtained for only 832 days (22%). Of the days with values for  $p' \neq 0$ , 76% had negative  $p'$  values, commensurate with the occurrence of waterflow in the river, but also the occurrence of a superficial and subsurface flow feeding the fluvial flow. On the other hand, the remaining of 24% days, which are the  $p'$  positive values here considered as true  $p$  values, are characterized by the loss of fluvial flow to the alluvial aquifer and to the atmosphere. Within this system the direct withdrawal of water from the river channel study stretch was not quantified (Figure 4).

In the 2821 days where recorded  $p'$  values were equal to 0 ( $p' = 0$ ), there were three possibilities that led to this occurrence a) there was no water flow in the river section, so flow values were not generated at the fluvimetric stations (as occurred in 70% of the days, and notably throughout all of 2001); b) there is presence of fluvial flow but it generates flow only at the initial part of the study stretch, this form appears to have occurred on 21% of the days; and, c) there is partial river flow, but it occurs not at the beginning of the river, but at the end, and was probably generated along the river stretch by surface and/or subsurface flow, this occurred on 9% of days.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Calibração do coeficiente de perda em trânsito

Dos 3653 dias avaliados (01/01/2000 a 31/12/2009), somente 832 dias (22%) obtiveram valores de  $p'$  diferentes de 0 ( $p' \neq 0$ ), ou seja, valores positivos e negativos. Dos dias com valores para  $p' \neq 0$ , 76% tiveram valores de  $p'$  negativos, sugerindo, assim, a ocorrência de escoamento fluvial no rio, mas também a ocorrência de um escoamento superficial e subsuperficial que alimentou o escoamento fluvial. Já os 24% dos dias restantes, que são os valores de  $p'$  positivos, aqui considerados os verdadeiros valores de  $p$ , são caracterizados pela perda de escoamento fluvial para o aquífero aluvial e para a atmosfera. Já que não é constatada a retirada direta de água da calha no trecho do rio (Figura 4).

Nos 2821 dias em que os valores de  $p'$  são iguais a 0 ( $p' = 0$ ), verificou-se três possibilidades que levaram a esse valor: a) não existe escoamento fluvial no trecho do rio, não gerando valores de vazão nos postos fluviométricos, como ocorreu em 70% dos dias e, especialmente, em todo o ano de 2001; b) existe a presença de escoamento fluvial em parte do trecho do rio, gerando assim vazão apenas no início do trecho, caracterizando a perda total da vazão registrada no início ao longo do percurso do rio, ocorrendo essa possibilidade em 21% dos dias; e c) também existe escoamento fluvial parcial, mas não ocorrendo vazão no início do trecho do rio e sim no final, demonstrando que o escoamento fluvial foi gerado ao longo do trecho do rio pelo escoamento superficial e/ou subsuperficial, isso ocorreu em 9% dos dias.

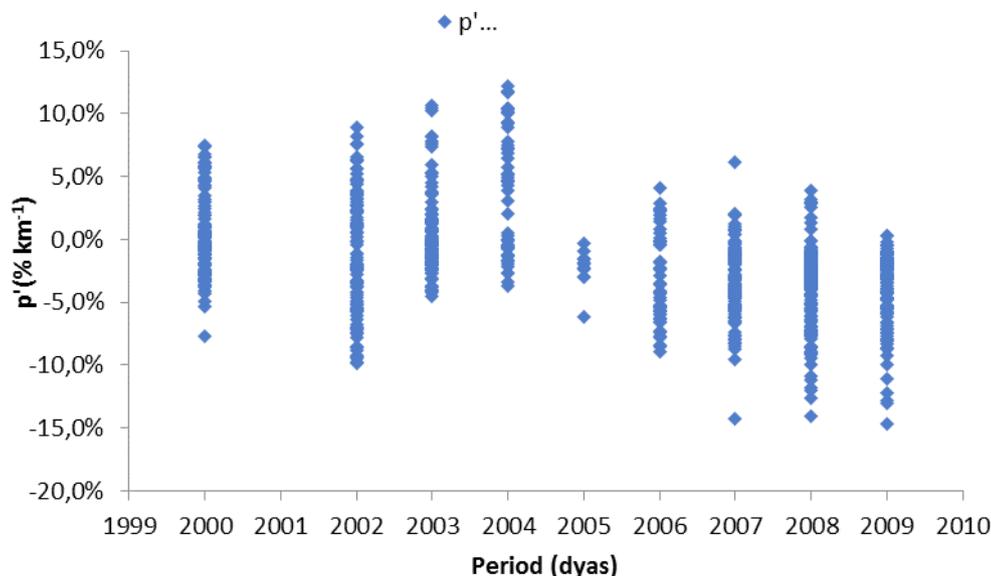


Figure 4 -  $p'$  values for the Jucas/Iguatu stretch of the Jaguaribe River.

Figura 4 - Valores de  $p'$  em função dos períodos no trecho Jucas/Iguatu do rio Jaguaribe.

Recorded  $p'$  values ranged from 0.001 to 0.122  $\text{km}^{-1}$ , that is, 0.01 to 12.2%, being compatible with the values found by Rêgo (2001), and Araújo and Ribeiro (1996). The analysis also presented average loss (pg.) of 0.031 or 3.1%  $\text{km}^{-1}$ , which lies in the same order of magnitude as the values reported by Lima *et al.* (2007) who, in simulations, found a loss of 3%  $\text{km}^{-1}$ , and Araújo and Ribeiro (1996) of 2.4%  $\text{km}^{-1}$ , both studies being in the semi-arid region of Ceará. In addition, the average value found, is close to those reported by Jordan (1977) and Walter (1990), which determined losses in transit through mass balance for transient rivers, respectively, 1.25 and 2.37% of the flow, for each km of river.

However, the values from the current study differed from the average found by Rêgo (2001) of 0.55%  $\text{km}^{-1}$ , for the sector of the Rio Jaguaribe below the Orós reservoir. The difference is likely due to the section of river selected by Rêgo, which, because it is artificially perennialized by the Orós reservoir, does not allow a large reduction in the alluvial aquifer over time, which influences the river/aquifer interaction.

An known artificial factor that will interfere with natural water volumes and that elevate the loss in transit values for this stretch of river, is the large number of wells, of which there are approximately 30 (SRH, 2011), installed along the stretch of river studied. They capture water from the alluvial aquifer of the river, thus increasing the loss of water in transit from the river/aquifer interaction. Since this effect can be observed throughout the Alto Jaguaribe basin: Ceará (2008), reported here the existence, up to 2006, of 2,662 water-extraction points: 2,304 tube wells; 306 cistern-type wells and 52 natural sources, capturing water in both sedimentary and crystalline rocks.

Os valores da  $p'$  variaram de 0,001 a 0,122  $\text{km}^{-1}$ , ou seja, 0,01 a 12,2%, sendo esses valores compatíveis com os valores encontrados por Rêgo (2001) e Araújo e Ribeiro (1996). A análise apresentou, ainda, perda média ( $p_{\text{geral}}$ ) de 0,031, ou 3,1%  $\text{km}^{-1}$ , que ficou na mesma ordem de grandeza dos valores encontrado por Lima *et al.* (2007), os quais por simulações constataram perda de 3%  $\text{km}^{-1}$  e Araújo e Ribeiro (1996) de 2,4%  $\text{km}^{-1}$ , ambos no semiárido cearense. Além do valor médio encontrado está próximo dos valores de Jordan (1977) e Walter (1990), que determinaram as perdas em trânsito pelo balanço de massa para rios em regime transiente como sendo, respectivamente, de 1,25 e 2,37% da vazão, para cada km de rio.

Mas diferiu da média encontrada por Rêgo (2001), que foi de 0,55%  $\text{km}^{-1}$ , para o rio Jaguaribe após o açude Orós. Essa diferença pode ser atribuída ao trecho do rio selecionado por Rêgo, que, por ser perenizado artificialmente pelo açude Orós, não permite um grande rebaixamento no aquífero aluvial ao longo do tempo, influenciando assim na interação rio/aquífero.

Um fator observado que interfere para que a perda em trânsito nesse trecho do rio seja alta é o grande número de poços, aproximadamente 30 (SRH, 2011), instalados ao longo do trecho do rio estudado. Eles captam água no aquífero aluvial do rio, aumentando a perda de água em trânsito da interação rio/aquífero. Sendo que esse fato também pode ser observado em toda a bacia do Alto Jaguaribe, como coloca Ceará (2008), que quantificou até 2006 a existência de 2.662 pontos d'água, sendo: 2.304 poços tubulares; 306 poços do tipo cisternas e 52 fontes naturais, captando água tanto em rochas sedimentares como cristalinas.

The interaction of the daily precipitation versus  $p'$  (Figure 5), shows that only rainfall in the region of the river study section greater than 47 mm could generate  $p'$  values  $\leq 0$ , that is, precipitation sufficient to promote surface runoff and/or subsurface layer activity capable of increasing downstream flow, thus making  $p' \leq 0$ . Being that the precipitation below 47 mm showed no relation to  $p'$  or even  $p$ .

A interação da precipitação diária versus  $p'$  (Figura 5) mostra que apenas precipitações na região do trecho do rio acima de 47 mm geram obrigatoriamente valores de  $p' \leq 0$ , ou seja, é a precipitação que promove um escoamento superficial e/ou subsuperficial capaz de aumentar o escoamento fluvial a jusante, tornando assim as  $p' \leq 0$ . Sendo que a precipitação abaixo de 47 mm, não demonstra relação alguma com  $p'$  ou mesmo com apenas o  $p$ .

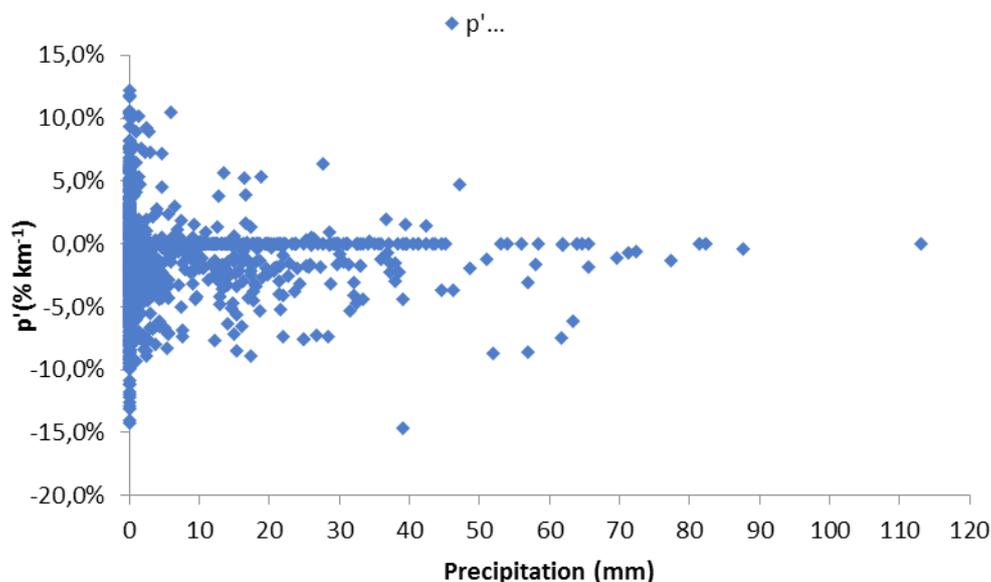


Figure 5 - Interactions between  $p'$  and mean regional precipitation for the river study stretch versus the losses ( $p$ ).

Figura 5 - Interação entre a precipitação média região do trecho do rio versus as perdas ( $p'$ ).

The upstream interactions versus  $p'$  (Figure 6A) and downstream flow versus  $p'$  (Figure 6B) also do not clearly explain the process of  $p'$  or  $p$  along the river channel. Analyzing only the upstream flow versus  $p'$  results with values  $p' > 0$ , has, on 05/27/2003 and 06/22/2003 for example, the same upstream flow of  $0.48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , but a totally different  $p$  response, with values of 1.4 and 5.4%  $\text{km}^{-1}$ , respectively.

On the other hand, the downstream flow versus  $p'$  on January 21 2004 was  $596 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , and on 08/06/2006  $0.721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , but both showed a loss of 0.5%  $\text{km}^{-1}$ . These two data points indicate that the level of the aquifer on the day prior to the assessment may provide a better explanation regarding the effect on  $p'$ , as well as of  $p$  itself, in this section of river, since there is extensive withdrawal of groundwater along the river stretch, as well as in the basin as a whole.

As interações de vazão a montante versus  $p'$  (Figura 6 A) e de vazão a jusante x  $p'$  (Figura 6 B) também não explicam claramente o processo de  $p'$  ou  $p$  ao longo da calha do rio. Na vazão, a montante versus  $p'$  analisando apenas os resultados com valores  $p' > 0$ , têm-se, por exemplo, no dia 27/05/2003 e 22/06/2003 a mesma vazão a montante de  $0,48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , mas uma resposta de  $p$  totalmente diferente, sendo obtidos 1,4 e 5,4%  $\text{km}^{-1}$ , respectivamente.

Já a vazão a jusante versus  $p'$ , no dia 21/01/2004, foi de  $596 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e no dia 08/06/2006, foi igual a  $0,721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , tendo ambos os dias uma perda de 0,5%  $\text{km}^{-1}$ . Essas duas interações indicam que o nível do aquífero no dia anterior da avaliação poderá proporcionar uma melhor explicação do efeito das  $p'$ , bem como de  $p$  nesse trecho de rio, já que existe muita retirada de água subterrânea ao longo do trecho do rio, bem como na bacia como um todo.

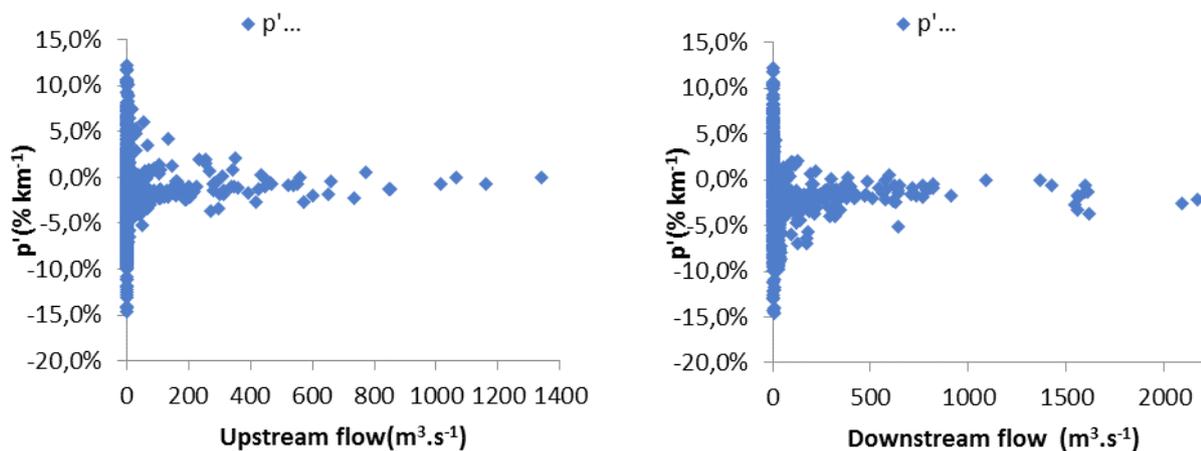


Figure 6 - Interactions between the upstream flow (A – Posto Sítio dos Patos versus losses), and the downstream flow (B – Posto Iguatu versus losses).

Figura 6 - Interações entre a Vazão a montante (A – Posto Sítio dos Patos versus Perdas) e a Vazão jusante (B – Posto Iguatu versus Perdas).

### Testing the model

Testing the model using data from 2010 and the first quarter of 2011 gave 70 days of upstream flow in the study section, varying between 0.01 and 141.74  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , with a mean of 16.6  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . Flows recorded at the downstream flowstation for the same 70 days, varied between 0.0 and 105.0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , there being only 36 dias when there were flowrates greater than 0, resulting in a mean of 8.4  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . In a simulation to obtain a modelled flowrate in the study stretch, using the loss in transit coefficient of 3.6%  $\text{km}^{-1}$  ( $p_{\text{general}}$ ), obtained flowrates of 0.0 to 24.0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  and a mean of 2,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  (Figure 7).

### Validação do modelo

A validação do modelo usando dados de 2010 e do primeiro quarto do ano de 2011 gerou 70 dias de vazão no posto à montante do trecho, variando de 0,01 a 141,74  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  e média de 16,6  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . Já as vazões observadas no posto à jusante para os mesmos 70 dias variou de 0,0 a 105,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , sendo que apenas 36 dias obtiveram vazões maiores que 0, gerando assim uma média de 8,4  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . Na simulação para obter a vazão modelada a jusante do trecho, usou-se o coeficiente de perda em trânsito de 3,6%  $\text{km}^{-1}$  ( $p_{\text{geral}}$ ), obtendo vazões de 0,0 a 24,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  e média de 2,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  (Figura 7).

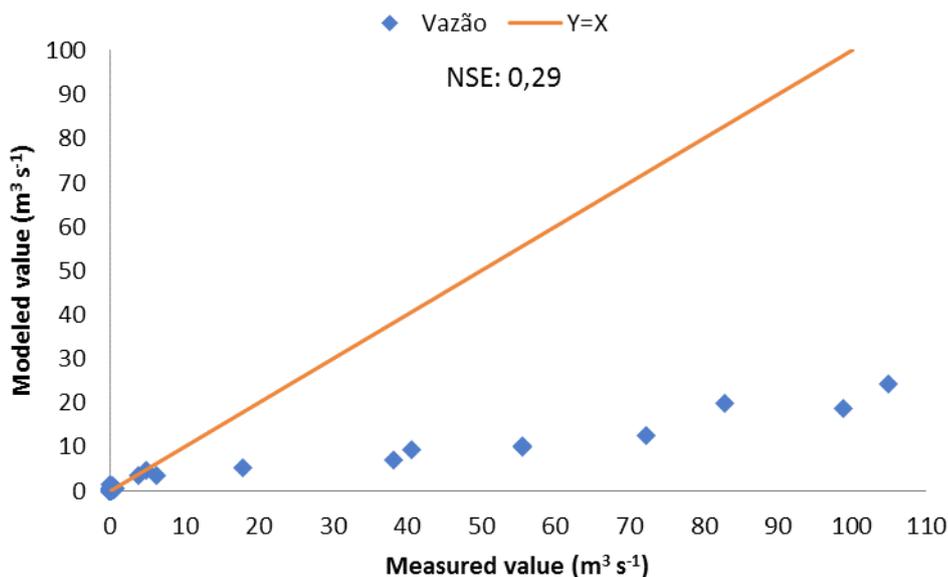


Figure 7 – Testing the loss in transit coefficient using the mean  $p_{\text{general}}$  value.

Figura 7 - Validação do coeficiente de perda em trânsito usando valor médio  $p_{\text{geral}}$ .

The NSE value of 0.29 is considered a standard efficiency value in hydrological models. This mean efficiency value was strongly influenced by the median loss in transity value used for all the initial flows. As high velocity flow rate have a tendency to have lower loss in transit values than the used mean loss value the model underestimated the initial high flow rates above  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

As seen in the callibration, the initial division of flow rates into sections, produced mean loss in transit values that differed sectorially. In order to test the hypothesis that each flow range would have an average loss value in transit, the category classes from the calibration were used (Table 2) to perform a new assay.

Using the  $p_{\text{class}}$  values, the simulated floodrates varied between  $0.0$  and  $75.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  with a mean of  $2.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figure 8). The new test was also used to simulate downstream flows from low initial flows. The most marked difference was the considerable increase in the downstream flow values, which are derived from large upstream flows, thus making these simulated values much closer to the observed values.

O NSE foi de 0,29, sendo considerada como uma eficiência regular para modelos hidrológicos. Esse valor mediano de eficiência foi muito influenciado pelo valor médio da perda em trânsito usado para todas as vazões iniciais. Como as altas vazões têm uma tendência a possuírem valores menores de perda em trânsito que a perda média, o modelo subestimou os valores com vazão inicial altas, acima de  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Como visto na calibração, a divisão das vazões iniciais em faixa proporciona valores de perda em trânsito diferente para cada faixa da média geral. Assim, para verificar essa hipótese, que cada faixa de vazão teria um valor médio de perda em trânsito, foram adotadas as classes detectadas na calibração (Tabela 2) para realizar uma nova validação.

Utilizando os valores de  $p_{\text{classes}}$ , a vazão simulada variou de  $0,0$  a  $75,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e média de  $2,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 8). A nova validação continuou simulando bem as vazões a jusante derivadas de baixas vazões iniciais. Mas o grande diferencial foi a elevação considerável dos valores de vazão a jusante, que são derivados de grandes vazões a montante, ficando esses valores simulados bem mais próximo do observado.

Table 2 - Average loss value in transit for each flow range observed during calibration

Tabela 2 - Valores da perda em trânsito médio para cada faixa de vazão observada na calibração

Classes	Upstream Flow Range ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Loss in transit (% $\text{km}^{-1}$ )
I	< 1.0	2.4
II	1.01 – 10.0	4.2
III	10.01 – 100.0	2.5
IV	> 100.01	1.3

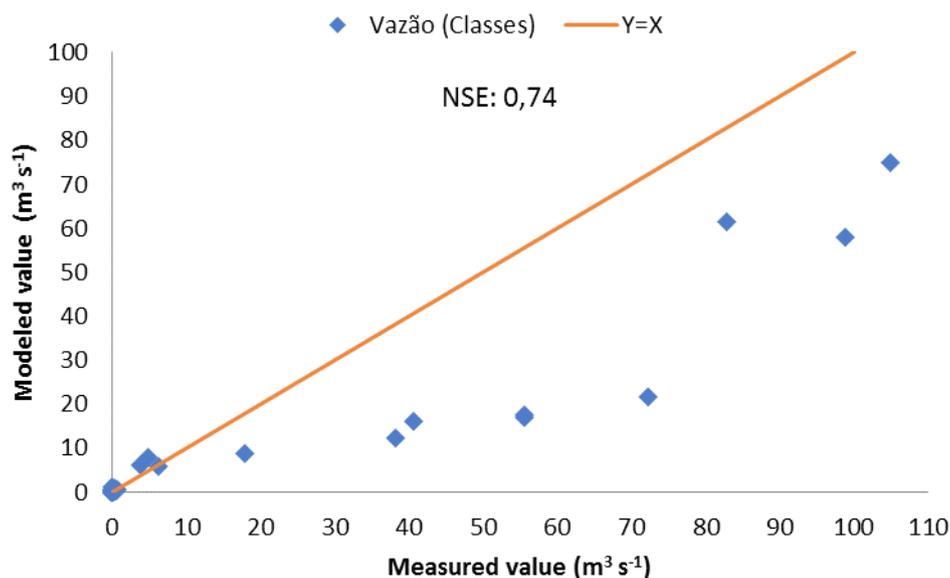


Figure 8 – Testing the lost in transit coefficient using the mean ( $p_{\text{class}}$ ) values.

Figura 8 - Validação do coeficiente de perda em trânsito usando o valor médio das classes ( $p_{\text{classes}}$ ).

A consequence of this improved approximation of the simulated values to those observed was a marked increase in the NSE, which in the new test was 0.74 being considered as a level of efficiency, according to Mine and Carke (1996). Moriasi *et al.* (2007) and Machado *et al.* (2017) both consider with NSE values greater than 0.75. may be considered of extremely high quality.

### Hydrological connectivity between reservoirs

Connectivity between reservoirs showed that the SRH controlled flow values for most reservoirs were higher than the simulated minimum values required for the occurrence of connectivity or perenniality for a given stretch (Table 3). This situation with values apparently exceeding that required was observed in both analyzes, that is, when loss in transit values were taken as equal to the average general ( $p_{\text{general}}$ ) and class ( $p_{\text{class}}$ ) values.

Table 3 - Connectivity Values for the sectors between the reservoirs

Tabela 3 - Valores da conectividade nos trechos entre os açudes

Reservoirs	Upstream Flow rate ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )		% of controlled flow*		Flow volume ( $1000 \text{ m}^3$ )		% of stored volume	
	$p_{\text{general}}$	$p_{\text{class}}$	$p_{\text{general}}$	$p_{\text{class}}$	$p_{\text{general}}$	$p_{\text{class}}$	$p_{\text{general}}$	$p_{\text{class}}$
Forquilha II	0.007	0.004	71.0	44.0	223.3	139.5	6.6%	4.1%
Várzea do Boi	0.010	0.006	10.0	6.0	330.5	178.4	0.6%	0.3%
Arneiroz II	0.012	0.006	1.0	0.4	3683.3	190.9	0.2%	0.1%
Caldeirão	0.146	0.030	----	----	4597.7	931.5	92.0%	18.6%

\* Controlled flow values from Atlas Eletrônico of SRH-Ce;  $p_{\text{general}} = 0.046 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$  and  $p_{\text{class}} = 0.0226 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$ .

\* Vazão regularizada do Atlas Eletrônico da SRH-Ce;  $p_{\text{general}} = 0,046 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$  e  $p_{\text{class}} = 0,0226 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$ .

The longest stretch is, clearly, the one that requires the greatest upstream flow for hydrological connectivity to occur. In the current study area this was the stretch between the Caldeirão and Óros dams, which attained a minimum upstream flow of 0.146 and 0.030  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  for  $p_{\text{general}}$  and  $p_{\text{class}}$ , respectively. The section between the Forquilha II and Várzea do Boi reservoirs was the analyzed river section on which the controlled flow value most closely approached the minimum values of the upstream flow found by modelling to promote hydrological connectivity, 71% of which came from the general method and 44 % from the  $p_{\text{class}}$ .

That the  $p_{\text{class}}$  method showed better results, indicates that even the dam releasing half of the current controlled flow rates - SRH would achieve the desired hydrological connectivity for the stretch in question. For other sections, with the release of 10% of the controlled flow SRH achieves hydrological connectivity of the analysed stretches. Simulated flow rates for the Caldeirão/Óros section cannot be compared to the controlled flow values from SR, since in the technical file of the upstream reservoir, Caldeirão dam, no controlled flow rate values were given.

A consequência dessa melhor aproximação dos valores simulados dos observados é comprovada pelo grande aumento do NSE, que na nova validação foi de 0,74, sendo considerado como de alta eficiência de ajuste, conforme Mine e Carke (1996). Já Moriasi *et al.* (2007) e Machado *et al.* (2017) mencionam que modelos para serem considerados como muito bom devem obter NSE maior que 0,75.

### Conectividade hidrológica entre os açudes

A conectividade entre açudes mostrou que os valores das vazões regularizadas dos açudes pela SRH na maioria dos açudes foram superiores aos valores mínimos simulados para que ocorra a conectividade ou perenização do trecho (Tabela 3). Essa situação de superioridade foi observada em ambas as análises, ou seja, quando se considerou a perda em trânsito igual à média geral ( $p_{\text{geral}}$ ) e por classe ( $p_{\text{classe}}$ ).

O trecho de maior comprimento, obviamente, é aquele que necessita da maior vazão a montante para que ocorra a conectividade hidrológica, no caso, é o trecho entre os açudes Caldeirão e Óros, que obteve uma vazão a montante mínima de 0,146 e 0,030  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , para  $p_{\text{geral}}$  e  $p_{\text{classe}}$ , respectivamente. O trecho entre os açudes Forquilha II e Várzea do Boi foi o trecho do rio analisado onde o valor da vazão regularizada mais se aproximou dos valores mínimos da vazão a montante encontradas para promover a conectividade hidrológica, sendo 71% com o método  $p_{\text{geral}}$  e 44% com o  $p_{\text{classe}}$ .

Como o método  $p_{\text{classe}}$  apresentou melhores resultados, indica que mesmo o açude liberando a metade da vazão regularizada ocorrerá a conectividade hidrológica no trecho. Nos demais trechos, a liberação de 10% da vazão regularizada possibilita também a conectividade hidrológica dos trechos. Apenas no trecho Caldeirão – Óros não pode ser feita comparação entre os valores da vazão regularizada e os valores simulados, pois na ficha técnica do açude a montante, açude Caldeirão, não existe informações acerca da sua vazão regularizada.

The per year volume that flowed in the analysed stretches varied from 223.3 to 4597.7 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> for the  $p_{\text{general}}$  method and 139.5 a 931.5 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> for  $p_{\text{class}}$ . This volume of the year represents 0.2 to 92.0% and 0.1 to 18.6% of the volume stored by the upstream reservoirs by  $p_{\text{general}}$  e  $p_{\text{class}}$ , respectively. Note that for  $p_{\text{general}}$  the Caldeirão Reservoir to connect the Caldeirão/Orós stretch, it would need to release almost its entire annual stored volume.

This volume of released water, added to the volume of water captured by the city of Saboeiro (7% of the volume stored per year) would cause the reservoir to dry out every year. Such an action would be aggravated by the marked seasonality of rainfall that characterizes this semi-arid area, so that there would be no water in the dam in hydrologically dry years, that is, in low rainfall years, there would be insufficient water to attain hydrological connectivity and also to supply the city of Saboeiro.

The values obtained from  $p_{\text{class}}$  proved to be more reliable for indicating that with a public policy of water resources encouraging the construction of private and public dams, it would be possible to carry out the hydrological connectivity and/or the perennization of the Rio Jaguaribe from its source to the Orós Reservoir, or better still, to the ocean since the river is perennial from the Orós reservoir to the North Atlantic Ocean. With connectivity established, the lowering of water levels in alluvial aquifers would be minimized because aquifers would be receiving water continuously from the river.

## CONCLUSION

The use of the Araújo and Ribeiro Equation can be used been demonstrated to calibrate, test and practically apply values on losses in transit for rivers in semi-arid areas;

No logical trend has been observed in any of the interactions studied that fully explains the phenomenon of water loss in river transit;

Hydrological connectivity could easily be reached in the evaluated sections, by releasing only part of the controlled flow managed by SRH, which is sometimes actuated, especially in rainy years, but in most of the time no such release occurs.

O volume escoado nos trechos por ano varia de 223,3 a 4597,7 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> para o método  $p_{\text{geral}}$ ; e 139,5 a 931,5 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> para o  $p_{\text{classes}}$ . Esse volume representa de 0,2 a 92,0% e 0,1 a 18,6% do volume armazenado pelo açude a montante, para  $p_{\text{geral}}$  e  $p_{\text{classes}}$ , respectivamente. Note que, no  $p_{\text{geral}}$  para o açude Caldeirão conectar o trecho Caldeirão – Orós, ele teria que liberar quase todo o seu volume armazenado ao longo do ano.

Esse volume liberado somado ao volume de água capitado pela cidade de Saboeiro (7% do volume armazenado por ano) induziria o açude ao secamento todos os anos. Tal ação seria agravada pela elevada sazonalidade de chuva, que é muito grande no semiárido, faltaria água no açude em todos os anos hidrológicos secos, ou seja, em anos com baixo volume de chuva, não tendo água para realizar a conectividade hidrológica e nem para abastecer a cidade de Saboeiro.

Os valores obtidos de  $p_{\text{classes}}$ , que demonstraram ser de maior confiabilidade, apontam que, tendo uma política pública dos recursos hídricos incentivando a construção de açudes privados e públicos, seria possível realizar a conectividade hidrológica ou a perennização do rio Jaguaribe da sua nascente até o açudes Orós, ou melhor, até o oceano, já que o rio em questão é perennizado do açude Orós até o oceano Atlântico Norte. Com a conectividade nos trechos, o rebaixamento dos níveis de água nos aquíferos aluviais seriam minimizados, pois os aquíferos estariam recebendo água continuamente do rio.

## CONCLUSÃO

O uso da Equação de Araújo e Ribeiro pode ser utilizado para calibrar, validar e ser aplicada na prática para determinar valores das perdas em trânsito para rios em áreas semiáridas;

Não foi verificada uma tendência lógica em nenhuma das interações estudadas que explique por completo o fenômeno da perda de água em trânsito no rio;

A conectividade hidrológica pode ser alcançada facilmente nos trechos avaliados, sendo liberado apenas parte da vazão regularizada colocada pela SRH, que algumas vezes é realizada, principalmente em anos chuvosos, mas que na grande maioria do tempo não ocorre liberação alguma.

## CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; PALÁCIO, H. A. Q. O semiárido cearense e suas águas. In: *Semiárido e o manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural*. Fortaleza, 2010.
- ARAÚJO, J. C.; RIBEIRO, A. L. Avaliação de perda d'água em rios no Semi-Árido. In: *Anais III Seminário de Recursos Hídricos do Nordeste*, Salvador - BA, 1996.
- CEARÁ, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Cenário Atual dos recursos hídricos do Ceará /Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza. INESP. 2008.
- COSTA, A. C.; FOERSTER, S.; ARAÚJO, J. A.; BRONSTERT, A. Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in north-eastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 7, p. 1046-1060, 2013.
- COSTA, A. C.; BRONSTERT, A.; ARAÚJO, J. C. A channel transmission losses model for different dryland rivers. **Hydrology Earth System Sciences**, v. 16, p. 1111-1135, 2012.
- DÖLL, P.; HAUSCHILD, M. Model-based Scenarios of Water Use in Two Semi-arid Brazilian State. *Regional Environmental Change*, 2002.
- HUANG, Y.; CHEN, X.; CHEN, X.; OU, G. Transmission losses during two flood events in the Platte River, south-central Nebraska. **Journal of Hydrology**, v. 520, p. 244-253, 2015.
- JORDAN, P. R. Stream-flow transmission losses in Western Kansas. **Journal of Hydraulic Engineering**, 103 (HY8), p. 905-919. 1977.
- LANE, L. J. Transmission losses. United States Department of Agriculture. Washington, D.C. 1983.
- LIMA, C. H. R.; FRISCHKORN, H.; BURTE, J. Avaliação da interação rio-aquífero a partir de dados experimentais e de um modelo analítico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 217-230. 2007.
- MACHADO, A. R.; MELLO JUNIOR, A. V.; WENDLAND, E. C. Avaliação do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 327-340, 2017.
- MVANDABA, V.; HUGHES, D.; KAPANGAZIWIIRI, E.; KAHINDA, J. M.; OOSTHUIZEN, N. Modelling of channel transmission loss processes in semi-arid catchments of southern Africa using the Pitman Model. **International Association of Hydrological Sciences**, v. 378, p. 17-22, 2018.
- MINE, M. R. M.; CLAKER, R. T. O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: Resultado preliminar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 2, p. 89-105. 1996.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.
- RÊGO, T. C. C. Avaliação da perda d'água em trânsito na bacia do rio Jaguaribe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará, 2001.
- TOLEDO, C.E.; ARAÚJO, J.C.; ALMEIDA, C.L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014.
- VASCONCELOS, V.V.; MARTINS JUNIOR, P.P.; HADAD, R.M.; KOONTANAKULVONG, S. Recarga de aquíferos: epistemologia e interdisciplinaridade. **Interthesis**, v. 10, n. 2, p. 360-409, 2013.
- VILLENEUVE, S.; Cook, P.G.; Shanafield, M.; Wood, C.; White, N. Groundwater recharge via infiltration through an ephemeral riverbed, central Australia. **Journal of Arid Environments**, v. 117, p. 47-58, 2015.
- WALTERS, M.O. Transmission losses in arid regions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 1, p. 129-139, 1990.