

## O BAIXO RIO SOLIMÕES PELA PERSPECTIVA DA TEORIA DO CAOS (CAOS DETERMINÍSTICO)

*The Lower Solimões River from the Chaos Theory Perspective (Deterministic Chaos)*

*El Bajo Río Solimões Desde La Perspectiva De La Teoría Del Caos (Caos Determinista)*

**Matheus Silveira de QUEIROZ** – Universidade Federal do Amazonas (UFAM). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8722-7715>. URL: <http://lattes.cnpq.br/4816403391624243>  
EMAIL: [matheussilveiradequeiroz@gmail.com](mailto:matheussilveiradequeiroz@gmail.com)

**José Alberto Lima de CARVALHO** – Universidade Federal do Amazonas (UFAM). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5154-0029>  
URL: <http://lattes.cnpq.br/8994136709611370>  
EMAIL: [albertogeografo@gmail.com](mailto:albertogeografo@gmail.com)



### RESUMO

O estudo dos sistemas dinâmicos não-lineares vem recebendo cada vez mais atenção da comunidade científica. A Teoria do Caos, desenvolvida no início da década de 60, busca soluções para sistemas que não se aproximavam do equilíbrio nem de uma solução periódica, descobrindo assim, o movimento caótico (oscilações irregulares e aperiódicas) sobre um atrator estranho. Esta descoberta foi um avanço para a análise da dinâmica hidrológica, considerada agora um sistema não-linear. Portanto, este artigo busca apresentar, sob a perspectiva da Teoria do Caos, potencialidades para a análise hidrológica de um sistema fluvial. Para isto, analisou-se a dinâmica fluvial e processos de erosão e sedimentação, além de entender dados de cotas, descarga líquida e sedimentos em suspensão, buscando compreender as médias mensais para prever os dados sob a perspectiva da Teoria do Caos. Os resultados apontam que análise dos fluxos turbulentos, em específico, fluxos helicoidais, e processos de transporte e deposição de sedimentos é interessante sob a perspectiva do Caos para uma escala de tempo curta, sendo difícil prever os resultados em uma escala de tempo maior. A utilização de médias mensais para prever fenômenos dados de cotas, descarga líquida e sedimentos em suspensão não é indicada pela dinâmica não-linear dos dados, porém é possível prever os dados em uma escala temporal curta. Observou-se, também, que quanto maior for a escala temporal prevista, maior a chance de haver inconsistências nos dados, não sendo indicada o uso para previsões, usando a Teoria do Caos, superiores a um ano.

**Palavras-chave:** Análise Não-Linear; Grandes Rios; Bacia Amazônica; Complexidade.

Histórico do artigo

Recebido: 15 maio, 2021

Aceito: 09 agosto, 2021

Publicado: 30 setembro, 2021

## ABSTRACT

The study of nonlinear dynamical systems has been receiving increasing attention from the scientific community. Chaos theory, developed in the early 1960s, seeks solutions for systems that were neither close to equilibrium nor to a periodic solution, thus discovering chaotic motion (irregular and aperiodic oscillations) on a strange attractor. This discovery was an advance for the analysis of hydrological dynamics, now considered a nonlinear system. Therefore, this article seeks to present, from the perspective of Chaos theory, potentialities for the hydrological analysis of a river system. For this, the fluvial dynamics and erosion and sedimentation processes were analyzed, in addition to understanding data of quota, water discharge and suspended sediments, seeking to understand the monthly means to predict the data from the perspective of Chaos theory. For this, the river dynamics and erosion and sedimentation processes were analyzed, in addition to understanding data of quotas, water discharge and suspended sediments, seeking to understand the monthly means to predict the data from the perspective of Chaos Theory. The results show that analysis of turbulent flows, in particular helical flows, and sediment transport and deposition processes is interesting from the perspective of Chaos for a short time scale, making it difficult to predict the results on a larger time scale. The use of monthly means to predict data phenomena of quotas, liquid discharge and suspended sediments is not indicated by the nonlinear dynamics of the data, however it is possible to predict the data on a short time scale. It was also observed that the larger the predicted time scale, the greater the chance of inconsistencies in the data, and the use for predictions, using the Chaos theory, greater than one year is not indicated.

**Keywords:** Non-Linear Analysis; Megarivers; Amazon Basin; Complexity.

## RESUMEN

El estudio de los sistemas dinámicos no lineales está recibiendo cada vez más atención por parte de la comunidad científica. La teoría del Caos, desarrollada a principios de la década de 1960, busca soluciones para sistemas que no se acercan al equilibrio ni a una solución periódica, descubriendo así el movimiento caótico (oscilaciones irregulares y aperiódicas) sobre un atractor extraño. Este descubrimiento fue un avance para el análisis de la dinámica hidrológica, ahora considerado un sistema no lineal. Por tanto, este artículo busca presentar, desde la perspectiva de la teoría del Caos, las potencialidades para el análisis hidrológico de un sistema fluvial. Para ello, se analizaron la dinámica fluvial y los procesos de erosión y sedimentación, además de comprender datos sobre cuotas, descarga líquida y sedimentos en suspensión, buscando comprender los promedios mensuales para predecir los datos desde la perspectiva de la teoría del Caos. Los resultados muestran que el análisis de los flujos turbulentos, en particular los flujos helicoidales, y los procesos de transporte y deposición de sedimentos, es interesante desde la perspectiva del Caos para una escala de tiempo corta, lo que dificulta predecir los resultados a una escala de tiempo mayor. El uso de promedios mensuales para predecir fenómenos de datos de cuotas, descarga de líquidos y sedimentos en suspensión no está indicado por la dinámica no lineal de los datos, sin embargo, es posible predecir los datos en una escala de tiempo corta. También se observó que cuanto mayor es la escala de tiempo predicha, mayor es la posibilidad de inconsistencias en los datos, y no se indica el uso para predicciones, utilizando la teoría del Caos, mayor de un año.

**Palabras-clave:** Análisis no lineal; Grandes Ríos; Cuenca del Amazonas; Complejidad.

## 1 INTRODUÇÃO

Durante a segunda metade do século XX e início do século XXI nota-se um grande interesse da comunidade científica pelo desenvolvimento dos fenômenos não-lineares

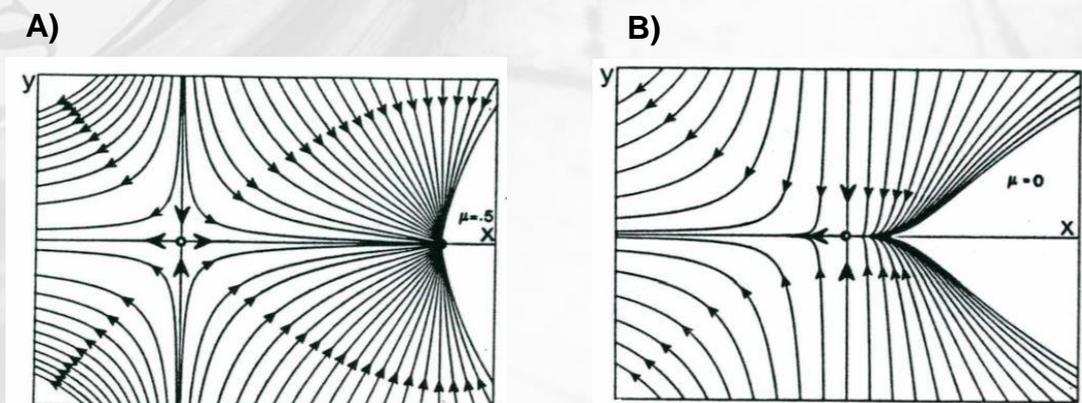
(HAKEN, 1982), resultando na introdução de novos conceitos e abordagens no tratamento dos sistemas dinâmicos: conservativos e dissipativos.

A tradição dos estudos de sistemas dinâmicos remonta a Henri-Poincaré (1814-1912), que percebeu a utilidade da análise topológica no espaço de fases de trajetórias dinâmicas inspirado por problemas em Mecânica Celeste (mais detalhes em POICARÉ, 1899). Com importantes contribuições de C.D Birkhoof à Teoria Ergódica e fundamentos da mecânica estatística, fortalecendo as bases teóricas de Poincaré, a ciência do não-linear, pautada na dinâmica não-linear enriquece a visão pré-existente sobre a Física Clássica (FIEDLER-FERRARA; PRADO, 1994).

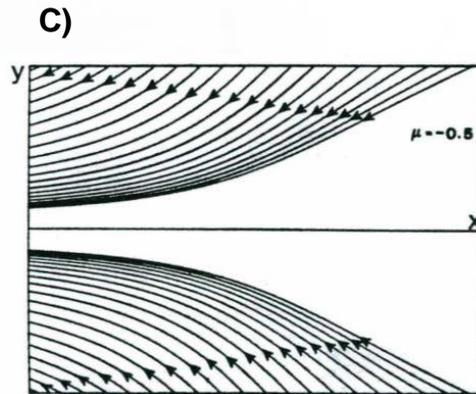
A dinâmica não-linear é o estudo da evolução dos sistemas não-lineares, sendo que a relação entre causa e efeito não é proporcional e determinada, mas bastante vaga e de difícil discernimento. Esses sistemas podem ser caracterizados pela interação entre as variáveis não-lineares e lineares ao longo do espaço-tempo, ou seja, o fenômeno pode apresentar características lineares em determinado momento, porém as relações entre as variáveis podem mudar causando drásticas alterações que são denominadas de bifurcações (SIVAKUMAR, 2017).

As bifurcações podem ser entendidas como a variação qualitativa na natureza de um sistema dinâmico quando há variação em um dos parâmetros analisados, onde os novos pontos estacionários podem aparecer e outros que eram previamente estáveis deixam de ser e vice-versa (Figuras 01 a, b, c) (FIEDLER-FERRARA; PRADO, 1994; MORENO, 1997). O conceito de Caos em sistemas dinâmicos não-lineares está sempre atrelado a bifurcações de algum tipo.

**Figura 01** – Exemplos de bifurcação do tipo Saddle-Node (diagrama de fases, A, B, C).



*Continua...*



As figuras representam um sistema dinâmico de 2º ordem. O sistema possui dois pontos de equilíbrio hiperbólico: um nó e uma seta. À medida que o sistema se aproxima do valor  $\mu=0$  de bifurcação, estes dois pontos de equilíbrio se aproximam, ocorrendo uma colisão para  $\mu=0$ . Caso o sistema continue a variar  $\mu$  na mesma direção, deixa de existir um ponto de equilíbrio na vizinhança. **Fonte:** Moreno (1997).

A manipulação através do avanço da computação de sistemas não-lineares, permitindo o manejo de fórmulas com certo grau de complexidade, levou Lorenz (1963) a notar, a partir de um modelo meteorológico, que as soluções de um sistema não se aproximavam do equilíbrio nem de uma solução periódica, descobrindo, assim, o movimento caótico (oscilações irregulares e aperiódicas) sobre um atrator estranho. Esta nova ciência da complexidade, ao longo da segunda metade do século XX, mostrou-se aplicável para diversas áreas: meteorologia, física, química, biologia, ciências sociais e humanas, engenharias, dentre outras.

A Teoria do Caos trouxe diversas implicações ao paradigma Newtoniano que é pautado na previsibilidade, ordem e estabilidade. Porém, o Caos é pautado na não-linearidade, desordem e instabilidade, com base no princípio da incerteza. Segundo Prigogine (1993), a noção de imprevisibilidade do Caos está pautada nos conceitos probabilísticos e irreversíveis, ou seja, é possível traçar um “trajeto” para os fenômenos com base na probabilidade com foco na quantidade de variáveis analisadas (dentro do sistema).

Apesar da não-linearidade representar que as mudanças nos inputs dos sistemas não necessariamente ocasionarão mudanças proporcionais nos outputs, isto não indica que há completa ausência do determinismo/previsibilidade, agora representados pelos princípios da probabilidade. Na realidade, a não-linearidade tende a possuir determinismo inerente por um lado e por outro ser sensivelmente dependente das condições iniciais. Enquanto o primeiro permite a previsão de eventos a curto prazo, o segundo elimina a

possibilidade de previsão precisa a longo prazo. Esta classe de não-linearidade é conhecida como “Caos Determinístico” (SIVAKUMAR, 2017).

Essa nova perspectiva trouxe muitos avanços para a análise de sistemas geomorfológicos, que no contexto da pesquisa poderiam ser analisados sob a ótica da não-linearidade trazendo uma maior complexidade para os modelos propostos. Logo, este artigo busca apresentar, sob a perspectiva da Teoria do Caos, potencialidades para a análise hidrológica de um sistema fluvial.

## 2 APLICABILIDADE DA TEORIA DO CAOS EM HIDROLOGIA

A natureza não-linear dos sistemas hidrológicos são estudadas desde a segunda metade do século XX e início do século XXI, sendo que o próprio ciclo hidrológico apresenta um comportamento não-linear, com quase todos os componentes individuais que compõe o ciclo apresentando comportamento não-linear também. Um exemplo clássico do Caos na hidrodinâmica é a instabilidade de Bénard. Esta experiência consiste, segundo Prigogine (1993, p. 22), na:

Imposição de um gradiente vertical de temperatura a um estrato horizontal de fluido, até que a diferença de temperatura entre a superfície inferior e a superfície superior do estrato fique bastante grande; nesse ponto se formam no líquido turbilhões, em que bilhões de partículas correm vertiginosamente umas atrás das outras, criando estruturas características, de forma hexagonal.

Essa situação caótica cria diferentes correlações a longo prazo, como a própria organização das partículas no turbilhão formado. Esse fenômeno de não equilíbrio demonstra claramente a noção dos fenômenos irreversíveis. Na hidrologia pode-se ver esse experimento aplicado no movimento turbulento natural das águas dos rios.

Com a experiência de Bénard, difundiu-se na hidrologia diversos métodos de análise utilizando o Caos determinístico, uma vez que as áreas incluem precipitação, fluxo do rio, precipitação-runoff, transporte de sedimentos, transporte de contaminantes de águas subterrâneas, modelagem, previsão, redução de ruído, dimensionamento, desagregação, estimativa de dados ausentes, reconstrução de equações do sistema, estimativa de parâmetros e classificação de bacias hidrográficas, entre outros. (SIVAKUMAR, 2017) (Quadro 01).

**Quadro 01 – Aplicação da Teoria do Caos em Hidrologia.**

Dados	Referências
Precipitação	Hense (1987); Rodriguez-Iturbe et al. (1989); Sharifi et al. (1990); Tsonis et al. (1993); Sivakumar (2000, 2001)
Fluxo Fluvial	Wilcox et al. (1991); Wang e Gan (1998); Jayawardena e Gurung (2000); Lisi e Villi (2001); Phoon et al. (2002); Zhou et al. (2002); Khatibi et al. (2012); Tongal e Berndtsson (2014)
Transporte de Sedimentos	Sivakumar e Jayawardena (2002); Shang et al. (2009)
Lençóis Freáticos	Sivakumar et al. (2005)

**Fonte:** Organização dos autores (2021).

A aplicação de estudos em sistemas não-lineares evidencia três tipos de comportamentos temporais: 1) estável (equilíbrio matemático ou ponto fixo); 2) oscilação entre pontos matemáticos de maneira estável, suave e periódica; 3) aparentemente aleatório, desprovido de padrão (ou comportamento não periódico), dominado pela incerteza e previsibilidade interrompida (SIVAKUMAR, 2017). Isto pode ser aplicado na hidrologia para estudos temporais de variáveis hidrológicas (descarga líquida, sedimentos em suspensão, dentre outros). A aplicação da Teoria do Caos em trabalhos recentes (ver quadro 1) na hidrologia segue em conceitos do Caos determinístico que busca, através da análise de equações não-lineares e probabilidade, prever fenômenos aparentemente aleatórios.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Solimões possui uma área aproximada de  $2.2 \times 10^6$  km<sup>2</sup> e drena uma variedade de domínios geológicos e geomorfológicos. O rio Solimões, principal rio da bacia, possui sua nascente no Peru e sua foz na confluência com o rio Negro para formar o rio Amazonas.

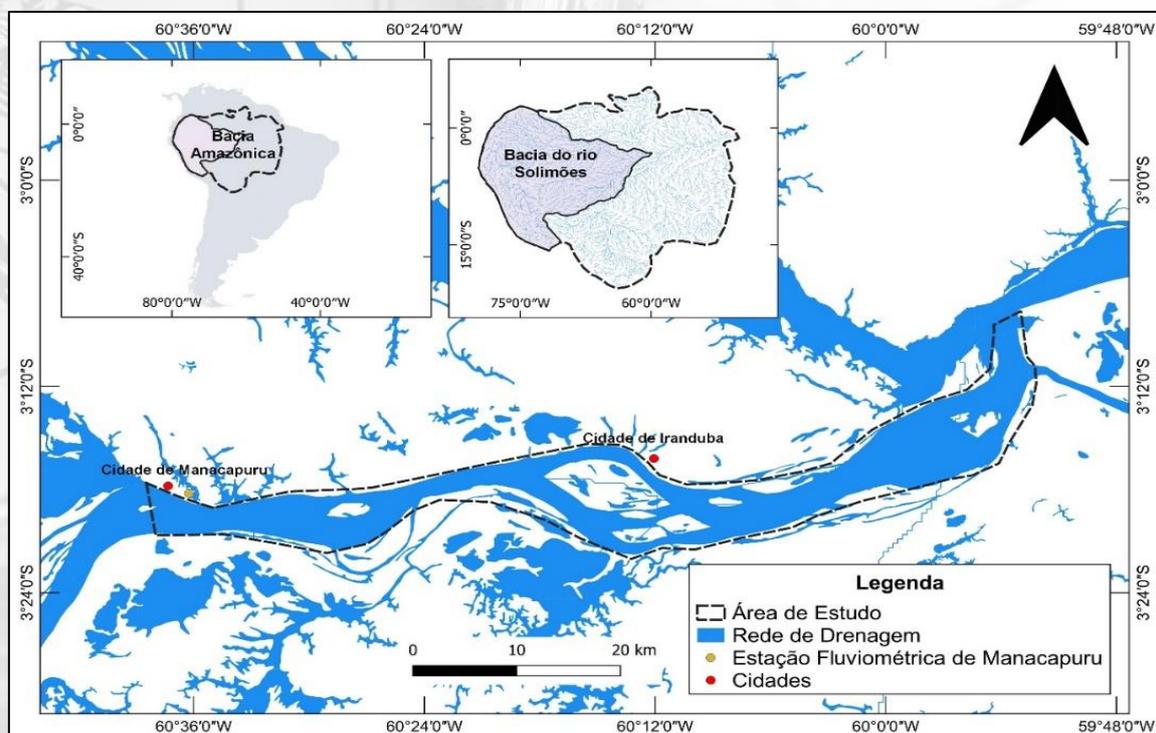
A última estação fluviométrica de referência no rio Solimões (Estação de Manacapuru) apresenta uma descarga líquida média anual de  $103.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , o pico de cheia ocorre no mês de junho e o de vazante no mês de outubro (VILLAR et al., 2018; QUEIROZ; TOMAZ NETO, 2019). O rio Amazonas, possui uma descarga média anual de  $209.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , na estação de Óbidos, no estado do Pará, a montante do município de Santarém, sendo o maior do mundo neste quesito (MOLINIER et al., 1996).

O sistema Solimões/Amazonas é um dos maiores sistemas fluviais do Mundo, e já

na estação de Manacapuru apresenta a maior vazão do mundo ( $103.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) (VILLAR et al., 2018), quase pouco mais que dobro do rio Congo na África, segundo maior nesse quesito ( $40.900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) (LATRUBESSE et al., 2005). Latrubesse (2008) considera que rios com descarga líquida superior à  $17.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  podem ser classificados como megarivers, possuindo uma dinâmica hidrogeomorfológica própria.

A descarga de sedimentos do rio Solimões/Amazonas é controlada pelo tipo de solo, declividade, clima, geologia e morfologia da bacia, e, nos últimos anos, a atividade antropogênica passou a influenciar (queimadas/desmatamento, construções de barragens, atividade industrial, mineração, dentre outros) no transporte sedimentar (MERTES et al., 1996; DUNNE et al., 1998; VILLAR et al., 2018). Na estação de Manacapuru a descarga de sedimentos pode ser calculada entre  $400$  e  $700 \text{ Mt ano}^{-1}$  (DUNNE et al., 1998; FILIZOLA, 1999, 2003; LARAQUE et al., 2005; FILIZOLA; GUYOT, 2009). Dadas as condições únicas de vazão, sedimentos e a variedade de feições geomorfológicas a área próxima à foz do rio Solimões foi delimitada para a análise sob a perspectiva da Teoria do Caos, ao qual compreende da cidade de Manacapuru até confluência com o rio Negro, correspondendo a uma área de  $566,6 \text{ km}^2$  (Figura 02).

**Figura 02 – Localização da Área de Estudo.**



Fonte: Organização dos autores (2021).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Analisou-se a dinâmica de erosão e deposição de sedimentos sob a perspectiva da Teoria do Caos, identificando as alterações morfológicas e as possíveis implicações para a dinâmica hidrogeomorfológica da área. Para isto, foram realizados trabalhos de campo na área de estudo entre os anos de 2018 e 2020 e utilizou-se quatro imagens Landsat 8 sensor OLI disponibilizadas pelo United States Geological Survey – USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) para observar a hidrodinâmica e entender, através de análises multitemporais entre 1991 e 2020, como os processos se relacionam com a Teoria do Caos (Tabela 01).

**Tabela 01 – Imagens Landsat utilizadas**

Satélite	Sensor	Bandas Analisadas	Data de Aquisição	órbita	Resolução Espacial	Cota Fluviométrica (Manacapuru)
Landsat 8	OLI	4, 3, 2 (cor verdadeira)	12/11/1991 (águas baixas)	Heliossíncrona	30 x 30 m	724 cm
-	-	-	13/11/2003 (águas baixas)	-	-	-
-	-	-	29/11/2009 (águas baixas)	-	-	771 cm
-	-	-	11/11/2020 (águas baixas)	-	-	758 cm

**Fonte:** Organização dos autores (2021).

Para a análise do Caos determinístico foi usado o método estocástico que se baseia em probabilidade e estatística (para prever ou estimar fenômenos), pautando-se no estudo de séries temporais. Este método pode ser aplicado para estudos hidrológicos (HURST, 1951; 1956; HANNAN, 1955; LE CAM, 1961; MANDELBROT; WALLIS, 1968; SIVAKUMAR, 2017; dentre outros). Normalmente, em hidrologia, as escalas de tempo estão relacionadas a análises de dados discretas (horária, diária, mensal, anual), tal série pode ser descrita como (Equação 01):

(01)

$$X_i, i = 1, 2, \dots, N$$

O N é a duração total do tempo observado e, portanto, geralmente representa o número total de dados (ou pontos) na série temporal. Este trabalho foca-se em dados mensais de descarga líquida, sedimentos em suspensão e cotas. Disponibilizadas pelo projeto HYBAM (<https://hybam.obs-mip.fr/pt/website-under-development-4/>) na estação de Manacapuru (código = 14100000), a série temporal corresponde aos dados disponíveis para cada parâmetro (Tabela 02):

**Tabela 02 – Parâmetros hidrológicos analisados.**

Parâmetros	Série Temporal	Número de Dados	Estação	Fonte
Descarga Líquida	1973 - 2018	16.620	Manacapuru (14100000)	HYBAM
Sedimentos em Suspensão	1995 - 2014	516	Manacapuru (14100000)	HYBAM
Cotas	1973 - 2018	16.768	Manacapuru (14100000)	HYBAM

**Fonte:** Organização dos autores (2021).

Os dados de sedimentos em suspensão são disponibilizados em mg l-1, porém para fins de comparação optou-se pela utilização dos dados em ton dia-1, para a conversão utilizou-se a Equação 02:

(02)

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C$$

O  $Q_{ss}$  é a carga de sedimentos em ton dia-1.  $Q$  é a descarga líquida.  $C$  é a concentração de sedimentos em suspensão em mg L-1. A constante se refere ao fator de transformação das unidades. Os parâmetros foram analisados para identificar tendência dentro da série histórica analisada que possam sugerir tendências hidrológicas que permitam prever fenômenos. Alguns padrões estatísticos foram utilizados para analisar a desagregação caótica dos parâmetros, sendo média, desvio padrão e coeficiente de variação (SIVAKUMAR, 2017).

Foram realizadas previsões para os três parâmetros analisados no caso das cotas e para a descarga líquida utilizou-se os anos de 1995, 1996 e 1997 para prever os dados dos anos de 1998 e 1999. Os anos para análise dos dados de sedimentos em suspensão foram considerados os anos de 1999, 2000 e 2001 para prever os dados de 2002 e 2003. Para isto, utilizou-se o método do vizinho mais próximo, conforme Kember e Flower (1993), com intervalo de confiança de 95%. As previsões foram comparadas com os dados

observados (reais) para analisar o nível de confiança do método. A série histórica de análise é curta, pois os métodos não-lineares de previsão para processos hidrológicos são discrepantes em análises a longo prazo (SIVAKUMAR, 2017).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise do Fluxo e Processos Fluviais

Alguns conceitos aplicados na instabilidade de Bénard, que é um experimento laboratorial para entender a dinâmica, podem ser observados na natureza longe do ambiente controlado que é o laboratório. A turbulência natural dos rios já apresenta movimento caótico, porém a dinâmica dos fluxos helicoidais é o que mais se aproxima dos conceitos de Bénard (PRIGOGINE, 1993).

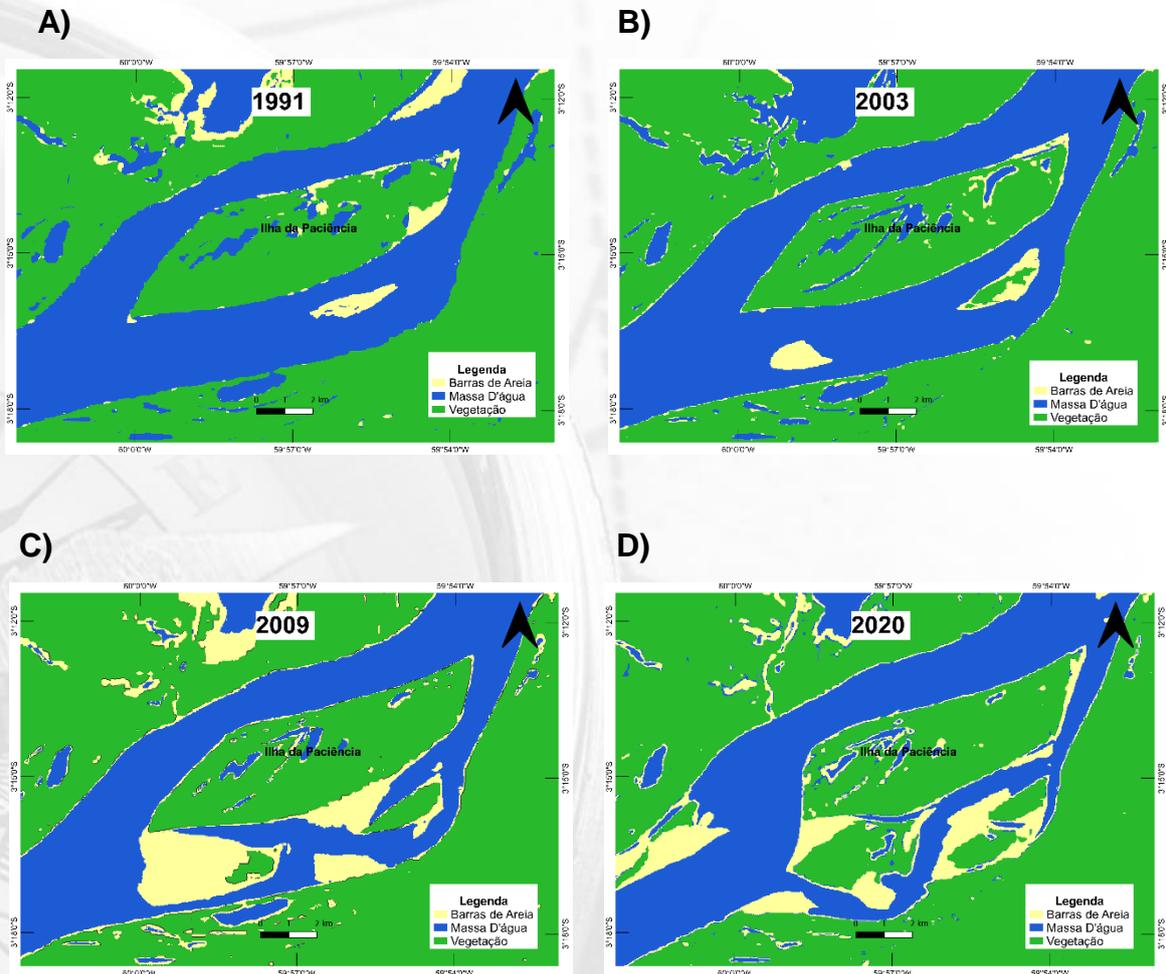
No rio Solimões este fluxo ocorre principalmente na zona de confluência dos rios Solimões e Negro, pois segundo Mosley (1975) e Best (1988), os canais de confluência normalmente formam uma zona de fluxo helicoidal devido à presença de curvatura na linha de fluxo. Outras áreas podem apresentar o fluxo helicoidal ao longo do canal devido à rugosidade do fundo de leito, porém nas zonas de canais de confluência esse tipo de fluxo é mais constante dificultando a previsão dos processos hidrodinâmicos resultantes na área e a jusante.

Na área da ilha da Paciência (Figuras 03 a, b, c, d) é possível observar um assoreamento do paraná da margem direita, a análise multitemporal entre 1991 e 2020 indica que entre 2003 e 2009 houve um processo acelerado de deposição, resultando em mudanças significativas nos processos fluviais da área do baixo Solimões, enquanto entre 2009 e 2020 houve a estabilização da vegetação, o que caracteriza a formação de novas ilhas ou o aumento da área da ilha da Paciência. Alves (2019) e Queiroz e Alves (2021) afirmam, analisando as taxas de deposição, que a tendência é que esta margem seja completamente assoreada. Os efeitos dessa dinâmica já podem ser observados na margem esquerda com um aumento da erosão na ilha da Xiborena, que é convexa, ou seja, propícia à erosão.

Queiroz et al. (2018) e Queiroz e Tomaz Neto (2019) afirmam que na região da ilha da Xiborena os efeitos da erosão de margem são sentidos com intensidade comparando com as áreas a montante e o talvegue do canal está migrando para próximo da margem esquerda (FRANZINELLI, 2011; ALVES, 2019; QUEIROZ; ALVES, 2021), aumentando a

pressão hidráulica que é um dos principais condicionantes da erosão em grandes rios.

**Figura 03** – Área do baixo curso do rio Solimões, próximo à confluência com o rio Negro entre os anos de 1991 e 2020 (A, B, C, D)



**Fonte:** Organização dos autores (2021).

Observa-se que o assoreamento do canal do paraná da margem direita na ilha da Paciência desencadeou diversos fatores que funcionam isoladamente, porém integrados, de forma que influem diretamente na dinâmica hidrogeomorfológica do baixo curso do rio Solimões e nas áreas a jusante, formando uma dinâmica não-linear.

Isto denota que condições iniciais do sistema não necessariamente indicarão as condições finais. As formas fluviais resultantes podem bifurcar para diversas possibilidades dependendo da evolução da dinâmica hidrológica local e regional. Portanto, é possível prever as condições de assoreamento e aumento da erosão na ilha da Xiborena a curto prazo, mas as condições a médio e longo prazo podem mudar novamente, alterando a dinâmica fluvial e os processos resultantes.

## 5.2 Análise dos Dados de Cota, Descarga Líquida e Sedimentos em Suspensão

A natureza complexa, irregular e aparentemente aleatória das séries históricas hidrológicas e a falta do desenvolvimento de equações governantes exatas específicas exigidas em modelos hidrológicos determinísticos motivou o aperfeiçoamento e aplicações de métodos probabilísticos e estatísticos para análise de dados hidrológicos (SIVAKUMAR, 2017). O Quadro 02 apresenta padrões estatísticos importantes para a análise dos dados de descarga líquida, sedimentos em suspensão e cotas fluviométricas.

**Quadro 02** – Estatística dos dados de descarga líquida, sedimentos em suspensão e cotas para o baixo curso do rio Solimões (estação de Manacapuru).

Estatísticas	Descarga Líquida	Sedimentos em Suspensão	Cotas
Média	103.855 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	855.310 ton dia <sup>-1</sup>	1442,75 cm
Mediana	105.444,25 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	600.929 ton dia <sup>-1</sup>	1472 cm
Desvio Padrão	27346,19	429180,8	335,847
Coefficiente de Variação (%)	26,331	50,178	23,278
Valor Máximo	140.616 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	1.499.732 ton dia <sup>-1</sup>	1876,75 cm
Valor Mínimo	63.344 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	340.493 ton dia <sup>-1</sup>	941,33 cm

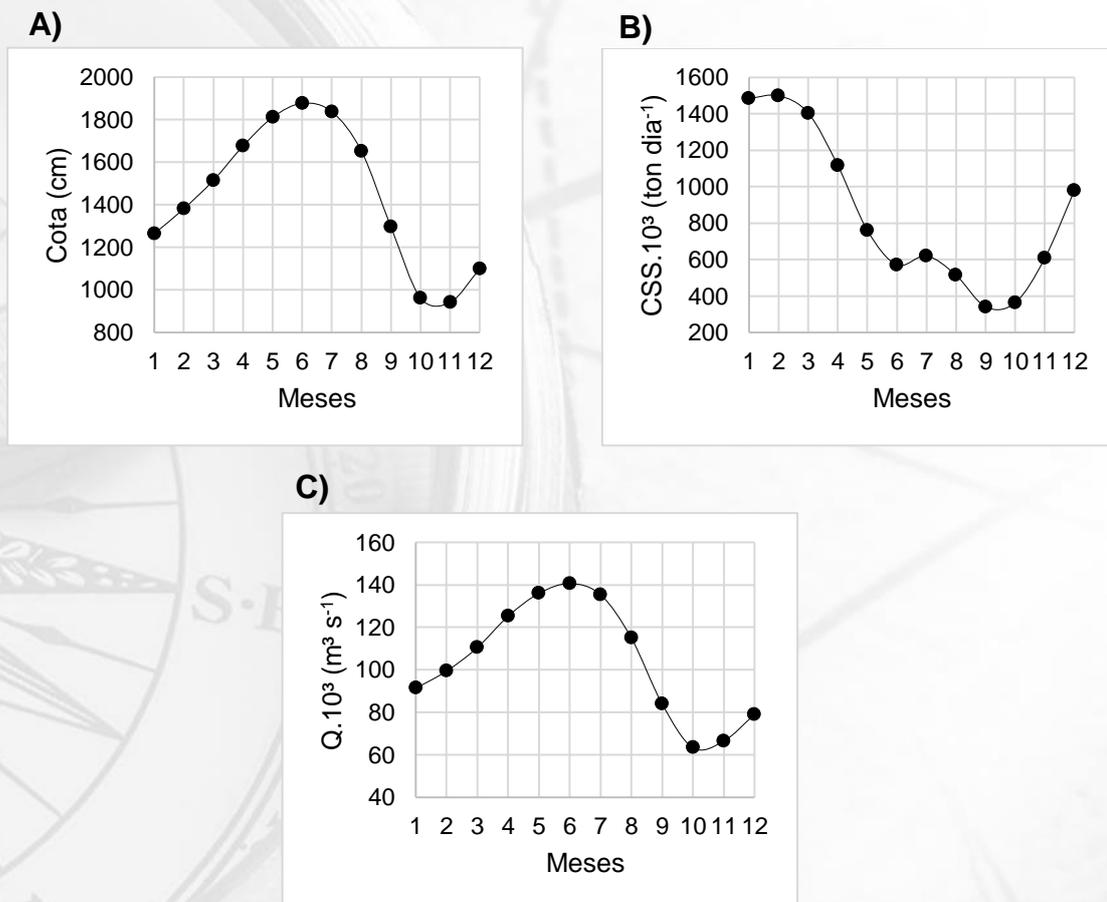
**Fonte:** Organização dos autores (2021).

A média é um importante fator para análise anual e mensal de dados hidrológicos, assim como o valor mínimo e máximo, pois esses fatores podem indicar tendências na série temporal. Porém, apesar de cobrir uma certa quantidade de informações não é uma estatística que caracteriza completamente uma série temporal. Com os valores médios de uma série temporal pode-se obter a sazonalidade dos parâmetros e prever a longo prazo os meses com os maiores e menores valores (Figuras 04 a, b, c). Entretanto, a distribuição não-linear dos dados impede uma previsão confiável, já que os dados variam em forma aleatória ao longo da série analisada.

A mediana, assim como a média, é um parâmetro interessante para análise estatística de dados, porém observa-se que a tendência não-linear dos dados impossibilita uma análise aprofundada dos dados anuais e mensais. A análise do desvio padrão é relevante para determinar o quanto o conjunto de dados é uniforme. Quanto mais próximo

de zero mais homogêneos são os dados, dentre os dados analisados o que possui maior homogeneidade é a cota e os dados mais heterogêneos são os dados de sedimentos em suspensão. O coeficiente de variação é usado para analisar a dispersão em termos relativos a seu valor médio, os dados de cotas e descarga líquida apresentam uma média dispersão, já os dados de sedimentos uma alta dispersão.

**Figuras 04** – Médias mensais dos dados de descarga líquida, sedimentos em suspensão e cotas para o baixo curso do rio Solimões (estação de Manacapuru, A, B, C).



**Fonte:** Organização dos autores (2021).

**Nota:** A – Dados de cotas fluviométricas. B – Dados de sedimentos em suspensão. C – Dados de descarga líquida.

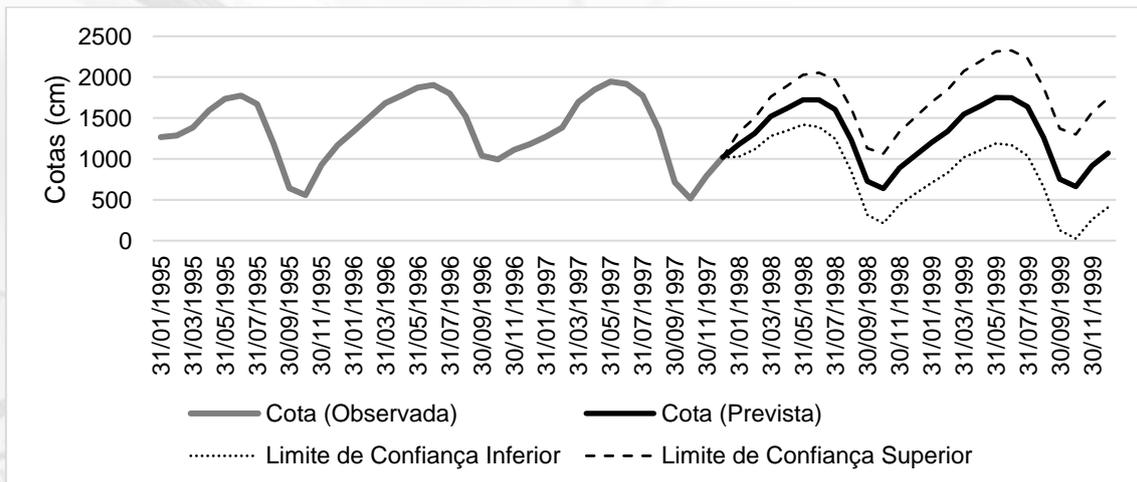
Analisou-se, também, a ideia de previsão a curto prazo dos dados de cotas, descarga e sedimentos (Figuras 05 a, b, c). Observa-se que os padrões dos dados são sazonais. Os dados de cotas e descarga possuem uma melhor uniformidade dos dados, portanto a margem de erro para as previsões é menor, enquanto que os dados de sedimentos são mais aleatórios, nota-se que o limite de confiança, neste parâmetro, possui uma amplitude maior e o limite inferior apresenta valores negativos, o que não condiz com

a realidade na natureza. Isto indica a dificuldade para prever dados sedimentológicos pela aparente aleatoriedade dos dados e sua complexa dinâmica não-linear.

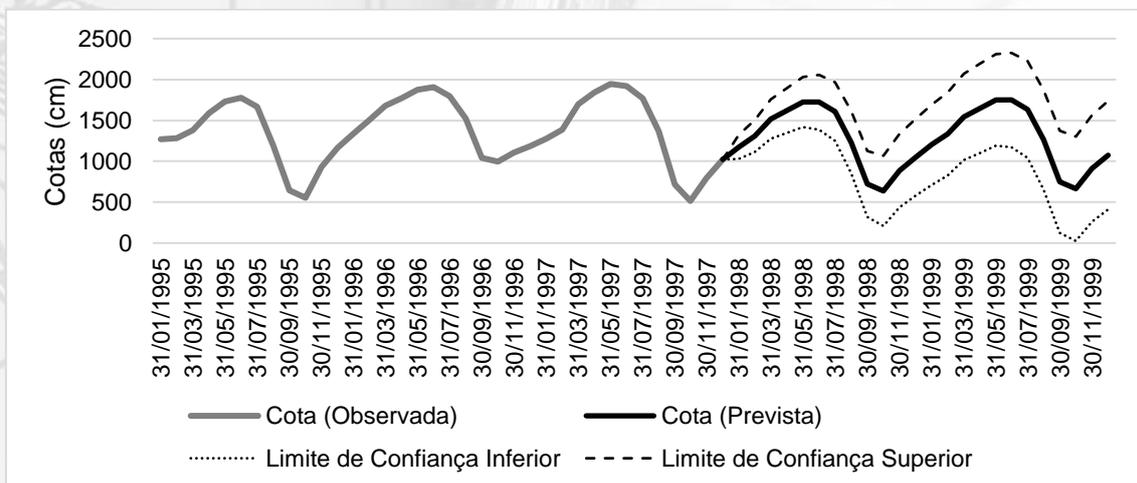
**Figuras 05 –** Previsão dos dados de cota, descarga líquida e sedimentos em suspensão

(A, B, C.)

**A)**

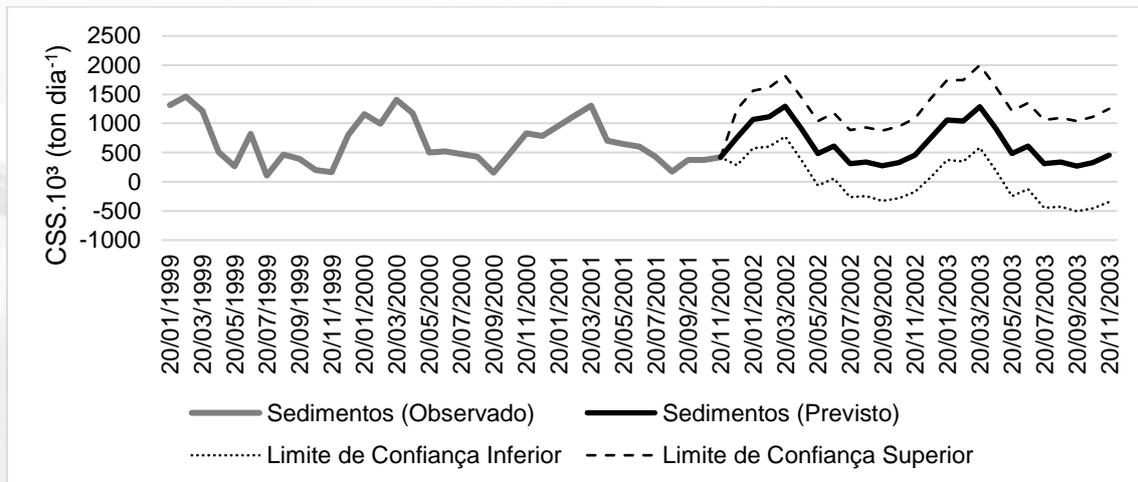


**B)**



*Continua...*

C)



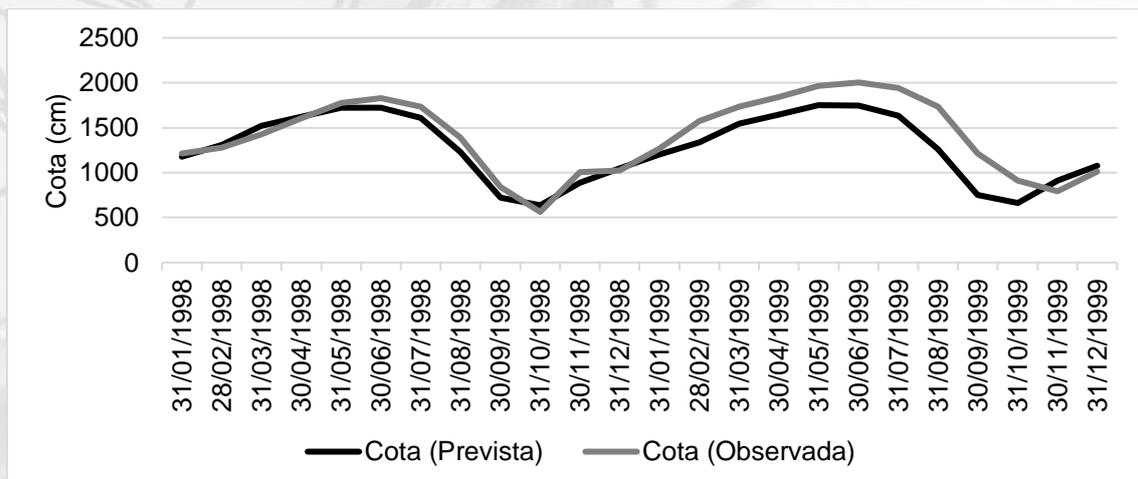
Fonte: Organização dos autores (2021).

Nota: A – previsão dos dados de cota. B – previsão dos dados de descarga líquida. C – previsão dos dados de sedimentos em suspensão.

Comparando os dados previstos com os observados (Figuras 06 a, b) nota-se que no ano de 1998 para os dados de cotas e descargas, as previsões e os dados reais são próximos. No ano de 1999 observa-se que os dados começam a divergir, porém ainda estão na margem de erro estipulada (limite de confiança inferior e superior).

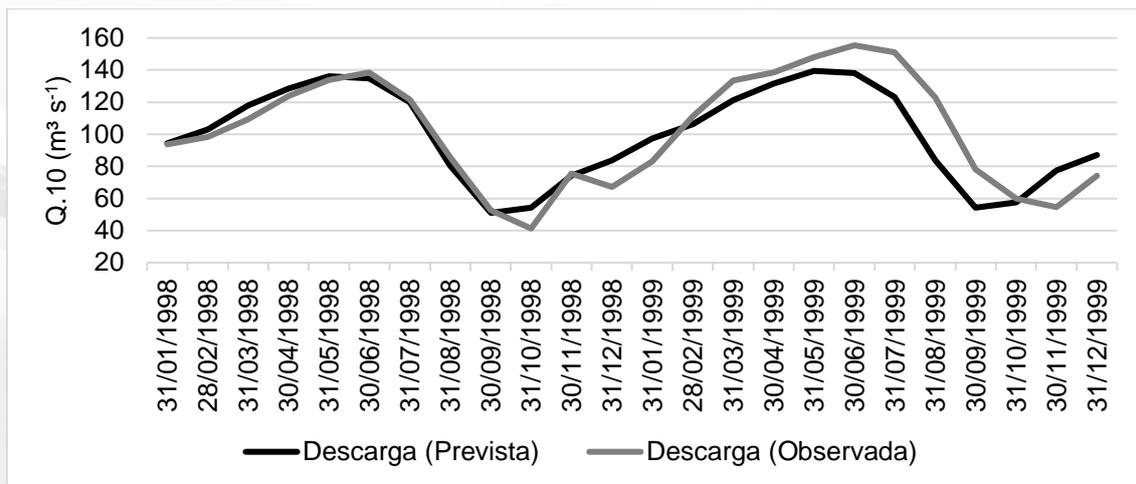
Figuras 06 – Comparação dos dados previstos e observados de cota e descarga líquida (A, B).

A)



Continua...

B)

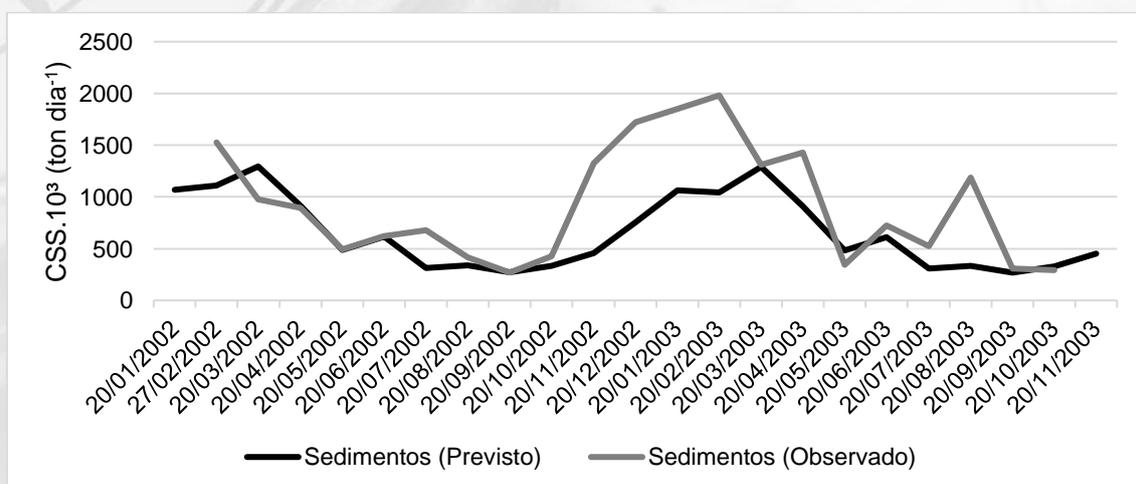


Fonte: Organização dos autores (2021).

Nota: A – Comparação dos dados previstos e observados de cota. B – Comparação dos dados previstos e observados de descarga líquida.

Os dados de sedimentos (Figura 07) são aparentemente mais aleatórios, porém seguem a mesma dinâmica, as previsões são mais próximas do real no ano de 2002 e começam a divergir no ano de 2003, porém ainda no limite de confiança. Os dados comprovam que a série temporal prevista precisa ser curta, pois, devido às características não-lineares dos dados, quanto mais longa a série prevista, maior a chance de inconsistências entre os dados observados e previstos. Os valores do desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de sedimentos já indicam a não-linearidade e aparente aleatoriedade do regime sedimentológico do baixo rio Solimões.

Figuras 07 – Comparação dos dados previstos e observados de sedimentos em suspensão.



Fonte: Organização dos autores (2021).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Teoria do Caos mostrou-se propícia para análise de processos e fluxos fluviais. A análise dos fluxos turbulentos e, em específico, fluxos helicoidais, é interessante sob a perspectiva do Caos. Observou-se que é possível prever a dinâmica desses fluxos caóticos em uma curta escala de tempo, porém para análises a médio e longo prazo é impossível fazer previsões com alto grau de confiabilidade sobre a evolução hidrodinâmica local e regional.

A análise dos processos de erosão e deposição de sedimentos seguem a mesma dinâmica, observou-se que eventos lineares (como a deposição linear de sedimentos arenosos que resultará no assoreamento do canal) pode desencadear elementos imprevisíveis, tornando a metamorfose fluvial complexa e não linear.

Quando se considera dados em uma escala de tempo menor os resultados previstos para os anos de 1998 (cotas e descarga) e 2002 (sedimentos) apresentam uma margem de erro baixa, comparado com os dados observados, porém os anos de 1999 (cota e descarga) e 2003 (sedimentos) começam a apresentar uma maior variabilidade dos dados.

Portanto, é preciso prever dados de um curto período de tempo, pois quanto mais longa for à série prevista, maiores as chances de os dados apresentarem inconsistências. As previsões de uma escala temporal curta podem ser importantes para a previsão de fenômenos hidrológicos que causam prejuízos estruturais, financeiros e humanos, facilitando a elaboração de políticas públicas para a contenção de desastres.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A. C. **Análise Multitemporal e Morfodinâmica no Entorno da Confluência do Rio Solimões com o Rio Negro**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Amazonas – UFAM), Manaus, 2019.

BEST, J. L. Sediment Transport and Bed Morphology at River Channel Confluence. **Sedimentology**, v. 35, pp. 481-498, 1988.

DUNNE, T.; MERTES, L. A.; MEADE, R. H.; RICHEY, J. E.; FORSBURG, B. R. Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil. **Geol. Soc. Am. Bull.**, v. 110, n. 4, pp. 450-467, 1998.

FIEDLER-FERRARA, N.; PRADO, C. P. C. **Caos: Uma introdução**. Blucher: São Paulo, 1994.

FILIZOLA, N. **O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da bacia Amazônica Brasileira**. ANEEL, 1999.

FILIZOLA, N. **Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens**. Université Toulouse 3- Paul-Sabatier, Toulouse, France, 2003, 292 p.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. **Hydrol. Processes**, v. 23, n. 22, pp. 3207-3215, 2009.

FRANZINELLI, E. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p 587-596, 2011.

HAKEN, H. **Evolution of Order and Chaos in Physics, Chemistry and Biology**. Springer Series in Synergetics, vol.17, Springer Verlag, Berlin, 1982.

HANNAN, E. J. A test for singularities in Sydney rainfall. **Austr Jour Phys**, v. 8, n. 2, pp. 289–297, 1955.

HENSE, A. On the possible existence of a strange attractor for the southern oscillation. **Beitr Phys Atmos**, v. 60, n. 1, pp. 34–47, 1987.

HURST, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. **Trans Am Soc Civil Eng**, v. 116, pp. 770–808, 1951.

HURST, H. E. Methods of using long-term storage in reservoirs. **Proc Inst Civil Eng**, v. 1, pp. 519–543, 1956.

JAYAWARDENA, A. W.; GURUNG, A. B. Noise reduction and prediction of hydrometeorological time series: dynamical systems approach vs. stochastic approach. **J Hydrol**, v. 228, pp. 242–264, 2000.

KEMBER, G.; FLOWER, A. C. Forecasting river flow using nonlinear dynamics. **Stoch Hydrol Hydraul**, v. 7, pp. 205–212, 1993.

KHATIBI, R., SIVAKUMAR, B., GHORBANI, M. A., KIŞI, Ö., KOCAK, K., ZADEH, D. F. Investigating chaos in river stage and discharge time series. **J Hydrol**, v. 414, n.415, pp. 108–117, 2012.

LARAQUE, A.; FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. **Variations spatio-temporelles du bilan sédimentaire dans le bassin Amazonien Brésilien, à partir d'un échantillonnage décadaire**. IAHS-AISH Publ, pp. 250-258, 2005.

LATRUBESSE, E. M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology** 101, pp. 130–145, 2008.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical Rivers. **Geomorphology**, 70, pp.187–206, 2005.

LE CAM, L. A. A stochastic description of precipitation. In: NEWMAN, J. (Org.). **Proc 4th Berkeley symp mathematics, statistics, and probability**. University of California Press, Berkeley, pp. 165–186, 1961.

LISI, F.; VILLI, V. Chaotic forecasting of discharge time series: A case study. **J Am Water Resour Assoc**, v. 37, n. 2, pp. 271–279, 2001.

LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 20, pp. 130-141, 1963.

MANDELBROT, B. B.; WALLIS, J. R. Noah, Joseph and operational hydrology. **Water Resour Res**, v. 4, n. 5, pp. 909–918, 1968.

MERTES, L. A.; DUNNE, T.; MARTINELLI, L. A. Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 108, n. 9, pp. 1089-1107, 1996.

MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. **Les régimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents**. IAHS Publ, pp. 209-222, 1996.

MORENO, U. F. **Teoria de Bifurcações e do Caos Aplicadas à análise da Estabilidade de Tensão**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, 1997.

MOSLEY, M. P. An Experimental Study of Channel Confluence. **Journal of Geology**, v. 84, pp. 535-562, 1975.

PHOON, K. K.; ISLAM, M. N.; LIAW, C. Y.; LIONG, S. Y. A practical inverse approach for forecasting of nonlinear time series analysis. **ASCE J Hydrol Eng** v. 7, n. 2, pp.116–128, 2002.

POINCARÉ, H. **Les Methodes Nouvelles de la Mécanique Celeste**. Vols. 1-3, Gauthier-Villars, Paris, 1899.

PRIGOGINE, I. **As leis do Caos**. Editora Unesp: São Paulo, 1993.

QUEIROZ, M. S.; TOMAZ NETO, A. G. A Influência dos Rios Negro e Solimões nas Comunidades Rurais Ribeirinhas no Município de Iranduba - Amazonas. In: PINHEIRO, L. S.; GORAYEB, A. (Org.). **Geografia Física e as Mudanças Globais**. 1ed.Fortaleza: Editora UFC, p. 01-12, 2019.

QUEIROZ, M. S.; ALVES, N.S. Conditioning Factors of “Terras Caídas” in Lower Solimões River – Brazil. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 80, p. 220–233, 2021.

QUEIROZ, M. S.; SOARES, A. P. A.; TOMAZ NETO, A. G. Comunidades rurais ribeirinhas e as águas do rio Solimões no município de Iranduba – Amazonas. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.4, n.1.108-119, 2018.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; POWER, F. B.; SHARIFI, M. B.; GEORGAKAKOS, K. P. Chaos in rainfall. **Water Resour Res**, v. 25, n. 7, pp.1667–1675, 1989.

SHANG, P.; NA, X.; KAMAE, S. Chaotic analysis of time series in the sediment transport phenomenon. **Chaos Soliton Fract**, v. 41, n. 1, pp. 368–379, 2009.

SHARIFI, M. B.; GEORGAKAKOS, K. P.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Evidence of deterministic chaos in the pulse of storm rainfall. **J Atmos Sci**, v. 47, pp.888–893, 1990.

SIVAKUMAR, B. **Chaos in Hydrology**: Bridging Determinism and Stochasticity. Springer, 2017.

SIVAKUMAR, B. Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations. **J Hydrol**, v. 227, n. 1–4, pp. 1–20, 2000.

SIVAKUMAR, B. Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective. **Hydrol Earth Syst Sci**, v. 5, n. 4, pp. 645–651, 2001.

SIVAKUMAR, B.; HARTER, T.; ZHANG, H. Solute transport in a heterogeneous aquifer: a search for nonlinear deterministic dynamics. **Nonlinear Process Geophys**, v. 12, pp. 211–218, 2005.

SIVAKUMAR, B.; JAYAWARDENA, A. W. An investigation of the presence of low-dimensional chaotic behavior in the sediment transport phenomenon. **Hydrol Sci J**, v. 47, n.3, pp. 405–416, 2002.

TONGAL, H.; BERNDTSSON, R. Phase-space reconstruction and self-exciting threshold modeling approach to forecast lake water levels. **Stoch Environ Res Risk Assess**, v. 28, n. 4, pp. 955–971, 2014.

TSONIS, A. A.; ELSNER, J. B.; GEORGAKAKOS, K. P. Estimating the dimension of weather and climate attractors: important issues about the procedure and interpretation. **J Atmos Sci**, v. 50, pp. 2549–2555, 1993.

VILLAR, R. E.; MARTINEZ, J. M.; ARMIJOS, E.; ESPINOZA, J. C.; FILIZOLA, N.; SANTOS, A.; WILLEMS, B.; FRAIZY, P.; SANTINI, W.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 1–2, pp. 4-12, 2018.

WANG, Q.; GAN, T. Y. Biases of correlation dimension estimates of streamflow data in the Canadian prairies. **Water Resour Res**, v. 34, n. 9, pp. 2329–2339, 1998.

WILCOX, B. P.; SEYFRIED, M. S.; MATISON, T. M. Searching for chaotic dynamics in snowmelt runoff. **Water Resour Res**, v. 27, n. 6, pp. 1005–1010, 1991.

ZHOU, Y.; MA, Z.; WANG, L. Chaotic dynamics of the flood series in the Huaihe River Basin for the last 500 years. **J Hydrol**, v. 258, n. 100–110, 2002.

\*\*\*