

## Variabilidade dos casos de malária e sua relação com a precipitação e nível d'água dos rios no Estado do Amazonas, Brasil

Variability in malaria cases and the association with rainfall and rivers water levels in Amazonas State, Brazil

Variabilidad de los casos de malaria y su relación con las precipitaciones y nivel del agua de los ríos en el estado del Amazonas, Brasil

Bruna Wolfarth-Couto <sup>1</sup>  
Rosimeire Araújo da Silva <sup>1</sup>  
Naziano Filizola <sup>2</sup>

doi: 10.1590/0102-311X00020218

### Resumo

*O entendimento das relações entre as variáveis de precipitação e nível d'água dos rios com os casos de malária podem fornecer indícios importantes da modulação da doença no contexto da variabilidade climática local. No intuito de demonstrar como essas relações variam no mesmo espaço endêmico, realizou-se a análise de coerência e fase de ondeletas entre as variáveis ambientais e epidemiológica no período de 2003 a 2010 para 8 municípios do Estado do Amazonas (Barcelos, Borba, Canutama, Carauari, Coari, Eirunepé, Humaitá e São Gabriel da Cachoeira). Os resultados indicam coerências significativas principalmente na escala de variabilidade anual, contudo, escalas menores que 1 ano e bienal também foram encontradas. As análises mostram que casos de malária apresentam pico com aproximadamente 1 mês e meio antes ou depois dos picos de chuva, e em média 1-4 meses após o pico dos rios para grande parte dos municípios estudados. Foi notado que cada variável ambiental apresentou atuação local distinta no tempo e no espaço, sugerindo que outras variáveis locais (a topografia é um exemplo) possam controlar as condições ambientais favorecendo uma atuação diferenciada em cada município, porém, quando as análises são feitas em conjunto é possível ver uma ordem não aleatória destas relações acontecerem. Embora os fatores ambientais e climáticos denotem certa influência sobre a dinâmica da malária, questões de vigilância, prevenção e controle não devem ser desprezadas, significando que as atuações governamentais de saúde podem mascarar possíveis relações com as condições hidrológicas e climáticas locais.*

*Malária; Precipitação Atmosférica; Hidrologia*

### Correspondência

B. Wolfarth-Couto  
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.  
Av. André Araújo 2936, Manaus, AM 69067-375, Brasil.  
brunaprojetoslba@gmail.com

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil.  
<sup>2</sup> Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil.



## Introdução

A malária, doença infecciosa grave, provoca enorme peso na saúde com impacto no desenvolvimento social e econômico. No Brasil, principalmente na Amazônia Legal, a doença é considerada um sério problema de saúde pública, exibindo ampla incidência e efeitos debilitantes em virtude, principalmente, das condições ambientais propícias para a manutenção da doença <sup>1,2</sup>.

Embora as condições ambientais e sociais sejam importantes para os níveis endêmicos da malária, fatores como acesso e qualidade dos serviços de saúde agem sobre a dinâmica da doença <sup>3,4</sup>. A interação desses fatores favorece as variações das notificações, sendo que muitos deles estão associados às fragilidades das ações da vigilância epidemiológica, responsáveis pelo atraso no diagnóstico, tratamento da doença e condições de vulnerabilidade da população <sup>5,6,7</sup>.

Muitos fatores como por exemplo os climáticos, ecológicos e ambientais podem ser responsáveis pelas características de sazonalidade do vetor <sup>8</sup>. Constantemente pesquisas têm sugerido a influência dos fatores climáticos na ocorrência de doenças vetoriais <sup>9,10,11</sup>. Variáveis ambientais como temperatura, umidade, padrões de uso do solo e de vegetação limitam o ciclo de vida de diversas doenças, sobretudo as transmitidas por vetores <sup>12</sup>.

Padrões de sazonalidade do vetor da malária estão intimamente relacionados com o ciclo anual de chuvas, variações meteorológicas e hidrológicas <sup>13,14</sup>. No que diz respeito às chuvas, a variabilidade anual da precipitação contribui para a alteração da densidade vetorial, além de proporcionar o meio aquático para a fase do ciclo de vida dos mosquitos, aumento nas condições de umidade e, consequentemente, a longevidade dos vetores <sup>8,15</sup>. A pesar da precipitação ter um papel importante sobre os casos da doença, o seu efeito, intensidade, pode variar com as circunstâncias de determinadas regiões geográficas <sup>8</sup>.

Outro fator relevante é o entendimento da atuação hidrológica na resposta dos casos de malária. Variações sazonais dos níveis hidrológicos contribuem para a formação de criadouros potenciais, provocando impacto significativo na flutuação e incidência da malária <sup>14,16</sup>.

Em função das características ambientais e climáticas assegurarem ambientes propícios para a perenidade desta endemia <sup>2</sup>, a compreensão das relações das variáveis de precipitação e nível d'água dos rios, sobre as respostas que elas provocam na malária, são importantes para o entendimento do perfil epidemiológico e como as diferenças de variabilidade são heterogêneas na Região Amazônica.

Mesmo numa região onde a doença é considerada endêmica, a dinâmica de transmissão pode ser variável dependente da interação de fatores ambientais, socioculturais, econômicos e políticos <sup>17</sup>. De acordo com Confalonieri <sup>18</sup>, as características ambientais e sociais da Amazônia brasileira são relevantes para a determinação dos quadros epidemiológicos. Além disso, os aspectos geográficos e ecológicos característicos da região determinam substancialmente habitats potenciais de reprodução vetorial da malária.

A malária, por apresentar uma complexa interação entre o parasita, vetor, homem e o meio ambiente, exibe distribuição espacial e temporal também complexa. Além da influência das políticas públicas, vários estudos apontam uma não homogeneidade em função das diferentes formas de ocupação do solo, distintas situações epidemiológicas por conta das características de paisagem e das condições climáticas <sup>19,20,21</sup>.

Pesquisas com iniciativas de esclarecer a dinâmica da doença, suas diferenças em nível municipal e discretizar diferenças espaciais tomando em consideração a variabilidade hidrológica da bacia e das condições de chuva local, fornecem subsídios relevantes para a implantação de estratégias de prevenção e controle com base em padrões distintos da malária. Dessa forma, o presente trabalho buscou analisar a covariância estatística das variáveis de precipitação e níveis d'água local com os casos de malária, no intuito de demonstrar como estas relações variam no mesmo espaço endêmico.

## Metodologia

### Área de estudo

O Estado do Amazonas está localizado na Região Norte do Brasil, ocupando uma área de 1.559.161,682km<sup>2</sup>. Exibe clima equatorial úmido, caracterizado por elevadas temperaturas e altos índices pluviométricos. A região tem basicamente duas estações bem definidas: compreendidas entre os meses de novembro a março (período chuvoso), de maio a setembro (período de estiagem) e com período de enchente dos rios entre os meses de maio a agosto, e vazante entre setembro e outubro <sup>22</sup>.

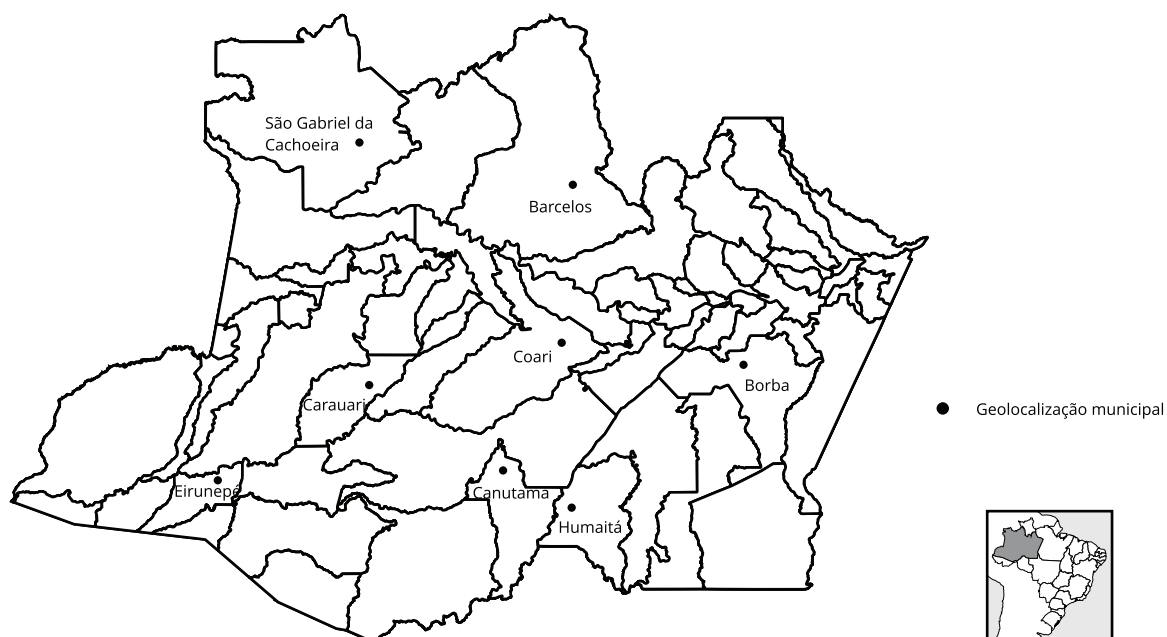
### Dados

Os dados de casos de malária total, anomalia de precipitação e nível d'água, respectivos de cada localidade investigada, compreenderam a série histórica do período de 2003 a 2010, em escala mensal. Devido aos dados do The Global Historical Climatology Network (GHCN), na ocasião da obtenção dos dados, disponibilizar uma série histórica até o ano de 2010, optou-se por padronizar o tamanho da série histórica dos dados a partir da disponibilização dos dados de casos de malária total do Sistema de Informação Epidemiológica da Malária (SIVEP-Malária), a começar do ano de 2003 até 2010 constado pelo banco de dados do GHCN. Os dados de nível d'água foram obtidos dentro desse período.

A seleção dos municípios foi feita aleatoriamente e vinculada à integralidade dos dados hidrológicos, de forma que compreendesse espacialmente toda a região do Estado do Amazonas, bem como os municípios localizados em bacias hidrológicas distintas. Os municípios analisados foram: Barcelos, Borba, Canutama, Carauari, Coari, Eirunepé, Humaitá e São Gabriel da Cachoeira (Figura 1).

### Figura 1

Localização da área de estudo no Estado do Amazonas, Brasil. Os 8 municípios analisados foram: São Gabriel da Cachoeira, Barcelos, Eirunepé, Carauari, Coari, Canutama, Humaitá e Borba.



- **Casos de malária**

Os dados de casos de malária total foram obtidos por meio do processamento dos dados brutos em arquivos DBF, disponibilizados no SIVEP-Malária, utilizando-se apenas os casos novos e autóctones totais.

- **Nível d'água**

Os dados de nível d'água (cotas de estações fluviométricas) foram provenientes da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) e SO HYBAM (Serviço de Observação "Controles Geodinâmico, Hidrológico e Biogeoquímico da Erosão/Alteração e da Transferência de Matérias nas Bacias dos Rios Amazonas, Orinoco e Congo"). Com relação à escolha das estações fluviométricas, foram definidos critérios que consideraram a integralidade e consistência dos dados influenciando na escolha dos municípios analisados.

- **Precipitação**

Foram usados dados mensais de precipitação para áreas continentais globais no período de 1948-2010, em uma resolução horizontal de 0,5° em latitude por 0,5° em longitude, referentes a pontos latitudinais e longitudinais do município, disponibilizados pelo GHCN na versão 2B e CAMS. Calculou-se as médias climatológicas da precipitação, média total da série e, em seguida, entre os anos 2003-2010, calculou-se as anomalias mensais de precipitação. As anomalias de precipitação permitem avaliar o grau de variabilidade das chuvas e sua relação com eventos extremos.

### Análise dos dados

Os procedimentos e cálculos descritos por Torrence & Compo<sup>23</sup> foram utilizados. Valendo-se do método de Análise de Coerência e Fase de Ondeletas é possível determinar os modos dominantes da variabilidade entre as variáveis e como estes modos variam no decorrer do tempo<sup>24</sup>, ou seja, decompor e descrever a função  $f(t)$  no domínio da frequência, de forma que se pode analisar esta função em diferentes escalas de frequência e de tempo. Essa técnica é importante na investigação de fenômenos não estacionários.

Os valores das coerências podem ser vistos com base na escala de cores do azul ao vermelho. Coerências com valor igual a 1 (cor vermelha) apresentam forte relação entre as variáveis. Coerências de cores do amarelo ao azul constituem relações mais fracas e sem significância estatística. As coerências estatisticamente significativas estão delimitadas por uma linha preta, na qual o nível de significância, utilizando-se o método de Monte Carlo, é de 95% de confiança. Valores baixos de coerência e sem significância estatística dão um indicativo de que as variáveis foram independentes nos anos. No entanto, valores significativos e elevados de coerência sugerem que as séries apresentam um grau de inter-relação com variações na mesma frequência.

A análise da fase ou defasagem entre as séries é caracterizada e ilustrada pelo ângulo de inclinação dos vetores. Setas na horizontal apontadas para a direita (0°) resultam em séries na mesma fase (relação conjunta); setas apontadas para a esquerda (180°) refletem séries em fases opostas (relação inversa). Setas verticalmente para baixo (-45°, -90° ou -135°) sugerem que a 1ª série analisada está defasada ocorrendo antes da 2ª série; setas verticalmente para cima (45°, 90° ou 135°) indicam que a 1ª série analisada está defasada ocorrendo depois da 2ª série.

Para as análises deste estudo e compreensão do tempo das defasagens (quanto uma variável antecede ou precede a outra) foram consideradas variáveis independentes: a precipitação e o nível d'água, e dependente, os casos de malária. O cálculo de definição da defasagem toma como base a inclinação do ângulo do vetor.

O eixo das abscissas corresponde ao período anual, sendo subdividido em frações de ano, ou seja: os níveis 0,25, 0,5, 1,0 e 2,0 que aparecem padronizados nos eixos correspondem ao período de 3 meses, 6 meses, 1 ano e 2 anos, respectivamente. Frequentemente os resultados para esse tipo de análise variam nos intervalos desses níveis.

## Resultados

De maneira geral, os resultados da análise de coerência indicaram relações principalmente na escala de variabilidade anual (1 ano), no entanto, escalas menores entre 0,25-0,9 (correspondentes a de 3 a 9 meses) e escala bienal (2 anos) também foram notadas. Em relação à precipitação e casos de malária, os resultados variaram em coerências em fase (relação das variáveis ocorrendo no mesmo momento) e defasadas (variáveis ocorrendo em momentos distintos). Para o nível d'água e malária, as coerências foram principalmente defasadas com variabilidade de 1-4 meses, de acordo com os municípios.

Tratando-se das variáveis de precipitação e casos de malária do Município de São Gabriel da Cachoeira (Figura 2), destacaram-se coerências em fase entre os anos de 2004-2006 numa escala de variabilidade de 0,6-0,8 ano (correspondente de 8 a 10 meses). Coerências defasadas numa escala de variabilidade de 0,25-0,33 ano (3 a 4 meses) para o ano de 2004 e 0,41-0,66 ano (5 a 8 meses) para 2006 e 2007 indicaram que os picos de casos de malária antecederam entre 20-30 dias os picos de precipitação. No ano de 2007, na escala de 0,08-0,41 ano (1 a 5 meses), coerências defasadas sugeriram que o pico de precipitação antecedeu de 10-20 dias o pico de casos de malária. Para as variáveis de nível d'água e casos de malária (Figura 2) não foram observadas coerências na escala anual (1 ano), exceto para o fim de 2009, no entanto, na escala bienal (2 anos) foram observadas coerências significativas para o ano de 2008. Em escalas menores identificou-se coerências pouco expressivas.

Para o Município de Barcelos, as variáveis de precipitação e casos de malária apresentaram coerências bastante expressivas (Figura 2). Na escala anual, a partir do ano de 2007 até o início de 2009, notou-se coerências defasadas em que a precipitação antecedeu aproximadamente 1 mês e meio os casos de malária. Nas escalas de variabilidade entre 0,08-0,83 ano (1 a 10 meses) e escala bienal notou-se coerências em fase em que a precipitação e os casos de malária demonstraram forte dependência entre elas. Em relação às variáveis de nível d'água e casos de malária (Figura 2) na escala anual, percebeu-se que na primeira metade da série, mesmo período em que não foi exibida coerência com a precipitação, a relação foi dada em fase oposta com o nível d'água, no entanto, sem significância. Observou-se coerência significativa apenas para 2009, na escala de variabilidade de 0,08-0,25 ano (1 a 3 meses), e em fase oposta.

Para o Município de Eirunepé, entre as variáveis de precipitação e casos de malária (Figura 3) notou-se na escala anual coerências defasadas, para os anos de 2005 e 2006, em que os picos de precipitação ocorreram 1 mês e meio após os picos de casos de malária. Na escala bienal, as variáveis apresentaram coerências em fase entre 2006 e 2008. Na escala anual, observou-se coerências em fase entre 2007 e 2009. Em relação às variáveis de nível d'água e casos de malária (Figura 3) na escala anual, percebeu-se coerências defasadas em que os picos de nível d'água antecederam entre 3-4 meses os picos de malária. Na escala de variabilidade de 0,08-0,41 ano notou-se coerências em fases opostas entre os anos de 2004-2006.

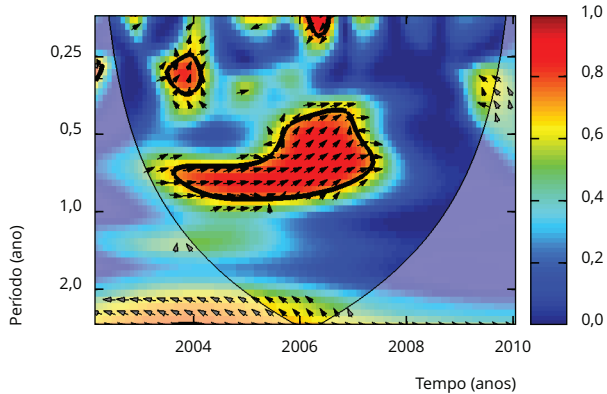
Para o Município de Caruari observou-se forte relação para todos os anos da série. Na escala anual, notou-se entre 2007 e 2009 coerências defasadas em que os picos de casos de malária antecederam 1 mês e meio os picos de precipitação (Figura 3). Na escala de 0,25 a 0,33 ano para 2009, constatou-se coerência defasada em que o pico de malária antecedeu 10 a 15 dias o pico de precipitação. Em relação às variáveis de nível d'água e casos de malária (Figura 3) na escala anual, notou-se relações de dependência de moderada a forte para praticamente todos os anos com coerências defasadas, em que a série de nível d'água antecedeu em 45 dias para os primeiros anos da série (2004-2006) e em 3 meses para o restante dos anos (2008-2010).

Para o Município de Coari, notou-se coerências em fase entre as variáveis de precipitação e casos de malária (Figura 4). Em geral, as coerências em fase ocorreram em escala anual, porém foram notadas coerências defasadas entre os anos de 2005 a 2007. Para 2004 e 2008, foram evidenciadas coerências defasadas na escala de variabilidade de 0,33-0,5 ano (4 a 6 meses), indicando que os picos de precipitação antecederam entre 20-45 dias os picos de casos de malária. Em relação às variáveis de nível d'água e casos de malária, percebeu-se que as coerências foram bem expressivas. Em escala anual, notou-se coerências defasadas em que os picos de nível d'água antecederam 3 meses os picos de casos de malária (Figura 4). Na escala de variabilidade de 0,33-0,66 ano (4 a 8 meses), entre os anos de 2004-2008, verificou-se coerências defasadas em que o pico de nível d'água antecedeu de 1-2 meses

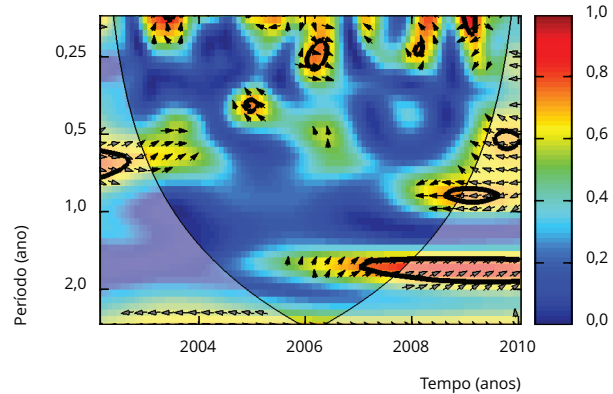
**Figura 2**

Coerência (hachuras do vermelho ao azul) e diferença de fase da ondeleta (em setas) entre as séries de “precipitação-casos de malária” e “nível d’água-casos de malária” para os municípios de São Gabriel da Cachoeira e Barcelos, Amazonas, Brasil, no período de 2003 a 2010.

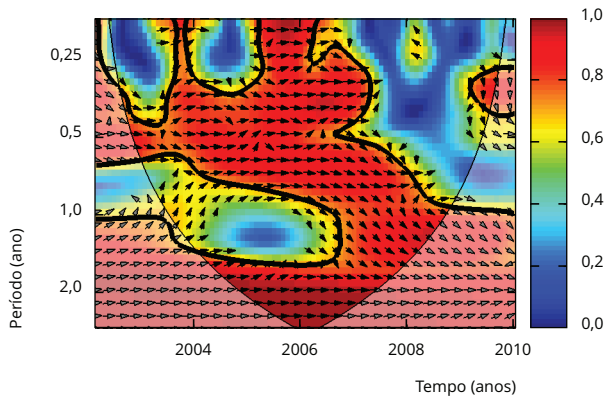
2a) São Gabriel da Cachoeira: precipitação – casos de malária



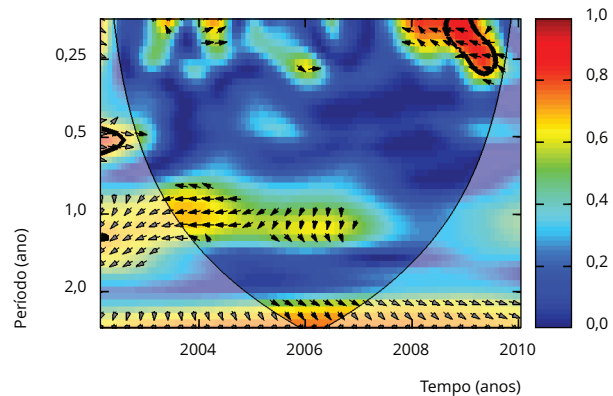
2b) São Gabriel da Cachoeira: nível d’água – casos de malária



2c) Barcelos: precipitação – casos de malária



2d) Barcelos: nível d’água – casos de malária



os picos de casos de malária. Numa escala de variabilidade de 0,08-0,25 ano, para os anos de 2007 e 2008, notou-se coerências em fase.

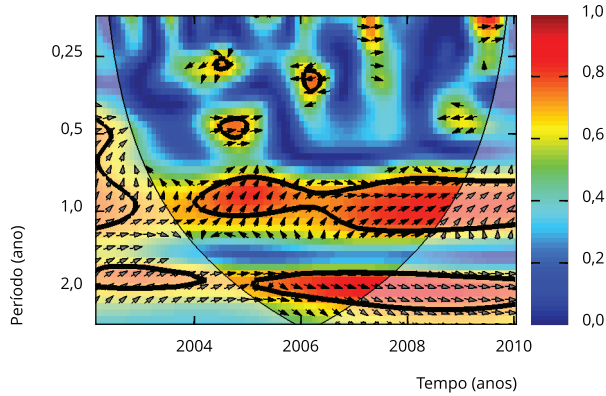
O Município de Canutama exibiu coerências praticamente em fase entre a precipitação e casos de malária de 2006 a 2009 na escala anual (Figura 4). Embora tenham sido apresentadas coerências em fase entre a precipitação e os casos de malária, notou-se relações inversas (fase oposta) quanto ao nível d’água e casos de malária no mesmo período em que a relação com a precipitação foi significativa (Figura 4).

Para o Município de Humaitá, a relação da precipitação com os casos de malária foi verificada apenas nas escalas de variabilidade entre 0,08-0,5 ano (1 a 6 meses) e em fase, de 2003 a 2007 (Figura 5). Para o ano de 2009, na escala de variabilidade de 0,08-0,16 ano (1 a 2 meses), observou-se coerência defasada em que o pico de casos de malária antecedeu 7 a 15 dias o pico de precipitação. Em relação às variáveis de nível d’água e casos de malária na escala anual, notou-se para praticamente toda a série coerências defasadas em que os picos de nível d’água antecederam 1 mês e meio o pico de casos de malária (Figura 5).

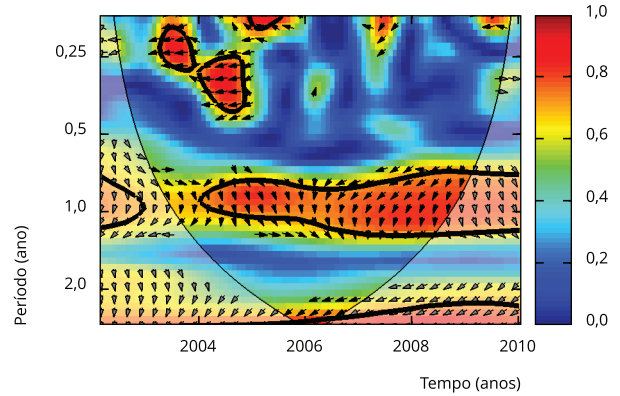
**Figura 3**

Coerência (hachuras do vermelho ao azul) e diferença de fase da ondeleta (em setas) entre as séries de “precipitação-casos de malária” e “nível d’água-casos de malária” para os municípios de Eirunepé e Carauari, Amazonas, Brasil, no período de 2003 a 2010.

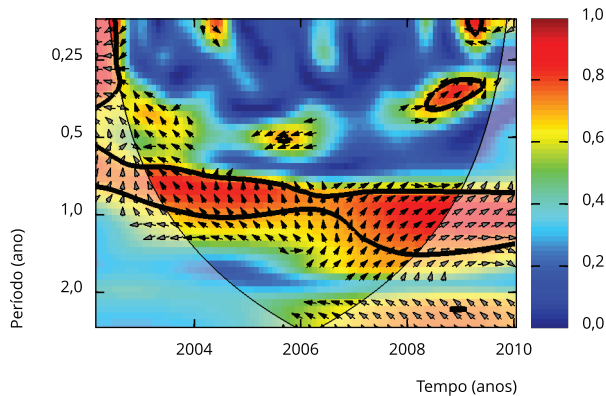
3a) Eirunepé: precipitação – casos de malária



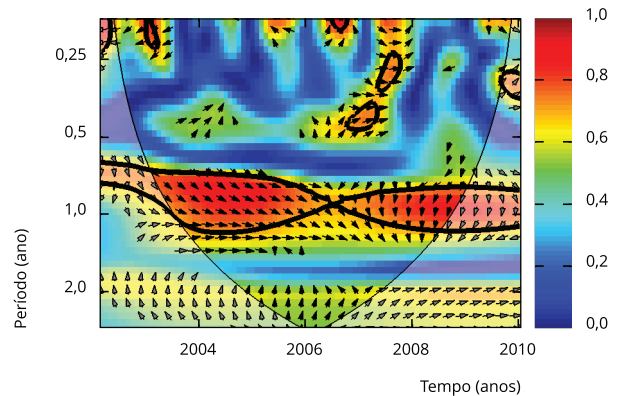
3b) Eirunepé: nível d’água – casos de malária



3c) Carauari: precipitação – casos de malária



3d) Carauari: nível d’água – casos de malária



Para o Município de Borba, na escala anual, observou-se coerências defasadas em que os picos de casos de malária antecederam 1 mês e meio os picos de precipitação para praticamente todo o período analisado (Figura 5). Em relação às variáveis de nível d’água e casos de malária na escala anual, coerências defasadas em que os picos de nível d’água antecederam em até 3 meses os picos de casos de malária foram significativamente fortes para toda a série (Figura 5).

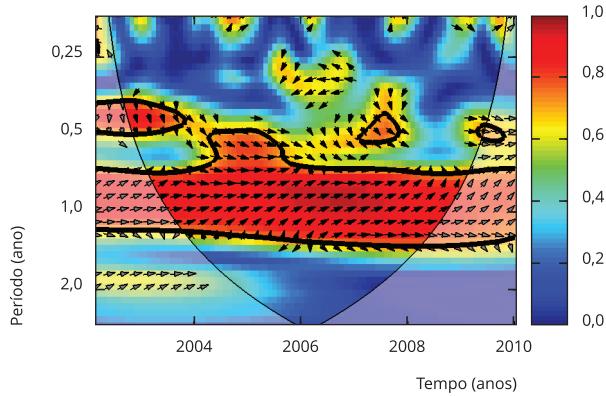
## Discussão

Na Amazônia, as condições de variabilidade da chuva, bem como a influência que exerce sobre o regime hidrológico, são frequentemente associadas à dinâmica de desenvolvimento vetorial e transmissão da doença. Embora essas relações estejam intimamente relacionadas, fatores relativos às condições climáticas, ambientais e de vigilância epidemiológica estabelecem cenários espaciais distintos para a malária.

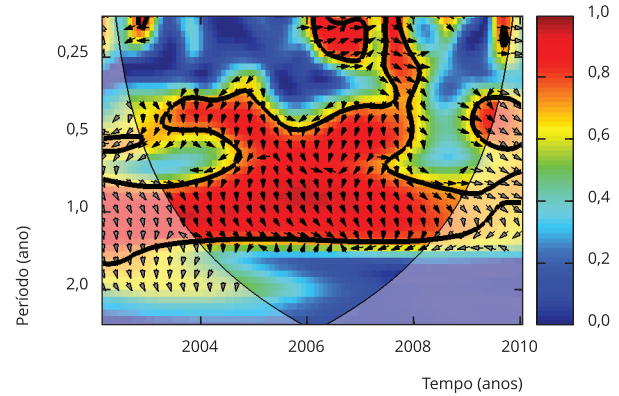
**Figura 4**

Coerência (hachuras do vermelho ao azul) e diferença de fase da ondeleta (em setas) entre as séries de “precipitação-casos de malária” e “nível d’água-casos de malária” para os municípios de Coari e Canutama, Amazonas, Brasil, no período de 2003 a 2010.

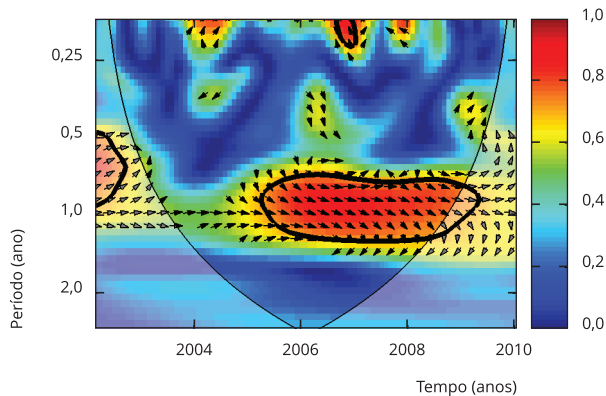
4a) Coari: precipitação – casos de malária



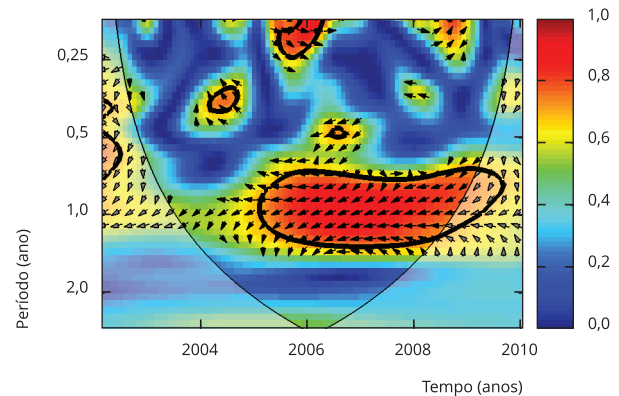
4b) Coari: nível d’água – casos de malária



4c) Canutama: precipitação – casos de malária



4d) Canutama: nível d’água – casos de malária



Evidenciou-se que a relação entre a precipitação e os casos de malária resultou entre coerências em fase, em que a frequência dos picos das variáveis ocorreu no mesmo tempo, e defasadas, em que os casos da doença mostraram-se em média 1 mês e meio antes ou depois dos picos de precipitação. De acordo com Gurgel <sup>6</sup>, picos de casos de malária que antecedem ou precedem os picos de precipitação caracterizam picos da doença ocorridos no início da estação chuvosa ou na época de estiagem. Essa variação está ligada à existência de nichos ecológicos que permitem o desenvolvimento e a reprodução do vetor durante esses períodos.

Em muitas partes da Amazônia, os picos de casos de malária ocorrem principalmente na época da estação seca, depois dos picos de chuvas <sup>6,25,26</sup>. Nos períodos pós-chuvas, as taxas de transmissão são frequentemente relatadas e é nesta época que o ambiente encontra-se mais propício à procriação do vetor <sup>27,28,29</sup>.

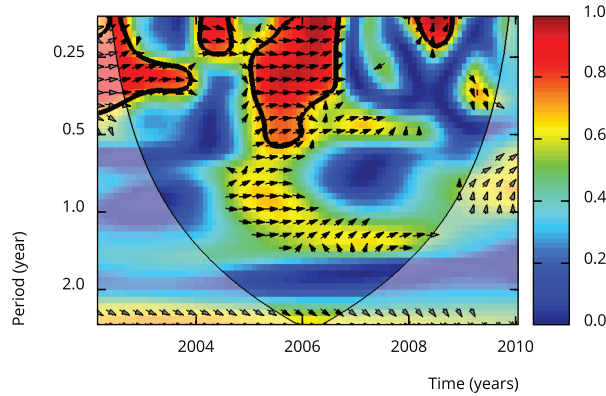
Os municípios que apresentaram picos na época da estação seca (2º semestre do ano) foram Coari e Canutama (pico médio dos anos no mês de agosto), São Gabriel da Cachoeira (pico médio dos anos em outubro) e Barcelos (pico médio dos anos no mês de dezembro). Em contrapartida, os municípios de Humaitá e Carauari (pico médio dos anos em abril), Borba e Eirunepé (pico médio dos anos no



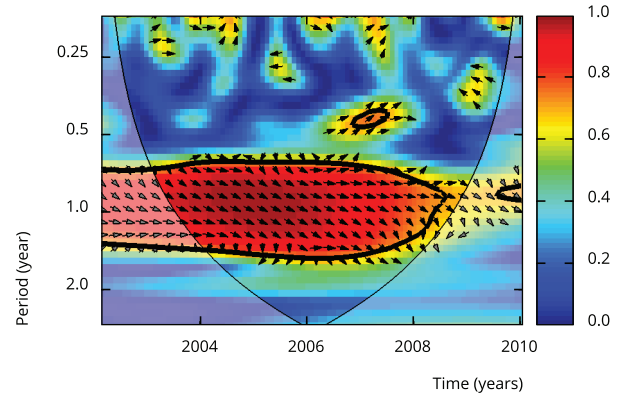
**Figura 5**

Coerência (hachuras do vermelho ao azul) e diferença de fase da ondeleta (em setas) entre as séries de “precipitação-casos de malária” e “nível d’água-casos de malária” para os municípios de Humaitá e Borba, Amazonas, Brasil, no período de 2003 a 2010.

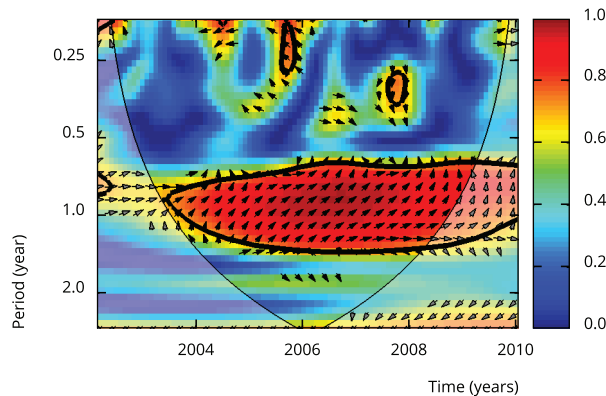
5a) Humaitá: rainfall – malaria cases



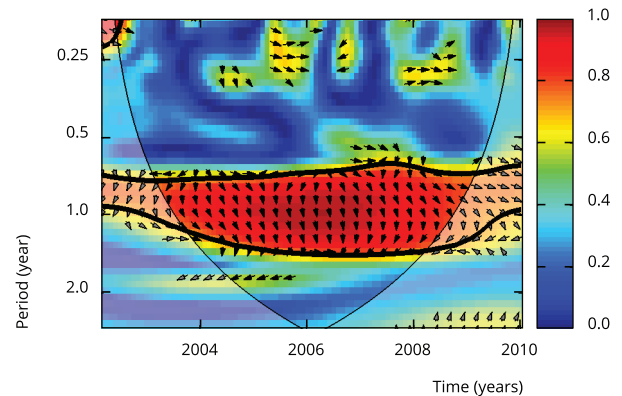
5b) Humaitá: water level – malaria cases



5c) Borba: rainfall – malaria cases



5d) Borba: water level – malaria cases



mês de maio) apresentaram picos de casos no 1º semestre do ano. Wolfarth-Couto et al. <sup>30</sup> explicam que os picos de casos de malária também podem ocorrer antes de agosto se levarmos em consideração regiões onde a precipitação e o regime hidrológico são antecipados de forma natural, portanto influenciando em distintos padrões de sazonalidade dos casos de malária.

Embora na literatura os maiores registros de casos de malária sejam notificados na estação seca, observa-se logo após o pico a diminuição do número de casos. Devido à baixa umidade relativa e ausência de criadouros temporários, ocasionadas pela baixa frequência da precipitação e temperaturas elevadas, as taxas vetoriais são diminuídas, o que consequentemente influencia na transmissão e casos da doença. Durante esse período os mosquitos se reproduzem em corpos d’água perenes, principalmente nas margens dos rios <sup>31</sup>, os quais desempenham papel de criadouro o ano todo, mesmo na estação seca.

As defasagens encontradas entre a precipitação e os casos de malária para os municípios analisados têm características semelhantes às encontradas por Grillet et al. <sup>32</sup>. Chuvas de menor intensidade desempenham um papel crítico na variação anual dos casos, influenciando de maneira positiva os picos da malária <sup>6,32,33</sup>.

Observações locais demonstram a existência de diferentes padrões sazonais de malária na Amazônia por ela não ser ambientalmente uniforme, dada a vasta diferença de topografia, padrões de drenagem, desenvolvimento econômico e social<sup>25,34</sup>. Apesar da importância da precipitação sobre a malária na Região Amazônica, e esta relação variar ao longo da bacia<sup>15,32</sup>, fatores de ordem biológica, geográfica, ecológica, social, cultural e econômica podem atuar sinergicamente na produção, distribuição e, sobretudo, no controle das doenças vetoriais<sup>35</sup>. De acordo com Barreto et al.<sup>36</sup>, fatores geográficos, econômicos e sociais facilitam a transmissão e limitam a aplicação de medidas de controle padrão.

A precipitação na Amazônia não apresenta comportamento uniforme de maneira espacial e temporal<sup>37</sup>. De maneira análoga, a malária também não é homogênea. Apesar dos resultados mostrarem relações entre as variáveis de precipitação e malária, coerências em fase e defasadas exprimem diferenças que podem estar relacionadas às características locais do ambiente, bem como refletirem a influência da atuação da vigilância epidemiológica em cada localidade.

Outro elemento fundamental que não pode ser desconsiderado é que na maioria das áreas endêmicas o *Plasmodium vivax* coabita com o *Plasmodium falciparum* e suas recorrências seguem um padrão temporal diferente<sup>38</sup>. Como o *P. vivax* é mais difícil de controlar e eliminar do que o *P. falciparum* por causa de sua tendência à recaída após a infecção primária<sup>38,39,40</sup>, possivelmente ocorra um reflexo nos casos totais de malária, bem como nas relações entre as variáveis, já que o número de casos por *P. vivax* (principal causador da malária na região) está mais associado às recaídas do que com determinantes ambientais.

A análise de coerência e fase de ondeletas revela que condições ambientais locais desempenham um papel importante no ciclo sazonal vetorial<sup>41</sup>. Coerente com os achados de Hurtado et al.<sup>42</sup>, a relação entre as variáveis indicaram um forte padrão anual, além de coerências significativas na escala de variabilidade menor que 1 ano e na escala bienal. De acordo com Chowell et al.<sup>43</sup>, um forte padrão anual pode ser seguido por ciclos bienais, no entanto, podem diferir de acordo com a região e com o tipo de malária. Como a precipitação atua como modulador da dinâmica vetorial, processos de variabilidade interanual da precipitação podem provocar efeitos nessa relação<sup>31,43,44</sup>.

A escala de oscilação bienal, evidenciada de maneira heterogênea entre os municípios, foi observada tanto na relação dos casos de malária com a precipitação (Barcelos e Eirunepé) como com o nível d'água (São Gabriel da Cachoeira). Poveda & Mesa<sup>45</sup> sugerem que a variabilidade bienal da precipitação está associada à interferência de ENOS (El Niño Oscilação Sul) com respostas na variabilidade hidrológica. Variabilidades interanuais das chuvas acarretam respostas nos rios da Bacia Amazônica diminuindo (aumentando) as descargas durante eventos El Niño/La Niña<sup>46</sup>.

Ferreira de Souza et al.<sup>41</sup> apontam que na escala bienal o ENOS é o principal fenômeno que modula a variabilidade climática sobre a Amazônia, refletida principalmente pelas anomalias da precipitação. Nos trópicos, o El Niño/La Niña modula fortemente as mudanças interanuais das variáveis ambientais predominantes. De acordo com Rasmusson et al.<sup>47</sup>, a oscilação bienal é um elemento fundamental da variabilidade de ENOS e evolui tipicamente ao longo do período de 2 anos.

Estudos sobre as influências climáticas nas doenças infecciosas enfocam principalmente a influência de ENOS na saúde pública para o controle da malária. O vetor da doença é suscetível a mudanças meteorológicas, pois afeta diretamente seu ciclo de vida<sup>10</sup>. Informações sobre o impacto potencial de fatores climáticos sobre a incidência da malária podem ser úteis para orientar os programas de prevenção da doença, visando à sua eventual eliminação<sup>42</sup>.

Com relação à escala de variabilidade menor que 1 ano, foi possível evidenciar associação entre as variáveis de casos de malária e nível d'água. Fenômenos hidrológicos nessa escala podem estar associados com o aumento do mosquito vetor da malária.

Coerentes com Wolfarth<sup>25</sup> e Xavier<sup>48</sup>, os dados de séries fluviométricas podem eventualmente apresentar variabilidades hidrológicas fora do comum. Conhecidos como repiquete, a variação do nível d'água dos rios, caracterizada como um fenômeno hidrológico atípico, apresenta oscilação fora do padrão de variabilidade anual, consistindo numa variação repentina do nível d'água (num período médio de 1 a 3 meses) até o estabelecimento do regime padrão. De acordo com Wolfarth<sup>25</sup>, as causas dos repiquetes ainda são desconhecidas, no entanto, este fenômeno possivelmente está associado aos processos de variabilidade climática com reflexos nos picos de casos de malária.

Coerências defasadas na escala de variabilidade anual em que os casos de malária ocorrem em média de 1 a 4 meses após os picos de nível d'água dos rios estão de acordo com Wolfarth-Couto<sup>30</sup>,

que descreve que os regimes hidrológicos distintos exibem importância sobre a variabilidade da sazonalidade dos casos de malária por intermédio do deslocamento de cheia dos rios.

Pesquisas revelam que assim como a precipitação, a variabilidade hidrológica estabelece determinada influência na flutuação da densidade vetorial<sup>16,49,50</sup>. A precipitação, além de propiciar habitats larvais, também é responsável pela elevação dos níveis dos rios que servem como criadouros permanentes.

Os resultados encontrados entre o nível d'água e casos de malária sugerem uma melhor descrição da dependência entre as variáveis neste estudo. De acordo com Stefani et al.<sup>14</sup>, a incidência da malária sofre um impacto relevante com a variação do nível d'água. Os rios amazônicos, bem como sua variabilidade hidrológica, estabelecem grande influência na flutuação da densidade vetorial<sup>16,27,50</sup>, expressando relações contínuas durante todo o ano.

A relação das variáveis com os casos de malária podem apresentar ou não relações significativas. Girod et al.<sup>21</sup> justificam a variação dessas relações de acordo com as características de paisagem de cada localidade. Além disso, as condições climáticas sobre determinada região são relevantes para o entendimento de dinâmicas distintas/similares da doença<sup>20</sup>.

Independentemente das associações significativas entre as variáveis, a relação doença/clima é complexa e indireta principalmente quando se usam dados de casos de malária e não de vetores (número de mosquitos anofelinos). Apesar dessa limitação, os casos de malária são ótimos indicadores da saúde e servem como medidores da vigilância epidemiológica da região, além de servirem como suporte de planejamento, ação e controle dos órgãos da saúde<sup>51</sup>. Grillet et al.<sup>32</sup> propõem que um melhor conhecimento dos padrões temporais da malária permitiria o desenvolvimento mais eficaz da vigilância e sistemas de alerta precoce, para prevenir o risco de doenças em resposta às variabilidades no clima.

Fatores ambientais não são os únicos elementos que determinam a transmissão da malária. Uma melhor compreensão de impactos nas mudanças climáticas, variação hidrológica, bem como dados ecológicos e estudos epidemiológicos ainda são necessários para avaliar o real risco local da malária<sup>26</sup>. Terrazas et al.<sup>50</sup> reforçam a importância de políticas socioeconômicas a serem implantadas em conjunto com ações estratégicas de proteção ambiental e vigilância epidemiológica da população no Estado do Amazonas.

É importante frisar que fatores não avaliados como casos de malária por espécie, temperatura local e ENOS têm respostas distintas em associação à malária e contribuem para conclusões mais robustas. Embora os fatores ambientais e climáticos denotem certa influência sobre a dinâmica da malária, questões de vigilância, prevenção e controle não devem ser desprezadas. Atuações governamentais de saúde podem atuar (ou não) de forma eficaz, mascarando possíveis relações com condições hidrológicas/climáticas.

A análise de coerência e fase de ondeletas tem se tornado uma ferramenta cada vez mais útil e significativa para a interpretação de fenômenos naturais em diferentes áreas de estudo<sup>32,41,42,43</sup>. Essa técnica constitui uma base matemática robusta que encoraja as atividades de pesquisas científicas que visam à análise de sinais físicos com variabilidades complexas. Desse modo, é possível determinar de forma simples e rápida a covariabilidade das variáveis e suas inter-relações<sup>52</sup>.

## Conclusão

As análises estatísticas mostram que os casos de malária estão associados fortemente com os fatores climáticos de precipitação e nível d'água dos rios. Em função disso, foram mostradas coerências significativas principalmente na escala de variabilidade anual, além de apresentar coerências em escalas menores que 1 ano e bienal. As análises mostram que picos de casos de malária são registrados aproximadamente 1 mês e meio antes ou depois dos picos de chuva, e em média 1-4 meses após o pico dos rios para grande parte dos municípios estudados.

Vale ressaltar que cada variável ambiental apresentou atuação local distinta no tempo e no espaço, sugerindo que outras variáveis locais (como a topografia) possam controlar as condições ambientais favorecendo uma atuação diferenciada em cada município, porém, quando as análises são feitas em conjunto é possível ver uma ordem não aleatória destas relações.

O estudo sugere que planos de ações e controles que contemplem a realidade ambiental e climática de cada localidade, somados às condições de defasagens dos regimes hidrológicos e pluviométricos, são elementos fundamentais para o monitoramento e auxílio no controle da doença, podendo auxiliar no processo de atenuação do fardo causado pela malária no Estado do Amazonas.

## Colaboradores

B. Wolfarth-Couto participou da concepção e delimitação do estudo, análise estatística, interpretação dos dados e redação do manuscrito. R. A. Silva participou da análise estatística e interpretação dos dados. N. Filizola participou da orientação do estudo, interpretação dos dados e revisão crítica do manuscrito.

## Informações adicionais

ORCID: Bruna Wolfarth-Couto (0000-0002-1445-7840); Rosimeire Araújo da Silva (0000-0001-5828-6193); Naziano Filizola (0000-0001-7285-7220).

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Nossos agradecimentos ao apoio recebido do Institut de Recherche pour le Développement (IRD; França); Maison de la Télédétection (Montpellier, França), Laboratório de Potamologia da Amazônia (LAPA), Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Universidade Estadual do Amazonas (UEA; em especial ao MSc. Igor Oliveira, pelo apoio técnico) e ao Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (PPG-CLIAMB/INPA).

## Referências

1. Tadei WP, Thatcher DB. Malaria vectors in the Brazilian Amazon: *Anopheles* of the subgenus *Nyssorhynchus*. *Rev Inst Med Trop São Paulo* 2000 42:87-94.
2. Tadei WP, Thatcher DB, Santos JMM, Scarpassa VM, Rodrigues IB, Rafael MS. Ecologic observations on anopheline vectors of malaria in the Brazilian Amazon. *Am J Trop Med Hyg* 1998; 59:325-35.
3. Secretaria de Vigilância em Saúde, Ministério da Saúde. Guia para gestão local do controle da malária: diagnóstico e tratamento. Brasília: Ministério da Saúde; 2008.
4. Ministério da Saúde. Relatório nacional de acompanhamento: combater o HIV/AIDS, a malária e outras doenças. Brasília: Ministério da Saúde; 2010.
5. Terrazas WCM. Desenvolvimento de SIG para análise epidemiológica da distribuição espacial da malária no município de Manaus: um enfoque em nível local [Dissertação de Mestrado]. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz; 2005.
6. Gurgel E. Paludisme et dynamiques environnementales dans l'état du Roraima au Brésil [Tese de Doutorado]. Paris: Université de Paris; 2006.
7. Barcellos C, Monteiro AMV, Corvalán C, Gurgel HC, Carvalho MS, Artaxo P, et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. *Epidemiol Serv Saúde* 2009; 18:285-308.
8. Alemu A, Abebe G, Tsegaye W, Golassa L. Climatic variables and malaria transmission dynamics in Jimma town, South West Ethiopia. *Parasit Vectors* 2011; 4:30.
9. Kovats RS, Bouma MJ, Hajat S, Worrall E, Haines A. El Niño and health. *Lancet* 2003; 362:1481-9.
10. Thomson MC, Mason SJ, Phindela T, Connor SJ. Use of rainfall and sea surface temperature monitoring for malaria early warning in Botswana. *Am J Trop Med Hyg* 2005; 7:214-21.
11. Patz JA, Campbell-Lendrum D, Holloway T, Foley JA. Impact of regional climate change on human health. *Nature* 2005; 438:310-7.
12. Hay SI, Guerra CA, Tatem AJ, Noor AM, Snow RW. The global distribution and population at risk of malaria: past, present, and future. *Lancet Infect Dis* 2004; 4:327-36.
13. Hiwat H, Bretas G. Ecology of *Anopheles darlingi* Root with respect to vector importance: a review. *Parasit Vectors* 2011; 4:177.

14. Stefani A, Hanf M, Nacher M, Girod R, Carme B. Environmental, entomological, socioeconomic and behavioural risk factors for malaria attacks in Amerindian children of Camopi, French Guiana. *Malar J* 2011; 10:246.
15. Olson SH, Gagnon R, Elguero E, Durieux L, Guégan J, Foley JA, et al. Links between climate, malaria, and wetlands in the Amazon Basin. *Emerg Infect Dis* 2009; 15:659-62.
16. Barros FSM, Honório NA. Man biting rate seasonal variation of malaria vectors in Roraima, Brazil. *Mem Inst Oswaldo Cruz* 2007; 102:299-302.
17. Ministério da Saúde. Ações de controle da malária: manual para profissionais de saúde na atenção básica. Brasília: Ministério da Saúde; 2006.
18. Confalonieri UEC. Saúde na Amazônia: um modelo conceitual para análise de paisagem e doenças. *Estud Av* 2005; 19:221-36.
19. Barata RCB. Malária no Brasil: panorama epidemiológico na última década. *Cad Saúde Pública* 1995; 11:128-36.
20. Zhou G, Minakawa N, Githeko AK, Yan G. Association between climate variability and malaria epidemics in the east African highlands. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2004; 101:2375-80.
21. Girod R, Roux E, Berger F, Stefani A, Gaborit P, Carinci R, et al. Unraveling relationships between *Anopheles darlingi* (Diptera: Culicidae) densities, environmental factors and malaria incidences: understanding variable patterns of transmission in French Guiana (South America). *Ann Trop Med Parasitol* 2011; 105:107-22.
22. Filizola N, Vicente AS, Santos AMC, Oliveira MA. Cheias e secas na Amazônia: breve abordagem de um contraste na maior bacia hidrográfica do globo. *T & C Amazônia* 2006; 9:42-9.
23. Torrence C, Compo GPA. Practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteorol Soc* 1998; 79:61-78.
24. Torrence C, Webster PJ. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *J Clim* 1999; 12:2679-90.
25. Wolfarth BR. Análise epidemiológica espacial, temporal e suas relações com as variáveis ambientais sobre a ocorrência da malária no período de 2003 a 2009 em 4 municípios do Estado do Amazonas, Brasil [Dissertação de Mestrado]. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia; 2011.
26. Wolfarth BR, Filizola N, Tadei WP, Durieux L. Epidemiological analysis of malaria and its relations with environmental variables in four municipalities of the State of Amazonas – Brazil. *Hydrol Sci J* 2013; 58:1495-504.
27. Magris M, Rubio-Palis Y, Menares C, Villegas L. Vector bionomics and malaria transmission in Upper Orinoco river, southern Venezuela. *Mem Inst Oswaldo Cruz* 2007; 103:303-11.
28. Vittor AY, Pan W, Gilman RH, Tielsch J, Glass G, Shields T, et al. Linking deforestation to malaria in the Amazon: characterization of the breeding habitat the principal malaria vector, *Anopheles darlingi*. *Am J Trop Med Hyg* 2009; 81:5-12.
29. Himeidan YE, Elzaki MM, Kweka EJ, Ibrahim M, Elhassan MI. Pattern of malaria transmission along the Rahad river basin, eastern Sudan. *Parasit Vectors* 2011; 4:109.
30. Wolfarth-Couto BR, Filizola N, Durieux L. Padrão sazonal dos casos de malária e a relação com a variabilidade hidrológica no Estado do Amazonas, Brasil. *Rev Bras Epidemiol*; submetido.
31. Confalonieri UEC. Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil. *Terra Livre* 2003; 1:193-204.
32. Grillet ME, Souki ME, Laguna F, León JR. The periodicity of *Plasmodium vivax* and *Plasmodium falciparum* in Venezuela. *Acta Trop* 2014; 129:52-60.
33. Aranha Camargo LM, Urbano M, Krieger H, Plessman E, Pereira L. Unstable hypoendemic malaria in Rondônia (Western Amazon region, Brazil): epidemic outbreaks and work-associated incidence in a agroindustrial rural settlement. *Am J Trop Med Hyg* 1994; 51:16-25.
34. Chaves SS, Rodrigues LC. An initial examination of the epidemiology of malaria in the state of Roraima, in the Brazilian Amazon Basin. *Rev Inst Med Trop São Paulo* 2000; 42:269-75.
35. Tauil PL. Controle de doenças transmitidas por vetores no Sistema Único de Saúde. *Inf Epidemiol SUS* 2002; 11:59-60.
36. Barreto ML, Gloria Teixeira M, Bastos FI, Ximenes RAA, Barata RB, Rodrigues LC. Successes and failures in the control of infectious diseases in Brazil: social and environmental context, policies, interventions, and research needs. *Lancet* 2011; 377:1877-89.
37. Espinoza Villar JC, Ronchail J, Guyot JL, Cochonneau G, Filizola N, Lavado W, et al. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *Int J Climatol* 2009; 29:1574-94.
38. White NJ. Determinants of relapse periodicity in *Plasmodium vivax* malaria. *Malar J* 2011; 10:297.
39. Tatem AJ, Smith DL, Gething PW, Kabaria CW, Snow RW, Hay SI. Ranking of elimination feasibility between malaria-endemic countries. *Lancet* 2010; 376:1579-91.
40. Battle KE, Karhunen MS, Bhatt S, Gething PW, Howes RE, Golding N, et al. Geographical variation in *Plasmodium vivax* relapse. *Malar J* 2014; 13:144.
41. Ferreira de Souza RA, Andreoli RV, Kayano MT, Carvalho A. American cutaneous leishmaniasis cases in the Metropolitan Region of Manaus, Brazil: association with climate variables over time. *Geospat Health* 2015; 10:40-7.
42. Hurtado LA, Calzada JE, Rigg CA, Castillo M, Chaves LF. Climatic fluctuations and malaria transmission dynamics, prior to elimination, in Guna Yala, República de Panamá. *Malar J* 2018; 17:85.
43. Chowell G, Munayco CV, Escalante AA, Mckenzie E. The spatial and temporal patterns of falciparum and vivax malaria in Perú: 1994-2006. *Malar J* 2009; 8:142.

44. Pascual M, Cazelles B, Bouma MJ, Chaves LF, Koelle K. Shifting patterns: malaria dynamics and rainfall variability in an African highland. *Proc Biol Sci* 2008; 275:123-32.
45. Poveda G, Mesa OJ. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *J Clim* 1997; 10:2690-702.
46. Ronchail J, Labat D, Calède J, Coconneau G, Guyot JL, Filizola N, et al. Discharge variability within the Amazon basin. In: Francks S, Wagener T, Bogh E, Gupta HV, Bastidas L, Nobre C, et al., editors. Regional hydrological impacts of climatic change: hydroclimatic variability: proceedings of symposium S6 held during the seventh IAHS scientific assembly. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences; 2005. p. 21-9. (IAHS Publication, 296).
47. Rasmusson EM, Wang X, Ropelwski CF. The biennial component of ENSO variability. *J Mar Syst* 1990; 1:71-96.
48. Xavier SDR. Variabilidade climática, vulnerabilidade ambiental e saúde: os níveis do rio Negro e as doenças relacionadas à água em Manaus [Dissertação de Mestrado]. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz; 2014.
49. Sogoba N, Doumbia S, Vounatsou P, Baber I, Keita M, Maiga M, et al. Monitoring of larval habitats and mosquito densities in the Sudan Savanna of Mali: implications for malaria vector control. *Am J Trop Med Hyg* 2007; 77: 82-8.
50. Terrazas WCM, Sampaio VS, Castro DB, Pinto RC, Albuquerque BC, Sadahiro M, et al. Deforestation, drainage network, indigenous status, and geographical differences of malaria in the State of Amazonas. *Malar J* 2015; 14:379.
51. Wieffels A, Wolfarth-Couto B, Filizola N, Durieux L, Mangeas M. Accuracy of the malaria epidemiological surveillance system data in the state of Amazonas. *Acta Amaz* 2016; 46:383-90.
52. Holdefer AE, Severo DL. Análise por ondaletas sobre níveis de rios submetidos à influência de maré. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2015; 20:192-201.

## Abstract

*Understanding the relations between rainfall and river water levels and malaria cases can provide important clues on modulation of the disease in the context of local climatic variability. In order to demonstrate how these relations can vary in the same endemic space, a coherence and wavelet phase analysis was performed between environmental and epidemiological variables from 2003 to 2010 for 8 municipalities (counties) in the state of Amazonas, Brazil (Barcelos, Borba, Canutama, Carauari, Coari, Eirunepé, Humaitá, and São Gabriel da Cachoeira). The results suggest significant coherences, mainly on the scale of annual variability, but scales of less than 1 year and of 2 years were also found. The analyses show that malaria cases display a peak at approximately 1 and a half months before or after peak rainfall and on average 1-4 months after peak river water levels in most of the municipalities studied. Each environmental variable displayed distinct local behavior in time and in space, suggesting that other local variables (e.g. topography) may control environmental conditions, favoring different patterns in each municipality. However, when the analyses were performed jointly it was possible to show a non-random order in these relations. Although environmental and climatic factors indicate a certain influence on malaria dynamics, surveillance, prevention, and control issues should not be overlooked, meaning that government public health interventions can mask possible relations with local hydrological and climatic conditions.*

*Malaria; Atmospheric Precipitation; Hydrology*

## Resumen

*La comprensión de las relaciones entre las variables de precipitaciones y el nivel de agua de los ríos con los casos de malaria pueden proporcionar indicios importantes sobre la modulación de la enfermedad en el contexto de la variabilidad climática local. Con el fin de demostrar cómo varían esas relaciones en el mismo espacio endémico, se realizó un análisis de coherencia y fase de ondas entre las variables ambientales y epidemiológicas, durante el periodo de 2003 a 2010, en 8 municipios del estado de Amazonas (Barcelos, Borba, Canutama, Carauari, Coari, Eirunepé, Humaitá y São Gabriel da Cachoeira). Los resultados indican coherencias significativas, principalmente en la escala de variabilidad anual, sin embargo, también se detectaron escalas menores de 1 año y bienal. Los análisis muestran que los casos de malaria presentan un pico con aproximadamente 1 mes y medio antes o después de la pluviosidad más alta, y de media 1-4 meses tras el pico de los ríos para gran parte de los municipios estudiados. Se observó que cada variable ambiental presentó una actuación local distinta en el tiempo y en el espacio, sugiriendo que otras variables locales (la topografía es un ejemplo) puedan controlar las condiciones ambientales, favoreciendo una actuación diferenciada en cada municipio, no obstante, cuando los análisis se realizan en conjunto es posible ver un orden no aleatorio de estas relaciones para que se produzcan. A pesar de que los factores ambientales y climáticos denoten una cierta influencia sobre la dinámica de la malaria, cuestiones de vigilancia, prevención y control no se deben despreciar, lo que significa que las actuaciones gubernamentales de salud pueden enmascarar posibles relaciones con las condiciones hidrológicas y climáticas locales.*

*Malaria; Precipitación Atmosférica; Hidrología*

---

Recebido em 01/Fev/2018

Versão final reapresentada em 04/Jul/2018

Aprovado em 05/Set/2018