

## MAPEO DE LA CONTAMINACIÓN POR NITRATOS (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) EN AGUAS SUBTERRÁNEAS URBANAS DE LA AMAZONÍA

*Fecha de aceptación: 02/09/2024*

### **Carlos Alberto Paraguassú-Chaves**

Doctor en Ciencias de la Salud - Universidad de Brasilia - UnB, Brasil; Doctor en Ciencias por la Universidad de La Habana (Cuba); Posdoctorado en Ciencias de la Salud - UnB y Universidad Degli Studi D'Aquila - IT. Profesor Titular en el Instituto Universitario de Río de Janeiro - IURJ, Brasil

### **Charles da Silva Barata**

Maestría en Geografía – Universidad Federal de Rondônia. Investigadora del Instituto Superior de Ciencias de la Salud y del Medio Ambiente de la Amazonía – AICSA

### **Leonardo Severo da Luz Neto**

Doctor en Educación con Postdoctorado en Psicología Pastoral, Profesor de la Universidad Federal de Rondônia, Brasil

### **Antonio Carlos Duarte Ricciotti**

Doctorado en Ingeniería Eléctrica (UFSM). Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica– Profesor de la Universidad Federal de Rondônia, Brasil

### **Dalza Gomes da Silva**

Profesor e investigador con doctorado en fitopatología por la Fundación Universidad Federal de Rondônia, Campus Rolim de Moura, Departamento de Agronomía. Brasil

### **Fabrício Moraes de Almeida**

Doctor en Física (UFC), con posdoctorado en Desarrollo Científico Regional (DCR/ CNPq). Investigadora del Programa de Doctorado y Maestría en Desarrollo Regional y Medio Ambiente (PGDRA/ UNIR). Líder de la línea 2 - Desarrollo Tecnológico y Sistémico, e Investigador de GEITEC – Universidad Federal de Rondônia, Brasil

**RESUMEN:** La investigación tuvo como objetivo mapear y analizar la contaminación por nitratos en aguas subterráneas urbanas de 3 (tres) ciudades ubicadas en la Amazonía Occidental, en la región fronteriza entre Brasil y la República de Bolivia. La evaluación de la superficie freática se realizó en agua de pozos o pozos amazónicos con una profundidad promedio de 10 metros. Método: Se recolectaron 80, 40 y 120 muestras de agua, respectivamente y proporcionales al área urbana y a la población, definidas y evaluadas para la existencia de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en proporción por encima o por debajo de los valores definidos por la Ordenanza del Ministerio de Salud n.º 2.914/2011, que rige las normas de normalización y potabilidad del agua en

Brasil. Las muestras de agua se recolectaron de acuerdo con los Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales junto con la metodología propuesta en la Guía para la Recolección y Conservación de Muestras de Agua de la Empresa de Tecnología de Saneamiento Ambiental – CETESB. Las ubicaciones fueron georreferenciadas utilizando el Sistema Global de Posicionamiento (GPS). Para medir el nitrato se utilizó el método de espectrofotometría, utilizando un espectrofotómetro Micronal B495. Los reactivos químicos utilizados fueron fabricados por Alfatecoquímica y se pusieron a disposición en dos viales llamados reactivos 1 y 2 (reactivo de nitrato). Resultados: El setenta y tres por ciento (73%) de las muestras presentaron niveles de nitrato superiores a 10 mg/L, lo que hace que el agua no sea apta para el consumo humano. Conclusiones: Este estudio indicó que la fuente de contaminación se origina a partir del resultado de actividades antropogénicas, evidenciadas por la ineficiencia del sistema de alcantarillado sanitario, uno de los ejes del saneamiento básico en el que, específicamente, se aborda la recolección, tratamiento y disposición adecuada de las aguas residuales sanitarias y otras prácticas de higiene sanitaria. Es necesario insertar con urgencia políticas públicas en el sector de saneamiento básico en las ciudades amazónicas.

**PALABRAS CLAVE:** Mapeo. Pozos poco profundos. Contaminación. Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Kriging indicativo.

## INTRODUCCIÓN

Brasil es considerado un país donde los recursos hídricos son abundantes. Aproximadamente el 12% del agua dulce del planeta se concentra en el territorio brasileño, más concretamente en la región norte de Brasil, donde reside alrededor del 7% de su población. Es la región con menor densidad demográfica del país, 0,4 habitantes/km<sup>2</sup>, datos que la convertirían en una región con excelentes indicadores de calidad de vida para sus habitantes en cuanto a recursos hídricos, sin embargo, factores como la baja oferta en la prestación de servicios de saneamiento básico, la ubican en el ranking de la peor región brasileña en este indicador.

Como lo mencionan varios autores, en zonas urbanas y centros rurales, la calidad del agua es cuestionable [1]; [2]; [3]; [4]. El consumo de agua en la región norte de Brasil ocurre sin mayores preocupaciones y este hecho evidencia tanto la falta de efectividad en el tratamiento del agua por parte de las autoridades públicas como la desinformación de la población que la consume sin más cuestionamientos. En la Amazonía occidental, el agua subterránea representa un recurso importante en el suministro humano. De acuerdo con Campos [5], el agua subterránea, al ser una alternativa de bajo costo, es accesible para todos, especialmente para la población de bajos ingresos, tanto en la complementación diaria como en la reposición total del agua suministrada por servicios públicos y privados.

La Ordenanza N° 2.914 del Ministerio de Salud de Brasil establece que el agua para consumo humano es el agua potable destinada a la ingestión, preparación de alimentos e higiene personal, independientemente de su origen, y el agua tratada es el agua sometida a

procesos físicos, químicos o una combinación de estos procesos, con el propósito de cumplir con el estándar de potabilidad [6]. El estándar de potabilidad se define como el conjunto de valores permitidos como parámetro para la calidad del agua destinada al consumo humano. El Sistema Legislativo Sanitario se refiere a las características físicas, organolépticas y químicas del agua; sus valores máximos admisibles (VPM) y las características de calidad microbiológica y radiactiva. Además de esta relación, los tiempos mínimos de contacto que deben observarse para la desinfección por cloración, en función de la temperatura y el pH del agua; y el número mínimo de muestras y la frecuencia para el control de la calidad del agua en los sistemas de abastecimiento, para diversos fines [7].

De acuerdo con la Ordenanza n.º 2.914/2011 del Ministerio de Salud de Brasil [6] y la Organización Mundial de la Salud, que establece los procedimientos de control y vigilancia de la calidad del agua de consumo humano y su estándar de potabilidad, la concentración de Nitrógeno (N) en forma de Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es superior a 10 mg/L, no es apto para el consumo humano. La legislación brasileña es categórica: “el agua que contiene concentraciones superiores a 10 mg/L de nitrógeno (N) en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no es apta para el consumo humano”. Las concentraciones superiores a 3 mg/L de nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) son indicativas de contaminación debida a actividades antropogénicas, así como indicadores de contaminación bacteriana y de fertilizantes. Una alerta de seguridad para la salud de las personas que se ven sometidas a una situación de este tipo.

Según Campos y Rohlfs [8], el nitrito y el nitrato se encuentran de forma natural en el agua y el suelo en bajas concentraciones. La deposición de material orgánico en el suelo aumenta drásticamente la cantidad de nitrógeno. Este nitrógeno se transforma bioquímicamente y finalmente se transforma en nitrato, que tiene una gran movilidad en el suelo, llegando a la fuente subterránea y depositándose allí. Melo Junior et al [9] señalan que la contaminación de las aguas subterráneas urbanas por nitratos es el resultado de la ineficiencia de los servicios básicos de saneamiento y la falta de alcantarillado sanitario en el área urbana. La ineficiencia de estos servicios obliga a la población local a construir fosas negras y sépticas para la deposición de efluentes en las cercanías de sus tierras, lo que en la práctica, este proceso se traduce en la contaminación de las aguas subterráneas.

Según Barbosa [10], el nitrato se encuentra de forma natural en las aguas subterráneas, pero su presencia en altas concentraciones es el resultado de las actividades humanas, principalmente el uso de sistemas de saneamiento in situ, las sustancias nitrogenadas de los residuos orgánicos se oxidan por reacciones químicas y biológicas y el resultado es la presencia de nitrato en el suelo. El nitrato es extremadamente soluble en agua y puede moverse fácilmente y contaminar el acuífero a largas distancias, debido a su persistencia y movilidad. Se observa el poder contaminante presente en este agente químico, una vez presente en el suelo o directamente en el agua, es muy fácil contaminar las aguas subterráneas. Para este autor, el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es un ion incoloro, neutro, fuerte, oxidante y soluble en agua, correspondiente a la relación de estabilización biológica final de la materia orgánica nitrogenada.

Para Foster; Ventura; Hirata [11] el nitrato es el contaminante más común que se encuentra en las aguas subterráneas y su concentración rara vez supera los 5 mg/L en el agua no contaminada, y las concentraciones superiores a 10 mg/L representan una fuerte indicación de contaminación en el agua. Además del uso de fertilizantes agrícolas y ganaderos, los sistemas de saneamiento in situ, ya sea mediante fosas sépticas o tanques rudimentarios, constituyen otra fuente importante de nitratos en las aguas subterráneas. Debido a la peligrosidad de este agente químico, la falta de planificación en la construcción de cada sistema de saneamiento individual (pozo x pozo negro) permite el contacto de los efluentes del pozo negro con el agua del pozo. Las fuentes de agua potable que contienen altas concentraciones de nitrato representan un gran riesgo para la salud pública y animal [12]. El agua utilizada para el abastecimiento, contaminada con nitratos, ha causado problemas, tanto para los animales como para los seres humanos. Los niños menores de tres meses son más sensibles que los adultos, ya que consumen más agua, en comparación con su peso corporal; y porque el pH de su estómago es favorable para el desarrollo de bacterias que reducen el nitrato a nitrito, lo que normalmente no ocurre en los adultos.

En varios estudios de Paraguassú-Chaves et al [13]; [14] ya han señalado una alerta de seguridad para la salud de las personas que se ven sometidas a tal situación en la gran mayoría de las ciudades de la Amazonía, dotadas de servicios de saneamiento y alcantarillado precarios o prácticamente inexistentes. Que el universo de la población de estas ciudades consume agua con concentraciones superiores a 3 mg/L de nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), lo que en sí mismo ya es indicativo de contaminación por actividades antropogénicas, también indicadores de contaminación bacteriana y de fertilizantes.

Lima [15] ya había considerado que, si hay presencia de nitrato en las aguas, incluso en bajas concentraciones, además de indicar que la contaminación es antigua en el ambiente, revela la presencia de materia orgánica asociada a bacterias, virus y parásitos, viva o en alguna de las etapas de descomposición. Estos agentes son la causa de varias enfermedades, especialmente la diarrea aguda y, en forma de nitrato, son un indicador cancerígeno. Se señalan como principales condicionantes como fuentes de contaminación la acción antrópica y multipuntual del sistema de saneamiento in situ, como las fosas sépticas y las fosas negras, la exposición y precariedad de los pozos, la exposición de residuos sólidos, y el vertido de aguas residuales de todo tipo. Así, la contaminación por nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) se produce en zonas urbanas de la región amazónica y en la frontera con Bolivia [16]. Aunado a todas estas condiciones, las inundaciones de los abundantes cursos de agua de la región son decisivas para agravar la contaminación de las aguas subterráneas. La población está consumiendo agua con un alto grado de contaminación por nitratos. Se le alerta sobre un problema de salud pública [17].

Paraguassu-Chaves et al [13] destacan varios problemas de salud asociados a niveles atípicos de nitratos y nitritos, que pueden promover enfermedades como la cianosis infantil y, posiblemente, diferentes tipos de cáncer. La deficiencia en el saneamiento básico

puede acarrear problemas de salud pública, ya que la contaminación del agua puede generar enfermedades como: disentería basilar, dengue, fiebre amarilla, leptospirosis, hepatitis A, entre otras. La falta de saneamiento básico en el municipio se agrava aún más debido a que la gran mayoría de los hogares del municipio se abastecen de pozos o manantiales sin la debida preocupación ambiental. Por lo tanto, la cultura local de utilizar básicamente pozos abiertos en sus propiedades para el consumo humano es algo extremadamente peligroso que requiere estudios más profundos como la evaluación de los impactos socioambientales resultantes de esta práctica en la salud humana [17].

Otra implicación derivada de la falta de saneamiento se refiere a los daños ambientales, como inundaciones, sedimentación de los cursos de agua (por la deforestación y la ocupación de las riberas), desaparición de áreas verdes, colapso de taludes, compromiso de cursos de agua que se convierten en vertederos de basura y canales de alcantarillado [17]. Para Alaburda y Nishihara [18], prácticamente todas las actividades humanas presentan algún riesgo de contaminación ambiental y a menudo se convierten en fuentes de contaminación de las aguas subterráneas. Entre las sustancias que pueden constituir un riesgo para la salud humana, se incluyen los compuestos nitrogenados en sus diferentes estados de oxidación: nitrógeno amoniacal y albuminoide, nitrito y nitrato.

El uso de aguas subterráneas en Brasil ha aumentado como resultado de la concentración demográfica y la expansión económica, debido a sus ventajas cualitativas y cuantitativas sobre las aguas superficiales. La lógica de esta demanda influyó directamente en su calidad y, consecuentemente, en la salud de las poblaciones, ya que estos manantiales se encuentran degradados, según estudios realizados por Hirata y Cagnon [19]. La ineficacia de estos servicios obliga a la población local a construir tanques negros y sépticos para la disposición de efluentes en las cercanías de sus tierras, lo que, en la práctica, contamina las aguas subterráneas. Los pozos y pozos negros cercanos tienen consecuencias drásticas e influyen negativamente en la calidad de vida de la población. Para Lima [15], la calidad del abastecimiento de agua, ya sea pública o privada, puede verse comprometida por la falta de alcantarillado sanitario en las zonas urbanas, donde están presentes diferentes sustancias, ya sean de origen natural o antropogénico. Según Finotti et al [20], las reservas brasileñas de agua subterránea ya están seriamente comprometidas. A través de estudios realizados en todas las partes de Brasil, se puede percibir el importante grado de contaminación encontrado en las aguas subterráneas, ya sean de origen urbano, industrial o agrícola.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo mapear y analizar la pluma de contaminación de aguas subterráneas (acuífero libre), potencialmente impactadas por nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), en 3 ciudades de la Amazonía Occidental, bajo el prisma de la geoestadística utilizando el método de Kriging Indicativo.

## MÉTODO

### Procedimientos metodológicos

En el primer estudio se registraron 80, en el segundo 40 y en el tercero 120 pozos someros para las muestras. El acuífero de agua subterránea fue delimitado para los estudios y se recolectaron muestras de agua en áreas urbanas, en pozos y se definió y evaluó la existencia de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en una proporción superior o inferior a los valores definidos por la Ordenanza del Ministerio de Salud n.º 2.914/2011, que rige los estándares de estandarización y potabilidad del agua en Brasil.

Los resultados se espacializaron en forma de Mapas utilizando Geoestadística, a través del software “ArcGIS for Desktop Advanced 10.2” [21], para que, posteriormente, puedan servir de base para el desarrollo de políticas públicas en la prevención de la contaminación de aguas subterráneas en ciudades amazónicas.

### Procedimientos de campo y laboratorio

Se utilizaron dos métodos para registrar los pozos. El primero según la Guía Nacional de Recolección y Conservación de Muestras: agua, sedimentos, comunidades acuáticas y efluentes de agua líquida de la Empresa Tecnológica de Saneamiento Ambiental - CETESB [22] y la Agencia Nacional del Agua - ANA [24]. El segundo método fue el Aleatorio Estratificado, según Yamamoto y Landim [25] para que un cierto número de observaciones, es decir, muestras, puedan estimar el comportamiento del conjunto de todas las observaciones potenciales de la población, es necesario que estos subconjuntos se recojan de tal manera que cada observación tenga las mismas posibilidades de ser elegida (17).

### Recolección y conservación de muestras de agua

El agua se recogía a la salida del pozo, utilizando las bombas eléctricas del lugar. El agua extraída en los primeros tres minutos se desecha para eliminar el agua estancada. A continuación, las muestras de agua se envasaron en botellas plásticas de 500 ml, se esterilizaron y se identificaron adecuadamente mediante Pozo de Muestreo (PA), se numeraron según la secuencia de colectas, en orden ascendente, y se conservaron aproximadamente a 4°C en una caja de espuma de poliestireno con hielo para mantener las características originales de las aguas.

A través de los Formularios Individuales de Muestreo de Agua, elaborados y puestos a disposición de acuerdo con las instrucciones contenidas en la Guía CETESB, se recogieron los datos de los pozos, así como el lugar de recolección, fecha y hora, profundidad, precipitaciones en las últimas 24 horas, condiciones higiénicas del pozo, pozos negros, animales y aguas residuales en las inmediaciones. En cada punto de captación de agua se georreferenciaron las coordenadas UTM, utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Las botellas con muestras de agua fueron transportadas al Laboratorio Especializado de una Institución de Educación Superior y a un Laboratorio Especializado Privado, donde se determinaron los contenidos de nitratos.

## Constituyentes iónicos

Las muestras de agua se filtraron previamente en filtros de acetato de celulosa de 0,22,00  $\mu\text{m}$  de porosidad y 13 mm de diámetro (Sartorius Biolab Products) y se analizaron por cromatografía iónica con detector de conductividad (Cromatógrafo iónico con detector de conductividad iónica, METROHM – 882 Compact IC plus). La calibración del equipo se realizó mediante una curva de calibración con patrones específicos, y las concentraciones de iones presentes se calcularon por comparación con patrones externos.

Las columnas analíticas utilizadas fueron: Metrosep A Supp. 5 – 150/4.0 y Metrosep C 4 –150/4.0 (METROHM), con un volumen de inyección fijo de 100  $\mu\text{L}$  y un caudal mantenido siempre en 0,7 mL  $\text{min}^{-1}$ . Los patrones de aniones y cationes se introdujeron por separado con una jeringa hipodérmica desechable de 5 ml en el sistema de inyección por cromatógrafo iónico.

Determinación del contenido de Nitratos con el uso de equipos puestos a disposición por los Laboratorios, mediante la técnica de Cromatografía Iónica con Detector de Conductividad.

## Distribución espacial del muestreo

A través de muestreo aleatorio, estratificado en el área urbana, se seleccionaron 80, 40 y 120 pozos, respectivamente, los cuales son aprovechados de manera continua en el abastecimiento local.

## Mapeo de contaminación

Uno de los métodos más eficientes para caracterizar el penacho de contaminación en el acuífero libre del área urbana, adoptado en esta investigación, fue el método geoestadístico de kriging, que permitió identificar dos áreas anómalas de ocurrencia de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

## El método geoestadístico de Kriging

De acuerdo con Isaak y Srivastava [26], el kriging se denomina un estimador espacial de variables regionalizadas, basado en valores adyacentes, mientras que se considera independiente en el análisis variográfico. A través de ella, es posible obtener: a) La predicción del valor puntual de una variable regionalizada y en una ubicación específica

dentro del espacio geométrico, es un procedimiento de interpolación exacto que tiene en cuenta todos los valores observados. b) El cálculo promedio de una variable regionalizada para un volumen mayor que el soporte geométrico y la estimación de la tendencia principal (*drift*), de manera similar a la superficie de la tendencia.

Kriging proporciona, en general, estimaciones no sesgadas con una variación mínima, reuniendo varios tipos de métodos de estimación, tales como: simple, ordinario, universal, indicativo, disyuntivo y kriging [27].

## Kriging ordinario

El Kriging ordinario es una técnica de estimación lineal para una variable regionalizada, que satisface la hipótesis intrínseca, cuyo objetivo es minimizar el error de estimación sin sesgo, es decir, en el que el error residual medio es igual a cero [28].

Según Landim [29], las formas más comunes de kriging lineal son: simple, ordinario, universal e intrínseco. El kriging no lineal utiliza alguna transformación no lineal de los datos originales y son: lognormal, multigaussiano, indicativo, probabilístico y disyuntivo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La recolección de muestras de agua subterránea se llevó a cabo en dos etapas. La primera etapa de muestreo aleatorio, estratificada en el área urbana durante la estación lluviosa amazónica y la segunda durante la estación seca (período en que no llueve).

De acuerdo con la tabla 1, se detectaron altos niveles de nitrato de N ( $\text{NO}_3^-$ ) en el 100% de las muestras. Se  $>$  que se detectaron 10 mg/L en el 100% de los pozos y puntos de recolección.

Todos los vecindarios tienen sus aguas subterráneas con un alto grado de contaminación por nitrato N ( $\text{NO}_3^-$ ), es decir, agua no apta para el consumo humano.

En el vecindario codificado como X1, los niveles de nitrato de N ( $\text{NO}_3^-$ ) son extremos. Los siete (7) puntos de muestreo oscilan entre 42.298 mg/L como valor más alto y 12.123 mg/L como valor más bajo, con un promedio de  $>$  a 27 mg/L. Los PA (puntos de muestreo) 1, 2, 3, 4 y 5 tienen respectivamente los niveles de 42.298 mg/L, 41.335 mg/L, 35.145 mg/L, 24.011 mg/L y 23.086 mg/L. Los niveles más bajos se encontraron en PA5, 16.441 mg/L y Pa7 12.123 mg/L.

En el vecindario codificado como X2, los niveles de nitrato de N ( $\text{NO}_3^-$ ) se presentan como de alto riesgo para la salud humana. El 100% tiene niveles superiores a 10 mg/L, con un promedio de  $>$  19 mg/L. En una situación extrema son la PA14 con 26,067 mg/L y la PA10 con 25,899 mg/L. Los PA (puntos de muestreo), los niveles de nitrato de N ( $\text{NO}_3^-$ ) son respectivamente 25,899 mg/l, 19,300 mg/l, 19,766 mg/l, 18,555 mg/l, 26.067 mg/l, 12.445 mg/l y 16.600 mg/l.

De las muestras colectadas en el barrio X3, 45.779 mg/L se encontraron en PA8 y 36.065 mg/L de nitrato en PA9, con un promedio de 40 mg/L en la vecindad de > de 40 mg/L. En el vecindario X4, el promedio se encontró > de 22 mg/L. Mientras que en el vecindario X5 los niveles promedio encontrados fueron > de 11 mg/L.

De acuerdo con la tabla 2, las muestras detectadas presentan altos niveles de nitrato N (NO<sub>3</sub>-), por encima de 10 mg/L, característicos de aguas con un alto grado de contaminación.

En el vecindario Y1, se detectó que el 100% de las muestras tenían niveles altos de nitrato de N (NO<sub>3</sub>-), por encima de 10 mg/L, con un promedio de > de 21 mg/L. Se encontró que los PA 21, 22, 23, 24 y 25 respectivamente tenían niveles de 28,466 mg/L, 22,079 mg/L, 23,780 mg/L, 20,332 mg/L y 15,198 mg/L de nitrato.

En el vecindario Y2, el 60% de las muestras tienen niveles superiores a 10 mg/L de nitrato. El promedio encontrado fue de > 12 mg/L. Sin embargo, se encontraron marcadas diferencias, como PA 31, 19.665 mg/L y PA 34, con 2.166 mg/L de nitrato.

En el vecindario Y3, a diferencia de los demás vecindarios de la ciudad, solo el 20% de las muestras tienen niveles > 10 mg/L. Los demás, el 80% de las muestras tienen niveles inferiores a 10 mg/L de nitrato.

En el vecindario Y4, el 80% de las muestras tenían niveles de nitrato de N (NO<sub>3</sub>-) superiores a 10 mg/L. Los niveles medios de nitrato de N (NO<sub>3</sub>-) encontrados fueron de > de 11 mg/L.

En el primer análisis, se puede afirmar que el agua subterránea utilizada por la población para consumo humano y otros servicios públicos se ve afectada por altos niveles de nitrato de N (NO<sub>3</sub>-). El 73% de las muestras presentan niveles > 10 mg/L de nitrato. Estos lugares son áreas urbanas de alto riesgo ambiental para la salud humana, un problema de salud pública. Solo el 17% tiene niveles < 10 mg/L de nitrato. Solo el 7,5% de las muestras tienen menos de 3 mg/L de nitrato.

La alta concentración de nitratos en las aguas subterráneas urbanas de las ciudades de la Amazonía brasileña pone en riesgo la salud de gran parte de la población que abastece este tipo de recursos hídricos para el consumo humano.

Entre las condiciones que agravan la situación de contaminación del agua por nitrato de N (NO<sub>3</sub>-) en el área urbana de las ciudades amazónicas se encuentra la ineficiencia del saneamiento básico (abastecimiento de agua y recolección de aguas residuales sanitarias) en la ciudad. El número de hogares con acceso a la red general de agua es todavía muy bajo, solo el 10,88% de los hogares, mientras que el 83,91% de los hogares se abastecen de pozos o manantiales en la propiedad y solo el 4,84% de pozos o manantiales fuera de la propiedad. La ineficiencia de la infraestructura urbana básica es intrínseca a la calidad de vida de los habitantes de cualquier barrio en pequeñas, medianas o grandes ciudades de la Amazonía.

Un estudio de Paraguassú-Chaves et al [16] en la región de la frontera Brasil/Bolivia ya había encontrado que en la primera gran área de riesgo antes de la inundación del río Madeira y sus afluentes, se detectaron altos niveles de nitrato de N (NO<sub>3</sub>-) por encima de 10 mg/L en el 50% de las muestras, característicos de aguas con un alto grado de impactación. Agua no apta para el consumo humano. El 40% tuvo un contenido > 3 mg/L, sumando al 50% > 10 mg/L, se hace evidente la contaminación total del acuífero. Y después de la inundación de la zona, el grado de contaminación aumentó de una manera aterradora, donde se detectó el 100% de las muestras con altos niveles de nitrato N (NO<sub>3</sub>-) > 10 mg/L. El 80% de los pozos y puntos de recolección se detectaron con niveles > 10 mg/L. Se encontraron niveles extremos como 156,74 mg/L; 70,08 mg/L; 67,36 mg/L; 63,27 mg/L y 56,67 mg/L de nitrato. Todas las características de las aguas con un alto grado de impactación.

En otros puntos de captación de agua que no tuvieron una influencia directa en la crecida, los contenidos de nitratos no sufrieron variaciones significativas. En esta zona, en el 30% de las muestras se detectó un contenido de (NO<sub>3</sub>-) superior a 10mg/L. Agua no apta para el consumo humano. En el 70% de las muestras se detectó un contenido superior a 3 mg/L, lo que caracteriza aguas con un alto grado de impactación, sin embargo, acercarse a los resultados encontrados en las zonas de situación I, zona impactada por la crecida del río Madeira [16].

Las precarias condiciones de infraestructura, el uso de agua de pozos amazónicos y pozos tubulares sin mantenimiento y cercanos a tanques negros y sépticos son factores condicionantes y/o determinantes para este escenario [16].

Punto de muestreo	Vecindario	Punto de muestreo	Vecindario
<b>PA</b>	<b>X1</b>	<b>PA</b>	<b>X2</b>
PA1	42.298	PA10	25.899
PA2	41.335	PA11	19.300
PA3	35.145	PA12	19.766
PA4	24.011	PA13	18.555
PA5	23.086	PA14	26.067
PA6	16.441	PA15	12.445
PA7	12.123	PA16	16.600
<b>PA</b>	<b>X3</b>	<b>PA</b>	<b>X4</b>
PA8	45.779	PA17	35.575
PA9	36.065	PA18	10.019
		<b>PA</b>	<b>X5</b>
		PA19	12.080
		PA20	10.119

Tabla 1 - Concentración de nitrato (NO<sub>3</sub>-) detectada en los puntos de muestreo

Punto de muestreo	Vecindario	Punto de muestreo	Vecindario
<b>PA</b>	<b>Y1</b>	<b>PA</b>	<b>Y2</b>
PA21	28.466	PA31	19.665
PA22	22.079	PA32	17.019
PA23	23.780	PA33	15.223
PA24	20.332	PA34	2.166
PA25	15.198	PA35	8.458
<b>PA</b>	<b>Y3</b>	<b>PA</b>	<b>Y4</b>
PA26	13.655	PA36	12.498
PA27	4.788	PA36	13.917
PA28	0.332	PA38	12.045
PA29	3.336	PA39	9.566
PA30	2.145	PA40	11.002

Tabla 2 - Concentración de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) detectada en los puntos de muestreo

En la Amazonía brasileña, otros estudios han presentado resultados que demuestran niveles elevados de nitrato en aguas subterráneas urbanas y rurales. Lima [15] en su investigación en el acuífero Livre Jaciparaná, en la zona 3 de la ciudad de Porto Velho, lo encontró parcialmente contaminado por nitratos. En el 68% de las muestras de agua se identificaron niveles superiores a 3 mg/L, lo que indica cambios en la composición química del agua debido a actividades antropogénicas. Los puntos de muestreo, los pozos poco profundos, utilizados en este estudio, tienen al 100% una profundidad de hasta 12 metros [16]. En el 33% de las muestras de agua, se detectaron niveles de nitrato por encima o muy cerca del límite de 10 mg/L, el valor máximo permitido en Brasil para el agua destinada al consumo humano, de acuerdo con la Ordenanza No. 518 del 25 de marzo de 2004 del Ministerio de Salud.

Campos [5], en una investigación realizada en el municipio de Mirante da Serra, en Rondônia, encontró altos niveles de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en las áreas urbanas más densamente pobladas. Para Lima [15] es importante considerar que, si existe presencia de nitrato en las aguas, incluso en bajas concentraciones, además de indicar que la contaminación es antigua en el ambiente, revela la presencia de materia orgánica asociada a bacterias, virus y parásitos, viva o en alguna de las etapas de descomposición. Estos agentes son la causa de varias enfermedades, especialmente la diarrea aguda y, en forma de nitrato, son un indicador cancerígeno.

El cáncer de iones de nitrato en el agua potable es motivo de preocupación debido a su posible relación con el cáncer de estómago, pero aún faltan investigaciones para aclarar esta relación. Baird y Cann [30] afirman que los áncers publicados muestran que las mujeres que bebían agua pública en un alto nivel de nitrato (> 2,46 mg/L) tenían cáncer con más probabilidades de ser diagnosticadas que aquellas menos expuestas (< 0,36 mg/L en el agua potable).

Los problemas de salud, como las enfermedades diarreicas y la gastroenteritis, son comúnmente reportados y registrados en el sistema de salud de las ciudades encuestadas. Los estudios de Alaburda y Nishihara [18] son notables en cuanto a la preocupación por la salud de la población, especialmente la salud de los niños y los ancianos, ya que son más susceptibles al desarrollo de metahemoglobinemia debido a la exposición al consumo de agua con una alta concentración de nitratos, y cánceres de estómago en adultos.

En la investigación de Barata [17] en aguas subterráneas urbanas, los resultados mostraron una distribución heterogénea, variando en el comportamiento de la pluma de contaminación en la que el 37,5% de las muestras tienen niveles < 10mg/l de Nitrato y el 62,5% de las muestras tienen niveles >10mg/l de Nitrato (NO<sub>3</sub>-).

Los niveles más altos de nitrato (NO<sub>3</sub>-) se encontraron donde hay mayor densidad poblacional, con una disminución gradual en las áreas de ocupación más recientes [17].

Los valores extremos de 42,0 y 45,8 mg/L se observaron en el área urbana de mayor ocupación humana, a diferencia de los valores mínimos de 0 y 2 mg/L, ubicados fuera del área central de la ciudad y asociados a baja densidad poblacional.

Los mapas de concentración de nitrato (NO<sub>3</sub>-) con nivel de corte >10mg/L elaborados por Barata [17] confirman los altos niveles de nitrato. Una gran parte de la población amazónica está consumiendo agua con un alto grado de contaminación, es decir, agua no apta para el consumo humano. Un problema inminente de salud pública.

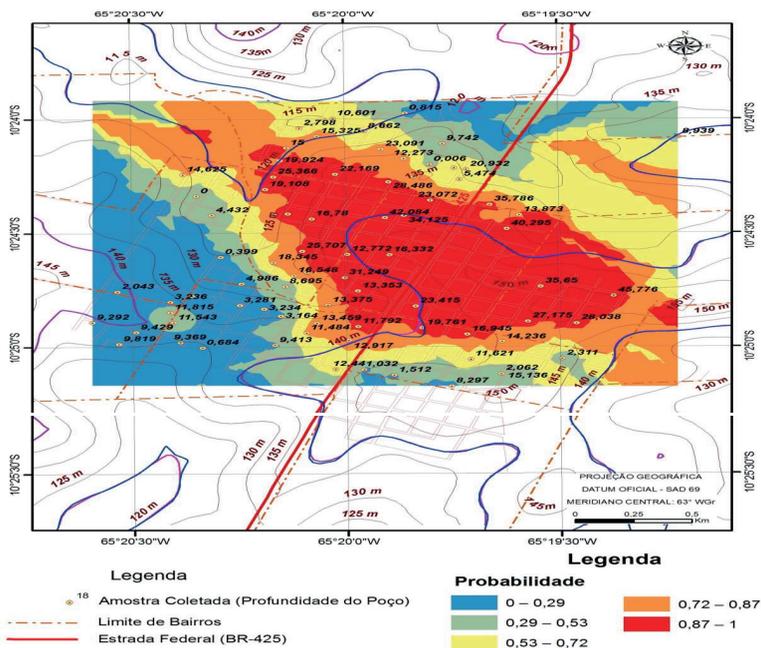


Figura 1: Mapa de concentración de nitrato (NO<sub>3</sub>-) con nivel de corte >10 mg/l

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las aguas subterráneas urbanas utilizadas por la población de 3 (tres) ciudades de la Amazonía para consumo humano y otros servicios públicos se ven afectadas por altos niveles de nitrato de N (NO<sub>3</sub>-).

El setenta y tres por ciento (73%) de las muestras tienen niveles > 10 mg/L de nitrato. Estos lugares son áreas urbanas de alto riesgo ambiental para la salud humana, un problema de salud pública. Solo el 7,5% de las muestras tienen menos de 3 mg/L de nitrato.

La alta concentración de nitratos en las aguas subterráneas urbanas de las ciudades de la Amazonía brasileña pone en riesgo la salud de gran parte de la población que abastece este tipo de recursos hídricos para el consumo humano. Entre las condiciones que agravan la situación de contaminación del agua por nitrato de N (NO<sub>3</sub>-) en el área urbana se encuentra la ineficiencia del saneamiento básico (abastecimiento de agua y recolección de alcantarillado sanitario, predominio de tanques rudimentarios y fosas sépticas en estado precario).

## REFERENCIAS

1. MINDRISZ, A. C. Avaliação da Contaminação da Água Subterrânea de poços tubulares, por combustíveis fosseis, no município de Santo André, São Paulo: uma contribuição à Gestão Ambiental. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo. 2006.
2. KLOCK, A. L. S.; GUARDA, J. S.; CELLA, J.; SILVA, M. L.; FILHO, L. P. K. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas. Qualidade das Águas de Poços Profundo do Município de Águas Frias-SC em Relação a Portaria 2.914 do Ministério da Saúde. Belo Horizonte, 2014. p. 13.
3. BRITO, P. N. F.; Qualidade da Água de Abastecimento em Comunidades Rurais de Várzea do Baixo Rio Amazonas. Trabalho de conclusão de curso. Fundação Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2013. 49p.
4. LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. Campinas, SP. Editora Átomo, 2010. 3ª ed. 494 p.
5. CAMPOS, J. C. V. A problemática dos recursos hídricos subterráneos na Amazônia na visão do Serviço Geológico do Brasil. In: I SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 2003, Rio de Janeiro: 2003. p. 133-41.
6. BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria MS nº 2.914/2011*. Brasília. Ministério da Saúde, 2011. 32 p.
7. SILVA, L.C.M; BROTTTO, M.E. Nitrato em Água: Ocorrência e Consequências. Escola Superior de Química, Faculdade Oswaldo Cruz. São Paulo.
8. CAMPOS, T. DE S.; ROHLFS, D.B. Avaliação dos valores de nitrato em águas subterráneas e sua correlação com atividades antrópicas no município de Águas Lindas de Goiás. Goiânia. PUC, [2011]. Disponível em: <<http://www.cpgls.ucg.br/arquivosUpload/1/File/.../SAUDE/86.pdf>>. Acesso em: 02 abr 2024.

9. MELO JUNIOR, H. R. et.al. Avaliação da Qualidade das Águas Subterrâneas em uma Zona Urbana da Amazônia Brasileira: Estudo de caso do bairro Eletronorte, Porto Velho (RO). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, 2006, Curitiba: Anais. Curitiba: ABAS, 2006. p. 1-20.
10. BARBOSA, C. F. Hidrogeoquímica e a contaminação por nitrato em água subterrânea no bairro Piranema, Seropédica – RJ. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <[http:// www.bibliotecadigital.unicamp.br](http://www.bibliotecadigital.unicamp.br)>. Acesso em: 21 abril. 2024.
11. FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. C. A. Poluição das Águas Subterrâneas. São Paulo: Série Manuais. Instituto Geológico. Secretaria do Meio Ambiente. 1993. 53 p.
12. DANIEL, M. H. B. Caracterização do perfil do nitrato na água para consumo humano no município de Natal - RN. 2008. Monografia (Especialização) – Universidade de Brasília, Distrito Federal.
13. PARAGUASSU-CHAVES, C.A.; CAVALCANTE, F.R.C.; UCHOA, M. R.; BARATA, C. S.; SILVEIRA, E.G.; DANTAS, L. R. M. Possível Concentração de Nitrato (NO<sub>3</sub>-) na Área Urbana da Fronteira de Rondônia. Debate em ação: discussão científica, v. 1, p. 70-79, 2015.
14. PARAGUASSU-CHAVES, C.A; CAVALCANTE, F.R.C; DANTAS, L.R.M; SOUSA, A.A; CLAROS, P.C.G; SILVA, I.R.R.P; NEVES, J.T; CALDERARO, I.F.N, OLIVEIRA, P.T.C; ALMEIDA, F.M. Groundwater quality: Study of the Nitrate(NO<sub>3</sub>-) concentration in the Urban Area of the Brazil/Bolivia Border. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS) [Vol-5, Issue-10, Oct- 2018]
15. LIMA, M.L.A. Águas subterrâneas potencialmente impactadas por nitrato (NO<sub>3</sub>-) na área urbana da cidade de Porto Velho; Um estudo da geografia da saúde. (Dissertação). Programa de mestrado em geografia. Universidade Federal de Rondônia. Porto Velho. 2008.
16. PARAGUASSU-CHAVES, C.A; BARATA, C.S; SILVA FILHO, E.P; ALMEIDA, F. M; DANTAS, L.R.M. Mapeamento da Contaminação por Nitrato (NO<sub>3</sub>-) em uma Área Urbana na Fronteira Brasil/Bolívia. Debate em Ação: discussão científica. Publicação preliminar. 2018.
17. BARATA, C. S. Mapeamento da contaminação por nitrato (NO<sub>3</sub> -) em poços rasos na área da sede do município de Nova Mamoré – Rondônia. (Dissertação). Programa de mestrado em geografia. Universidade Federal de Rondônia. Porto Velho. 2016.
18. ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de Compostos de Nitrogênio em Águas de Poço. Revista de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 32, n. 2, p. 160-5, abr.1998.
19. ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de Compostos de Nitrogênio em Águas de Poço. Revista de Saúde Pública, Rio de Janeiro, revisada e atualizada, abr. 2021.
20. HIRATA, R.; CAGNON, F. (2004). Source of nitrate in the groundwater of Adamantina aquifer in Urânia, SP - Brasil. In: XXXIII IAH Congress/VII ALHSUD, 2004, Zacatecas, City, 2004.
21. FINOTTI, A. R.; CAICEDO, N. O. L.; RAYA RODRIGUES, M. T. **Contaminações Subterrâneas com Combustíveis Derivados de Petróleo: Toxicidade e a legislação brasileira.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 2, p. 29-46. 2001.
22. ARCGIS FOR DESKTOP ADVANCED. versão 10.2.
23. CETESB. Agudo, E.G. **Guia Nacional de Coleta, preservação de amostras de Água**, 1987.

24. ANA. Agência Nacional de Águas. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas de Água da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB e Agência Nacional de Águas-ANA,2011
25. ISAAK, E.; SRIVASTAVA, R. An introduction to applied geostatistic. New York: Oxford University Press, 1989.
26. LANDIM, P. M. B. Análise Estatística de Dados Geológicos. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003. 254 p.
27. ISAAK, E.; SRIVASTAVA, R. An introduction to applied geostatistic. New York: Oxford University Press, 1989.
28. LANDIM, P. M. B. Análise Estatística de Dados Geológicos. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003. 254 p.
29. SIMÃO, F. B. Mapeamento de risco de malária na área urbana de Porto Velho - RO, pela krigagem indicativa. (Mestrado em Geociências). Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 2001. 78 p.
30. LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. Krigagem Indicativa Aplicada à Elaboração de Mapas Probabilísticos de Riscos. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 06, 2002. 19 p. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em: 10 nov. 2007. 71
31. BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.