

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

LUANA VANESSA BRUCH

**RELAÇÃO ENTRE O USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E OS TEORES DE NITRATO
NO AQUÍFERO CAIUÁ**

CURITIBA

2023

LUANA VANESSA BRUCH

**RELAÇÃO ENTRE O USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E OS TEORES DE NITRATO
NO AQUÍFERO CAIUÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof^a Dra. Camila de Vasconcelos
Müller Athayde

CURITIBA

2023

“Eu digo a minha esposa que a água fresca em seu copo não é tão fresca assim. Seus átomos tem, nada menos do que 14 bilhões de anos”

- Andy McWilliam

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou até exatamente onde eu deveria estar e me abençoou quando cheguei lá.

Aos meus pais Valmir e Ivete, por todo o apoio, incentivo, amor e absolutamente todas as coisas que me proveram, me permitindo chegar até aqui e ser quem sou, pessoal e profissionalmente.

Á meu noivo Herick, que presenciou todas as fases desta graduação e deste projeto, me incentivando nos melhores momentos e me auxiliando nos mais difíceis.

A minha orientadora Camila, por embarcar comigo nesta jornada e me auxiliar em toda esta caminhada. Foi quem me apresentou a hidrogeologia dentro desta graduação e quem terei sempre como um exemplo.

A meu avô Valdemar Jahn (in memorian), que me viu começar este momento tão importante e que agora me acompanha de outro plano, enquanto eu o finalizo.

A meus colegas de curso: companhias de estudos, desabafos, campos, seminários e happy hours. A geologia jamais seria a mesma sem vocês.

Aos meus colegas de trabalho da Geoloc Engenharia e Geologia, pela compreensão nos dias mais cheios e pelo incentivo sempre. De maneira especial a minha colega Elise, geóloga que me inspira todos os dias como profissional e como pessoa.

A meus amigos que me acompanham a anos e que jamais perderam uma oportunidade de me incentivar neste trabalho e durante toda a graduação: Danielly, Janaine e Jeferson, vocês são os melhores amigos deste mundo.

A minha madrinha Ingelori, minha oma Irena e meu afilhado Alessandro, agradeço a vocês como representantes de toda a família que nestes anos de graduação me auxiliou, incentivou e compreendeu minha ausência, mesmo em meio as saudades.

Por fim, agradeço a toda estrutura fornecida pela Universidade Federal do Paraná, especialmente pelo Setor de Ciências da Terra. Que nunca falte nesse Brasil a educação pública, gratuita e de qualidade, da qual tive a honra de desfrutar.

RESUMO

Este trabalho aborda a relação entre os teores máximos e mínimos de nitrato associados ao uso e ocupação do solo no aquífero Caiuá. Este aquífero já possui uma elevada vulnerabilidade, necessitando de maior atenção em relação aos usos do solo sobre sua área. Esta atenção aumenta no entorno de áreas de captação de água subterrânea, que necessitam de atenção ou restrição em relação ao tipo de ocupação a ser realizado, utilizando como ferramenta para a definição deste entorno a ser protegido, os Perímetros de Proteção de Poços, que indicam as distâncias a serem respeitadas no entorno de um poço, de acordo com o tempo de transporte do aquífero naquele ponto. De forma geral, os usos associados ao ambiente agrícola são preocupação devido aos resíduos animais e aos fertilizantes utilizados nas plantações, no entanto, neste trabalho foi observada também a relação entre o Nitrato e o ambiente urbano, com ênfase para áreas residenciais. Para verificar a origem do Nitrato são utilizados mapas de uso e ocupação do solo, tanto atuais quanto históricos, além das análises químicas dos poços e do índice de correlação dos elementos químicos analisados. A combinação destas informações permite a identificação da provável origem do Nitrato, que neste trabalho está associada principalmente ao saneamento proveniente de áreas residenciais.

Palavras chave: Caiuá; Uso e ocupação do solo; Nitrato; Aquífero sedimentar.

ABSTRACT

This paper addresses the relationship between the maximum and minimum levels of nitrate associated with the use and occupation of the soil in the Caiuá aquifer. This aquifer already has a high vulnerability, requiring greater attention in relation to land uses in its area. This attention increases around groundwater catchment areas, which need attention or restriction in relation to the type of occupation that will be made, using as a tool for defining this environment to be protected, the Well Protection Perimeters, which indicate the distances to be respected around a well, according to the transport time of the aquifer at that point. In general, the uses associated with the agricultural environment are a concern due to animal waste and fertilizers used in plantations, however, in this work the relationship between Nitrate and the urban environment was also observed, with emphasis on residential areas. To verify the origin of Nitrate, maps of land use and occupation are used, both current and historical, in addition to chemical analyzes of the wells and the correlation index of the analyzed chemical elements. The combination of this information allows the identification of the likely origin of Nitrate, which in this work is mainly associated with sanitation from residential areas.

Keywords: Caiuá; Field uses and occupations; Nitrate; Sedimentary aquifer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fotos de afloramentos do Grupo Caiuá.....	3
Figura 2: Mapa geológico da área do Aquífero Caiuá	4
Figura 3: Localização do Aquífero Caiuá	5
Figura 4: Poços cadastrados no IAT (2022)	6
Figura 5: Ciclo do Nitrogênio	8
Figura 6: PPPs definidos por Cabelera da Silva (2019)	11
Figura 7: Mapa de poços selecionados para o trabalho	14
Figura 8: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5109	19
Figura 9: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 1117	21
Figura 10: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5089	23
Figura 11: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5206	25
Figura 12: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5389	27
Figura 13: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5399	30
Figura 14: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5005	31
Figura 15: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5196	34
Figura 16: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5395	36
Figura 17: Nuvem de correlação dos poços de MMA, 2015.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Poços selecionados para análise detalhada.....	13
Tabela 2: Detalhamento das legendas aplicadas ao mapa de uso e ocupação do solo	15
Tabela 3: PPPs dos poços selecionados para análise	17
Tabela 4: Síntese do uso e ocupação do solo no entorno dos poços	37
Tabela 5: Análise multielementar dos poços	40

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I: Poços da base de dados de MMA, 2015	
ANEXO II: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5109	
ANEXO III: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 1117	
ANEXO IV: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5089	
ANEXO V: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5206	
ANEXO VI: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5389	
ANEXO VII: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5399	
ANEXO VIII: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5005	
ANEXO IX: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5196	
ANEXO X: Histórico de uso e ocupação no entorno do poço 5395	
ANEXO XI: Matriz de correlação dos poços de MMA,2015	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO TEÓRICA	2
2.1 Contexto geológico da área de estudo.....	2
2.1.1 Grupo Caiuá	2
2.1.2 O Aquífero Caiuá.....	5
2.2 Nitratos.....	7
2.3 Perímetro de Proteção de Poços	9
2.3.1 Definição e consequências.....	9
2.3.2 Método de cálculo	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
4. RESULTADOS.....	17
4.1 Perímetro de proteção de poços.....	17
4.2 Poço 5109.....	18
4.2.1 Descrição do poço.....	18
4.2.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	18
4.3 Poço 1117.....	20
4.3.1 Descrição do poço.....	20
4.3.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	20
4.4 Poço 5089.....	22
4.4.1 Descrição do poço.....	22
4.4.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	22
4.5 Poço 5206.....	24
4.5.1 Descrição do poço.....	24
4.5.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	24
4.6 Poço 5389.....	26
4.6.1 Descrição do poço.....	26
4.6.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	26
4.7 Poço 5399.....	28
4.7.1 Descrição do poço.....	28
4.7.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	28
4.8 Poço 5005.....	30

4.8.1 Descrição do poço.....	30
4.8.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	31
4.9 Poço 5196.....	32
4.9.1 Descrição do poço.....	32
4.9.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	33
4.10 Poço 5395.....	34
4.10.1 Descrição do poço.....	34
4.10.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área.....	35
5 DISCUÇÃO	36
5.1 Comparação entre os usos do solo.....	36
5.2 Análise multielementar	39
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42
REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

O aquífero Caiuá possui uma importância social e econômica significativa no contexto em que está inserido, sendo responsável por 80% do abastecimento público das cidades que se localizam sobre sua abrangência (CPRM,2012). Apenas sobre este aquífero estão cadastrados junto ao Instituto Água e Terra 3.121 poços de captação de água subterrânea) (IAT, 2022).

Entretanto, apenas a disponibilidade de água não é o bastante, já que a água deve possuir características químicas, contempladas por limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde, para ser considerada potável e própria para consumo humano.

Apesar desta importância, atualmente não existe uma legislação universal no Brasil no que diz respeito a permissão para uso de recurso hídrico subterrâneo, sendo que na maioria dos casos, quem estabelece estas regras são legislações estaduais, que constantemente diferenciam-se entre si, utilizando diferentes critérios ou valores de distância entre poços, para a emissão da Outorga

Além disso, é comum o conflito entre os interesses econômicos e ambientais no que diz respeito ao perímetro do poço que deve ser protegido de forma mais restrita, com proibição de alguns usos. Em alguns estados, está legislação não faz parte dos processos de Outorga coordenados pelos órgãos ambientais. Fato que acontece no próprio Paraná, que não cita o PPP (Perímetro de Proteção de Poços) em sua legislação.

Um exemplo de legislação que cita o PPP é o estado de São Paulo, que possui a Lei nº6.134/1988 que “Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e dá outras providências”, citando em seu texto o PPP a ser adotado para os poços de captação (São Paulo, 1988a; São Paulo 1988b).

No caso do Paraná, a portaria Instituto Água e Terra nº 130 de 5 de maio de 2020 estabelece, no Art. 1º que estão dispensados de outorga as “derivações e captações individuais até 5,4m³/h ou 129,6 m³/dia” no caso das atividades de aquicultura. Em relação a demais atividades estão dispensadas “derivações e captações individuais até 1,8 m³/h”. Ou seja, os critérios para dispensa de outorga dizem respeito apenas ao volume explorado do aquífero.

Já em relação aos poços com necessidade de outorga a avaliação inicia com a Anuência Prévia, onde declara-se a intenção de uso daquele poço (finalidade, vazão,

localização, etc) e após a aprovação da anuência é realizada a perfuração do poço seguida pela solicitação de Outorga de direito de uso de recurso hídrico (IAT, 2022).

Durante o processo de solicitação de Outorga é informada a profundidade perfurada, localidade do poço, vazão a ser utilizada (por finalidade), além dos dados do usuário de recursos hídricos responsável por aquele poço. Todo poço, para passar por processo de anuência ou outorga, precisa ter um profissional qualificado e com registro ativo no CREA (Conselho Regional de Engenharia e Agronomia) para assinar a responsabilidade técnica pelas informações prestadas acerca do poço (IAT, 2022).

Em relação as análises químicas da água, um dos compostos que deve ser caracterizado em uma análise de água para garantir sua potabilidade é o Nitrato. O excesso deste composto na água pode gerar diversos problemas de saúde em humanos, além de afetar a produtividade e vitalidade de bovinos e outros mamíferos, que passam por dessedentação a partir destas águas. Esta interferência torna-se perigosa especialmente considerando as origens do Nitrato na água subterrânea que são associadas principalmente ao ambiente rural, com plantações (que recebem fertilizantes) e criação animal (São Paulo, 2019).

Neste contexto, este projeto visa analisar a relação entre diferentes usos e ocupações do solo com os teores de Nitrato encontrados no aquífero Caiuá, a partir da hipótese de que diferentes ambientes terão diferentes respostas em relação aos níveis de Nitrato. Esta correlação visa rastrear a origem das contaminações por Nitrato encontradas no aquífero Caiuá, entre os poços observados. Considerando as origens conhecidas deste composto, também se espera que o ambiente rural possua uma maior concentração de Nitrato em relação a ambientes mais urbanizados.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 Contexto geológico da área de estudo

2.1.1 Grupo Caiuá

A geologia da área do aquífero Caiuá foi originalmente definida por Soares et al (1979) que, na época, definiram o Caiuá como uma unidade pertencente ao Grupo Bauru. Posteriormente Fernandes & Coimbra (1994) classificaram a área como um grupo que é dividido entre as formações Rio Paraná, Goio-Erê e Santo Anastácio (Fernandes & Coimbra, 1994; Fernandes, 2004).

O grupo Caiuá faz parte do contexto da Bacia Bauru, sendo uma unidade sedimentar, de idade Cretácea superior, que recobre o vulcanismo basáltico sobre o 3º planalto paranaense, no noroeste do Paraná (MMA, 2015; CPRM,2021). De forma geral o aquífero Caiuá é constituído por arenitos finos a médios, que apresentam uma cor em tom arroxeadado característico e típico do Grupo Caiuá (Figura 1) (MMA, 2015; CPRM,2021).

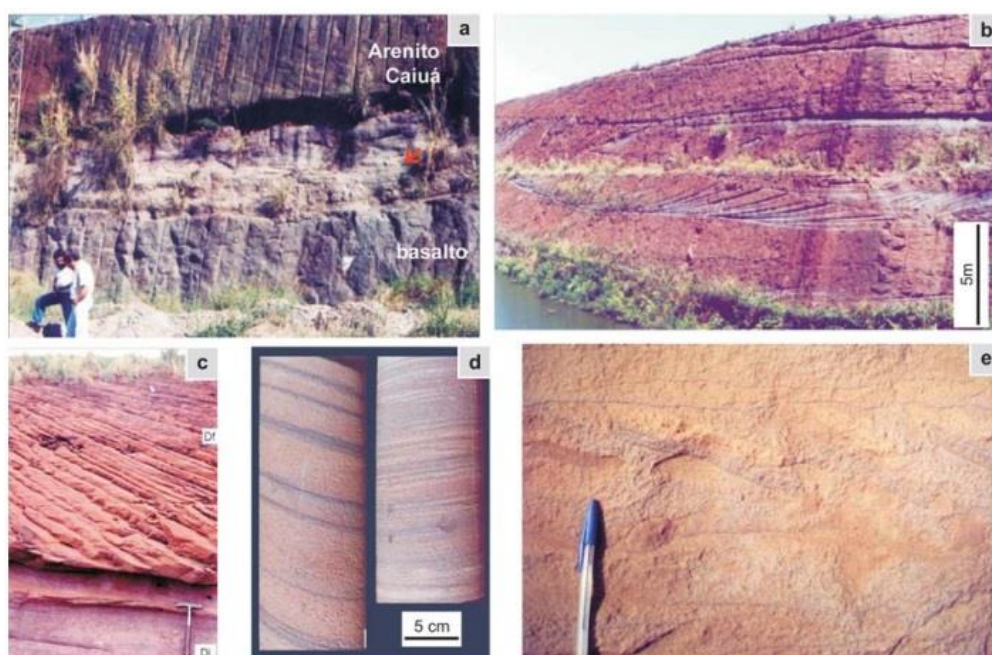


Figura 1: Fotos de afloramentos do Grupo Caiuá
Fonte: Fernandes et al, 2008

Em relação a estruturas sedimentares, Almeida et al (1980) descreve estratificações cruzadas de médio a grande porte, constituídas por lâminas de diferentes granulometrias de seleção regular a boa. A mineralogia é pouco variada, entre quartzo, sílica amorfa e feldspato e opacos em variadas porcentagens. De forma ocasional há presença de cimento carbonático (Almeida et al, 1980).

Dentre as formações que compõe o grupo Caiuá, a Formação Rio Paraná é a que aflora na maior parte da delimitação do aquífero (Figura 2). Ela é formada por “quartzoarenitos finos a muito finos, bem selecionados, de cores marrom avermelhado e arroxeadado”(CPRM, 2021). Conforme descrições anteriores, são encontradas nesta formação estratificações cruzadas que podem ter porte médio ou grande e de forma subordinada são observadas intercalações de camadas de lamitos de composição arenosa e maciços (CPRM, 2021).

A formação Goio Erê é composta por “arenitos subarcoseanos finos a muito finos de cores marrom avermelhado e cinza arroxeados” (CPRM, 2021). Nesta formação são encontradas unidades com estratificação cruzada, assim como camadas tabulares e com aspecto maciço, que podem apresentar “laminação mal desenvolvida, *climbing ripples* e pequenas ondulações eólicas” (CPRM, 2021).

Por fim, a Formação Santo Anastácio é composta por arenitos subarcoseanos com granulação fina a muito fina, aspecto maciço, seleção moderada e subordinadamente apresentando as frações silte e argila (CPRM, 2021). A ocorrência desta formação é em estratos tabulares com espessuras decimétricas (CPRM, 2021).

Além do Grupo Caiuá, uma parte do aquífero Caiuá também é composta por afloramentos do Grupo Bauru, especificamente da Formação Vale do Rio do Peixe, que se trata de uma “associação de estratos tabulares alternados”. Alguns estratos são compostos por “arenitos com estratificação cruzada de pequeno a médio porte” com granulometria fina a muito fina e coloração vermelho claro a marrom alaranjado, os demais são siltitos arenosos e lamitos com coloração marrom (CPRM, 2021).

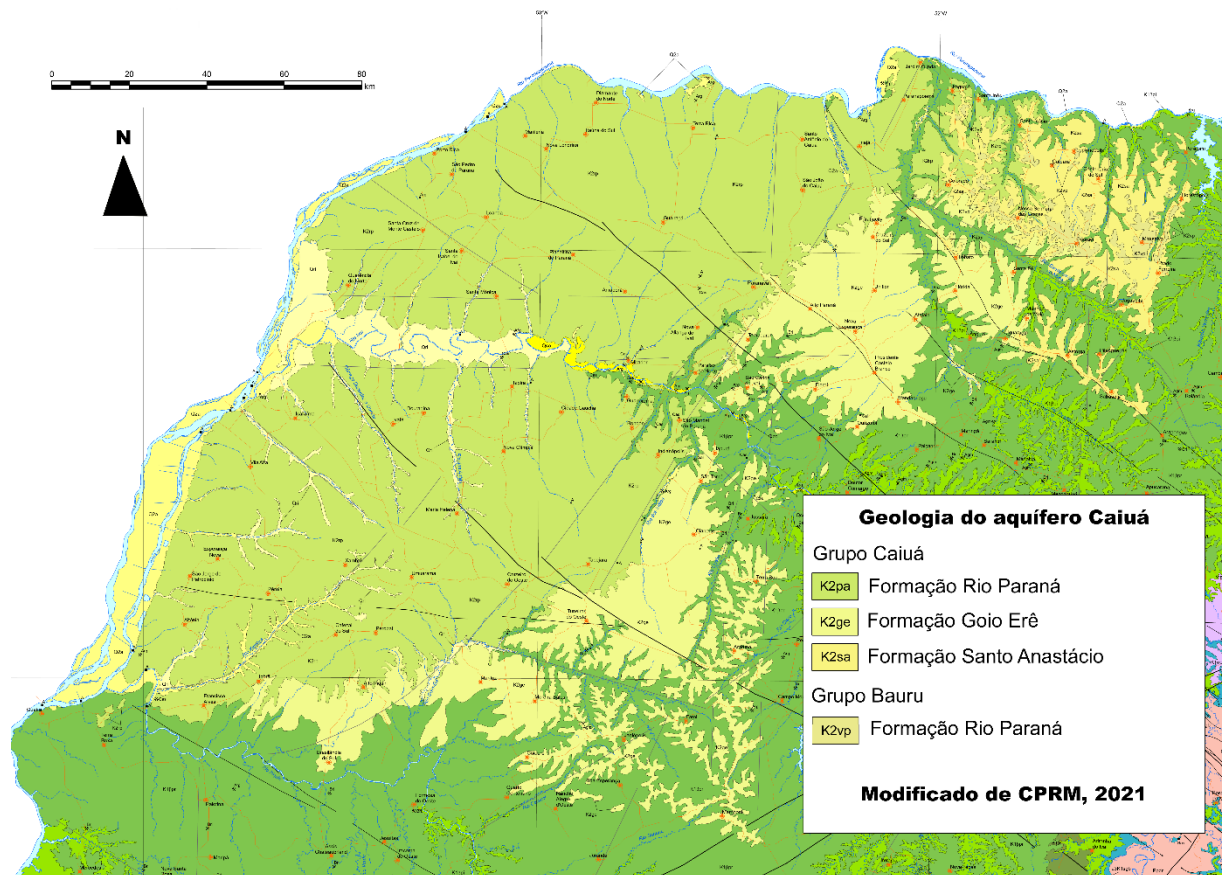


Figura 2: Mapa geológico da área do Aquífero Caiuá
Fonte: Modificado de CPRM, 2021

2.1.2 O Aquífero Caiuá

O aquífero Caiuá (figura 3), é um aquífero sedimentar de idade cretácea (Almeida *et al*, 1980) localizado no noroeste do estado do Paraná, possuindo uma extensão de 27.564,20 Km² (MMA,2015), correspondentes a 13,8% da área do estado, distribuídos sobre 114 municípios paranaenses (IBGE, 2018; MMA, 2015). Entre os municípios abrangidos pelo Caiuá, os mais populosos são Cianorte, Paranavaí e Umuarama (IBGE, 2021).

Segundo a CPRM (2012) o aquífero possui médias de profundidade de 150 metros, capacidade específica de 1,5 m³/h/m, vazão de 62,5 m³/h, transmissividade de 200 m²/d e Condutividade hidráulica de 1,5 m/d. A classificação deste aquífero varia de aquífero semiconfinado (coeficiente de armazenamento médio de 1×10^{-3}) a aquífero livre e a recarga deste aquífero ocorre através de uma precipitação média anual de 1400mm (Rosa Filho *et al*, 2011).

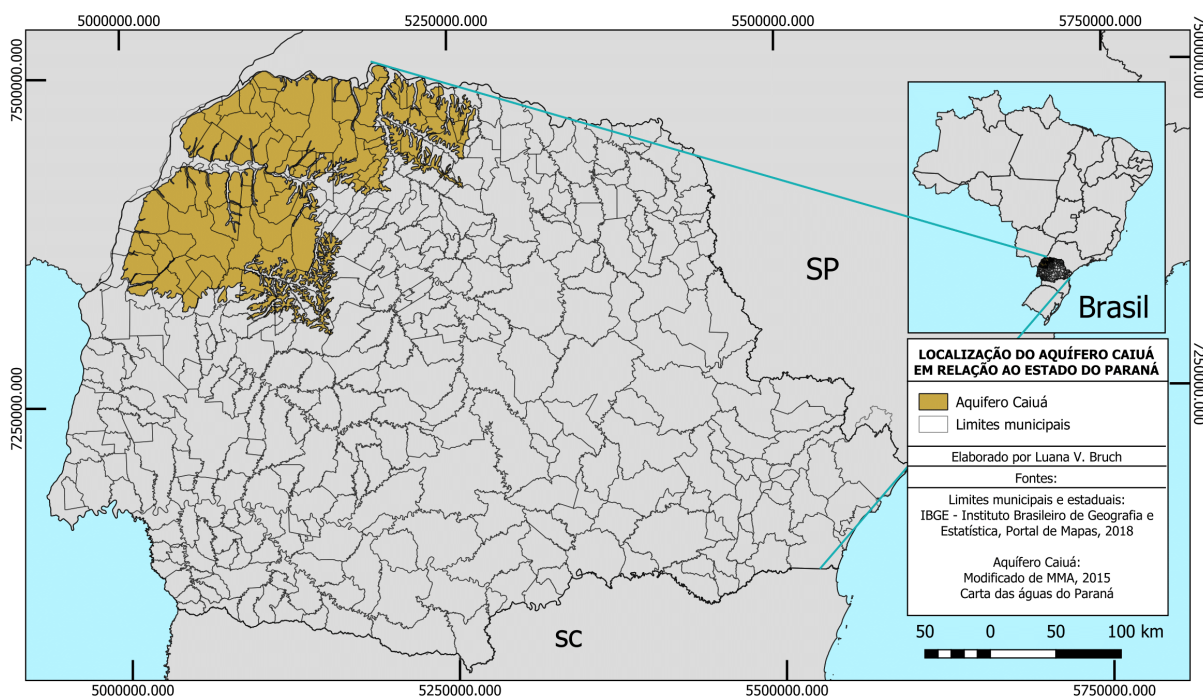


Figura 3: Localização do Aquífero Caiuá
Fonte: Modificado de MMA,2015 e IBGE,2018

A caracterização hidroquímica da água deste aquífero, feita a partir do diagrama de Piper, indica águas bicarbonatadas cálcicas e eventualmente bicarbonatadas sódio/potássio - cálcicas (MMA, 2015). Também se destaca, em relação a hidroquímica, a relação Sódio e Potássio, visto que o aquífero apresenta Potássio em maior quantidade que Sódio, característica considerada rara nos aquíferos (Rosa Filho *et al*, 2011).

As características deste aquífero o tornam favoráveis a exploração, implicando em 3.121 poços de captação outorgados (Figura 4) através do sistema SIGARH (Sistema de Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos) (IAT, 2022), além de 2.196 poços de captação dispensados de outorga, 538 poços para Irrigação (sendo 385 outorgados e 153 dispensados de outorga) e 109 poços para aquicultura (sendo 7 outorgados e 102 dispensados de outorga) (IAT, 2022). Estes poços possuem finalidades distribuídas entre o ambiente urbano (consumo humano, limpeza, utilização em indústrias) e rural (irrigação, consumo humano e dessedentação animal) (IAT, 2022).

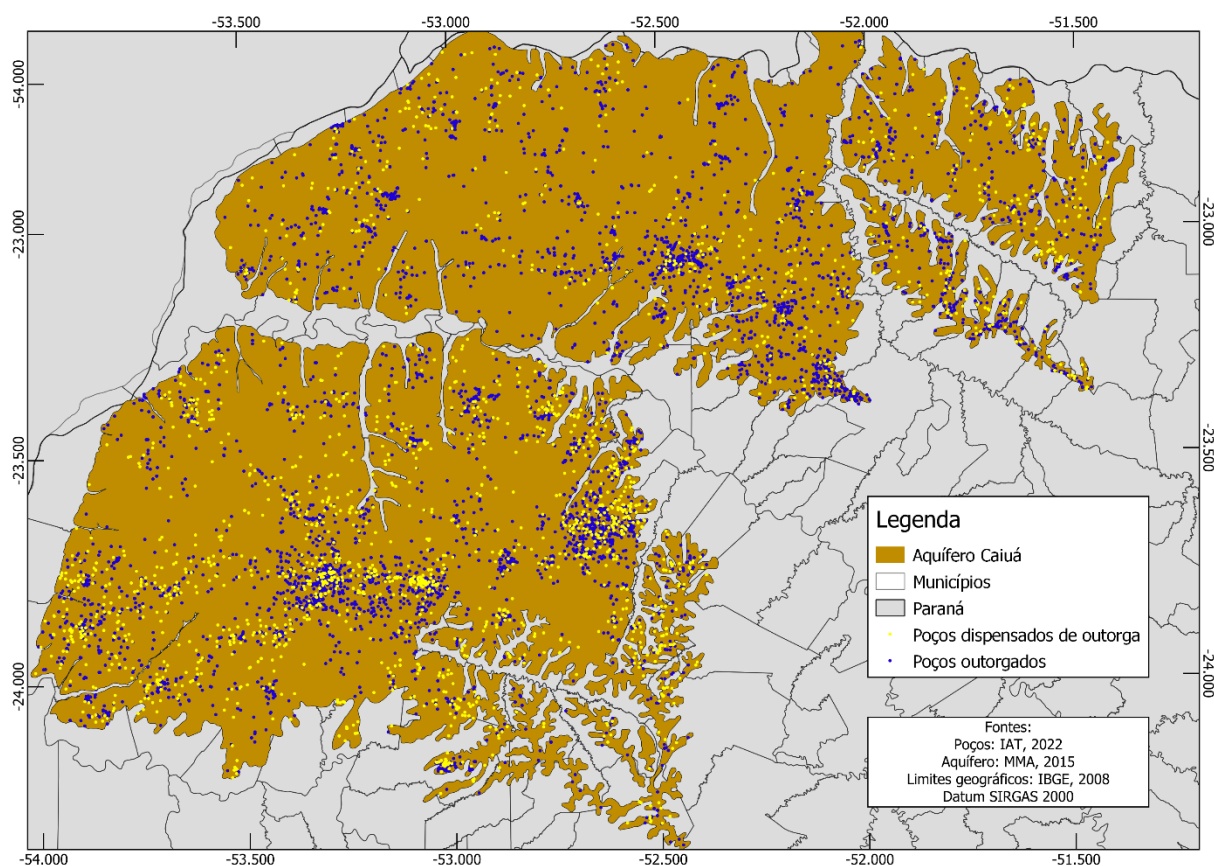


Figura 4: Poços cadastrados no IAT (2022)
Fonte: Modificado de MMA, 2015; IBGE, 2018 e IAT, 2022

Apesar da boa produtividade do aquífero, algumas características, especialmente litológicas e de profundidade fazem com que o aquífero precise de atenção no que diz respeito aos volumes explorados e a ocupação sobre suas águas. O Instituto das Águas do Paraná (2010), alerta, no Plano Estadual de Recursos Hídricos que o aquífero Caiuá (assim como o Karst) merece atenção especial em relação ao uso e ocupação do solo, por conta de sua elevada vulnerabilidade.

MMA (2015) também realizou o cálculo da vulnerabilidade segundo o método GOD, que considera o grau de confinamento (G), a ocorrência de estratos de cobertura (O) e a profundidade do NE (D) encontrando índices de vulnerabilidade Média (4% do aquífero), Alta (89,4% do aquífero) e Extrema (1,9%), possuindo, portanto, predominância de índice de vulnerabilidade Alto. Estes índices reforçam a importância da proteção dos poços construídos sobre este aquífero assim como a necessidade de estudos na área.

Associando a vulnerabilidade elevada do aquífero, sua utilização expressiva para consumo humano e sua classificação como um aquífero homogêneo (Celligoi, 2000), o aquífero Caiuá é um excelente objeto de estudo das águas subterrâneas, sendo este o objeto de estudo deste trabalho.

2.2 Nitratos

O Nitrato é um composto químico de fórmula NO_3^- , que é encontrado no ambiente como produto do ciclo do Nitrogênio (Figura 5). Este ciclo transforma o N_2 (gás que perfaz 80% da atmosfera terrestre) em NH_3 , através do processo denominado “Fixação de Nitrogênio”. Este processo é seguido pela “oxidação amoniacal” resultando em NO_2^- , que é oxidado por nitrobactérias, gerando o Nitrato (Bernhard, 2010).

Este ciclo é natural, porém pode ser desestabilizado por atividades antrópicas, conforme destacam Silva & Brotto (2014), demonstrando que a atividade antrópica pode aumentar de forma significativa os teores deste composto no ambiente.

Este aumento pode ocorrer a partir de diversas atividades, tanto rurais quanto urbanas, se destacando os resíduos animais e os fertilizantes, na área agrícola e as redes de esgoto, fossas sépticas, indústrias diversas e construção civil. Ambos os ambientes podem também ser influenciados por lixiviação gerada a partir de tempestades (Tameirão Pinto, 2018).

O nitrogênio na forma de nitrato constitui um dos principais perigos para os aquíferos, já que o nitrato possui uma solubilidade elevada e trata-se da forma do Nitrogênio com máximo estado oxidativo, facilitando a acumulação nas águas subterrâneas (APDA, 2013).

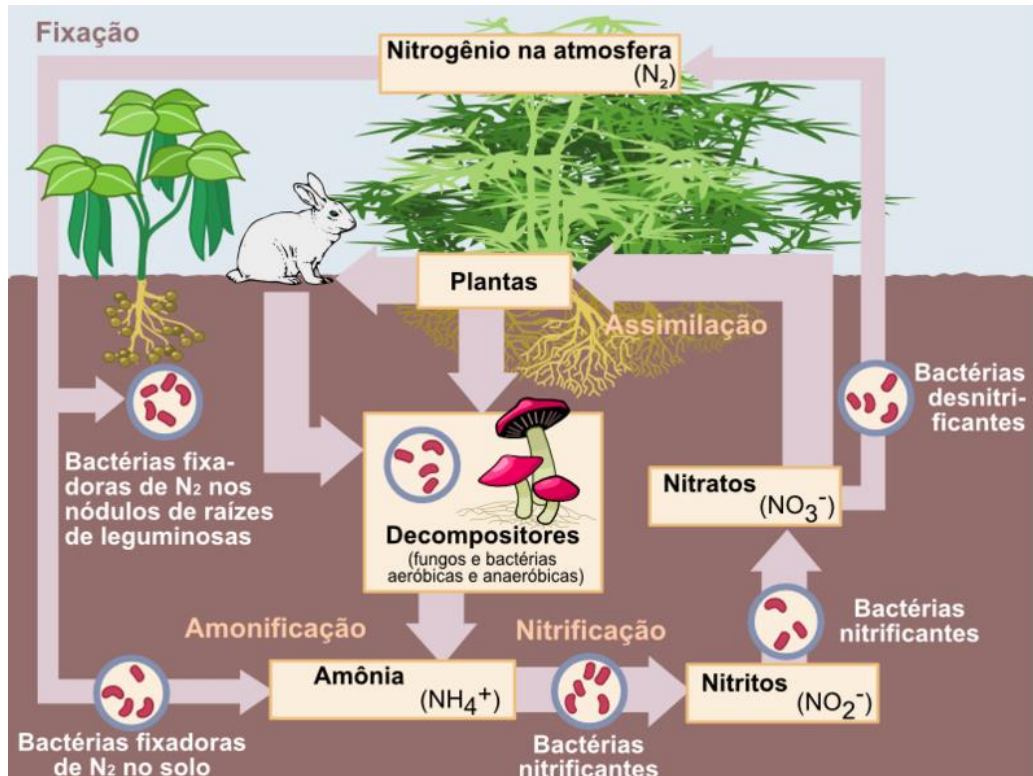


Figura 5: Ciclo do Nitrogênio
Fonte: Modificado de Study Mind (2022)

Atualmente o nitrato já é uma preocupação na sociedade, sendo “o contaminante de maior ocorrência em aquíferos no Brasil e no exterior”. Sua toxicidade é média, no entanto a substância possui elevada persistência e difícil remediação (São Paulo, 2019).

A portaria do Ministério da Saúde nº888/2021 estabelece um limite máximo de 10mg/L de Nitrato (como N) para que a água seja considerada própria para consumo humano (Brasil, 2021). Considerando o balanço iônico este valor significa um teor de 44 mg/L de NO_3^- .

Além disso, “A soma das razões das concentrações de nitrito e nitrato e seus respectivos VMPs (Valor máximo permitido), estabelecidos no Anexo 9, não deve exceder 1”. Ou seja, concentração nitrato/VMP + concentração nitrito/VMP deve ser menor que 1 (Brasil, 2021).

As consequências de ingestão de Nitrato acima dos padrões considerados seguros, pode resultar em problemas de saúde, a exemplo da metemoglobinemia (síndrome do bebê azul), uma doença que aumenta a concentração de metemoglobina (forma oxidada da hemoglobina) no sangue, impossibilitando a ligação com o oxigênio e consequentemente diminuindo a capacidade de transporte de oxigênio no organismo (Nascimento *et al*, 2008).

A metehemoglobinemia pode ser consequência da exposição elevada a nitritos ou nitratos, presentes em contaminações de água potável, assim como em agentes preservativos ou corantes da indústria alimentícia (Nascimento *et al*, 2008).

Além desta doença, alguns estudos também indicam relação entre o Nitrato e alguns tipos de câncer, como o linfático e o gástrico, embora ainda não existam conclusões definitivas acerca desta relação (São Paulo, 2019).

Existe também a sugestão da relação entre a exposição elevada ao nitrato, através da água para consumo humano e o hipotireoidismo subclínico em mulheres (Ascherbrook-Kilfoy *et al*, 2012).

Além da finalidade de consumo humano, os teores de Nitrato também afetam a potabilidade da água em relação a dessedentação animal, já que os elevados teores deste composto químico podem ser associados a “baixa produtividade, redução no ganho de peso, queda de eficiência reprodutiva, queda de vitamina A e abortos”, especialmente em animais ruminantes (São Paulo, 2019).

O nitrato, assim como o nitrito, se trata de uma substância solúvel em água, por consequência os índices de nitrato no aquífero ou em águas superficiais, sofrerão interferência de acordo com os índices de precipitação e de acordo com a relação entre infiltração e escoamento superficial nas áreas avaliadas (Avila, 2005)

No contexto do aquífero Caiuá, Tameirão Pinto (2018) já verificou uma tendência de aumento do Nitrato no aquífero entre 1970 e 2016, intensificando, portanto, a necessidade de mais estudos acerca desse tema no aquífero Caiuá.

2.3 Perímetro de Proteção de Poços

2.3.1 Definição e consequências

O perímetro de proteção de um poço (PPP) é uma zona circular estabelecida para manter a segurança do poço de captação. Em tese, as interferências antrópicas devem ser limitadas ou barradas dentro dessa zona, visando a eliminação dos contaminantes antrópicos (Waahnfried & Hirata, 2005). No entanto, apesar desta definição, Waahnfried & Hirata (2005) também destacam que em muitas situações o PPP é conflitante a interesses econômicos, sendo necessário um equilíbrio bem planejado entre o desenvolvimento das cidades e a segurança hídrica dos cidadãos.

Quando este equilíbrio não é atingido, o aquífero se torna alvo de potenciais contaminações, que podem gerar danos materiais e imateriais de difícil recuperação e elevado prejuízo. Ainsworth & Jehn (2005) destacam que um dos principais benefícios da proteção das águas subterrâneas diz respeito ao custo-benefício entre proteger as águas e remediá-las.

Alguns casos já ficaram famosos pelo prejuízo causado perante um contaminante, destacando-se o caso de Orange, Califórnia, onde uma contaminação por Nitratos, sais, selênio e VOC's (volatile organic compounds) causou um prejuízo de 54 milhões de dólares divididos entre remediação das áreas contaminadas, tratamentos suplementares e troca da fonte de abastecimento na cidade (Ainsworth & Jehn, 2005). Também se destaca a cidade de Rockford, Illinois, contaminada por solventes, gerando um custo de 11,5 milhões de dólares para alteração do sistema público de abastecimento, que foi conectado a poços privados (Ainsworth & Jehn, 2005).

2.3.2 Método de cálculo

Atualmente o avanço das tecnologias permite uma ampla gama de métodos de cálculo para o PPP, sendo responsabilidade de cada país ou estado legislar acerca do método recomendado em seu território.

Internacionalmente, os Estados Unidos da América e a Europa podem ser considerados referência em relação ao Perímetro de Proteção de Poços (Cabelera da Silva, 2019).

No caso dos Estados Unidos, já em 1986 foi criado o Programa de Proteção de Poços, através da "Safe Drinking Water Act" traduzida como "Lei da água potável segura" instituída em 1974 (Estados Unidos da América, 1974).

Com base nesta lei, a USEPA (United States Environmental Protection Agency) criou o "Guia para Delineação de Perímetros de Proteção de Poços" baseado em seis métodos de análise dos PPPs: Raio fixo arbitrário, raio fixo calculado, formas variadas, métodos analíticos, mapeamento hidrogeológico e modelos numéricos de transporte (USEPA, 1987). Estes métodos variam do primeiro para o último, em termos de confiabilidade e de preço, sendo o modelo numérico o método considerado por Foster et al (2003) como o mais confiável, porém com custo mais elevado.

Em termos práticos, a principal diferença do Raio Fixo Calculado, assim como do Raio Fixo Arbitrário, para os demais, é que este resulta em um raio perfeitamente circular, ou seja, o raio em todo o entorno do poço é o mesmo. Já os demais métodos consideram a área de captura do poço e o sentido do fluxo do aquífero no local, apresentando resultados assimétricos com raios menores a jusante do poço em relação a montante (considerando a potenciometria do aquífero) (Cabelera da Silva, 2019).

Cabelera da Silva (2019) testou três diferentes métodos de cálculo para PPPs no aquífero Caiuá (Figura 6), sendo eles o Raio Fixo Calculado, o método de Wyssling (1979) e a Modelagem Numérica (MN) resultando em PPPs para um tempo de transporte de 50, 500 e 1825 dias.

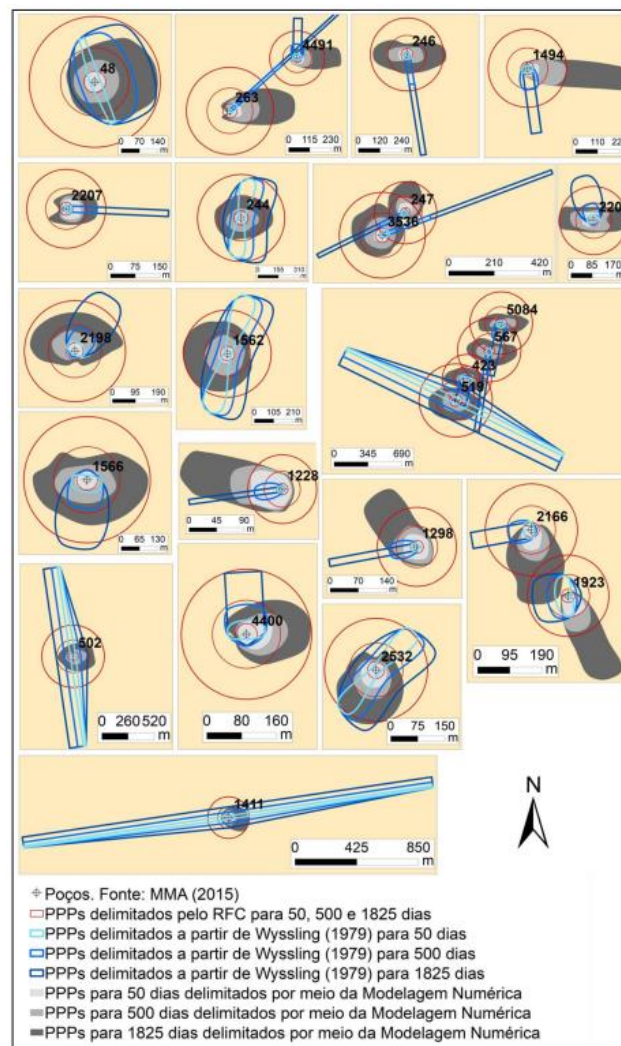


Figura 6: PPPs definidos por Cabelera da Silva (2019)
 Fonte: Cabelera da Silva (2019)

A autora concluiu, analisando o tempo para aplicação de cada um dos métodos versus a acurácia dos resultados, além da relação entre si dos resultados de diferentes

métodos, que o método de Raio Fixo Calculado é o mais recomendado para aplicação no aquífero Caiuá, sendo assim, os PPPs obtidos por este método serão considerados como base para este trabalho (Cabelera da Silva, 2019).

Considerando estas diferenças, o Raio Fixo Calculado tende a ser mais conservador em relação a Jusante do poço, embora a área final do Perímetro de Proteção tenha tendência de similaridade entre os métodos aplicados no aquífero Caiuá (Cabelera da Silva, 2019).

USEPA (1987) também destaca que a escolha do método que definirá o Perímetro de Proteção de Poços não pode limitar-se a custo e tempo de aplicação, devendo ser consideradas também as questões técnicas associadas ao método, por exemplo a disponibilidade de profissional qualificado para aplicar o método assim como a disponibilidade dos dados acerca do aquífero naquele local.

Também devem ser consideradas as questões políticas, já que os governantes responsáveis pela elaboração das leis em relação a proteção de recursos hídricos devem, idealmente, conseguir compreender os princípios do método de cálculo e o significado de seus resultados na prática (USEPA, 1987).

As variáveis descritas e especialmente a variação no preço e complexidade faz com que muitos locais acabem aderindo ao método do Raio Fixo Calculado, mesmo em países como os Estados Unidos, que já são considerados avançados no tema, porém tem 26 de seus 37 estados utilizando deste método (Raymond et al, 2006).

No Brasil, a situação é similar já que o estado de São Paulo, por exemplo, estabelece na Lei nº 6.134 de 02 de Junho de 1988, em seu artigo 24 que é obrigatório um perímetro de 10 metros de proteção sanitária do poço (São Paulo, 1988). Já o artigo 25 estabelece que além deste primeiro perímetro deve ser estabelecido um perímetro de alerta, no qual deverá ocorrer atenção a extrações e controle de fontes poluidoras, além de restrições a novas atividades poluidoras. Este perímetro é calculado (raio fixo) com base no tempo de trânsito no aquífero de 50 dias (Estado de São Paulo, 1991).

O tempo de trânsito é uma medida quantitativa referente ao tempo que a água subterrânea leva para se transportar de um ponto ao outro, ou seja, um aquífero com elevadas velocidades de fluxo, irá transportar um contaminante mais rapidamente entre a fonte e um ponto de captação (USEPA, 1987).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa desta metodologia consistiu na seleção dos poços a serem analisados. Entre os 51 poços, localizados sobre o aquífero Caiuá e que foram utilizados para a elaboração da carta das águas, 45 possuem dados de concentração de Nitrato, sendo entre estes, realizada a escolha dos poços. Os poços de monitoramento utilizados por MMA (2015) podem ser visualizados no Anexo 1.

A partir dos poços com concentrações de Nitrato disponíveis, foi realizada a partir do Microsoft Excel, a confecção da tabela em percentis, referente aos dados disponíveis. Este modelo de legenda é ideal, pois considera os valores de cada ponto, assim como a quantidade total de pontos disponíveis (considerando que um percentil equivale ao valor de 1% dos dados avaliados).

Os percentis utilizados foram de 5, 15, 25, 40, 50, 65, 75, 85, 90, 91, 93, 95, 97, 98 e 99%, sugeridos por Licht (2001). A partir desta legenda foram selecionados 2 poços equivalentes aos maiores percentis, além do poço referente ao valor máximo, acompanhados de 2 poços com os percentis mais baixos e do ponto com valor mínimo. Totalizando 6 valores de concentração de Nitrato para análise. Os poços selecionados, estão descritos na tabela 1.

Tabela 1: Poços selecionados para análise detalhada

Poço	Concentração de Nitrato no poço (mg/L)	Concentração Percentil (mg/L)	Percentil
5109	102,54	-	Valor máximo
ND	-	74,87	99
ND	-	47,21	98
1117	38,2	34,94	97
5089	26,96	24,35	95
5206	9,55	9,54	93
5389	0,84	0,84	15
5399	0,84	0,84	15
5005	0,22	0,23	5
5196	0,22	0,23	5
5395	0,005	-	Valor mínimo

*ND: Não Disponível (Nenhum poço apresenta concentração de Nitrato próxima ao Percentil)

Fonte: Elaborada pela autora com base nos poços de MMA,2015

É observado que não havia, entre os poços disponíveis, teores de nitrato referentes aos percentis de 99 e 98, sendo assim, optou-se por utilizar os percentis de 97 e 95. Além disso, nos percentis 5 e 15, foram encontradas duas

correspondências de teor de Nitrato para cada poço, optando-se por utilizar ambos os poços, de modo a adicionar aos comparativos, dois poços de mesma concentração de Nitrato. Totalizando 9 poços selecionados para análise de uso e ocupação em seu entorno, estando a localização destes poços apresentada na Figura 7.

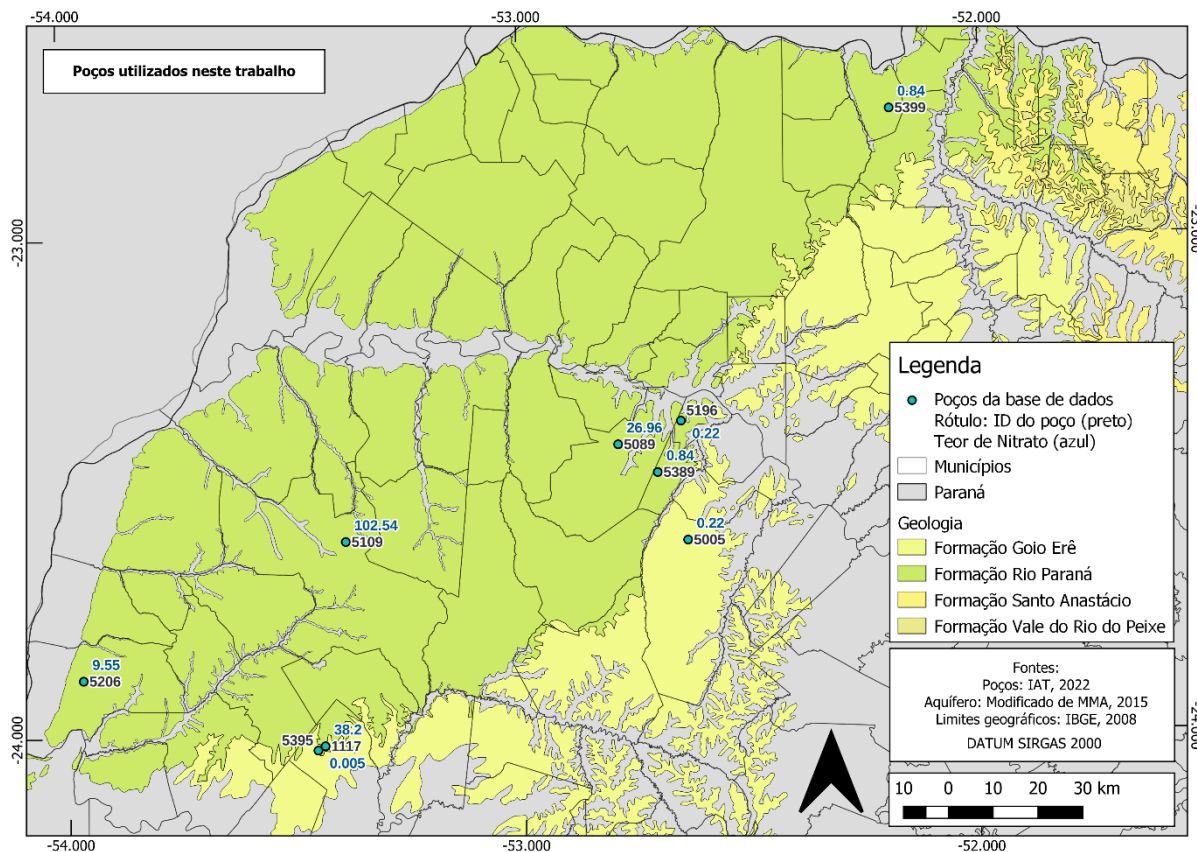


Figura 7: Mapa de poços selecionados para o trabalho
Fonte: Modificado de MMA, 2015

Para definição do raio a ser observado em relação ao uso e ocupação do solo, ou seja, para estabelecer o Perímetro de Proteção do Poço, seguiu-se o recomendado por Cabelera da Silva (2019) que pontua a confiabilidade do método do “Raio Fixo Calculado”. Considerando o mapa já disponível na bibliografia de Cabelera da Silva (2019) realizou-se o georreferenciamento do mapa de PPPs elaborado pela autora para o aquífero Caiuá, utilizando-se a legenda de 50 dias e de 1825 dias, sendo que ambos os raios foram analisados no mapa de uso e ocupação do solo.

As análises de teor de Nitrato de MMA (2015) não possuem registro da data de coleta das amostras, assim, foram utilizadas imagens históricas (anteriores a 2015) para verificar a tendência de origem do Nitrato até o momento máximo de coleta (que seria anterior a publicação da Carta das Águas, portanto, anterior a 2015) obtidas a partir do software Google Earth.

Visando verificar a tendência futura dos teores de Nitrato associados ao uso e ocupação do solo, também se utilizou as imagens entre o ano de 2015 e o momento atual, também a partir do Google Earth.

Todas as imagens da série histórica foram salvas em formato JPEG (Joint Photographic Experts Group) e foi realizada a comparação visual entre as imagens para verificar as alterações ocorridas em cada Perímetro de Proteção de Poço com o passar dos anos.

O parâmetro de comparação para análise das alterações nas áreas, foram mapas, confeccionados via software QGIS (QGIS, 2021) e contendo legendas detalhadas do uso e ocupação do solo atual no entorno de cada um dos poços. Para confecção destes mapas foi realizada uma integração entre Google Satélite, Street View, Google Hybrid (Imagens de satélite com pontos cadastrados com nomes de comércios, estradas etc.), com imagens obtidas a partir do Plugin QuickMapServices (NextGIS, 2022) e demais informações disponíveis na internet acerca dos endereços localizados dentro do perímetro analisado.

Para confecção do mapa de uso e ocupação do solo, foram utilizadas legendas, detalhadas a seguir na Tabela 2.

Tabela 2: Detalhamento das legendas aplicadas ao mapa de uso e ocupação do solo

Rótulo	Descrição
Acesso terra	Estrada de menores proporções utilizada para acesso a residências ou para percorrer plantações, por exemplo.
Área alagada	Área com corpo d'água visível e persistente na análise histórica
Área arborizada	Área coberta integralmente por árvores, geralmente associada a vegetação nativa
Área de pastagem	Área verde com vegetação baixa, geralmente próxima a alguma chácara e delimitada por cercas ou muros
Área residencial	Área com predominância de edificações residenciais. Esta categoria pode incluir pequenos comércios sem potencial poluidor como lojas de conveniência, supermercado, padaria etc.
Chácara	Área com pelo menos uma construção residencial, cercada por instalações agrícolas (área de plantação, área

	de pastagem, área arborizada e/ou instalações para criação animal).
Edificação	
Escola	Delimitação de área ocupada por Instituição Educacional.
Estrada asfalto	Estrada pública com cobertura asfáltica.
Estrada terra	Estrada pública sem cobertura asfáltica.
Galpão	Edificação coberta, maior que uma residência, geralmente próxima a plantações ou área de pastagem. Provavelmente associado a manutenção e estoque de equipamentos para manejo de animais e plantas
Pequenas indústrias	Área com predominância de indústrias de pequeno porte
Plantação	Área ocupada por cultivos controlados. Possui potencial poluidor associado ao uso de fertilizantes
Plantação arbórea	Área com plantações arbóreas não nativas, relacionadas a árvores frutíferas.
Praça	Área inserida em ambiente urbano contendo árvores e calçamento para caminhada. Área de lazer em meio a ambiente urbano.

Fonte: Elaborada pela autora

Além destas legendas, foram utilizados pontos para identificar áreas ou edificações não contempladas por estes itens, mas que também possuem relevância na identificação de possíveis fontes de contaminação na área.

Todos os mapas foram salvos em formato PDF e JPG contemplando a possibilidade de uso deles em meio ao texto ou como anexos, a depender da necessidade. O layout do mapa considerou a área avaliada definida pelo PPP e contempla legenda, escala e norte.

Para avaliação dos mapas ocorreu a descrição textual dos itens localizados em cada um dos mapas, seguido pela análise do histórico da área. Com base nestas informações foi realizada a comparação entre os usos identificados e os teores de Nitrato do poço equivalente àquele perímetro.

Nesta etapa de análise foram observadas similaridades e diferenças entre pontos com teores elevados ou com teores baixos do Nitrato, visando identificar padrões. Todas as semelhanças e diferenças entre a relação uso e teor de nitrato foram descritas no texto do trabalho e comparadas para a elaboração da conclusão.

Após a análise da relação entre uso e ocupação e os teores de nitrato foi realizada uma comparação multielementar entre os poços, feita para auxiliar no rastreio das possíveis origens de contaminação na água subterrânea, comparando parâmetros químicos elevados e suas prováveis origens.

A análise iniciou com a detecção da correlação entre os elementos, realizada a partir de todos os poços disponibilizados por MMA (2015). Esta correlação visa determinar padrões de aumento ou diminuição de resultados de análises químicas que possuam seus elementos correlacionados de alguma forma dentro do aquífero Caiuá.

Esta correlação pôde ser identificada a partir de uma matriz de correlação gerada via plugin do Microsoft Excel e transformada em recurso gráfico a partir do aplicativo EzCorrGraph (Campos e Licht, 2020).

O resultado da correlação é um índice numérico que indica o grau de correlação entre dois elementos, ou seja, o quanto ambos os elementos possuem tendências de comportamento similar dentro do banco de dados observado.

Este índice numérico pode ser classificado entre Perfeito (=1), Forte (0,8 a 1), Moderado (0,5 a 0,8), Fraco (0,1 a 0,5), ínfimo (menor que 0,1) ou nulo (=0), indicando através deste índice o grau de correlação entre dois elementos (Santos, 2007).

As discussões e conclusões do trabalho foram elaboradas com base em todos os métodos aplicados e descritos neste capítulo.

4. RESULTADOS

4.1 Perímetro de proteção de poços

Os poços previamente selecionados foram plotados no mapa de Cabelera da Silva (2019) onde foram obtidos os Perímetros de Proteção do Poço, para tempos de retorno de 50 e 1825 dias (Tabela 3).

Estes perímetros foram dispostos nos mapas de uso e ocupação do solo e discutidos individualmente, por poço, conforme apresentado nos itens 4.2 a 4.10 a seguir.

Tabela 3: PPPs dos poços selecionados para análise

Poço	PPP para 50	PPP para 1825
5109	51,9m	313,6m
1117	24,5m	147,9m

5089	43,0m	259,9m
5206	32,2m	194,5m
5389	43,0m	259,9m
5399	64,4m	389,0m
5005	43,0m	259,9m
5196	51,9m	313,6m
5395	36,7m	221,7m

Fonte: Modificado de Cabelera da Silva (2019)

4.2 Poço 5109

4.2.1 Descrição do poço

O poço 5109, localiza-se no município de Umuarama, localidade de Serra dos Dourados. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, os teores de Mn e NO³ encontram-se acima do Valor Máximo Permitido (VMP) pela legislação para águas destinadas ao consumo humano. Além disso, este é o poço que apresenta maior de Nitrato entre os poços avaliados, possuindo um teor de 102,54 mg/L de Nitrato.

De acordo com as cotas topográficas registradas no Google Earth, a parte central do mapa, próxima ao poço, trata-se da porção mais alta do terreno contemplado pelo PPP de 1825 dias. Ou seja, provavelmente o fluxo subterrâneo segue do centro para as bordas do mapa, localizando-se a menor cota topográfica a oeste do poço 5109.

O PPP definido para este poço foi de 51,9m para o tempo de transporte de 50 dias e 313,6m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na Figura 8.

4.2.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

Dentro do perímetro de 50 dias de tempo de transporte está localizada a Avenida principal da localidade de Serra dos Dourados, uma avenida de mão dupla, asfaltada e com canteiro central arborizado. Beirando esta rodovia há uma área residencial com presença de residências e pequenos comércios sem potencial poluidor, como lojas de conveniência, padarias e pequenos mercados.

Em relação ao PPP para 1825 dias, de forma mais próximo ao poço mantém-se a predominância de área residências com comércios sem potencial poluidor. Há também um campo de futebol, uma praça, instalações religiosas (igreja e instalações operacionais da mesma e uma escola.

A Sudoeste do perímetro o ambiente torna-se mais rural, contendo chácaras e áreas de pastagem (grama baixa) provavelmente associadas a pastagem de bovinos. Pequenas estruturas incluídas nos ambientes de chácara também podem estar associadas a outras criações animais como porcos ou galinhas. A disposição dos diferentes usos dentro do perímetro encontra-se na Figura 8.

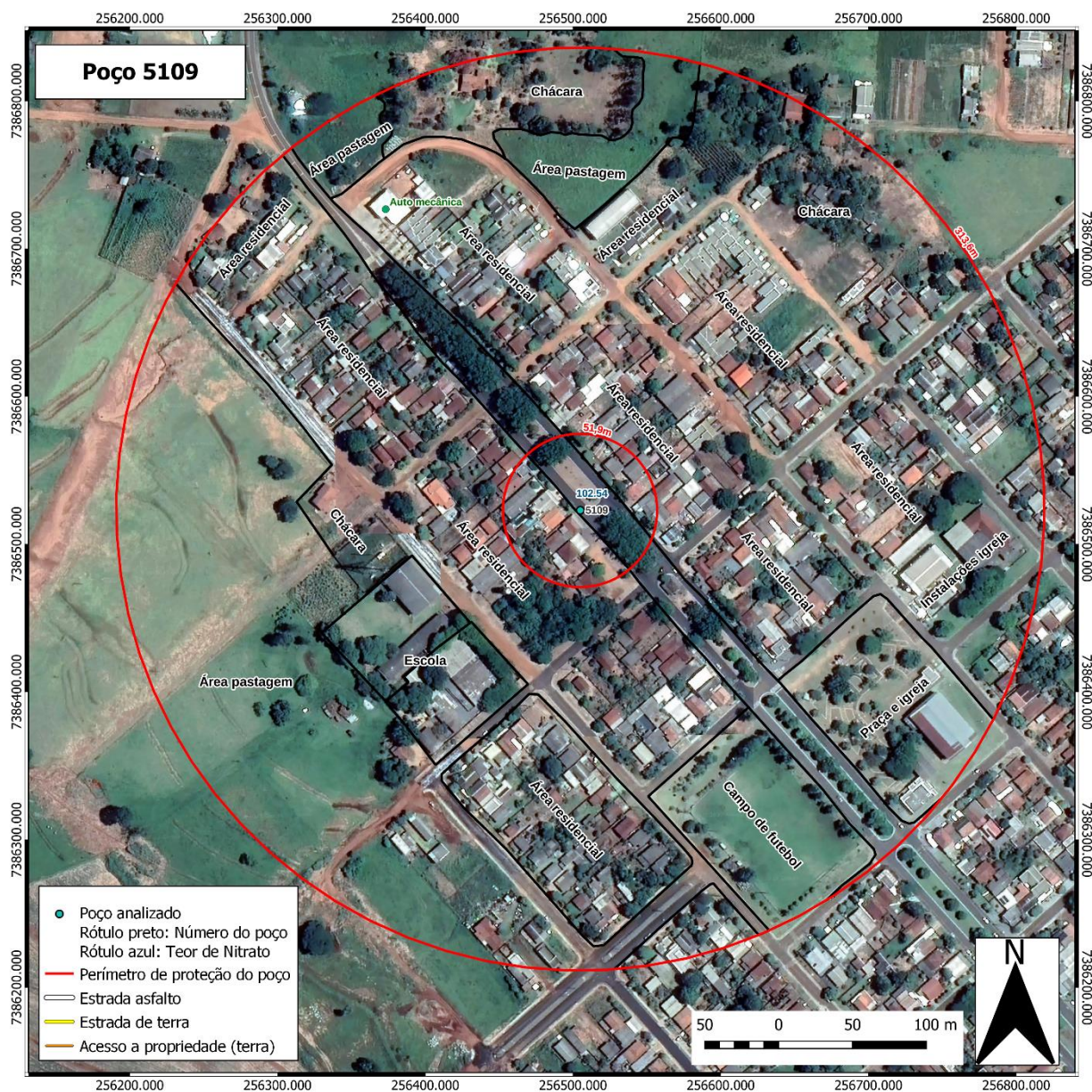


Figura 8: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5109
Fonte: Elaborado pela autora

Em relação ao histórico da área, a primeira alteração observada ocorre entre os anos de 2013 e 2016, com o corte de árvores localizadas na margem oeste do PPP de 1825 dias. Nesta mesma região havia um galpão de forma alongada e estreita,

provavelmente associado a criação animal e que foi demolido entre estes mesmos períodos.

Voltando para o ano de 2012, não acontecem mudanças substanciais em relação ao ano de 2013 e assim como atualmente a área do entorno do poço encontra-se substancialmente urbanizada.

Em relação a imagem mais antiga, de 1985, a ocupação da área parece ser menos urbanizada, com menos residências e com a estrada principal que corta o perímetro ainda como estrada de terra. No entanto, a qualidade da imagem de 1985 compromete análises mais detalhadas.

A série histórica de imagens de satélite dos PPPs do poço podem ser encontradas no Anexo 2

4.3 Poço 1117

4.3.1 Descrição do poço

O poço 1117 localiza-se no município Alto Piquiri. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, um dos valores divergentes do permitido pela legislação é o pH que encontra-se em 5.38, valor abaixo da faixa recomendada. Além disso, este é o poço que apresenta o segundo maior valor de Nitrato entre os poços avaliados, estando também acima do permitido pela legislação, com um teor de 38,2 mg/L de Nitrato.

A topografia do terreno indica um provável sentido de fluxo em direção a N/NE. Esta teoria é reforçada pela área arborizada que compõe a porção superior do raio de 1825 dias, que está associada a drenagem.

O PPP definido para este poço foi de 24,5m para o tempo de transporte de 50 dias e 147,9m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na figura 9.

4.3.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

O ambiente que compõe o entorno deste poço trata-se, predominantemente, de um ambiente rural. No raio de tempo de transporte de 50 dias encontra-se apenas árvores e área verde, referente a um ambiente destinado a pastagem.

No raio de 1825 dias permanece a predominância do ambiente rural, no entanto, já ocorre a presença de pequenas áreas residenciais, principalmente no sudoeste do raio. Os acessos a este poço e em seu entorno são todos constituídos por estradas de terra, sem nenhum ponto de revestimento asfáltico.

A maior parte deste raio está ocupada por áreas de pastagem associadas a áreas arborizadas, a uma chácara e a um galpão provavelmente utilizado para cuidados com os animais que pastam pela área verde. A chácara possui pequenas instalações provavelmente para criação de pequenos animais, como galinhas.

A disposição das ocupações e acessos estão dispostas na Figura 9.

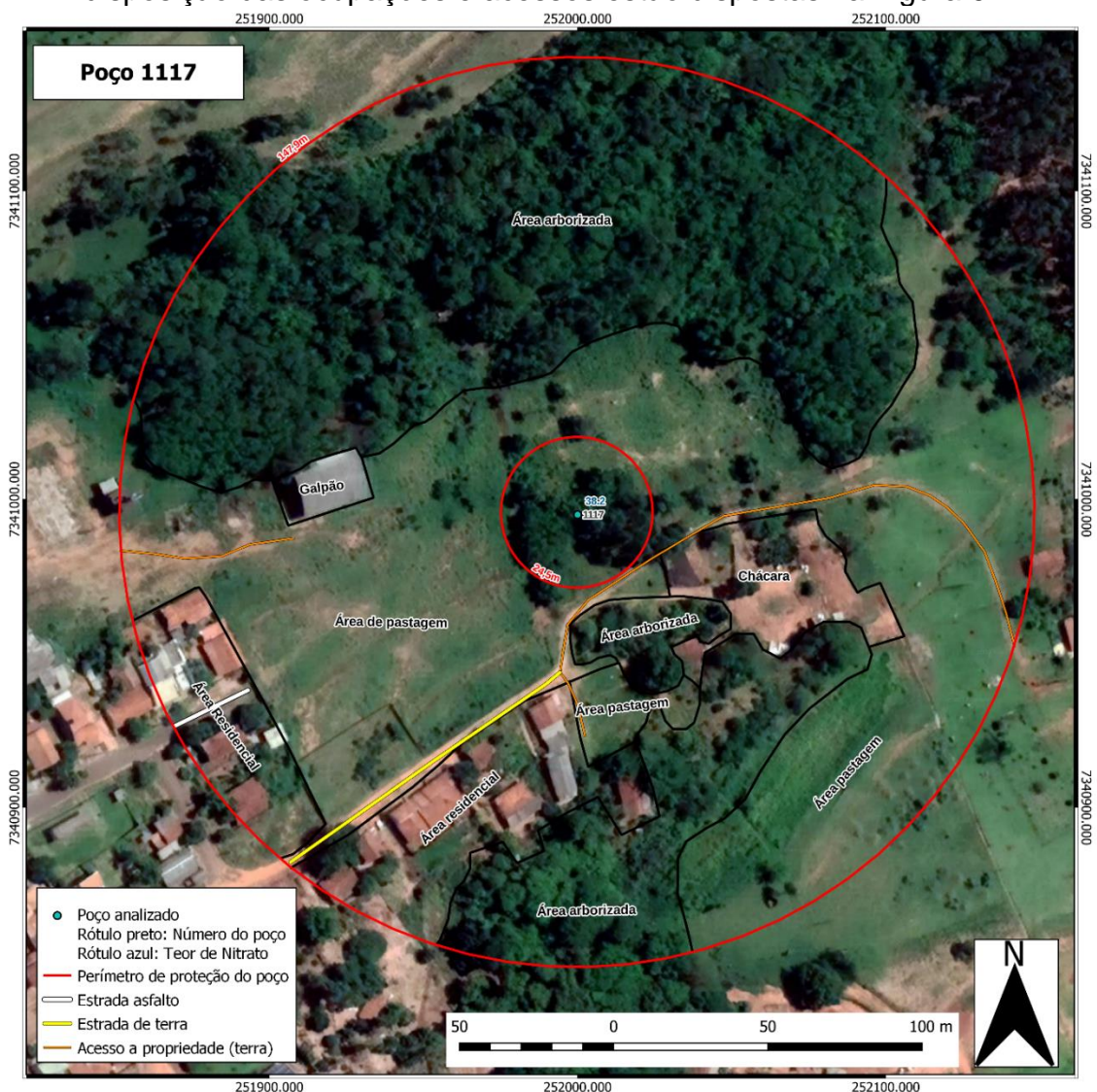


Figura 9: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 1117

Fonte: Elaborado pela autora

Observando o histórico da área, é percebida uma mudança entre 2020 e 2021, com a remoção de parte da área arborizada, que atualmente compõe área de pastagem. Esta remoção ocorreu imediatamente a norte do raio de 50 dias.

A mudança mais significativa observada ocorre a oeste do poço, dentro do raio de 1825 dias, onde até o ano de 2011 funcionava um depósito de madeira, que já não aparece na imagem de 2016 (primeira imagem posterior a 2011).

Em 2005 também percebe-se a intensa atividade relacionada a extração madeireira, com o depósito a oeste do poço. Este ano consiste na análise mais antiga possível, visto que neste caso a imagem de 1985 não possui nitidez suficiente, além de estar no encaixe de duas fotos do fotomosaico que compõe a imagem de satélite, não possibilitando nenhuma conclusão expressiva.

A série histórica de imagens de satélite dos PPPs do poço podem ser encontradas no Anexo 3.

4.4 Poço 5089

4.4.1 Descrição do poço

O poço 5089, localiza-se no município de Rondon. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, o pH (5,62) e a turbidez (2 unidades de turbidez) encontram-se fora do permitido pela legislação. O teor de Nitrato neste poço também é elevado e está em desacordo com o padrão de potabilidade, possuindo 26,96 mg/L de Nitrato.

A topografia da área passa possui uma depressão localizada no ponto onde encontra-se o poço com um perímetro de aproximadamente 70m. Além desta depressão o escoamento e possivelmente o fluxo subterrâneo se dá do centro da área sentido ao norte.

O PPP definido para este poço foi de 43,0m para o tempo de transporte de 50 dias e 259,9m para 1825 dias.

4.4.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

O poço 5089 também está localizado em ambiente rural. No raio de 50 dias localiza-se a principal estrada da área, que é uma estrada de terra que corta todo o perímetro analisado. Neste primeiro raio há apenas plantações e áreas arborizadas.

Em relação ao raio de 1825 dias, predominam as áreas de plantação. Analisando a imagem de satélite, com base nas variações de coloração e textura na imagem, parece ocorrer o cultivo de pelo menos três espécies de plantas dentro do perímetro analisado.

Outro aspecto deste perímetro é a criação animal que acontece a sudoeste e noroeste do PPP de 1825 dias, sendo evidenciado pelas áreas de pastagem e por uma edificação estreita e alongada, provavelmente associada ao ambiente de descanso e manejo dos animais. Entre as duas áreas de pastagem identificadas, existe também uma área arborizada. A disposição dos usos e ocupações e os acessos da área estão disponíveis na Figura 10.

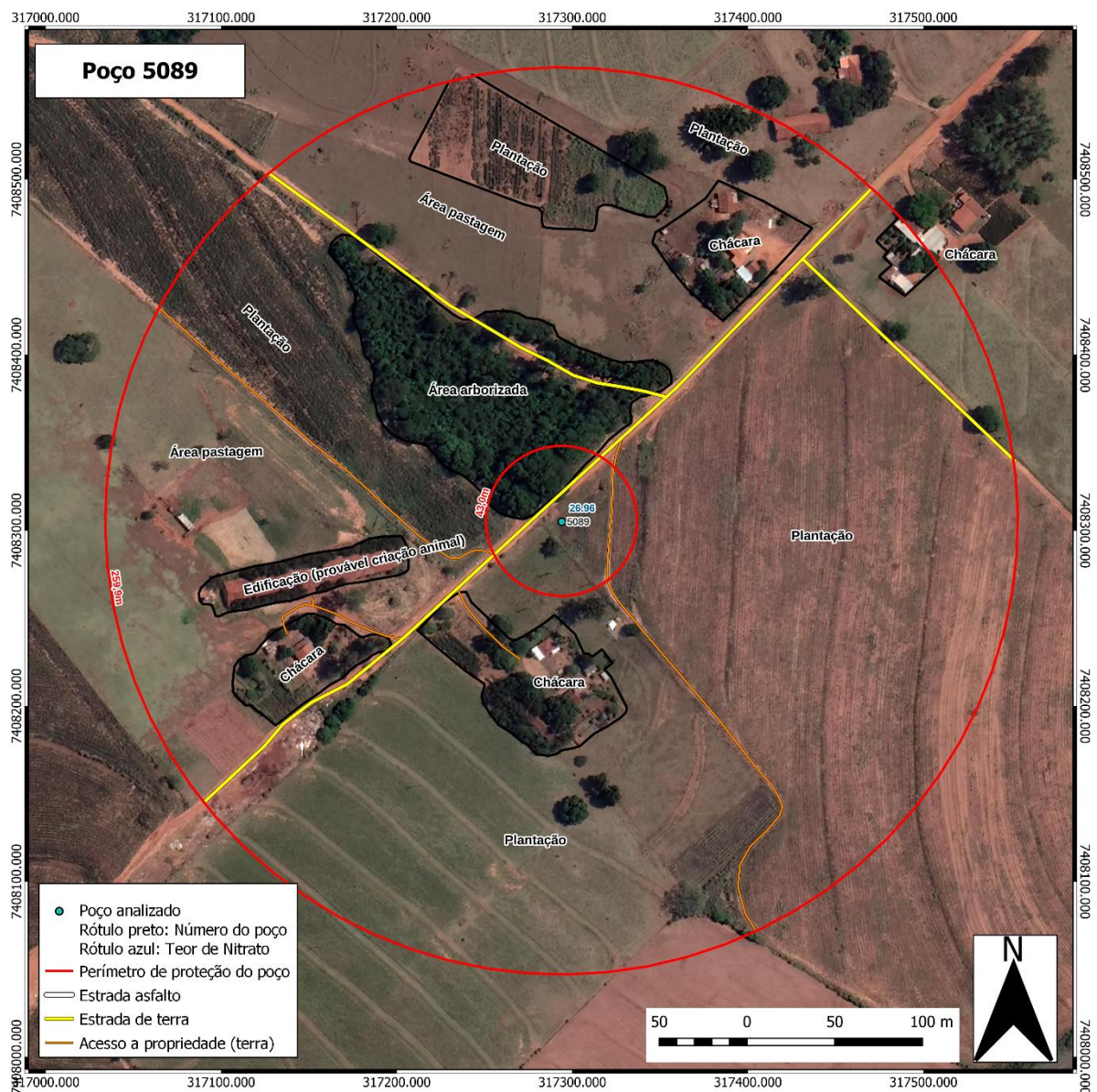


Figura 10: Mapa de uso e ocupação do solo 5089

Fonte: Elaborado pela autora

Historicamente não foi observada nenhuma mudança significativa no uso e ocupação do solo na área analisada. Visualmente parecem ocorrer mudanças no tipo de cultivo com o passar do tempo, mas não surgem novas edificações ou tipos de uso do solo entre 2012 e 2022 (período com imagens disponíveis).

A série histórica de imagens de satélite dos PPPs do poço podem ser encontradas no Anexo 4.

4.5 Poço 5206

4.5.1 Descrição do poço

O poço 5206, localiza-se no município de Altônia, localidade de Serra da Moringa. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, o pH localizava-se fora da faixa recomendada pela legislação para águas destinadas ao consumo humano, possuindo o valor de pH=6,0. O teor de Nitrato deste poço é de 9,5 mg/L de Nitrato.

A topografia da área indica um provável fluxo subterrâneo com direção de SW para NE, dentro do perímetro de 1825 dias.

O PPP definido para este poço foi de 32,2m para o tempo de transporte de 50 dias e 194,5m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na figura 11.

4.5.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

No entorno analisado do poço 5206, em ambos os tempos de transporte, o uso do solo é caracterizado como ambiente rural, visto que não há nenhuma edificação na área, apenas área de plantio e pastagem.

No raio de 50 dias, tem-se a Leste plantações de árvores, provavelmente frutíferas, dada a forma das plantas e a disposição retilínea, que indica que estas árvores foram colocadas no local por meio de atividade antrópica. A Oeste tem-se plantações rasteiras. Não há acessos delimitados visíveis nesta parte do mapa.

No raio de 1825 dias, mantem-se a presença de plantações rasteiras em toda a parte sudoeste e parte do noroeste do raio, alterando o uso nesta porção apenas no extremo noroeste que é constituído por áreas de pastagem. Há uma faixa de plantações arbóreas, sendo continuação do trecho descrito no raio menor. Nos extremos norte e sul desta plantação arbórea, há algumas árvores nativas do local.

O leste do raio de 1825 dias é constituído por mais plantações rasteiras, associadas a algumas árvores nativas. A estrada principal que corta a área é de terra, assim como os pequenos acessos as plantações.

A disposição dos diferentes usos dentro do perímetro encontra-se na Figura 11.

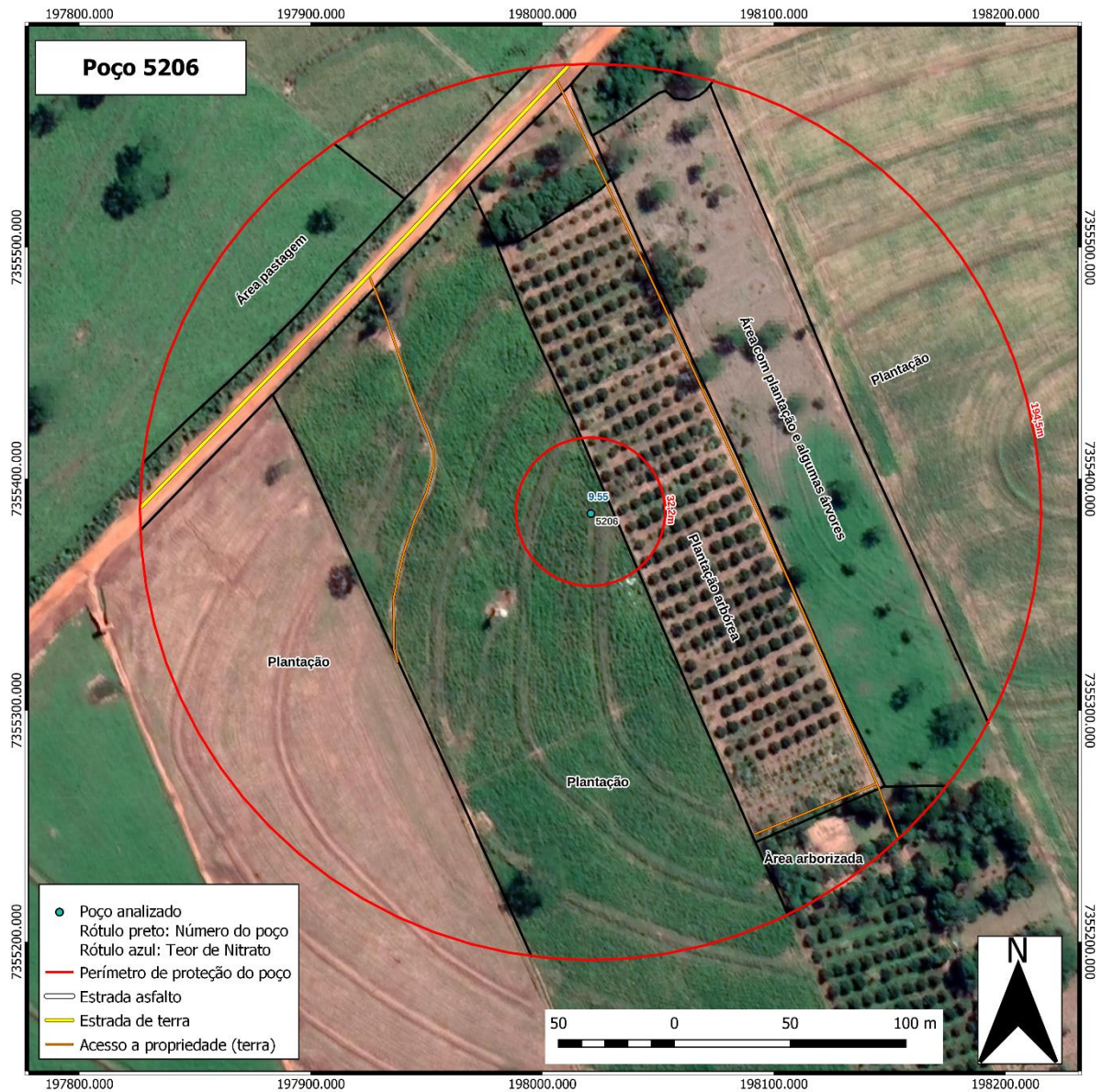


Figura 11: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5206
Fonte: Elaborado pela autora

Em relação ao histórico da área, a principal mudança no período analisado, diz respeito ao tipo de cultivo realizado na área. Entre 2016 e 2017 é percebida uma remoção da vegetação, deixando o solo exposto para em seguida, no ano de 2018, surgirem as primeiras plantações arbóreas.

Além disso, entre junho de 2016 e novembro de 2017, uma pequena porção de área arborizada, localizada ao norte do perímetro de 1825 dias, é removida e substituída por plantações.

A série histórica de imagens de satélite dos PPPs do poço podem ser encontradas no Anexo 5.

4.6 Poço 5389

4.6.1 Descrição do poço

O poço 5389, localiza-se no município de Indianópolis. Entre os parâmetros avaliados deste poço, o pH localizava-se fora da faixa recomendada pela legislação para águas destinadas ao consumo humano, possuindo o valor de pH=5,98. O teor de Nitrato deste poço é de 0,84 mg/L de Nitrato.

Considerando a topografia da área o fluxo subterrâneo deve apresentar uma tendência de movimentação de sul para norte/noroeste, dentro da área do perímetro de 1825 dias.

O PPP definido para este poço foi de 43,0m para o tempo de transporte de 50 dias e 259,9m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na figura 12.

4.6.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

O poço 5389 tem seu PPP inserido em ambiente urbano, predominando os usos residenciais em ambos os perímetros observados (Figura 12).

No raio de 50 dias, a única ocupação do solo é referente a áreas residenciais. Em observação via Street View (Google maps) é possível confirmar que todas as edificações desta área são residências, sem comércios ou outros usos.

No raio de 1825 dias, apesar de permanecer a predominância de áreas residenciais, constam também outros tipos de edificações. A região nordeste do perímetro continua com quase a totalidade da ocupação sendo por área residencial, no entanto, neste trecho já ocorrem pequenos comércios sem potencial poluidor, além de uma borracharia localizada na avenida principal (Avenida Xavantes).

A área noroeste também mantém a predominância de área residencial, com exceção apenas para uma auto elétrica que localiza-se na avenida principal. A oeste

do poço há uma borracharia, um posto de gasolina e uma marmoraria, além de uma pequena plantação localizada a sul do posto de gasolina e da marmoraria.

A sudoeste há um campo esportivo (área toda coberta por grama e com algumas árvores), além de uma oficina mecânica e uma serralheria localizadas sobre e próximo ao raio de 1825 dias.

Ainda no sudoeste, próximo ao limite do perímetro, há uma área de plantações baixas, uma pequena área residencial e uma clínica de assistência médica.

Passando para o sudeste volta a predominância de áreas residenciais, com presença de uma escola com ginásio poliesportivo além de um hospital, um posto de saúde e uma área arborizada que extrapola para fora do perímetro analisado.

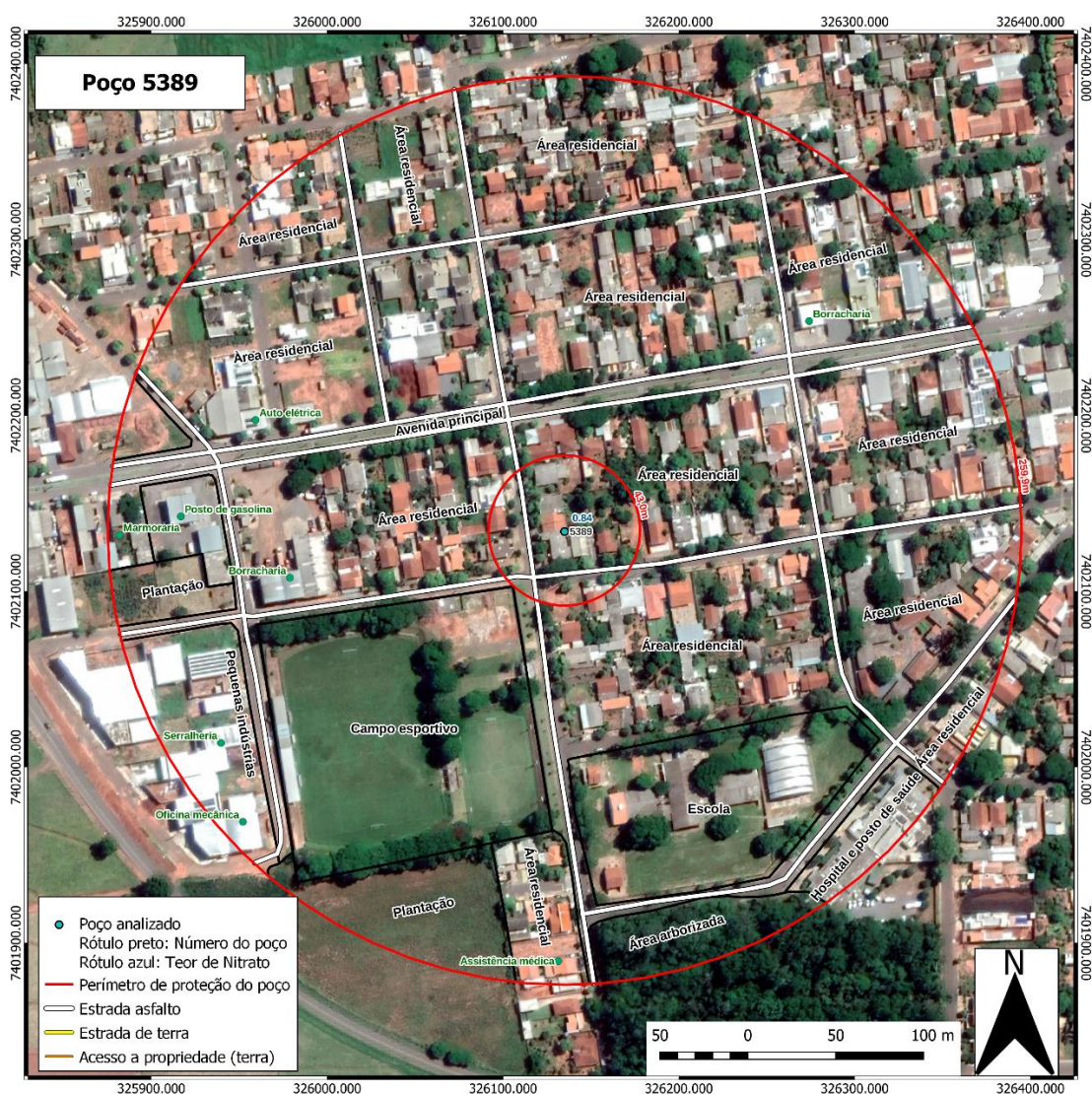


Figura 12: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5389
Fonte: Elaborado pela autora

Em relação ao histórico da área, pouco é alterado com o passar dos anos em termos de tipo de uso e ocupação. Em todo o período analisado permanece o uso predominantemente residencial, sendo que apenas surgem, gradativamente, novas residências dentro do perímetro entre 2011 e a 2022 (imagens disponíveis). Mesmo na imagem de 1985, apesar da baixa nitidez da imagem, a área já aparenta ter considerável ocupação residencial/urbana.

As imagens históricas analisadas, referentes ao poço 5389 podem ser visualizadas no anexo 6.

4.7 Poço 5399

4.7.1 Descrição do poço

O poço 5399, localiza-se no município de Inajá, localidade de Serra dos Dourados. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, o pH localizava-se fora da faixa recomendada pela legislação para águas destinadas ao consumo humano, possuindo o valor de pH=5,99. O teor de Nitrato deste poço é de 9,5 mg/L de Nitrato.

O poço 5399 está localizado em um alto topográfico, com queda de cotas topográficas em direção ao Norte da área. Espera-se uma tendência de fluxo subterrâneo com comportamento similar ao superficial.

O PPP definido para este poço foi de 64,4m para o tempo de transporte de 50 dias e 389,0m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na figura 13.

4.7.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

Os PPPs do poço 5399 estão inseridos em usos predominantemente rurais, apesar de estarem da área urbana da cidade que se localiza a oeste do poço.

Em relação ao raio de 50 dias, há apenas dois tipos de uso do solo contemplados, sendo eles os usos denominados “chácara” e “plantação”. Na chácara é observada uma única edificação, provavelmente respectiva a residência, com algumas árvores rodeando a construção. A plantação, considerando coloração e textura da imagem, parece ser referente a um mesmo tipo de cultivo em toda a área.

O perímetro menor é cortado pela rua Ronalde Gomes (rua asfaltada), principal acesso a área mais urbanizada da cidade. Além de uma estrada de terra utilizada para acessar as plantações ao norte deste perímetro.

Em relação ao raio de 1825 dias a predominância é de áreas de plantação, provavelmente, assim como no raio de 50 dias, associadas a um único tipo de cultivo em toda a área. Em meio as plantações é possível verificar pequenas edificações provavelmente associadas a manutenção e estoque de equipamentos utilizados no manejo das plantas.

Além das plantações há uma área de pastagem, localizada a sul do poço analisado. Também ao sul há um pequeno quadrante no qual parecem ocorrer pequenas escavações na terra e não foi possível identificar o tipo de uso, mesmo analisando as imagens históricas da área. O que é possível observar neste local é que a cobertura vegetal foi removida, permanecendo o solo exposto, além disso na parte sudoeste deste quadrante há o depósito de algum material, aparentemente ensacado, que pode ser associado as plantações do entorno, mas que não foi identificado pela imagem de satélite.

O raio de 1825 continua sendo cortado pela Rua Ronalde Gomes, possuindo, além desta, algumas estradas de terra e pequenos acessos dentro das plantações, também de terra. Os usos e ocupação do solo podem ser visualizados na Figura 13.

Em relação ao histórico da área, a principal mudança identificada está associada as edificações. A chácara dentro do perímetro de 50 dias surge apenas na imagem de 2014, juntamente com a área residencial localizada no sudoeste do raio de 1825 dias, que também surge neste mesmo momento.

Além das edificações não é observada nenhuma outra alteração nos tipos de uso do solo, já que mesmo com a baixa nitidez a imagem de 1985 já indica um predomínio de plantações na área com zonas residenciais ao oeste dos perímetros.

A série histórica de imagens de satélite dos PPPs do poço podem ser encontradas no Anexo 7.

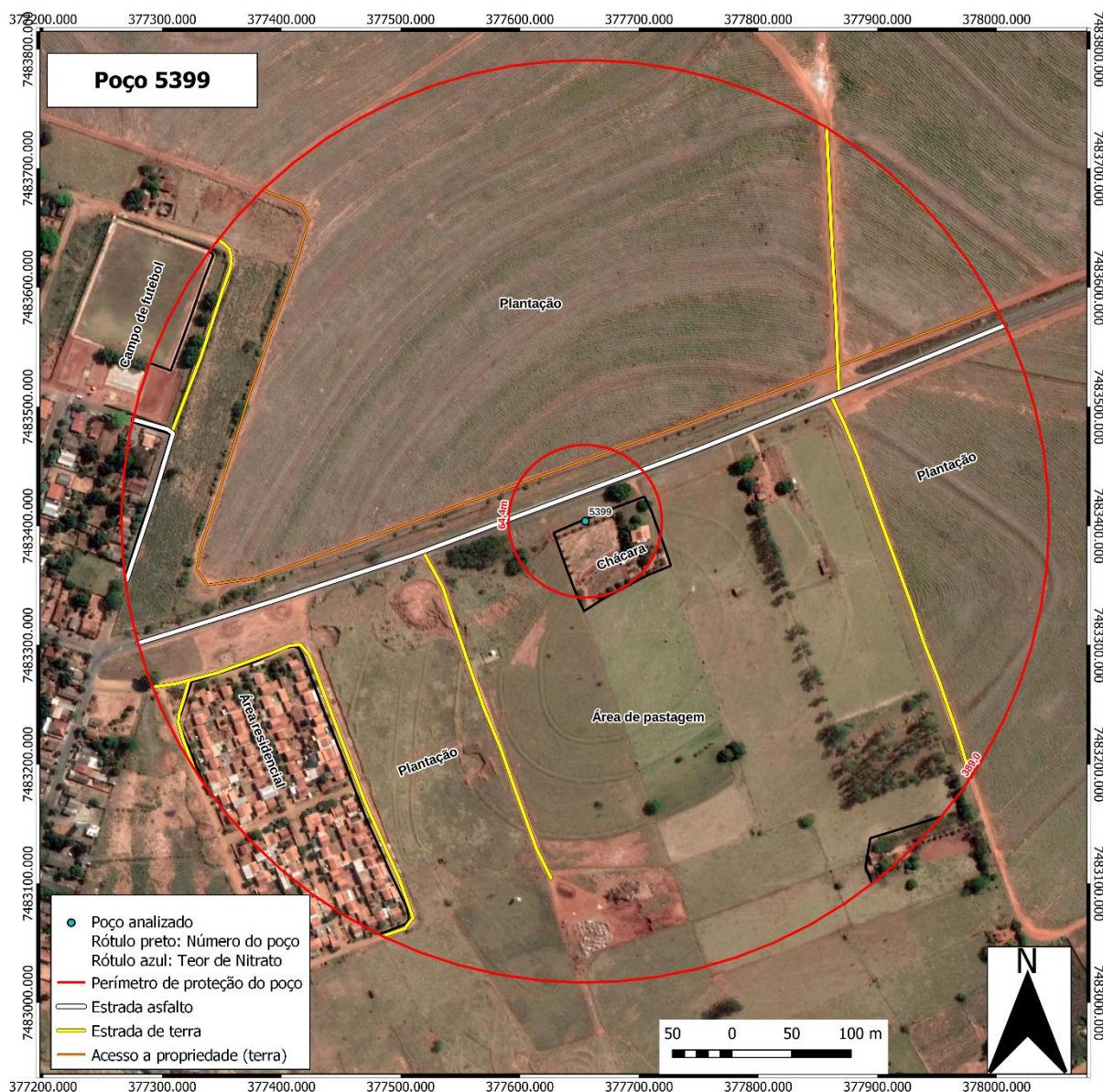


Figura 13: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5399
Fonte: Elaborado pela autora

4.8 Poço 5005

4.8.1 Descrição do poço

O poço 5005, localiza-se no município de Cianorte e está localizado a montante do Aterro Sanitário do município. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, o pH encontra-se fora da faixa recomendada pela legislação para águas destinadas ao consumo humano, possuindo um pH de 5,86. O teor de Nitrato deste poço é de 0,22 mg/L de Nitrato.

De acordo com a topografia, a cota topográfica mais alta dentro do PPP de 1825 dias localiza-se a oeste do poço e o fluxo subterrâneo deve ocorrer de SW para

NE. No entanto, é importante ressaltar que a porção do PPP localizada a oeste do poço passou por alterações em sua superfície ocasionadas pelo depósito de resíduos sólidos.

O PPP definido para este poço foi de 43,0m para o tempo de transporte de 50 dias e 259,9m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na figura 14.

4.8.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

O uso e ocupação do solo do poço 5005 encontra-se na Figura 14.

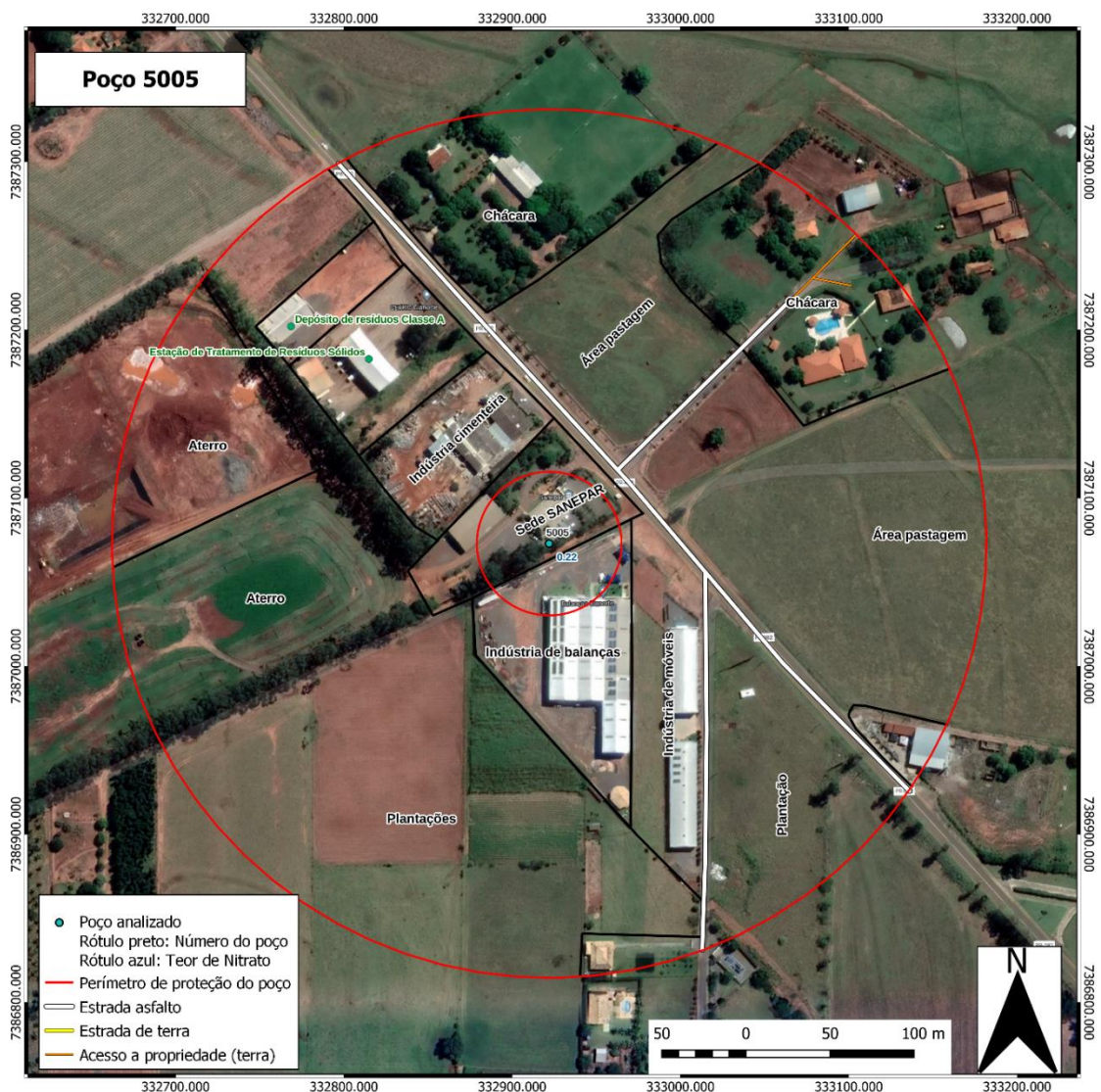


Figura 14: Mapa de uso e ocupação do solo no poço 5005
Fonte: Elaborado pela autora

O leste e norte do PPP é composto por chácaras (associadas a criação animal) e áreas de pastagem. Já a área oeste e noroeste é composta pelo aterro de destinação de resíduos sólidos, que aparentemente permanece em atividade.

A sudoeste e sudeste do poço, a prevalência é de áreas de plantação que aparentam possuir pelo menos dois tipos de cultivos distribuídos pela área. A disposição dos diferentes usos dentro do perímetro encontra-se na Figura 14.

Entre 2022 e 2023 ocorre a primeira pequena alteração visível no entorno. A parte sul do aterro de resíduos sólidos passa por um plantio de vegetação sobre a área aterrada, que passa a possuir uma coloração predominantemente esverdeada e com pouca exposição do solo. Este plantio pode indicar uma desativação do aterro que passa a operar predominantemente em sua porção norte.

Ainda em relação ao aterro, sua estrutura já está presente no entorno do poço desde o ano de 2006, passando por ampliações e modificações em sua forma no decorrer dos anos, mas não deixando de operar em nenhum momento.

Já as indústrias localizadas ao sul do poço surgem entre 2011 e 2013, passando por ampliação de suas estruturas nos anos de 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

As chácaras da área também estão presentes desde o início das análises de imagem (2006), sendo que a única alteração observada é o crescimento das árvores no entorno da chacara.

A série histórica de imagens de satélite dos PPPs do poço podem ser encontradas no anexo 8.

4.9 Poço 5196

4.9.1 Descrição do poço

O poço 5196, localiza-se no município de São Manoel do Paraná, na localidade de Estrada Paraíso. Dentre os parâmetros avaliados deste poço, o pH encontra-se fora da faixa definida pela legislação para águas destinadas ao consumo humano, possuindo um pH de 5,47. O teor de Nitrato deste poço é de 0,22 mg/L de Nitrato.

De acordo com a topografia, a tendência é que o fluxo subterrâneo possua uma direção partindo de SE para NW dentro do perímetro.

O PPP definido para este poço foi de 51,9m para o tempo de transporte de 50 dias e 313,6m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na Figura 15.

4.9.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

O uso e ocupação do solo no entorno do poço 5196 é associado ao ambiente rural, predominando as plantações. Este uso é, inclusive, o único uso dentro do perímetro de 50 dias, com exceção de um pequeno quadrante no qual ocorreu remoção da vegetação para implantação da associação de produtores agrícolas.

No raio de 1825 dias continuam predominando as plantações, ocorrendo, pela análise de cor e textura da imagem, a presença de pelo menos três tipos de cultivos, além da área arborizada localizada na região norte do perímetro.

Ao sul do poço, dentro deste perímetro, há duas edificações: uma chácara e um galpão pertencente a Associação de Produtores Agrícolas. A área onde este galpão está inserido é caracterizada por uma área majoritariamente sem vegetação, possuindo apenas algumas plantações na parte da frente do galpão, porém, de forma geral, o solo está exposto.

A disposição dos diferentes usos dentro do perímetro encontra-se na Figura 15.

Neste perímetro ocorrem poucas mudanças durante o período analisado. A primeira delas é uma pequena expansão no galpão da Associação de Produtores Agrícolas entre o ano de 2017 e 2018.

A segunda alteração na área diz respeito ao tipo de cultivo plantado na área, que parece passar por variações sazonais, de acordo com a cor e textura presentes nas imagens de satélite

Os usos e ocupações do solo na série histórica podem ser visualizados no Anexo 9.

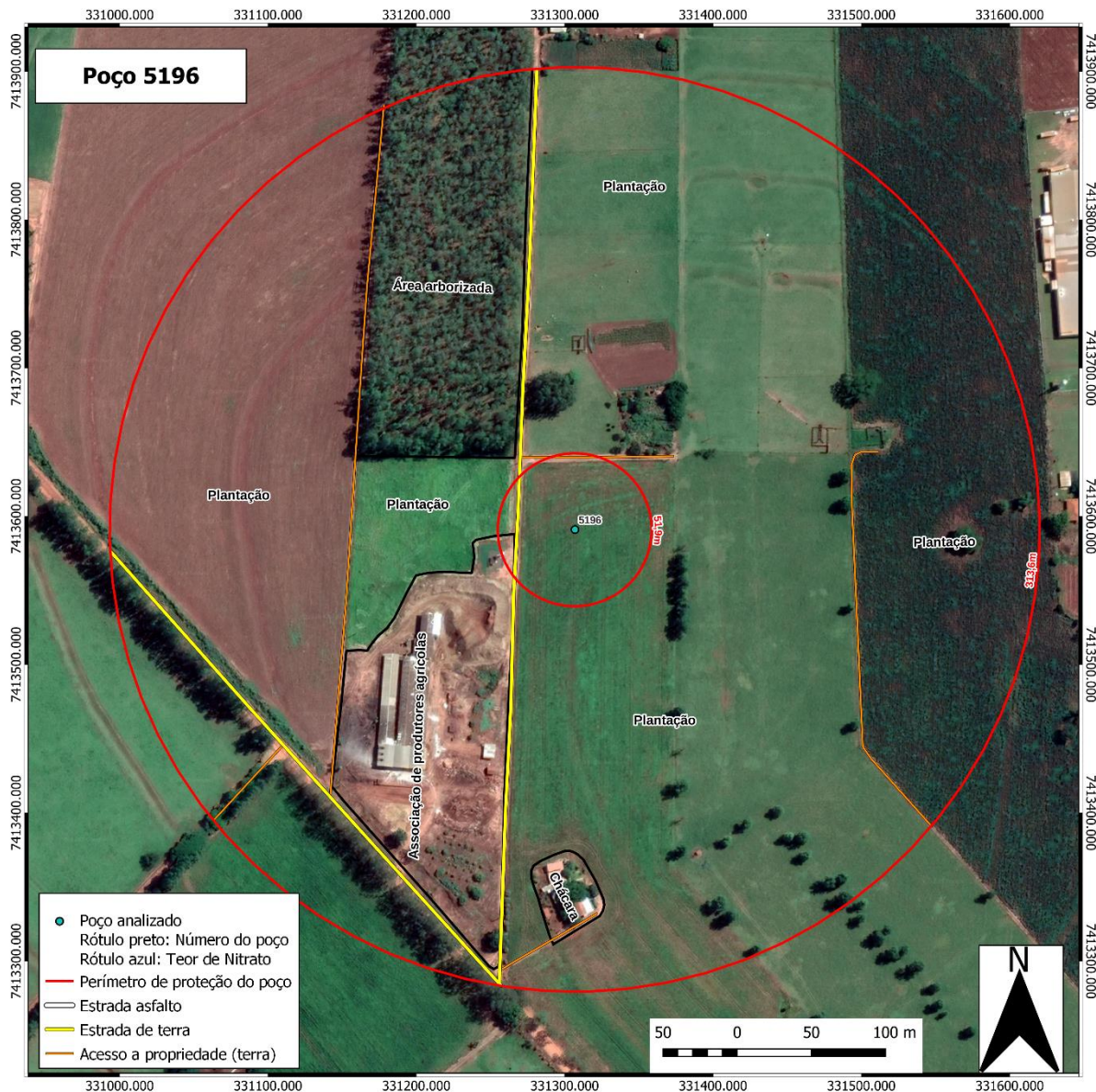


Figura 15: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5196
Fonte: Elaborado pela autora

4.10 Poço 5395

4.10.1 Descrição do poço

O poço 5395 localiza-se no município de Alto Piquiri. Este é o poço que apresenta menor de Nitrato entre os poços avaliados, possuindo um teor de 0,005 mg/L de Nitrato.

De acordo com a topografia, o sentido do fluxo da água potencialmente é de oeste, leste e norte sentido ao centro sul da área (das bordas para o centro, na porção superior do mapa).

O PPP definido para este poço foi de 63,7m para o tempo de transporte de 50 dias e 221,7m para 1825 dias. Os perímetros, juntamente com os usos e ocupações do solo referentes a este poço encontram-se na figura 16.

4.10.2 Uso e ocupação atual da área e Histórico da área

O poço 5395 está inserido em ambiente rural, com predominância de áreas de pastagem. Dentro do raio de 50 dias permanece esta predominância que está associada apenas a uma área alagada ao norte do poço. Esta área aparenta ser uma lagoa, com limites que não estão bem definidos e se alteram com o passar do tempo (informação obtida na observação histórica).

Em relação ao raio de 1825 dias, a predominância é das áreas de pastagem, associadas a uma extensa área arborizada ao sul do poço. Na porção noroeste do perímetro, poucos metros além do raio de 50 dias, há uma chácara com evidências de criação animal, incluindo pequenas edificações, além da área de pastagem que cerca a chácara. Nesta mesma área de pastagem ocorre mais uma área alagada, localizada ao norte da primeira.

A oeste do poço há uma área de plantação com características visuais homogêneas, aparentando possui apenas um tipo de cultivo. A lateral desta plantação possui um acesso de terra, além da estrada principal, que percorre o sul da plantação e da área da pastagem, sendo composta também de terra.

A disposição dos diferentes usos dentro do perímetro encontra-se na Figura 16.

Analisando o histórico da área, a única mudança perceptível dentro dos PPPs acontece nas duas áreas alagadas que mudam sutilmente seus limites com o passar dos anos. Estas áreas alagadas estão associadas aos pontos de menor cota topográfica em seu entorno, e podem interferir em processos de dissolução de contaminantes dentro deste perímetro

A análise histórica do uso e ocupação do solo dentro dos perímetros analisados encontra-se no Anexo 10.

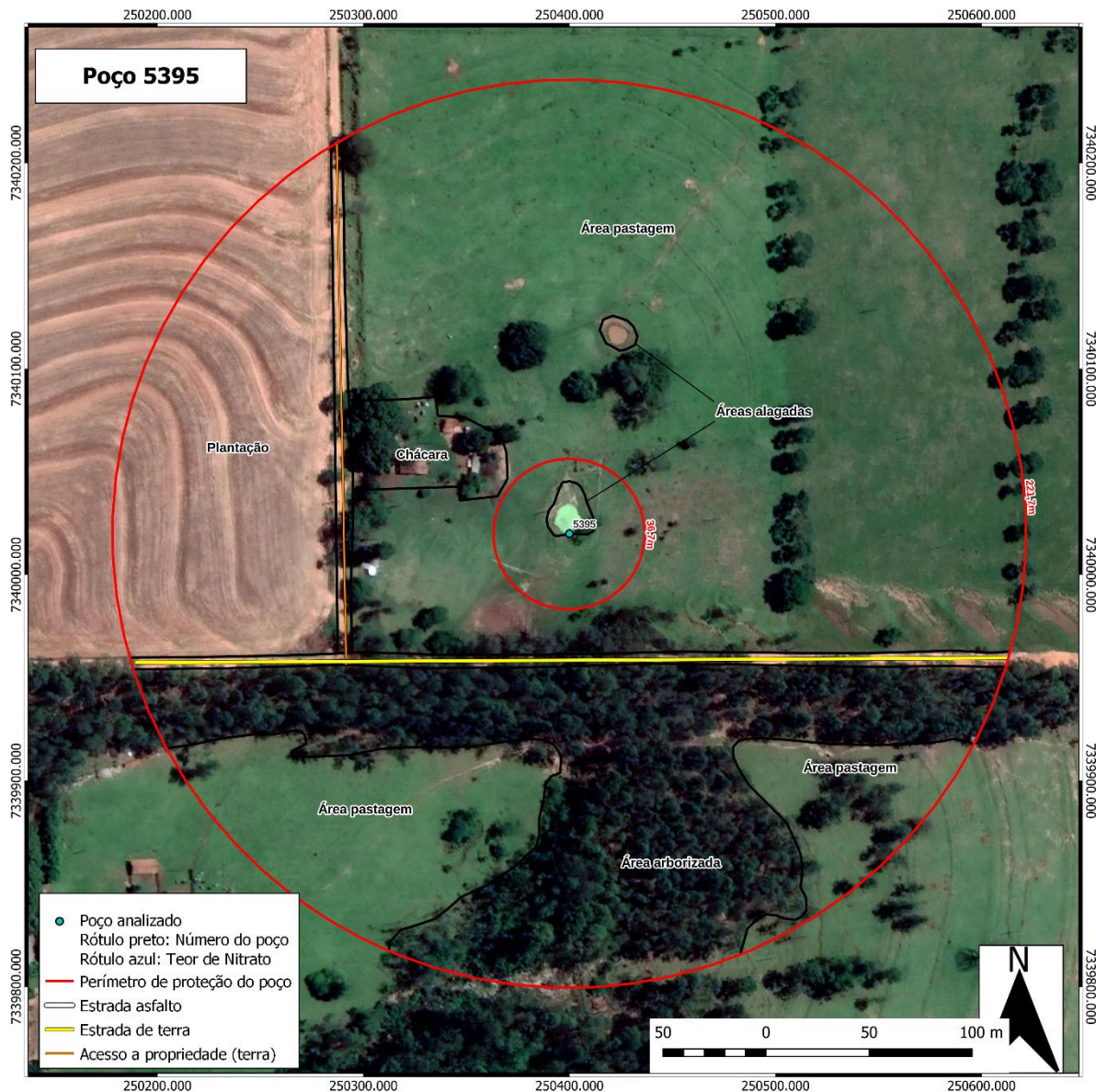


Figura 16: Mapa de uso e ocupação do solo do poço 5395
Fonte: Elaborado pela autora

5 DISCUÇÃO

5.1 Comparação entre os usos do solo

A primeira etapa de comparação entre os dados obtidos consistiu na comparação entre os diferentes tipos de uso e ocupação do solo identificados em cada um dos poços, a síntese destes dados está presente na tabela 4.

Os usos foram analisados de acordo com o ambiente (rural ou urbano), uso predominante e demais informações relevantes para a análise.

Tabela 4: Síntese do uso e ocupação do solo no entorno dos poços

Poço	Teor Nitrato (mg/L)	Ambiente	Uso predominante	Observação
5109	102,54	Predominantemente urbano	Residencial	Área de pastagem a SW dentro do perímetro de 1825 dias
1117	38,2	Rural	Área de pastagem e áreas arborizadas	Histórico de depósito de madeira
5089	26,96	Rural	Plantações	Edificação associada a criação animal
5206	9,55	Rural	Plantações	Plantações rasteiras e arbóreas
5389	0,84	Urbano	Residencial	Plantações a SW
5399	0,84	Rural	Plantações	Área residencial a oeste do poço
5005	0,22	Rural com indústrias	Indústrias, Pastagens e Plantações	Estação de tratamento de resíduos sólidos a montante do poço. Poço localizado na sede da SANEPAR
5196	0,22	Rural	Plantações	Associação de produtores agrícolas
5395	0,005	Rural	Áreas de pastagem	Dois corpos d'água próximos ao poço

Fonte: Elaborada pela autora com dados de nitrato de MMA, 2015

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, que relaciona a presença de nitrato na água subterrânea principalmente a ambientes rurais com plantações e criação animal, esperava-se uma relação entre estes usos e os maiores teores de nitrato no aquífero Caiuá. No entanto, os dados obtidos não refletem completamente esta realidade.

Apesar dos poços 1117, 5089 e 5206 estarem inseridos em ambiente rural e associados aos maiores teores de nitrato no Caiuá, o poço 5109 apresenta o valor máximo de nitrato no aquífero e está inserido no ambiente urbano. O poço 5109 também se encontra em um alto topográfico, o que diminui a probabilidade destes índices de nitrato possuírem origem externa a um raio muito próximo do poço.

Já o poço 1117 encontra-se a jusante de uma área residencial, o que aumenta a gama de possibilidades da origem do elevado teor de nitrato neste poço.

O poço 5089, também associado aos maiores percentis, possui forte influência das chácaras localizadas a SW do poço, assim como da Edificação relacionada provavelmente a criação animal.

O poço 5206, também está associado aos maiores percentis de nitrato no aquífero. Considerando o sentido de fluxo, os parâmetros deste poço são influenciados principalmente pelas plantações a montante do poço.

Passando a análise para os menores percentis, o poço 5389, localizado em ambiente urbano, tem, a montante do poço um campo esportivo, algumas áreas residenciais, uma escola e uma área com pequenas indústrias que possui uma oficina mecânica e uma serralheria.

Considerando a topografia e a variedade de usos do solo no entorno do poço 5389 uma análise mais precisa em relação a este poço exigiria um detalhamento da potenciometria do aquífero no entorno deste poço. Verificando assim qual dos tipos de uso que cercam o poço possuem maior influência sobre o mesmo.

Em relação ao poço 5399, também localizado sobre um alto topográfico, a principal influência em relação a composição química da água se dará pela chácara no qual o poço está inserido e pelas plantações ao sul.

Em relação ao poço 5005 se destaca a localização do poço, que encontra-se na própria sede da SANEPAR do município. Considerando esta localização, associada a um órgão oficial de abastecimento de água, é esperado um perfil construtivo, assim como uma proteção sanitária sobre o poço, realizada de forma mais adequada do que poços localizados em ambientes com solo mais exposto, como em meio a plantações e chácaras.

Além disso, a montante do poço, a sul, localiza-se uma indústria de balanças, que possui uma parte significativa de sua área externa recoberta com cimentação para espaços de estacionamento e logística da empresa, fator que também interfere na permeabilidade do solo neste ponto. A soma destes fatores auxilia na proteção sanitária do poço 5005, tornando coerente o baixo teor de nitrato encontrado neste poço.

O poço 5196 possui o mesmo teor de nitrato que o poço 5005, no entanto, não está associado a áreas impermeabilizadas. Pelo contrário, seu entorno é constituído predominantemente de áreas verdes, relacionadas a plantações. Neste caso, como o contaminante poderia estar associado a fertilizantes dispostos na superfície, o teor de nitrato é provavelmente impactado pela profundidade da estrada de água assim como pelo perfil construtivo do poço, não disponibilizado no banco de dados utilizado.

O teor mínimo de Nitrato no aquífero Caiuá (Poço 5395) também está relacionado a uma área verde, sendo este poço influenciado principalmente por áreas de pastagem, plantação e por uma chácara. O que se destaca nesse caso é a proximidade do poço com uma área alagada.

A área alagada está associado a uma porção do terreno com menores cotas topográficas, conseqüentemente a direção do fluxo do entorno será direcionado para este ponto. Avila (2005) destaca que volumes elevados de água, associado a elevados índices pluviométricos, poderiam acarretar na dissolução do nitrito e nitrato até a chegada em um ponto de captação, por exemplo.

Um processo similar pode estar acontecendo neste ponto, já que o fluxo preferencial direcionado para as proximidades do poço pode favorecer uma dissolução de contaminantes nesta área de recarga.

5.2 Análise multielementar

Para análise multielementar dos poços, inicialmente foi verificado o índice de correlação entre os elementos, para assim identificar as tendências entre os poços observados. A nuvem de correlação entre os elementos, está disponível na Figura 17 e a matriz de correlação utilizada como base para esta figura apresenta-se no Anexo 11.

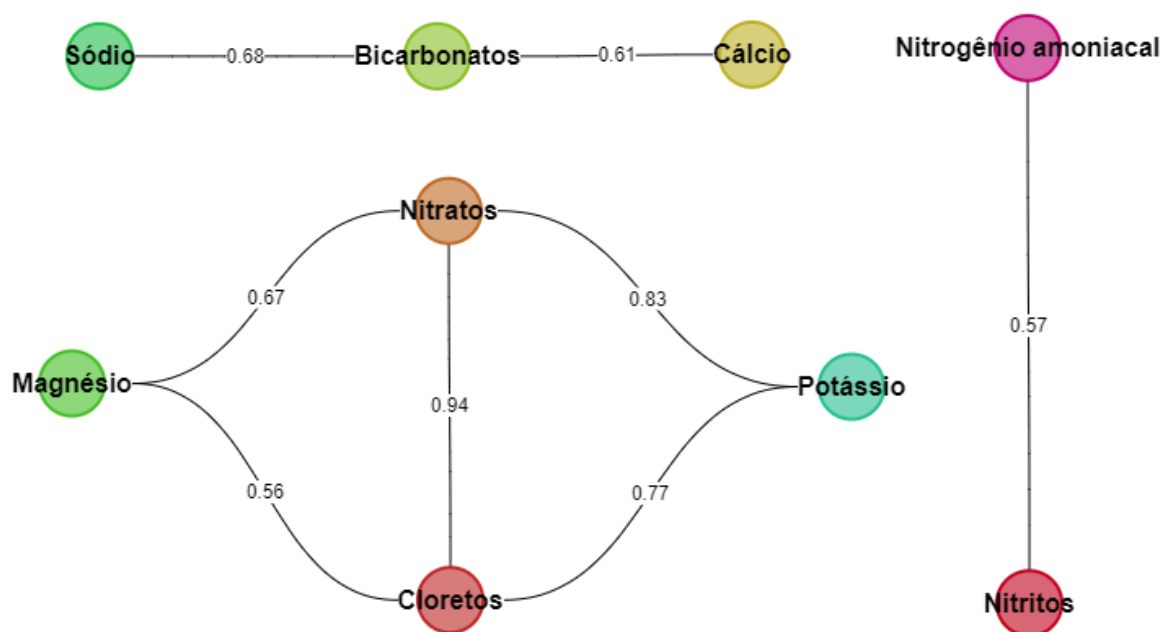


Figura 17: Nuvem de correlação dos poços de MMA, 2015
Fonte: Elaborado pela autora a partir de Campos e Licht (2020)

Conforme o diagrama, os parâmetros que mais se relacionam são o teor de Nitrato e Cloreto, com um índice de correlação de 0,94, classificado com uma correlação muito alta.

O Nitrato, composto químico central deste projeto, também possui uma correlação alta com o Potássio (0,83) e moderada com o Magnésio (0,67). O que indica que, para análises de proveniência do Nitrato, os compostos químicos indicadores mais adequados são o Potássio e os Cloretos.

Além dos compostos já citados, nenhum outro composto ou elemento químico analisado obteve correlações acima de 0,5 com o Nitrato, não sendo, portanto, utilizados considerando o banco de dados para estas análises. Serão discutidos como associados ao Nitrato, apenas o Cloreto e o Potássio.

Considerando as primeiras observações e comparações entre os poços, foi elaborada uma tabela contendo diversos resultados de análises químicas de cada um dos poços (Tabela 5). Esta análise visa detalhar as prováveis origens do nitrato em cada um dos poços, utilizando para isto elementos e compostos químicos característicos de alguns usos e ocupações do solo.

Para a análise foram observados os teores de nitrato, nitrogênio kjeldahl, nitrogênio orgânico, sílica dissolvida, bicarbonatos, cloretos, cálcio, magnésio, sódio e potássio. A tabela multielementar pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5: Análise multielementar dos poços

	5109	1117	5089	5206	5389	5399	5005	5196	5395
Bicarbonatos** (mg/L)	2.83	28.02	8.01	11.55	22.85	18.74	7.51	13.4	39.95
Cálcio (mg/L)**	13.49	9.86	3.9	2.55	3.24	1.62	0.86	3.84	11.99
Cloretos (mg/L)	34.22	11.74	1.17	2.02	0.93	1.35	0.85	0.84	1.4
Fosfatos (mg/L)	0.03	0.32	0.005	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Magnésio (mg/L)	6.95	5.3	5.3	0.61	1.22	0.49	0.19	0.24	0.24
Manganês (mg/L)	0.62*	-	0.02	0.005	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Nitrato (mg/L)	102,54*	38,2	26,96	9,55	0,84	0,84	0,22	0,22	0,005
Nitrogênio Kjeldahl Total (mg/L)	0.005	0.12	0.005	0.11	0.005	0.13	0.005	0.17	0.02
Nitrogênio orgânico (mg/L)	0.005	0.12	0.005	2.27	0.005	0.13	0.005	0.16	0.02
pH***	7,08	5,38*	5,62*	6,00	5,98*	5,99*	5,86*	5,47*	7,05

Potássio** (mg/L)	14.8	4.9	7.6	7.4	2.1	4.36	1.7	0.5	4.3
Sílica dissolvida (mg/L)	13.6	27.4	16.6	22.48	19.07	26.35	15	9.9	42.02
Sódio (mg/L)	22.2	5.9	1.2	1.4	0.7	4.33	0.5	0.8	2.5

Fonte: Adaptado de MMA, 2015

* Em vermelho: Valores fora das faixas recomendadas pelo Ministério da Saúde

**índices sem VMP de acordo com o Ministério da Saúde

*** Portaria MS nº 2914/2011

O cloreto em águas naturais pode estar associados a descargas de água residencial urbana e industrial (APDA, 2012). Esta origem é reforçada pela CETESB (2016) que indica que o cloreto nos efluentes sanitários está relacionado a urina humana que pode fazer com que este efluente atinja teores que ultrapassam os 15mg/L de cloreto. Este valor é encontrado juntamente com o teor máximo de Nitrato no aquífero.

Outra origem indicada por APDA (2012) seria relacionada ao próprio solo, especialmente de forma proximal a intrusões salinas, o que não se aplica no contexto geológico da área e é mais um indício da provável relação com efluentes residenciais.

O elevado índice de correlação encontrado entre o Nitrato e os Cloretos, associado aos valores elevados destes dois elementos encontrados nos poços observados, também pode ser um indicativo da relação da origem do Nitrato com efluentes residenciais no aquífero Caiuá.

Em relação ao potássio (que possui correlação 0,83 com o Nitrato), a origem pode ser relacionada aos sais de potássio que são utilizados na indústria e na agricultura (CETESB, 2016). Esta origem é sugerida já que as fontes naturais de Potássio (rochas com este elemento em sua composição) possuem uma resistência considerável às ações do tempo (CETESB, 2016).

Outro composto químico que faz parte dos efluentes residenciais é o fósforo, representado a tabela pelos fosfatos e possuindo seus maiores teores nos poços 5109 e 1117, no entanto, o índice de correlação entre este elemento e o Nitrato, entre os valores analisados, está abaixo de 0,5, não permitindo correlações da origem destes compostos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises realizadas neste trabalho, observa-se uma tendência da relação de teores elevados de nitrato, associados principalmente a ambientes com efluentes residenciais, ou seja, áreas nas quais ocorrem mais ocupações relacionadas a residências, seja em ambiente urbano ou rural (onde as residências são representadas pelas chácaras).

Os indícios desta relação com os efluentes começa pela análise dos mapas, já que o poço com maior urbanização em seu entorno é também o poço com maior teor de Nitrato. Outros poços associados aos maiores percentis também possuem algum tipo de área residencial associada ao seu entorno.

Outro indício importante é a correlação encontrada entre o Nitrato e os Cloretos, já que ambos tem origens associadas aos efluentes sanitários e sua correlação é bastante nítida já que os maiores teores de nitrato são encontrados nos poços que também possuem os maiores teores de cloretos.

Além disso, identifica-se os cloretos como importantes substâncias rastreadoras de contaminações por nitrato, já que há uma forte correlação entre estes dois compostos no banco de dados utilizado.

A observação do poço 5389 também demonstra que para análises mais precisas, assim como para delimitação de PPPs o ideal é um conhecimento mais detalhado do fluxo subterrâneo, já que pequenos desvios na trajetória esperada para este fluxo, já podem mudar as fontes potenciais de contaminação da área e conseqüentemente a forma como o poço será protegido.

Em relação aos ambientes de contaminação por nitrato, além da relação com efluentes residenciais, foram realizadas algumas observações em relação as áreas compostas por plantações, descritas a seguir.

Os tipos de uso delimitados como “Plantação” foram encontrados tanto em resultados elevados de nitrato, quanto relacionados a teores mais baixos. Isto indica que para a constatação do risco de nitrato relacionado a uma plantação é necessária uma análise mais detalhada do ponto de vista agrônômico.

Alguns exemplos desta análise seriam de detalhamento das quantidades de agrotóxicos utilizados naquela plantação, frequência de utilização, além de descrições e análises químicas do solo antes e depois da inserção do defensivo, possibilitando

rastrear alterações produzidas pela adição de fertilizantes agrícolas. Também seria importante, para um grau superior de análises, o conhecimento da composição dos fertilizantes utilizados em cada uma das áreas avaliadas.

O fato descrito no parágrafo anterior gera uma recomendação em relação ao controle legislativo dos fertilizantes. Vito que, se a composição e quantidade de fertilizantes utilizados, gera uma variação no grau de risco a contaminação das águas subterrâneas, é fundamental que o poder legislativo realize um controle atento em relação as leis que regem este tipo de produto.

No poço 5005 também foi observada a importância do ambiente no qual o poço está instalado, já que barreiras sanitárias construídas no entorno do poço podem diminuir a probabilidade da infiltração de contaminantes. Esta constatação também deve ser reforçada nas legislações associadas a construção de poços, recomendando sempre a manutenção de lajes sanitárias no entorno do poço.

Em termos de legislação, também recomenda-se a fiscalização frequente de instalações sanitárias, especialmente em regiões menos desenvolvidas ou com instalações sanitárias mais antigas. O método geofísico de Radar de Penetração no Solo (GPR) permite mapeamentos não invasivos deste tipo de instalação e pode ser utilizados como recurso para prevenção de vazamentos e manutenção de instalações antigas (Teixeira Filho, 2012).

Em relação a tendência futura e histórica dos poços, foram observadas poucas mudanças significativas no uso e ocupação do solo, nos perímetros analisados. Sendo assim, é esperado que os resultados obtidos anteriormente a 2015 se projetem para a atualidade, considerando as poucas mudanças ocorridas nos entornos dos poços.

Uma sugestão para futuros trabalhos, consiste na realização de testes microbiológicos na água dos poços estudados. Esta indicação baseia-se na composição esperada para efluentes residenciais, que contém bactérias associadas ao sistema digestivo, conhecidas como coliformes fecais (CETESB, 2016). A análise e confirmação da presença destes organismos na água também confirma os resultados obtidos nesta pesquisa.

Para pesquisas futuras também recomenda-se o detalhamento do perfil construtivo dos poços assim como profundidade(s) de entrada de água no poço. Esta análise poderia identificar processos de dissolução de contaminantes em poços com entradas de água mais profundas, por exemplo.

REFERÊNCIAS

Instituto das Águas do Paraná 2010. *Plano estadual de recursos hídricos do Paraná – Resumo Executivo*. Governo do Estado do Paraná. COBRAPE – Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Outubro de 2010. Disponível em <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-Estadual-de-Recursos-Hidricos-do-Parana> PLERHPR> Acesso em 14/12/2022

Ainsworth S., Jehn P. 2005. Source water protection: what's in it for you?. *The Groundwater Association. Groundwater monitoring & remediation*, 25(2): 44-51.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2005.0043.x>

Almeida M. A. de, Stein D.P., Melo M.S., Bistrichi C.A. 1980. *Geologia do Oeste Paulista e áreas fronteiriças dos estados de Mato Grosso do Sul e Paraná*. XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Balneário Camburiú, Santa Catarina, Anais de congresso, vol. 5.

APDA – Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas 2013. *Nitratos*. Comissão Especializada da Qualidade da Água. Portugal. Disponível em: <https://www.apda.pt/site/ficheiros_eventos/201302261001-ft_qi_15_nitratos.pdf> Acesso em 05/01/2023

APDA – Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas 2012. *Cloretos*. Comissão Especializada da Qualidade da Água. Portugal. Disponível em: <https://www.apda.pt/site/ficheiros_eventos/201302261001-ft_qi_15_nitratos.pdf> Acesso em 05/01/2023

Ascherbrook-Kilfoy B., Heltshe S. L., Nuckols J. R., Sabra M. M., Schuldiner A. R., Mitchell B. D., Airola M., Holford T. R., Zhang Y., Ward, M. H. 2012. *Modeled nitrate levels in well water supplies and prevalence of abnormal thyroid conditions among the Old Order Amish in Pennsylvania*. *Environmental Health*, 11:6. Disponível em: <<http://www.ehjournal.net/content/11/1/6>> Acesso em 15/12/2022

Avila V. B. 2005, *Relação entre o uso e manejo do solo em uma bacia rural e a contribuição de nitrogênio, fósforo e sedimentos hídricos*. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Publicação PTARH.DM – 88/05, Agosto de 2005, 114 pp.

Bernhard, A. 2010. *The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact*. Nature Education. Departamento de Biologia. Connecticut College. Disponível em <<https://www.nature.com/>> Acesso em 29/08/2022

Brasil, 2021. *Portaria Ministério da Saúde nº 888/2021*. “Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade”. Publicada em 4 de Maio de 2021 pelo Gabinete do Ministro da Saúde.

Cabelera da Silva, Talita. 2019. *Definição e análise de perímetros de proteção de poços, por diferentes métodos, para o aquífero Caiuá, no estado do Paraná*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Campos F. F. de, Licht O. A. B. 2020. Correlation Diagrams: graphical visualization of geochemical associations using the EzCorrGraph app, Journal of Geochemical Exploration <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106657>

Celligoi, André. 2000. *Hidrogeologia da formação Caiuá no estado do Paraná*. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, Instituto de geociências, Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. São Paulo.
DOI: 10.11606/T.44.2000.tde-21082015-131357

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo 2016. *Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo. Apêndice E – Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade*. Governo do Estado de São Paulo, Secretária do Meio Ambiente. 287pp. Disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>> Acesso em 30/01/2023

CPRM – Companhia de Recursos de Pesquisas Minerais, 2012. *Relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná: Bacia do Paraná*. V. 14. 40 p. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Andréa Segura Franzini. Belo Horizonte.

CPRM – Companhia de Recursos de Pesquisas Minerais 2021. *Mapa Geológico e de Recursos minerais do estado do Paraná*. Escala 1:600.000. Dados Vetoriais. Confeccionado por Besser M. L., Brumatti M. e Spisila A. L.

Estados Unidos da América 1974, *Public Law nº 93-523 – Safe Drinking Water Act*. The 93rd United States Congress, 16 de Dezembro de 1974.

Fernandes, L.A., Sedor F.A., Silva R.C. da, Silva L. R. de, Azevedo A. A., Siqueira A. G. 2008. Icnofósseis da Usina Porto Primavera, SP – Rastros de dinossauros e de mamíferos em rochas do deserto neocretáceo Caiuá. SIGEP (Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil) 013. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/sitio013/sitio013.pdf>> Acesso em 15/08/2022

Fernandes L. A. 2004. *Mapa Litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), Escala 1:1.000.000*. Nota Explicativa. Boletim Paranaense de Geociências, n. 55, p. 53-66, Editora UFPR <<http://dx.doi.org/10.5380/geo.v55i0.4283>>

Fernandes L.A., Coimbra A.M. 1994. *O grupo Caiuá (Ks): Revisão estratigráfica e contexto deposicional*. Revista Brasileira de Geociências. 24(3) p. 164-176, Setembro de 1994.

Foster, S., Hirata, R., Gomes D., D'elia M.; Paris M. 2003. *Protección de la Calidad del Agua Subterránea, Guía para empresas de água, autoridades municipales y agencias ambientales*, Banco Internacional e Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial, Washington, D.C., 115p

IAT – INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2022. *Outorgas emitidas*. Arquivo .csv (Comma-Separated Values). Datum SIRGAS-2000. Portal SIGARH – Sistema de Informação para Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos. Edição de 03/08/2022. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Consultar-outorgas>> Acesso em 10/08/2022

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. *Estimativa de população enviadas ao TCU. Tabela de estimativas para 1º de julho de 2021*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>> Acesso em 15/01/2023

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2018. Malha Municipal do Estado do Paraná. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>> Acesso em 19/11/2022

Licht O.A.B. 2001. *Atlas geoquímico da folha Curitiba: SG-22-XD-I*. Curitiba. Minerais do Paraná S.A. - MINEROPAR. 80 p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, *Carta das águas subterrâneas do Paraná*, Brasília, DF, 2015.

Nascimento T. S. do, Pereira R. O. L., Mello H. L. D. de, Costa J. 2008, *Metemoglobinemia: do diagnóstico ao tratamento*. Revista Brasileira de Anestesiologia, 58: 6, Dez. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0034-70942008000600011>

NextGIS 2022. *QuickMapService plugin*. Version 0.19.32. 02 de Novembro de 2022. Disponível em <https://plugins.qgis.org/plugins/quick_map_services/> Acesso em 12/12/2022

QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>, 2021.

Raymond, H. A., Bondoc, M., Mcgginis J., Metropulus K., Heider P., Reed A., Saines S. 2006. *Using Analytic Element Models to Delineate Drinking Water Source Protection Areas*. Revista Groundwater, v. 44. Janeiro - Fevereiro, 2006, p. 16-23. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00122.x>

Rosa Filho, E., Hindi E.C., Mantovani L. E., Bittencourt A. V. L. 2011, *Aquíferos do Estado do Paraná*. Curitiba: Edição do autor. 200 p.

São Paulo (Estado) 1988. *Lei nº 6.134/1988*. “Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e dá outras providências”. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 02 de Junho de 1988.

São Paulo (Estado) 2019. *Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual*. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. 128p. (versão online). Disponível em <<https://sigrh.sp.gov.br/>> Acesso em 02/08/2022

Santos C. 2007. *Estatística Descritiva – Manual de Auto-Aprendizagem*. Lisboa, Edições Sílabo.

São Paulo (Estado) 1991a. *Lei nº7.663/1991*. “Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos”. Publicada em 30 de dezembro de 1991. Disponível em <<http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/leis/lei-estadual-n%C2%BA-7-663/>>

SÃO PAULO (Estado). 1991. *Decreto n° 32.955*. Regulamenta a Lei n° 6.134, de 2 de junho de 1988. Publicado em 7 de fevereiro de 1991 Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/decretos/decreto-estadual-n-32-955/>

Silva L. C. M., Brotto M. E. 2014. *Nitrato em água: ocorrência e consequências*. Escola Superior de Química, São Paulo

Soares P.C., Landim P.M.B., Fúlfaro V.J., Sobreiro Neto A.F. 1979. *Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo*. In: SIMP. REG. GEOL., 2. Rio Claro, 1979

Study Mind 2022. Cycles – Decomposition & The Nitrogen Cycle (GCSE Biology). National Tutoring Programme. Disponível em <<https://studymind.co.uk/notes/decomposition-the-nitrogen-cycle/>> Acesso em 07/08/2022

Tameirão Pinto M. 2018. *Evolução das concentrações de Nitrato no Aquífero Caiuá, Estado do Paraná*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geologia.

Teixeira Filho, P. C. 2012. *A Utilização do método GPR para localização de tubulações: Estudo prévio para as instalações do sítio controlado da geofísica/UFRJ*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Disponível em <<http://hdl.handle.net/11422/4969>> Acesso em 30/01/2023

USEPA – United States Environmental Protection Agency. 1987. *Guidelines for Delineations of Wellhead Protection Areas*. US EPA/440/6-87/010. Relatório Técnico, 212 p.

Wahnfried I., Hirata R. 2005. *Perímetros de proteção de poços: uma importante ferramenta para a sustentabilidade de mananciais públicos*. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste.

ANEXOS

**ANEXO I: Poços presentes da base
dados de MMA, 2015**

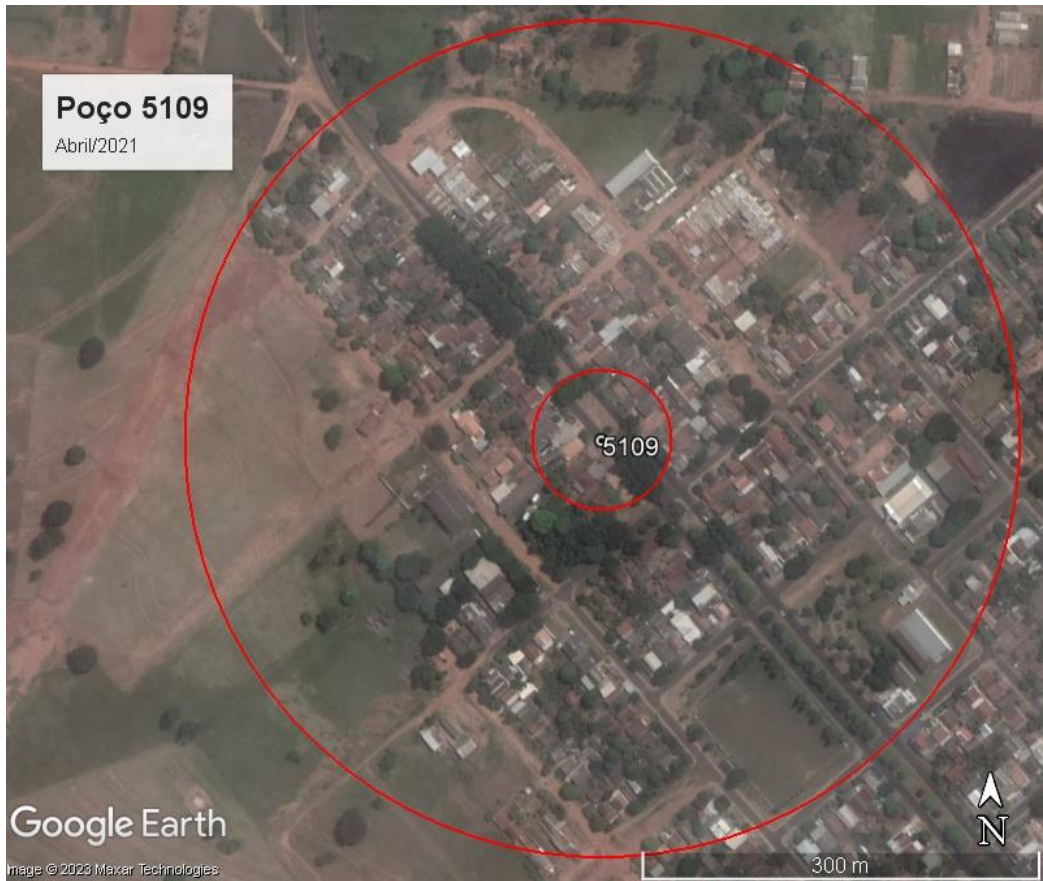
Anexo II: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5109

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth





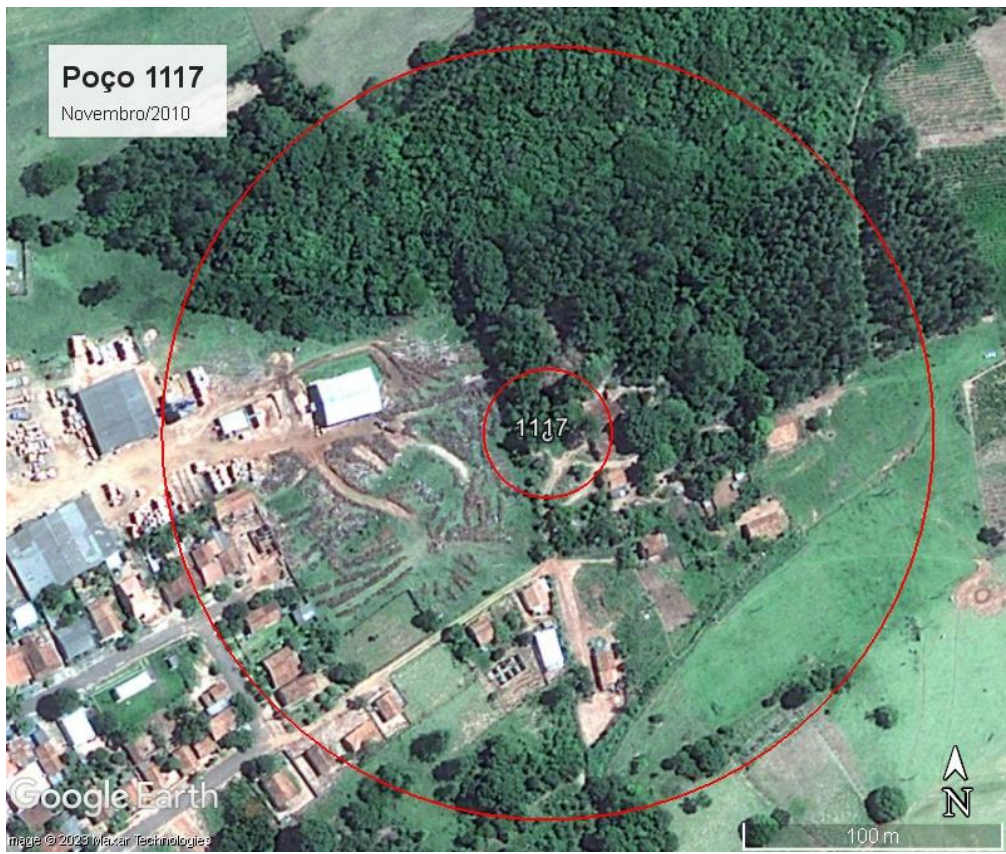




Anexo III: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 1117

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth



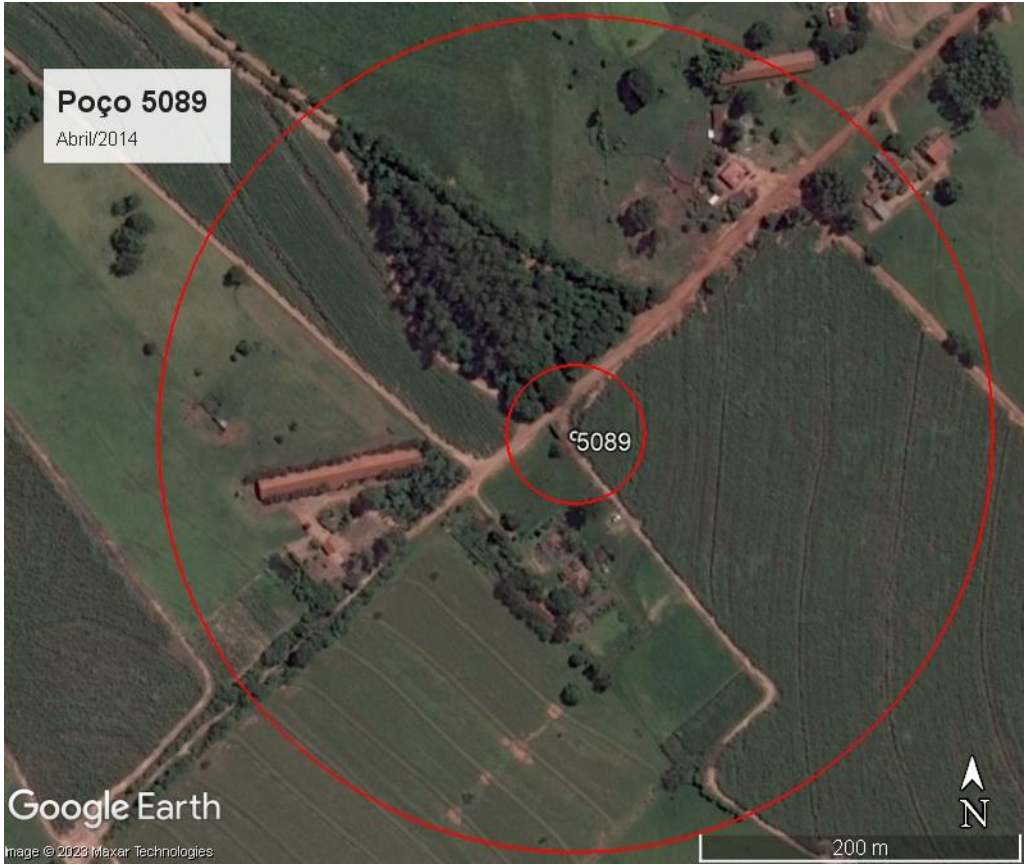




Anexo IV: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5089

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth

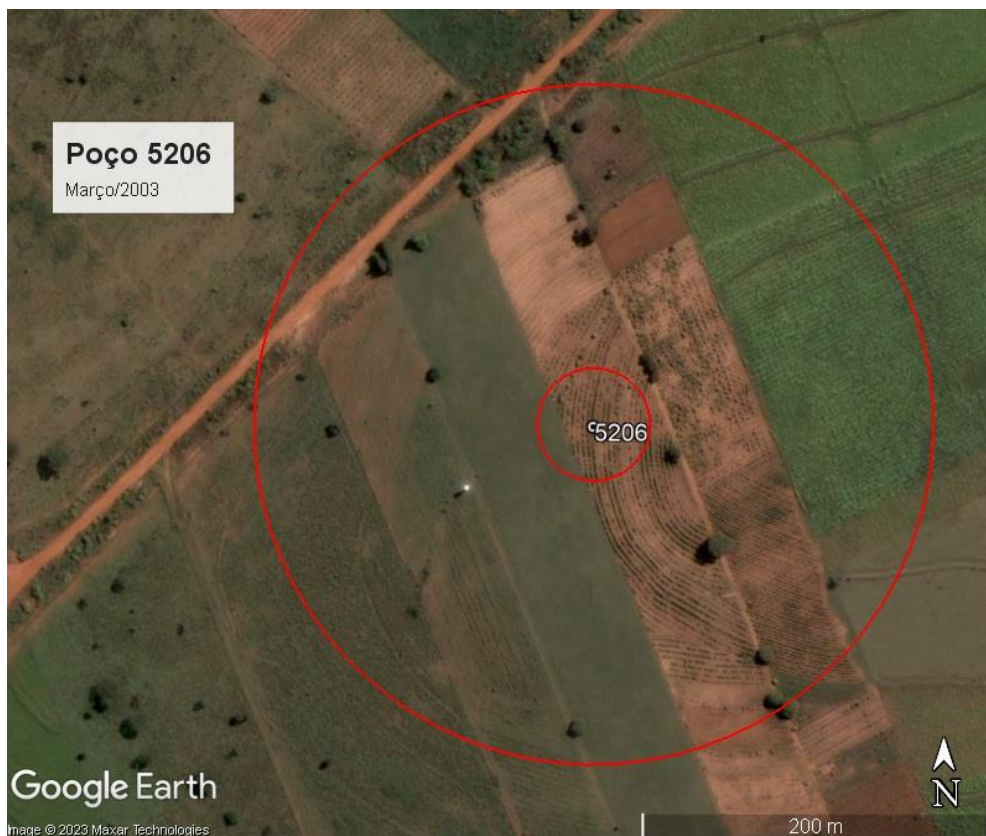




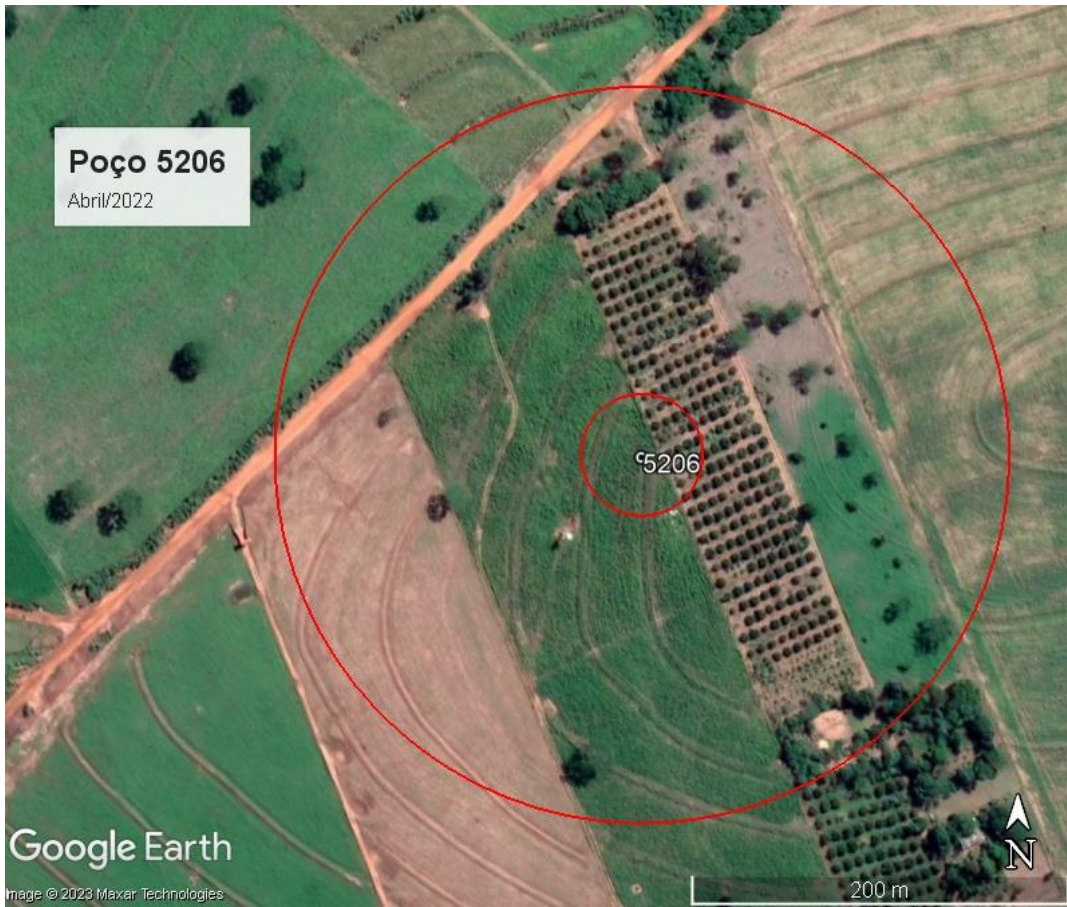


Anexo V: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5206

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth







Anexo VI: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5389

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth

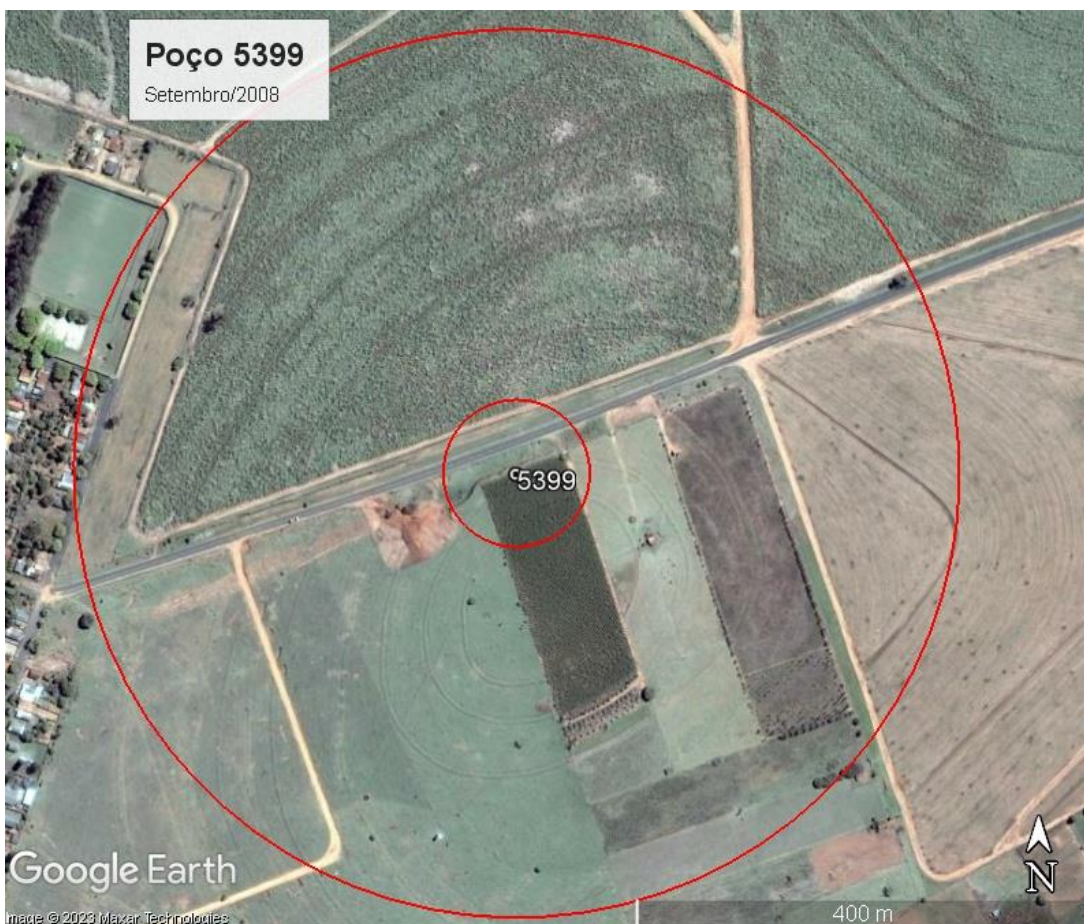




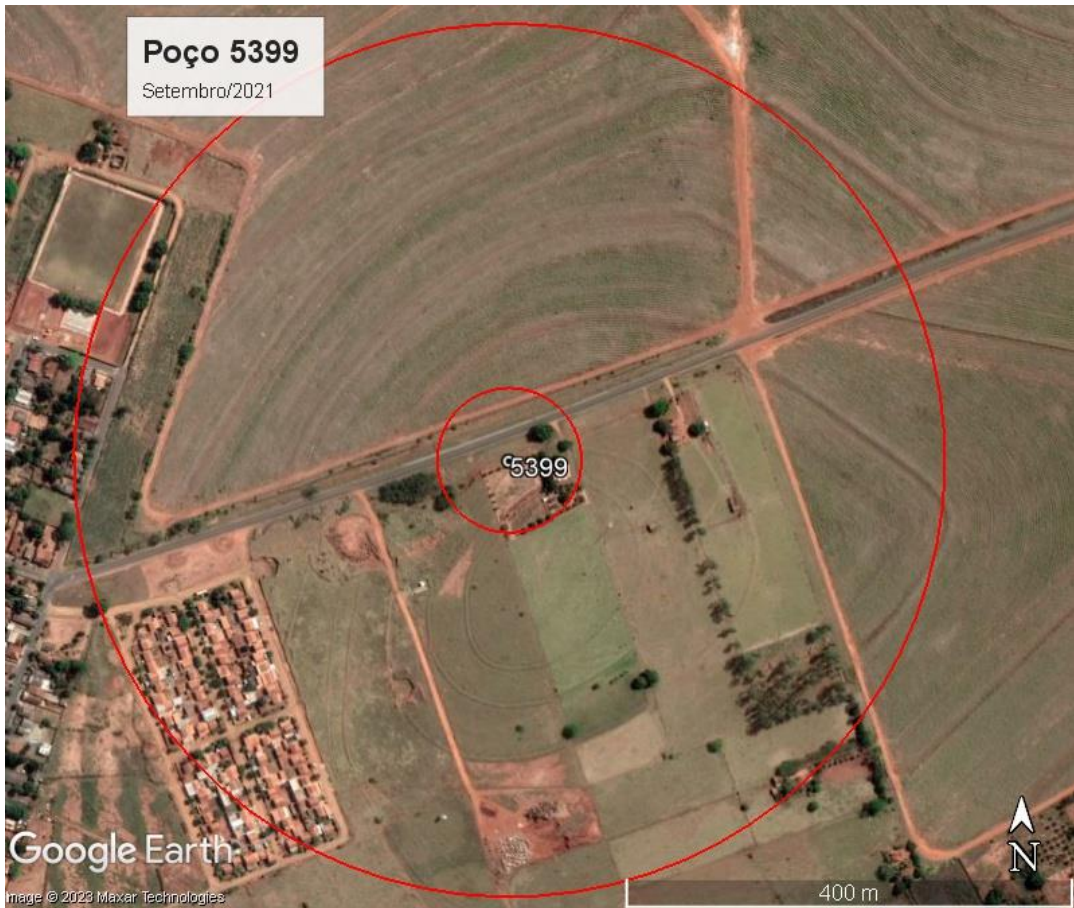


Anexo VII: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5399

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth

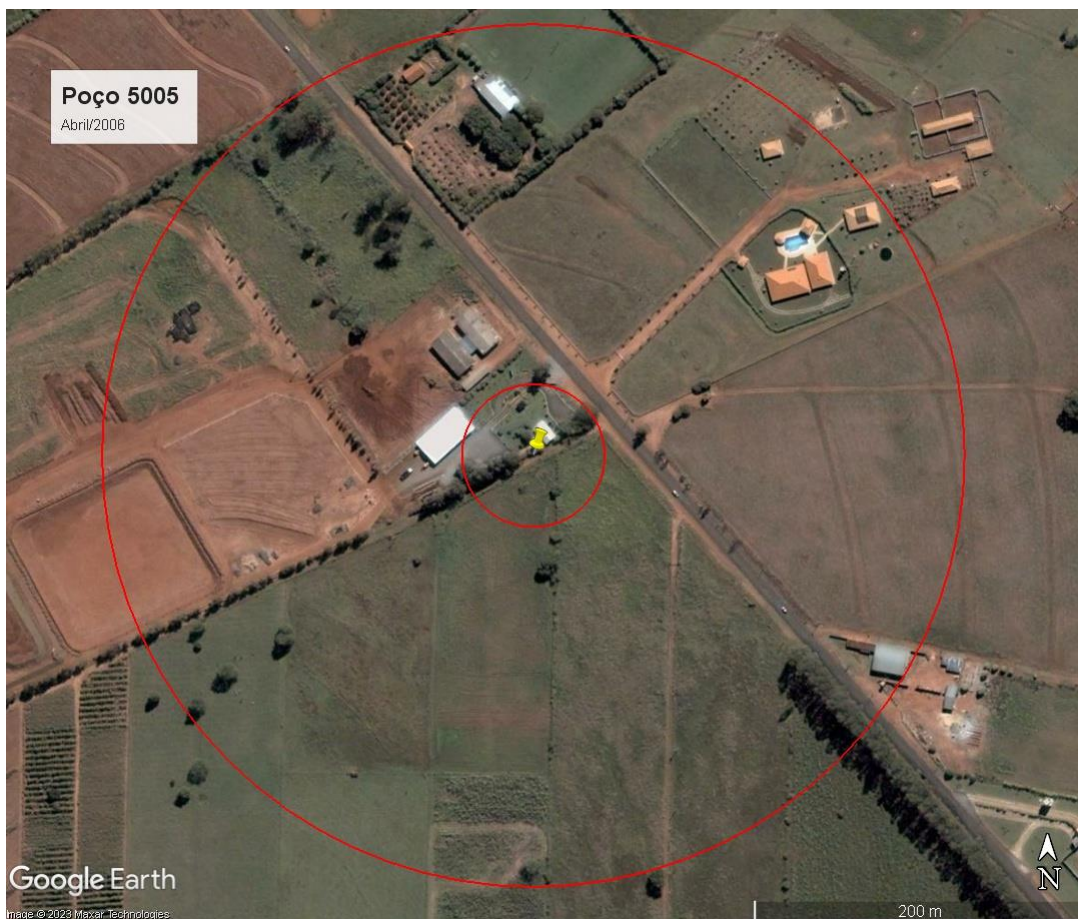






Anexo VIII: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5005

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth

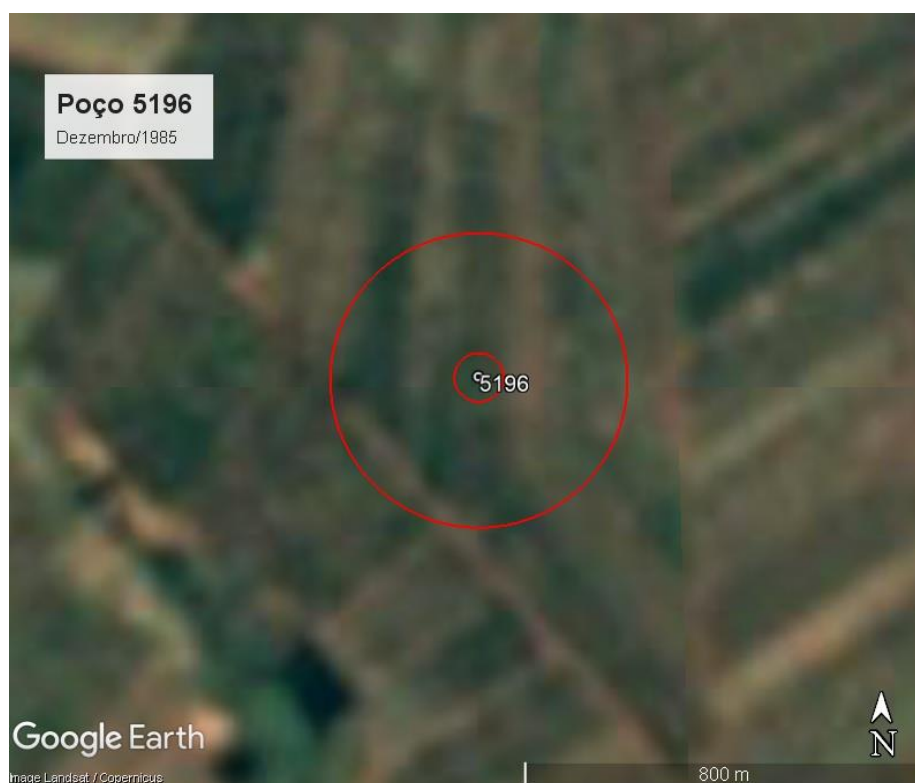






Anexo IX: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5196

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth







Anexo X: Histórico do Uso e Ocupação do solo no entorno do poço 5395

Fonte: Elaborado pela autora a partir do Google Earth







**ANEXO XI: Matriz de correlação dos
dados de MMA, 2015**

	Nitratos	Nitritos	Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio	Sílica dissol	Bicarbonat	Cloretos	Fluoretos	Fosfatos	Sulfatos	Cálcio	Magnésio	Sódio	Potássio
Nitratos	1														
Nitritos	0.022318	1													
Nitrogênio Kjeldahl total	-0.08214	0.219185	1												
Nitrogênio amoniacal	-0.06319	0.57456	0.394982	1											
Nitrogênio orgânico	0.007597	-0.03826	0.228245	-0.09053	1										
Sílica dissolvida	-0.14901	0.030425	0.061423	0.043131	-0.03113	1									
Bicarbonatos	-0.1397	0.091932	0.04136	0.450544	-0.09987	0.417205	1								
Cloretos	0.939235	-0.02726	-0.06057	-0.09235	-0.00998	-0.12094	-0.12303	1							
Fluoretos	-0.04662	-0.00616	-0.11879	-0.02347	-0.02484	-0.09485	0.005623	-0.01446	1						
Fosfatos	-0.00562	0.057067	0.371088	0.305666	-0.03995	0.157449	0.02123	0.049818	-0.06651	1					
Sulfatos	-0.00552	-0.02867	-0.13462	-0.06962	-0.04527	0.24794	0.141509	-0.07883	-0.03116	0.049103	1				
Cálcio	0.376871	0.076117	-0.07241	0.152519	-0.08934	0.297114	0.612293	0.385601	-0.08316	0.208969	0.331425	1			
Magnésio	0.666943	0.06041	-0.23095	-0.11844	-0.10811	0.059284	-0.00194	0.558548	0.383968	0.066902	0.335745	0.409138	1		
Sódio	0.348958	-0.00982	0.076374	0.40108	-0.07372	0.182322	0.676727	0.398583	0.047813	-0.02626	-0.03926	0.377023	0.139093	1	
Potássio	0.83278	-0.02533	-0.0833	-0.09843	0.222424	-0.12668	-0.13656	0.774842	-0.00958	0.024478	-0.18888	0.281816	0.490549	0.280777	1