

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

Análise da vulnerabilidade natural à contaminação por gasolina de solos das formações
Corumbataí, Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro.

Gabriel Golfetti Fernandes

Orientadora: Prof(a).Dr(a). Vania Silvia Rosolen

Rio Claro (SP)

2022

GABRIEL GOLFETTI FERNANDES

**Análise da vulnerabilidade natural à contaminação
por gasolina de solos das formações Corumbataí,
Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro**

Orientadora: Prof.^a Dra. Vania Silvia Rosolen

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro (SP)

2022

F363a	Fernandes, Gabriel Golfetti Análise da vulnerabilidade natural à contaminação por gasolina de solos das formações Corumbataí, Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro / Gabriel Golfetti Fernandes. -- Rio Claro, 2022 56 f. : il., tabs., mapas Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientadora: Vania Silvia Rosolen 1. Análise de vulnerabilidade. 2. Contaminação. 3. Hidrocarbonetos. 4. Propriedades físicas do solo. 5. Condutividade hidráulica. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GABRIEL GOLFETTI FERNANDES

**Análise da vulnerabilidade natural à contaminação
por gasolina de solos das formações Corumbataí,
Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen (Orientadora)

Dra. Karen Luko Sulato

Ms. Lucas Moreira Furlan

Assinatura do(a) aluno(a)

Gabriel Golfetti Fernandes

Assinatura do(a) orientador(a)

Vania Silvia Rosolen

Rio Claro (SP), 21 de Março de 2022

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato a todos que me acompanharam ao longo da graduação, do apoio de meus pais, Cláudio e Patrícia, aos colegas de convivência diária ou remota Thaís Naomi, Kenny e Flavio.

Agradeço também à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo auxílio e fomento financeiro, dado por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH 40.

RESUMO

A contaminação do solo por hidrocarbonetos combustíveis, em especial a gasolina, é um dos principais problemas ambientais no Brasil. No estado de São Paulo, estima-se que cerca de 80% das áreas contaminadas envolvem hidrocarbonetos combustíveis, sendo o principal a gasolina, a qual possui em sua composição diversos compostos de potencial dano à saúde humana e qualidade da água subterrânea. Em casos de derramamentos em superfície e subsuperfície, as características físicas do meio no qual a gasolina se propaga, o solo, possui grande influência na atenuação destes impactos, sendo as principais características de controle intrínsecas ao meio, a condutividade, porosidade, declividade, profundidade da zona insaturada e o potencial de adsorção dos contaminantes. Estas características estão diretamente ligadas à geologia da área e seu respectivo perfil de alteração, definindo a vulnerabilidade de uma área à contaminação da água subterrânea. Este trabalho visa a análise da vulnerabilidade em solos de diferentes unidades sedimentares pertencentes à Bacia do Paraná, através do estudo de características físicas intrínsecas das formações Corumbataí, Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro nos municípios de Rio Claro, Corumbataí, Analândia e Itirapina. O uso de dados bibliográficos e a integração com bases de dados em SIG permitiu a avaliação dos parâmetros gerais de vulnerabilidade diretamente afetados pela geologia da área e características do perfil de alteração. Classificou-se de forma relativa a Fm. Corumbataí como aquela de menor vulnerabilidade natural à contaminação por gasolina, e a Fm. Pirambóia como de maior vulnerabilidade. Foram identificados parâmetros intrínsecos ao solo, em especial se considerada a contaminação por gasolina, que raramente estão presentes nos modelos já estabelecidos, como o DRASTIC, os quais está inclusa a porcentagem de argilominerais com alto potencial de adsorção e a variabilidade de fácies sedimentares ao longo de perfis de solo espessos.

Palavras-chave: análise de vulnerabilidade; contaminação; hidrocarbonetos; propriedades físicas do solo; condutividade hidráulica.

ABSTRACT

Soil contamination by hydrocarbon fuels, in special gasoline, is one of the main environmental problems in Brazil. In São Paulo state, around 80% of the contaminated sites are estimated to have been affected by hydrocarbon fuels, with gasoline being the main fraction and containing several compounds that can be hazardous to human health, as well high potential to endanger the groundwater quality. Considering an oil spill in surface or subsurface scenario, the physical properties of the media are the most important factors that can lead to the attenuation of that impact, which can be named as the hydraulic conductivity, porosity, topography, groundwater depth, and mineral adsorption potential. These variables are directly linked to the local geology and its corresponding soil profile, establishing the concept of vulnerability for an area's groundwater. This work aims to assess the intrinsic soil vulnerability to the Corumbataí, Piramboia, Serra Geral and Rio Claro sedimentary formations of the Paraná Basin, focusing in the municipalities of Rio Claro, Corumbataí, Analândia and Itirapina. The combination between bibliographic data and GIS database systems allowed the assessment of the key media elements related to the geology and soil. The Corumbataí Fm. has classified, relatively to the others, as the one with the lowest intrinsic vulnerability, and the Piramboia Fm. as attaining the highest vulnerability. Some soil media parameters related to gasoline contamination, and which are rarely present in well established models for vulnerability assessment as DRASTIC were identified, and include adsorption potential and sedimentary facies variability in thick soil profiles.

Keywords: vulnerability assessment; contamination; hydrocarbon compounds; soil physical properties; hydraulic conductivity.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	11
1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	14
2.1 FORMAÇÃO CORUMBATAÍ	16
2.2 FORMAÇÃO PIRAMBÓIA	17
2.3 FORMAÇÃO SERRA GERAL	17
2.4 FORMAÇÃO RIO CLARO	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 VULNERABILIDADE	19
3.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DA GASOLINA	21
3.3 ZONA VADOSA	24
3.4. PARÂMETROS INTRÍNSECOS DE VULNERABILIDADE	26
3.4.1 Porosidade	26
3.4.2. Condutividade Saturada (Ksat)	27
3.4.3 Permeabilidade	28
3.4.4. Parâmetros espaciais	29
3.5 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE	30
4 MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO	32
4.1. DADOS BIBLIOGRÁFICOS	32
4.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1 FORMAÇÃO CORUMBATAÍ	35
5.2. FORMAÇÃO PIRAMBÓIA	37
5.3. FORMAÇÃO SERRA GERAL E INTRUSIVAS BÁSICAS	39
5.4. FORMAÇÃO RIO CLARO	41
5.5 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO	45
6 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A principal fonte energética do mundo são os hidrocarbonetos derivados de petróleo e, em decorrência da dependência de nossa sociedade a este combustível, é quase inevitável que compostos derivados do petróleo alterem a qualidade ambiental. A contaminação de solos e aquíferos decorrente da atividade humana é um grave problema de escala mundial, não apenas pelo comprometimento da qualidade ambiental, terras produtivas e recursos hídricos, mas pela exposição direta de indivíduos (KHAN et al., 2018). Dentre as principais substâncias presentes em áreas contaminadas ao redor do globo, há uma substancial presença de hidrocarbonetos e derivados de petróleo. Segundo Panagos et al. (2013), cerca de 50% dos solos comprometidos da Europa estão ou foram contaminados por hidrocarbonetos, sendo em média as atividades envolvidas no refino, transporte e serviços relacionados, como postos de gasolina, aquelas com maior número de áreas contaminadas. Em países como EUA e Austrália, estas substâncias representam a maioria das áreas contaminadas (KHAN et al., 2018).

No Brasil, este cenário tende a se repetir, tendo os hidrocarbonetos como principais contaminantes, com os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul entre aqueles com maiores quantidades de áreas contaminadas conhecidas. No estado do Rio de Janeiro, cerca de 56% das áreas contaminadas são resultantes da atividade inadequada de postos de combustíveis e, no estado de Minas Gerais, 77% (TEIXEIRA et al. 2016). Esta situação é agravada no estado de São Paulo, que possui cerca de 80% de todas as áreas contaminadas cadastradas no país (TEIXEIRA et al. 2016), e das quais 74% estão diretamente ligadas com a atividade de postos de combustíveis, segundo dados da CETESB (2019).

Os hidrocarbonetos, em suas frações contaminantes mais comuns, podem ser divididos, com base em sua estrutura molecular, entre alcanos, cicloalcanos e aromáticos (FARIAS, 2003; SCHNEIDER, 2012). A fração prevalente nos hidrocarbonetos combustíveis é a dos alcanos, no qual estão inclusos o diesel e a gasolina, possuindo como características baixa solubilidade e densidade menor que a da água. Acompanhada desta fração, os hidrocarbonetos combustíveis possuem uma ampla gama de compostos Aromáticos, como

benzeno, tolueno, etilbenzeno, o-xileno, m-xileno, p-xileno (BTEX) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), os quais além da difícil degradação, apresentam alta toxicidade e ação carcinogênica (FARIAS, 2003; LAHR & KOOISTRA, 2010; SCHNEIDER, 2012; KHAN et al., 2018).

Dentre as estratégias para mitigar eventuais danos ao ambiente e a saúde humana, no caso das contaminações por hidrocarbonetos, está a análise e o mapeamento de vulnerabilidade à contaminação de uma determinada região. Este método visa fornecer dados e informações relevantes para um melhor planejamento e locação de empreendimentos com risco de contaminação (LAHR & KOOISTRA, 2010).

Dado um cenário comum, com liberação das substâncias contaminantes de forma superficial ou subsuperficial rasa (SCHNEIDER, 2012), a vulnerabilidade pode ser definida, segundo Hirata (1991), como a possibilidade deste contaminante impactar na qualidade ambiental, do solo ou aquífero, de acordo com as características de condutividade hidráulica e capacidade de atenuação na zona vadosa.

A vulnerabilidade à contaminação é o conceito que pode ser utilizado para analisar o grau de impacto de um possível dano ao meio ambientes, e é ligada ao conjunto de características intrínsecas do solo particular de cada região, relacionada a uma combinação entre características da rocha e superfície (HIRATA et al., 1991; SCHNEBELEN et al., 2002). Neste contexto, a zona vadosa do solo é o meio de transferência entre uma contaminação e o aquífero e, dadas suas características e reatividade, controla diretamente a dispersão do contaminante (GALANTE, 2008), os quais podem comprometer seriamente a saúde humana. Dentre as principais propriedades que influenciam este processo, estão a permeabilidade (diretamente ligada a condutividade hidráulica), a estrutura (KAZAKIS & VOUDOURI, 2015) e a composição mineralógica; esta última com a forte influência de argilominerais na sorção de hidrocarbonetos (LI et al., 2016).

O estado de São Paulo possui uma ampla gama litológica, principalmente na região da borda da Bacia do Paraná, a exemplo dos municípios de Rio Claro, Corumbataí, Itirapina e Analândia. A existência de solos com variadas características físicas e mineralógicas,

propiciadas por variações na geologia local, acarreta diferentes cenários de vulnerabilidade à contaminação por hidrocarbonetos (HIRATA et al., 1991; SISTO et al., 2018).

O principal objetivo deste projeto é avaliar, através de critérios quantitativos, a correlação entre rocha fonte na vulnerabilidade do solo de uma região à contaminação por gasolina. Esta avaliação leva em conta propriedades físicas e mineralógicas de perfis de solo e a capacidade de infiltração. Para tal, o estudo será realizado na região norte de Rio Claro e municípios adjacentes, que apresentam uma grande representatividade de litologias e de materiais pedológicos, em uma área razoavelmente pequena, através das formações Corumbataí, Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste projeto é avaliar a correlação entre a rocha fonte do solo de uma região e sua vulnerabilidade à contaminação por gasolina combustível.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar parâmetros de vulnerabilidade intrínseca em solos das formações Corumbataí, Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro.
- Identificar possíveis fatores que interfiram na vulnerabilidade específica à gasolina combustível.
- Classificar a vulnerabilidade de cada contexto estudado, tanto de forma global quanto comparativa entre as litologias.

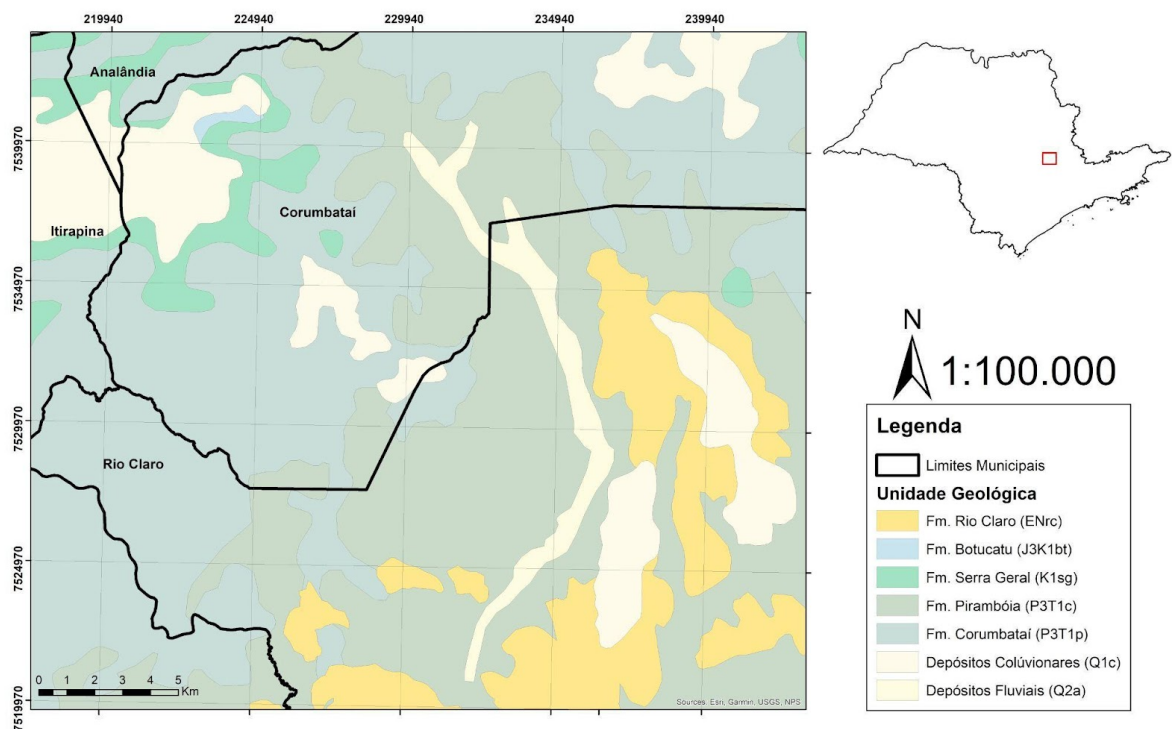
1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área alvo do estudo está inserida na porção centro-leste do estado de São Paulo, e abrange territórios dos municípios de Rio Claro, Corumbataí, Analândia e Itirapina. O acesso a localidade tem como vias principais a Rodovia Washington Luiz (BR-364) e a Rodovia Estadual Wilson Finardi (SP-191), sendo através destas possível o acesso a vias secundárias.

Geomorfologicamente, a região corresponde a porção noroeste da Depressão Periférica Paulista, com áreas inseridas na unidade de Cuestas Basálticas. O relevo da Depressão Periférica é definido por formas suaves, com uma topografia pouco acidentada e desníveis variando entre 20 e 50 metros, com a presença de colinas amplas, colinas médias, morrotes alongados e espigões. Destacam-se também planícies e topos retilíneos de aplainamento (PENTEADO, 1976).

A porção oeste é marcada por um desnível bastante acentuado (entre 300 m a 400 m) que culmina em uma altitude superior a 800 m (SOUSA, 2002) nas escarpas do limite externo do domínio de Cuestas Basálticas, estruturadas com base suave e paredes subverticais de traçado contínuo, corresponde aos relevos de escarpas festonadas e mesas basálticas (IPT, 1981). A geologia da área é definida pelo afloramento de rochas referentes a borda leste da Bacia do Paraná - uma sinéclise intracratônica com abrangência entre o Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina, preenchida por rochas sedimentares e magmáticas Paleozóicas e Mesozóicas (MILANI et al., 2007). No local, identifica-se o afloramento de rochas das formações Corumbataí, Pirambóia, Botucatu e Rio Claro, e magmáticas extrusivas relacionadas ao evento Serra Geral (Figura 1).

Figura 1 : Contexto Geológico da área de estudo

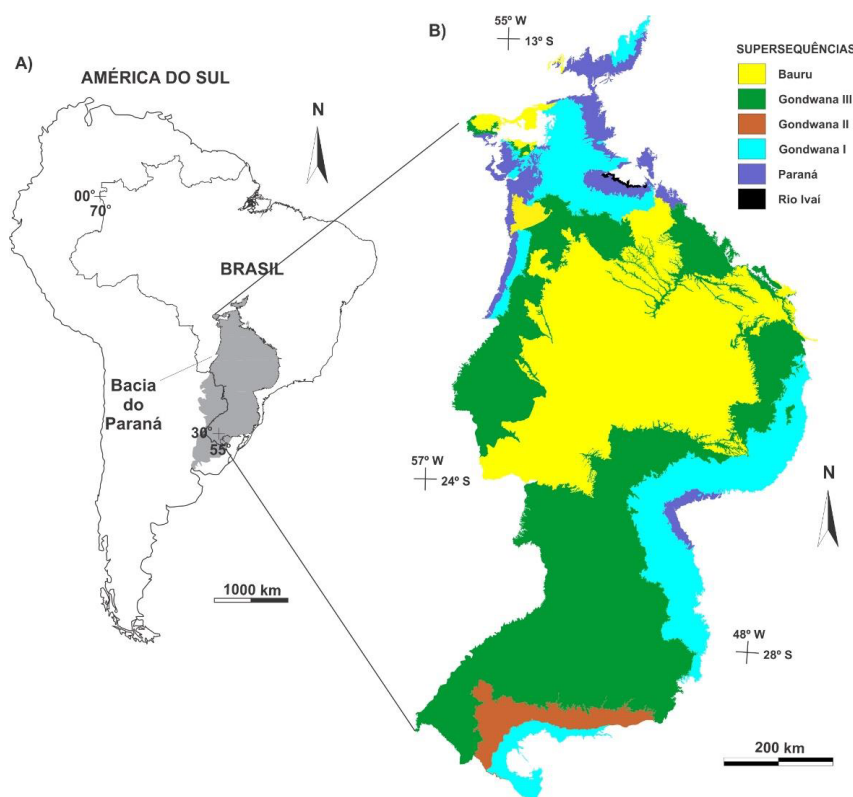


Fonte: Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de São Paulo, escala 1:750.000 (CPRM, 2006)

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A área de estudo está inserida em um contexto regional de rochas sedimentares da borda leste da Bacia do Paraná. Esta bacia sedimentar abrange uma área aproximada de 1.500.000 km² (MILANI et al, 2007), ocupando porções majoritárias dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul, partes de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Paraguai, Uruguai e Argentina (MILANI, 1997)(Figura 2).

Figura 2 : Mapa da Bacia do Paraná no território brasileiro e supersequências segundo Milani, (1997)



Fonte: Montibeller (2019)

A Bacia do Paraná possui caráter de sinéclise intracratônica (FULFARO et al., 1982), desenvolvendo-se sobre um substrato Paleozóico, e com estratigrafia marcada por supersequências deposicionais referentes, respectivamente, ao Siluriano (Rio Ivaí), Devoniano (Paraná), Carbonífero-EoTriássico (Gondwana I) NeoTriássico (Gondwana II), Neojurássico-Eocretácico (Gondwana III) e NeoCretácico (Bauru) (MILANI, 1997), os quais

soma-se a acumulação sedimentar durante o Terciário (ZAINÉ, 1994). Estes pulsos de subsidência, e consequentemente a evolução da bacia, são descritos como resultado de isostasia, propagada de eventos colisionais síncronos na margem oriental do supercontinente Gondwana (MILANI & RAMOS, 1998; PINTO, 2019).

Na localidade de estudo, a borda leste da Bacia do Paraná, destaca-se o afloramento de rochas das supersequências Gondwana I, com a Formação Corumbataí e Pirambóia; e Gondwana II, representado pelo magmatismo extrusivo Serra geral, além da formação Rio Claro, posterior a supersequência NeoCretácica da Bacia Bauru. (ZAINÉ, 1994)

A supersequência Gondwana I representa o pacote mais espesso da bacia, com cerca de 2500 m na região da calha (MILANI et al, 2007), e engloba depósitos marinhos, marinhos restritos e continentais, e descrevendo a evolução da bacia do Carbonífero ao início do Mesozóico (PINTO, 2019). Destacam-se na área a Formações Corumbataí, correlacionada ao Grupo Guatá, de sedimentação Permiana e a Formação Pirambóia (Figura 3).

Figura 3: Coluna estratigráfica simplificada da Bacia do Paraná na Região de Rio Claro

ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)
CENOZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100
MESOZOICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100
	JURÁSSICO		BOTUCATU		100
	TRIÁSSICO		PIRAMBÓIA		150
				CORUMBATAÍ	
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	IRATI		40
			Mb. Assistência Mb. Taquaral		50
		TATUI		900	
	CARBONIFERO	ITARARÉ	Grupo ITARARÉ (Indiviso no Estado de São Paulo)		
					
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO		

Fonte: Perinotto & Zaine (2008)

A supersequência Gondwana II está associada à sedimentação continental desértica da Formação Botucatu, intercalada a extensos derrames de natureza basáltica do evento Serra Geral (MILANI et al., 2007; ROCHA et al., 2020). Este evento magmático tem em sua causa mais provável a reativação de estruturas Paleozóicas durante a quebra do Gondwana Ocidental entre 138 e 125 Ma (ROCHA et al., 2020).

2.1 FORMAÇÃO CORUMBATAÍ

A Formação Corumbataí é caracterizada pela deposição pelítica Neo Perminiana (298,9 ±0,15 M.a. até 251,902 ±0,024 M.a.) (MONTIBELLER, 2019), tipicamente representada por siltitos e folhelhos de coloração arroxeadas a avermelhadas, e ocasionalmente intercalados a siltitos arenosos (MILANI et al., 2007). A estrutura sedimentar predominante é a estratificação plano-paralela, mas pode-se encontrar também laminação flaser, fendas de ressecamento, laminação cruzada, marcas onduladas e estruturas estromatolíticas.

Esta formação aflora em uma faixa alongada da borda leste da bacia, diferenciando-se a sul no interior do estado de São Paulo a partir da região de Piracicaba, e seguindo a borda da bacia até Itiquira, no Mato Grosso (MONTIBELLER, 2019). A máxima espessura desta formação ocorre próximo a área de estudo, na região de Santa Gertrudes (MONTIBELLER, 2019).

A sedimentação é tipicamente de planície de maré segundo (MILANI et al. (2007), embora a correlação com deposições Permianas da Formação Teresina, de características similares e inserida no contexto da supersequência Gondwana I, possa ser comum (MILANI & RAMOS, 1998; ZAIEN, 1994), é possível que sua deposição esteja associada a áreas fontes distintas (MONTIBELLER, 2019).

Fisiograficamente, distingue-se pela baixa densidade de drenagens e pequenas planícies aluvionares, resultado de sua baixa permeabilidade e nível freático raso, relacionada à composição predominantemente argilosa (MONTIBELLER, 2019).

2.2 FORMAÇÃO PIRAMBÓIA

A formação Pirambóia é caracterizada por uma sucessão de arenitos esbranquiçados finos a médios, bem selecionados, e com características típicas de sistemas deposicionais de dunas úmidas (ALMEIDA et al., 2012). Esta formação é limitada por uma discordância inferior do NeoTriássico, sobreposta à Formação Corumbataí, e em seu topo por uma discordância EoJurássica com a Formação Botucatu (MILANI & RAMOS, 1998; MILANI et al., 2007), embora tais idades sejam alvo de discussão (CHRISTOFOLETTI et al., 2021).

Esta sucessão aflora ao longo de toda borda leste da Bacia do Paraná, com espessura aproximada de 150 m em localidades adjacentes à área de estudo deste trabalho (ZAINÉ E PERINOTTO, 2008). Estratificações cruzadas de grande porte são estruturas sedimentares típicas desta formação, caracterizando ambientes eólicos de dunas e interdunas alagadas (ASSINE et al, 2004), com eventuais depósitos fluviais de arenito conglomerático (ASSINE & SOARES, 1995).

No relevo, destaca-se o alto potencial de erosão em áreas de afloramento desta formação, e os solos caracterizam-se pela alta permeabilidade, resultado da granulometria fina e bem selecionada típica (PENTEADO, 1976). Esta formação, em conjunto a Formação Botucatu, desempenha um papel de extrema relevância como rocha aquífera no Sistema Aquífero Guarani (SAG) (CORTÊS, 2013).

2.3 FORMAÇÃO SERRA GERAL

Os derrames basálticos da Formação Serra Geral são resultado do magmatismo fissural do Neojurássico, e que atingiu a bacia no processo de abertura do Atlântico Sul, ocupando no Brasil uma área aproximada de 917.00 km² (JANASI et al., 2011) na denominada Província Magmática Paraná-Etendeka (MILANI et al., 2007). Estes derrames afloram, mesmo que de forma irregular, ao longo de toda borda da Bacia do Paraná, entre Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina.

Esta série de eventos resultou em uma espessa cobertura de lavas basálticas toleíticas entre 131 e 135 Ma (JANASI et al. 2011), de textura afanítica, coloração cinza a negra,

amigdaloidal no topo dos derrames, estruturada e uma rede de diques e soleiras, podendo estar associado a lavas ácidas em algumas localidades (MILANI et al., 2007). Estes derrames iniciam-se na porção sul da bacia, se propagando para norte em um período de cerca de 2 Ma.

A alteração da Fm. Serra Geral é caracterizada na área pelo desenvolvimento de Latossolos vermelho-escuros (ZAINÉ, 1994) com a ocorrência de perfis lateríticos, resultado de interações climáticas quaternárias (PENTEADO, 1976).

2.4 FORMAÇÃO RIO CLARO

A Formação Rio Claro é constituída por sedimentos arenosos, em sua maioria inequigranulares, esbranquiçados, amarelados e róseos, comumente ocorrendo em intercalações de lentes argilosas e níveis conglomeráticos, com deposição entre o Mioceno e NeoPleistoceno (ZAINÉ, 1994; FERREIRA & CHANG 2008; SALMAZO, 2015). As litofácies indicam um paleoambiente de fluxo no geral energético e desorganizado, em certas porções, compatível a um ambiente fluvial meandante, segundo Zaine (1994).

A ocorrência desta formação é no geral reduzida à porção norte da Depressão Periférica Paulista, limitado por condicionantes topográficos e estruturais, definidos na folha Rio Claro pela Formação Pirambóia a norte e leste, e estruturas tectônicas, como o domo de Pitanga e a zonas de falha, a sul (ZAINÉ, 1994).

A alteração da Formação Rio Claro resulta em latossolos areno-argilosos, no geral de grande espessura, com profundidade do nível freático oscilante. A fraca litificação, a alta erodibilidade e o espesso perfil de solo, característicos na área, tendem a formar grandes superfícies aplainadas, com colinas amplas, tabuliformes e frequentes lagos de topo (PENTEADO, 1976; ZAINÉ, 1994).

Devido a heterogeneidade desta formação, podem ocorrer substanciais diferenças na condutividade hidráulica dentro desta formação (OLIVA, 2006; GONÇALVES 2016). Gonçalves (2016) divide três fácies de comportamento hidrogeológico distinto: a primeira com baixos teores de argila e de maior condutividade; a segunda com composição entre 20-40%; e a terceira representando lentes de composição majoritariamente argilosa.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como base o entendimento dos conhecimentos básicos envolvidos na análise de vulnerabilidade. São abordados conceitos básicos acerca da definição de vulnerabilidade, propriedades físico-químicas dos contaminantes (gasolina), características gerais do solo, propriedades físicas intrínsecas da zona vadosa e métodos e ferramentas de classificação de vulnerabilidade.

3.1 VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade representa, para o estudo ambiental, a estimativa do risco e grau de uma contaminação a partir de características físicas e químicas intrínsecas à área (HIRATA et al., 1991). O termo foi proposto dentro da área de geologia e meio ambiente pela primeira vez por Albinet & Margat (1970), utilizado pelos autores para definir a possibilidade de percolação e difusão de um contaminante, em condições naturais, percorrendo o solo entre a superfície e uma camada aquífera.

A influência do meio físico, representado pela zona vadosa, é enfatizada por trabalhos seguintes, ao longo das décadas de 1970 e 1980 (CHENINI et al., 2015). Olmer & Rezàc (1974) discutem o grau de vulnerabilidade de uma área como independente da fonte de contaminantes, mas sim ligado a características físicas e hidrológicas intrínsecas. Vrána (1983) inclui a probabilidade e escala de danos à qualidade ambiental, em especial a água subterrânea, como parte do conceito de vulnerabilidade.

A vulnerabilidade de solos e aquíferos começa a ser abordada em meios acadêmicos brasileiros a partir do final da década de 1980 e início de 1990 (FOSTER & HIRATA, 1988; HIRATA et al., 1991). Hirata et al. (1991) propõe para o estudo de vulnerabilidade no estado de São Paulo o uso de variáveis discretas, diretamente ligadas a propriedades físicas de solo, coletadas em campo.

Dentre os primeiros trabalhos do tipo no estado de São Paulo (HIRATA et al., 1991), é destacada a diferença entre análises de “vulnerabilidade à contaminação” e de “risco a

contaminação”. Embora a vulnerabilidade seja complementar à análise de risco, a segunda leva em conta, além dos fatores do meio, interação de uma fonte contaminante conhecida ou suposta (OLMER E REZÀC, 1974; HIRATA et al., 1991).

A ampliação do conceito de vulnerabilidade se deu em décadas seguintes, com a divisão entre “vulnerabilidade intrínseca” e “vulnerabilidade específica” (SCHNEBELEN et al., 2002; CHENINI et al., 2015). A vulnerabilidade intrínseca, seguindo a definição clássica, aborda apenas as características do meio, sendo ele a zona vadosa e a zona saturada, através de características físicas e hidrológicas (OSTER & HIRATA, 1988; CHENINI et al., 2015). A vulnerabilidade específica leva em conta um contaminante de composição conhecida, avaliando não só seu comportamento, mas sua interação química com o meio, além de seu potencial de afetar a qualidade do ambiente (SCHNEBELEN et al., 2002, CHENINI et al., 2015).

Por não ser uma propriedade física, e sim um conjunto de variáveis, dependentes ou não, a análise da vulnerabilidade intrínseca de uma área necessita da coleta e interpolação de parâmetros de uma área (HIRATA et al., 1991; SCHNEBELEN et al., 2002; LAHR; KOOISTRA, 2010).

Hirata et al. (1991) propõe, em seu estudo de vulnerabilidade pioneiro no estado de São Paulo, o uso de variáveis discretas diretamente ligadas ao solo e camadas aquíferas através de observações em campo. O tipo de ocorrência do aquífero (livre, confinado, semi-confinado), a profundidade da zona vadosa e a litologia da área são utilizadas por este autor como parâmetros principais.

Com a evolução desta área, diversos outros parâmetros foram incorporados a este tipo de análise, embora cada um deva ser avaliado quanto a escala e relevância local (SORICHETTA et al., 2011). Dentre os principais, estão aqueles relacionados à zona vadosa, como textura, estrutura, permeabilidade e composição mineralógica; à zona saturada, como sua profundidade, porosidade e condutividade; e outras, espacialmente dependentes, como a topografia (BARBER et al., 1993; SCHNEBELEN et al., 2002; ; KHAN et al., 2018). Quanto ao caso específico de contaminantes derivados de hidrocarbonetos, trabalhos mais recentes (KHAN et al., 2018) utilizam como fator importante para a determinação da vulnerabilidade específica a adsorção e conteúdo total de matéria orgânica.

A análise de vulnerabilidade pode ser realizada, a partir dos dados principais, através de três abordagens distintas, análises empíricas com a adoção de índices, modelagem física e interpolações estatísticas (CHENINI et al., 2015). Os primeiros trabalhos do tipo realizados no Brasil, de Hirata et al. (1991), utilizam a análise do tipo empírica, com amostras agrupadas em classes subjetivas.

Este tipo de abordagem para estudos de vulnerabilidade é criticada por diversos autores, e o principal problema teórico apontado é o uso de valores padrão para o peso de cada propriedade, o que pode não representar de forma correta as características particulares de cada área (BARBER et al., 1993; LAHR; KOOISTRA, 2010; SORICHETTA et al., 2011; PACHECO & FERNANDES, 2013).

Um dos principais objetivos da elaboração de uma análise ou carta de vulnerabilidade é fornecer orientações para o desenvolvimento, de forma a permitir melhores estratégias na implantação de atividades humanas e a manutenção da qualidade ambiental (CHENINI et al., 2015, SCHNEBELEN et al., 2002). Ainda segundo os mesmos autores, a escala do estudo é importante para direcionar seu uso, sendo as maiores escalas recomendadas apenas para a criação de políticas públicas educacionais e de proteção ambiental (1:1.000.000 a 1:500.000).

3.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DA GASOLINA

O produto combustível mais comumente comercializado ao redor do mundo é a gasolina e que, embora possua predominância da fração de hidrocarbonetos de mesmo nome, é uma mistura de substâncias com variados comportamentos e toxicidades (MUIJS & JONKER, 2011).

Estes hidrocarbonetos possuem no geral entre quatro a doze átomos de carbono em sua estrutura, abrangendo compostos do grupo dos alcanos, cicloalcanos, e aromáticos, totalizando mais de uma centena de hidrocarbonetos diferentes, em uma mistura complexa (FARIAS, 2003; MUIJS & JONKER, 2011). Ademais de hidrocarbonetos, a gasolina comercial possui uma gama de elementos traços que variam em quantidade, sendo os principais o enxofre, nitrogênio e metais pesados como chumbo (KHAN et al., 2018).

A gasolina pura se caracteriza por um comportamento hidrofóbico, medianamente volátil, de densidade $0,721 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, com cerca de 50-70% de seu volume em hidrocarbonetos alifáticos. Hidrocarbonetos aromáticos do tipo BTEX compõem o segundo grupo mais presente na gasolina pura, podendo atingir concentrações de até 20% em volume (GALANTE, 2008; SCHNEIDER, 2012).

No geral estas concentrações de BTEX, segundo Oliveira (2015), compreendem em volume cerca de 0,52% de benzeno, 3,38% de tolueno e 5,52% de xileno. Os compostos BTEX possuem comportamento hidrofóbico, são pouco solúveis e de menor densidade que água (embora mais solúveis que a gasolina em si) (GALANTE, 2008). A toxicidade do benzeno e etilbenzeno é classificada como carcinogênica, enquanto o tolueno e xileno são tóxicos sistêmicos (KHAN et al., 2018).

A gasolina comercial brasileira não é sinônimo da gasolina pura, isto porque possui cerca de 20-25% em volume composto de etanol anidro, sendo denominada “gasolina C” (SCHNEIDER, 2012). A gasolina tipo C no Brasil apresenta a 20°C densidade entre 0,735 e $0,765 \text{ mg/L}$, viscosidade de 0,54 cP, é mais solúvel em água e possui menor potencial de sorção que a gasolina pura (OLIVEIRA, 2015). As principais propriedades físico químicas dos hidrocarbonetos citados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Propriedades físico químicas dos hidrocarbonetos principais da gasolina C

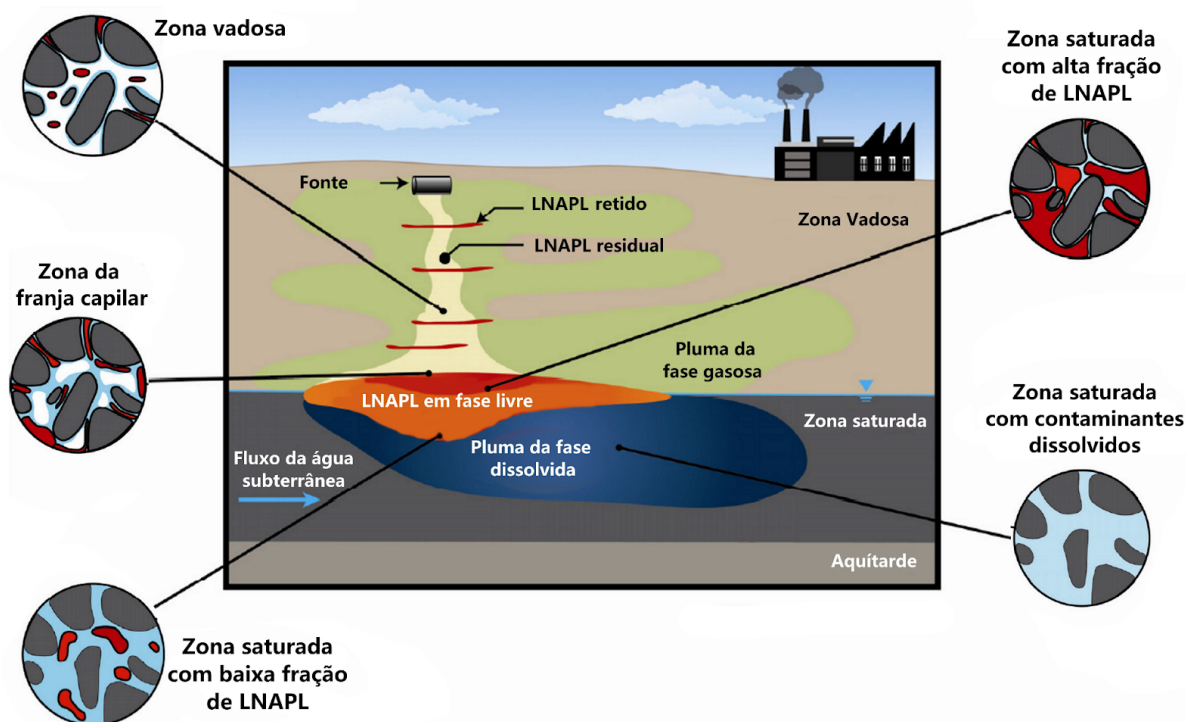
Composto Indicadores	Densidade (20°) (g / cm³)	Ponto de Ebulição (°C)	Pressão de Vapor (20°C. atm)	Const.deHenry (atm.m³.mol⁻¹)	K_{ow}
Benzeno	0,88	80,1	$1,0 \times 10^{-1}$	$5,59 \cdot 10^{-3}$	132-141
Tolueno	0,87	110,6	$2,9 \times 10^{-2}$	$6,37 \cdot 10^{-3}$	537
Etilbenzeno	0,867	136,25	$9,2 \times 10^{-3}$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	891
O-xileno	0,880	144	$6,6 \times 10^{-3}$	$6,43 \cdot 10^{-3}$	1410
Etanol	0,79	78,50	$7,4 \times 10^{-2*}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	---
Gasolina	0,72-0,78	---	$6,8 \times 10^{-3**}$	---	---

Fonte: Schneider (2012)

Considerando a gasolina C de forma padrão com 22% de etanol em volume, a concentração de elementos BTEX é relativamente menor se comparada a gasolina pura, com volumes de 0,42% de benzeno, 2,72% de tolueno e 4,60% de xileno (OLIVEIRA, 2015). Apesar disso, os hidrocarbonetos aromáticos são bastante solúveis no etanol anidro, que por sua vez é solúvel em água, resultando na mobilidade destes elementos em meio aquoso pelo fenômeno da co-solvência, aumentando possíveis impactos ao ambiente (FARIAS, 2003; GALANTE, 2008; KHAN et al., 2018).

Uma das principais características de vulnerabilidade específica da gasolina como contaminante decorre de sua densidade, menor que a da água (SCHNEIDER, 2012). O comportamento da fase de hidrocarbonetos contaminantes no solo é de uma fase líquida não aquosa (NAPL), e de acordo com a densidade da substância, é dividido entre *dense non-aqueous phase liquid* (DNAPL) ou *light non-aqueous phase liquid* (LNAPL) (FARIAS, 2003; SCHNEIDER, 2012). Um modelo conceitual é expresso na Figura 4.

Figura 4: Modelo conceitual de uma pluma de contaminação de LNAPL



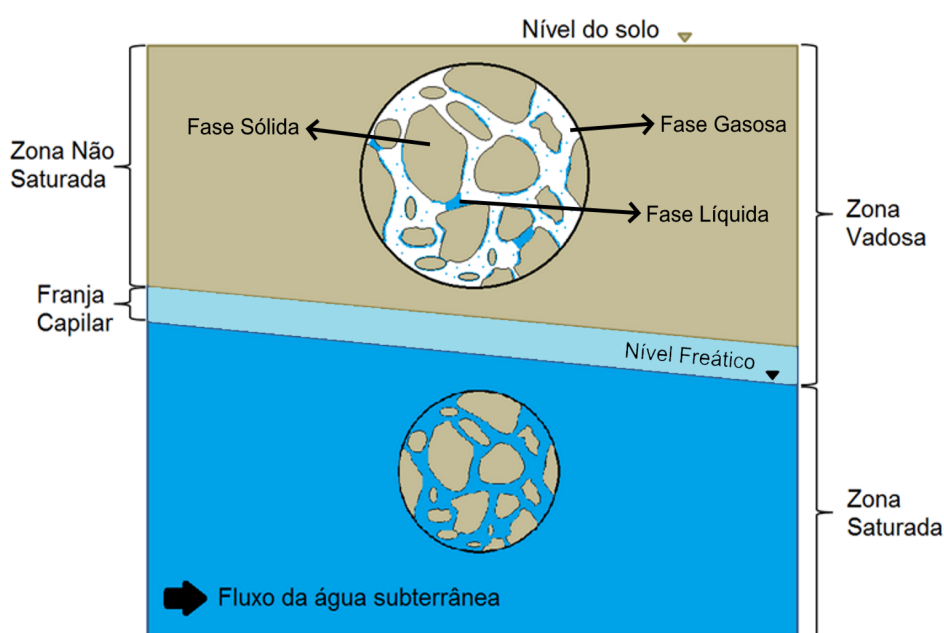
Fonte: CL:AIRE (2014)

A gasolina, pura ou comercial, é uma mistura de comportamento LNAPL. Esta característica do hidrocarboneto faz com que, em teoria, a zona saturada seja menos vulnerável à contaminação (SCHNEIDER, 2012). Apesar disso, a adição de etanol anidro e o fenômeno de co-solvência existentes na gasolina C resultam em um aumento da vulnerabilidade específica, bem como a importância das propriedades de atenuação da zona vadosa para a análise de vulnerabilidade (SCHNEBELEN et al., 2002).

3.3 ZONA VADOSA

Segundo Schnebelen et al. (2002), o conceito de vulnerabilidade está intimamente associado à influência das propriedades do solo, em especial da zona vadosa, em atenuar ou facilitar o transporte do contaminante. A zona vadosa solo é uma mistura multifásica complexa, no qual estão presentes uma ou mais fases sólidas, líquidas e gasosas (SCHNEIDER, 2012), e compreende tanto a zona não saturada do solo quanto a região de franja capilar (Figura 5).

Figura 5: Divisão do perfil de solo quanto a saturação



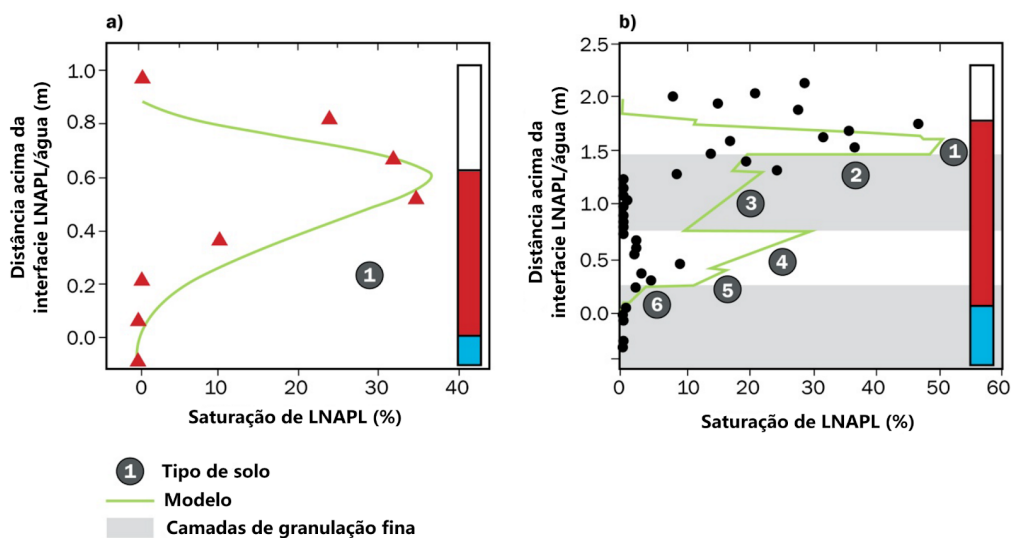
Fonte: Schneider (2012)

A vulnerabilidade intrínseca de uma área é, em especial, ligada à fase sólida, a qual representa a principal barreira física para a migração de contaminantes. As partículas minerais, tanto originais da rocha quanto derivadas de processos supérgenos, e matéria orgânica são os componentes principais desta fase (SCHNEIDER, 2012). A granulometria e estrutura da fase sólida são os principais fatores que condicionam a vulnerabilidade intrínseca na zona vadosa (HIRATA et al., 1991; ROCHA et al., 2019; CENTENO, 2020). Considerando a vulnerabilidade específica de hidrocarbonetos, o conteúdo total de matéria orgânica e a composição mineralógica apresentam-se como propriedades relevantes, em especial para solos com predomínio de argilominerais reativos, visto o potencial de sorção da gasolina (KHAN et al., 2018).

Em condições naturais, ou seja, sem a ocorrência de uma contaminação, considera-se a água como fase líquida da zona vadosa. A água é retida através da interação com a fase sólida, com as maiores forças interfaciais relativas entre líquido-sólido mais intensas do que em relação a líquido-gás (OLIVEIRA, 2015). A gasolina representa uma fase líquida não aquosa leve (*light non-aqueous phase liquid*), ou LNAPL, e propriedades do contaminante como viscosidade e pressão de vapor são importantes para o entendimento de sua vulnerabilidade específica, visto que podem permitir uma maior permanência na zona vadosa e menores riscos de contaminação da água subterrânea (FARIAS, 2003).

Em aquíferos livres, comportamento e a migração da fase LNAPL está diretamente relacionada à pressão capilar, resultando em uma concentração da saturação dos contaminantes mais próximo ao contato entre a franja capilar-zona vadosa, e que diminui próximo ao limite com a zona saturada do aquífero. Este modelo, segundo CL:AIRE (2014), diverge da representação clássica de uma fase livre de contaminantes achatada e homogênea, separada por imiscibilidade por um limite contínuo. Para um meio homogêneo, a variação de concentração possui verticalmente uma representação na forma de um pico (Figura 5a), embora esta geometria possa ser bastante variável em razão de heterogeneidades (Figura 5b) (CL:AIRE, 2014).

Figura 6: Concentração de contaminantes LNAPL na zona da franja capilar, sendo: a) concentração em um meio homogêneo, e b) concentração em um meio com heterogeneidades na condutividade.



Fonte: (CL:AIRE, 2014)

3.4. PARÂMETROS INTRÍNSECOS DE VULNERABILIDADE

A migração de um contaminante através do solo insaturado ocorre pela ação da força gravitacional, e tem como principais fatores os parâmetros intrínsecos de porosidade, permeabilidade e composição mineralógica (HIRATA et al., 1991; SISTO et al., 2018). Os principais parâmetros de vulnerabilidade relativos à zona saturada são a cota do nível d'água (consequentemente a espessura da zona vadosa) e a condutividade saturada. Outros fatores de grande importância são espacialmente mais variáveis, e podem ser intrínsecos, com destaque a topografia, ou extrínsecos, cujo mais importante é o uso e ocupação do solo (CENTENO et al., 2020).

3.4.1 Porosidade

A porosidade representa os espaços vazios existentes entre a fase sólida do solo ou rocha, em relação a seu volume total (HISCOCK & BENISE, 2021). A porosidade (n) é caracterizada pela equação:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo “ V_v ” o volume de vazios e “ V ” o volume total de uma dada amostra. No geral, o volume de vazios (V_v) é uma propriedade de difícil medição em laboratório. Para a obtenção de dados de porosidade, utilizam-se outros dois parâmetros, a *bulk density* (P_b), a partir da coleta de uma amostra indeformada de solo (HISCOCK & BENISE, 2021), e a *particle density* (P_p), utilizando a equação:

$$n = 1 - \frac{P_b}{P_p} \quad (\text{Eq. 2})$$

A porosidade é condicionada pelo tamanho, geometria e arranjo dos grãos minerais, cimentação, compactação e grau de fraturamento, e pode ser dividida entre granular e de fraturas (FEITOSA & FILHO, 2000). A porosidade granular representa os espaços vazios condicionados pelo arranjo geométrico entre os grãos (intergranular), sendo a porosidade principal ao se analisar o solo. A porosidade de fraturas é formada pela abertura de espaços planares em um material geológico quando submetido a esforços rúpteis (FEITOSA & FILHO, 2000). Uma terceira condição é a da porosidade intragranular, com a existência de espaços vagos internos ao grão mineral (como aqueles formados por dissolução) (RIBEIRO et al., 2007).

3.4.2. Condutividade Saturada (K_{sat})

A condutividade hidráulica é o parâmetro geral que mede o fluxo de uma substância aquosa, seja água ou contaminante, através do meio poroso (HISCOCK & BENISE, 2021), sendo considerada a propriedade chave para a análise de vulnerabilidade em uma área (CENTENO et al., 2019). A condutividade hidráulica (K) pode ser obtida através da equação:

$$K = \frac{k \cdot \gamma}{\mu} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo k um coeficiente intrínseco ao tamanho dos grãos, γ o peso específico da substância (no geral água), e μ a viscosidade cinemática do mesmo fluido (HISCOCK & BENISE, 2021).

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) representa o valor máximo de condutividade para um dado meio, atingido quando todos os poros são preenchidos por um

fluido, sendo influenciada pela estrutura e arranjo dos poros (FURLAN, 2019; ROCHA et al., 2019).

Esta propriedade é importante por dois fatores: permite a análise da vulnerabilidade intrínseca, pela observação da máxima condutividade do meio no qual está inserido; e representa dados menos complexos e variáveis para a coleta em campo, visto que a condutividade insaturada varia de forma extrema em função de pequenas alterações de umidade (ROCHA et al., 2019; CENTENO et al., 2020).

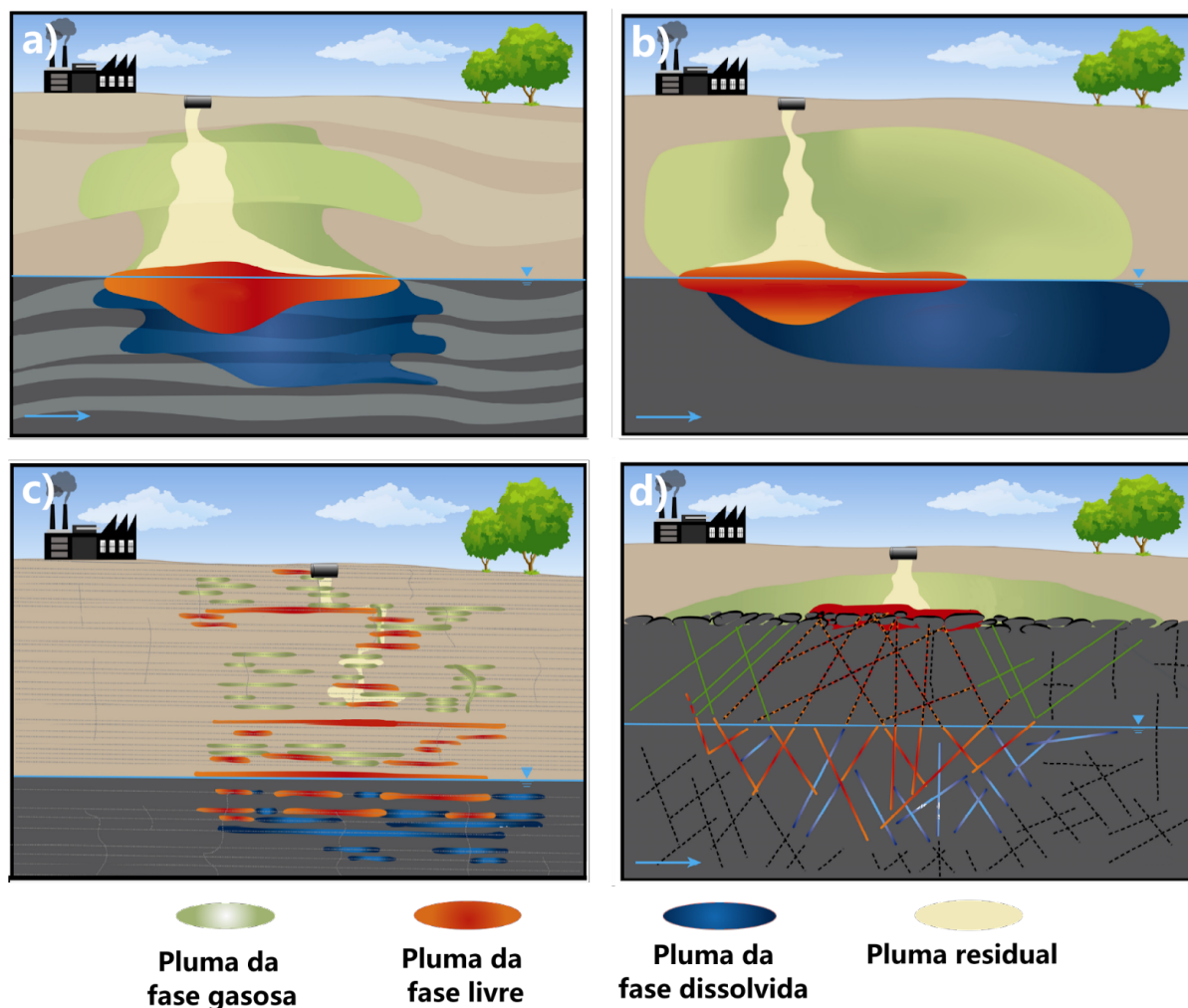
Conforme Vargas (1978), é possível classificar de forma qualitativa a permeabilidade de um solo através de sua condutividade entre cinco classes, que podem auxiliar na determinação da vulnerabilidade intrínseca: Alta($> 10^{-1}$ cm/s), Média(10^{-1} a 10^{-3} cm/s), Baixa(10^{-3} a 10^{-5} cm/s), Muito Baixa(10^{-5} a 10^{-7} cm/s) e Baixíssima($< 10^{-7}$ cm/s).

3.4.3 Permeabilidade

Um importante parâmetro intrínseco para o fluxo da fase líquida, tanto na zona vadosa quanto na zona saturada, é a permeabilidade. Esta propriedade é definida pelo grau de interligação dos vazios de um meio, dado por sua granulometria e disposição (HISCOCK & BENISE, 2021). Folhelhos são exemplos comuns de materiais geológicos de alta porosidade e baixa permeabilidade, e representam na prática barreiras ao fluxo subterrâneo. Na prática, esta propriedade pode ser deduzida de forma qualitativa ao se observar a umidade do material *in situ*, sendo solos de alta permeabilidade, no geral, mais secos (FURLAN, 2019).

Conhecendo-se de forma básica as heterogeneidades na permeabilidade de perfis de solo nas formações estudadas, é possível a proposição de modelos conceituais para o transporte de contaminantes LNAPL como a gasolina, com base em CL:AIRE (2014) (Figura 7).

Figura 7: Dispersão de contaminantes LNAPL em diversos cenários geológicos. a) aquífero poroso com camadas heterogêneas; b) aquífero poroso homogêneo; c) aquífero com características porosas e fraturadas, típicos do intemperismo de folhelhos; d) aquífero fraturado.



Fonte: Cl:AIRE (2014)

3.4.4. Parâmetros espaciais

A estimativa da vulnerabilidade de uma área necessita, além da realização de ensaios para a definição de propriedades físicas do meio, da interpolação de dados cartográficos. O uso destas informações tem como objetivo facilitar a coleta de outros dados, pela aplicação de métodos geoestatísticos de regionalização e, simultaneamente, fornecer parâmetros diretamente relacionados à vulnerabilidade (CHENINI et al., 2015; CENTENO et al., 2020).

A topografia é um dos elementos de destaque para a análise de vulnerabilidade, com influência nos parâmetros hidrológicos, como o fluxo hidráulico, espessura da camada de solo, profundidade da zona saturada e, em última análise, parte da composição mineralógica.

A importância deste parâmetro é comprovada por sua presença em métodos empíricos que envolvem índices de peso, como o DRASTIC (ALLER et al., 1987) e DRIST (CHENINI et al., 2015) quanto aos métodos geoestatísticos (BARBER et al., 1993). Sua obtenção pode ser feita através de dados públicos e abertos, de fácil acesso e prontamente disponíveis de forma digital.

Embora não seja uma variável intrínseca do meio, se consideradas as definições de Schnebelen et al. (2002) de vulnerabilidade abrangentes das características naturais, o uso e ocupação do solo é um dado espacial de extrema importância, em especial quanto a regionalização de outros parâmetros como a condutividade saturada (CENTENO et al., 2019, ROCHA et al. 2020).

3.5 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE

A análise de vulnerabilidade, tanto de forma pontual quanto para a realização de cartas de vulnerabilidade, não depende da medição de uma única variável, mas da combinação de diversos parâmetros (SCHNEBELEN et al., 2002). As abordagens empíricas, com o uso de sistemas e índices de peso para cada parâmetro, estão bastante presentes na literatura, e compreendem as ferramentas mais comuns para a análise e criação de cartas de vulnerabilidade (FOSTER & HIRATA, 1988; HIRATA et al., 1991; BARBER et al., 1993; LAHR; KOOISTRA, 2010; CHENINI et al., 2015)

Os índices de pesos são no geral padronizados a partir de modelos já descritos na literatura, sendo os mais amplamente aplicados nomeados DRASTIC e GOD (CHENINI et al., 2015). O método DRASTIC foi proposto por Aller et al. (1987), e é tido até hoje como uma escolha sólida para a avaliação de vulnerabilidade (LIGGETT & TALWAR, 2009). Cada letra de sua sigla representa um parâmetro intrínseco a ser analisado, sendo: D (*Depth of water*) - Profundidade da zona saturada; R (net Recharge) - Recarga líquida do aquífero; A (Aquifer soil media) - Propriedades do meio aquífero; S (Soil media) - Propriedades do solo;

T (Topography) - Topografia; I (Impact of vadose zone) - Características da zona vadosa; e C (Conductivity) - Condutividade hidráulica saturada. A cada valor, numéricos ou qualitativos destes parâmetros, é atribuída uma pontuação de 0-10 conforme tabelas pré-definidas por Aller et al. (1987). Cada parâmetro também possui um peso de 1-5, o qual multiplica a pontuação, estando os maiores pesos associados a parâmetros considerados de maior importância. A pontuação então é somada, resultando em um valor de vulnerabilidade de 26-226. Dentre os principais problemas do método, estão a avaliação subjetiva dos parâmetros do solo e zona vadosa e a não classificação dos resultados numéricos de forma qualitativa (baixa-média-alta vulnerabilidade)(LAHR & KOOISTRA, 2010; SORICHETTA et al., 2011)

O sistema GOD, proposto por Foster & Hirata (1988) , possui um foco ainda maior nas propriedades do aquífero, e funciona de forma similar ao DRASTIC, embora de forma simplificada, utilizando-se da profundidade da zona saturada (G), propriedades da zona vadosa (O) e tipo de aquífero quanto ao confinamento (D).

4 MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

4.1. DADOS BIBLIOGRÁFICOS

A avaliação da vulnerabilidade intrínseca às litologias estudadas contou com o levantamento de dados bibliográficos dos parâmetros de maior relevância. Foram pesquisados dados de condutividade saturada (K_{sat}), visto sua importância vital no transporte de contaminantes e ampla presença de dados na literatura hidrogeológica, textura, espessura da camada insaturada (ou profundidade do NA), presença de argilominerais no perfil de solo e sua composição. Diversos dados referentes a parâmetros de interesse, e em contextos similares ao estudado, estão presentes em Duarte (1980), Cottas (1983), Prado (1986), Zaine (1996), Zaine (2000), Yamada (2004), Oliva (2006), Zuquette et al. (2006), Abreu (2007), Tavanti (2009), Zanetti (2012), Bodelão (2014), Alfaro et al. (2015), Gonçalves (2016), Sisto (2016), Rosa (2017), Sisto et al. (2018), Rocha et al. (2019) e Tomazella (2020).

As principais informações cartográficas de interesse compreendem mapas geológicos (CPRM, 2006) e topográficos dos municípios de Rio Claro, Corumbataí, Itirapina e Analândia. O modelo digital de elevação foi obtido através do banco de dados Topodata (BRASIL, 2008) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Dados acerca da espessura de perfis de solo e profundidade da zona saturada puderam ser obtidos através do banco de dados do sistema SIAGAS (CPRM 2011).

4.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Em ambiente digital, através do software ArcGIS versão 10.5, foram adicionadas informações acerca da litologia da área, e comparadas com os dados dos poços obtidos através da base de dados SIAGAS. Os valores anômalos nos dados de condutividade saturada, ou outliers, foram identificados separadamente para cada contexto geológico (Fm. Corumbataí/Pirambóia/Serra Geral/Rio Claro) e removidos. Estes valores podem ser identificados, segundo NIST/SEMATECH (2003) por:

$$\text{Outlier} = Q3 + 1,5 \text{ FIQ} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo “FIQ” a faixa interquartil, obtida após a organização dos dados e identificação do terceiro (Q3) e primeiro (Q1) quartis:

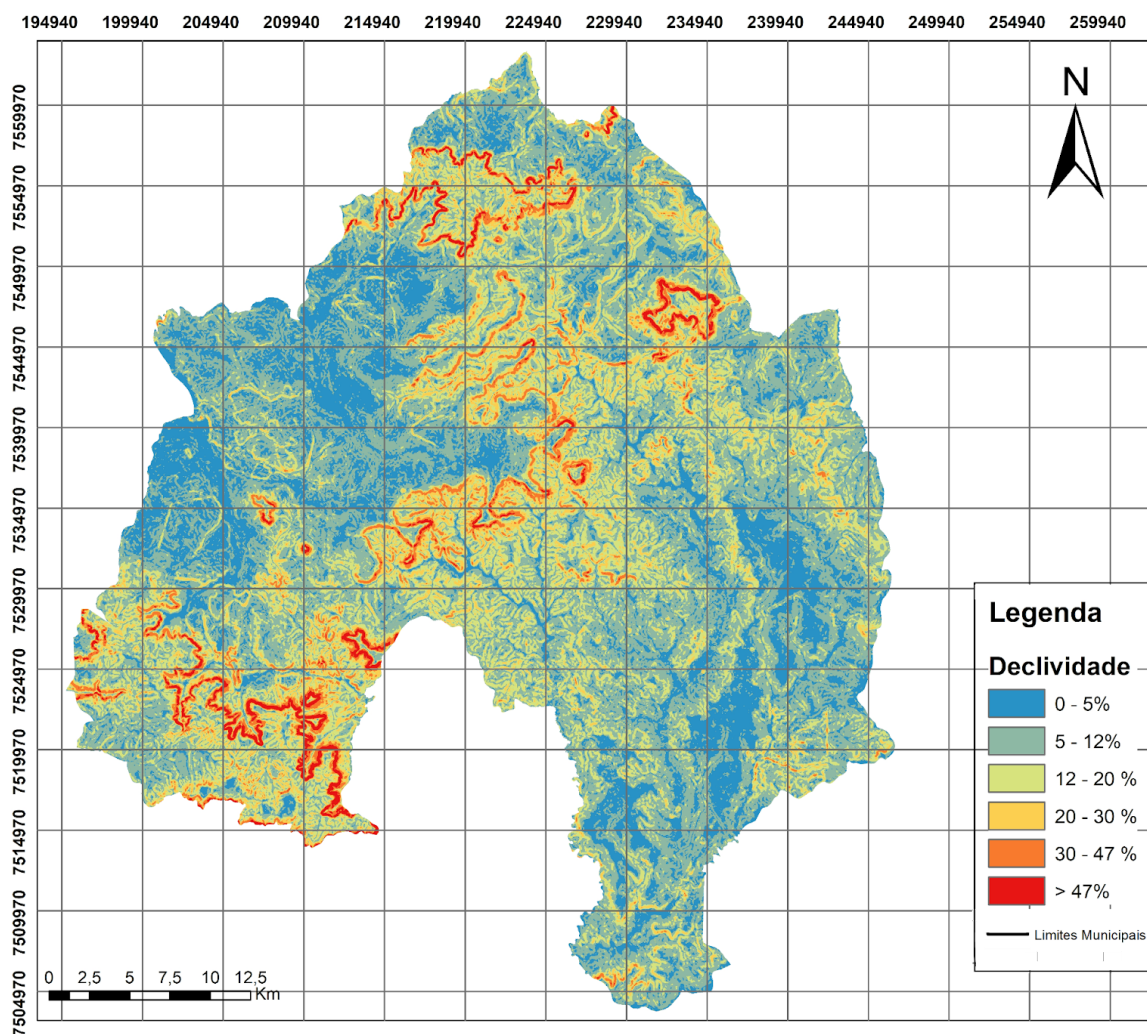
$$FIQ = Q3 - Q1 \quad (Eq.5)$$

A classificação da declividade a partir dos dados foi elaborada com base nos critérios presentes em Zaine (2000) e Abreu (2007), sendo consideradas declividades “baixas” entre 0 e 5%, “intermediárias” entre 5 - 15% e “altas” (as quais foram subdivididas) a partir deste valor. A vulnerabilidade para cada classe de declividade segue os critérios de Santos et. al (2007).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados da pesquisa bibliográfica, com o incremento de informações espaciais do mapa de declividade (Figura 8).

Figura 8: Mapa de declividade elaborado para a área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados de BRASIL (2008)

5.1 FORMAÇÃO CORUMBATAÍ

A formação Corumbataí é reconhecida na área de estudo como a principal barreira de permeabilidade presente nas sequências sedimentares, servindo como aquíclode para os Aquíferos Rio Claro e o Sistema Aquífero Guaraní. Os parâmetros do solo desta unidade levantados para esta seção foram retirados dos trabalhos de Duarte (1980), Cottas (1993), Prado (1986), Zaine (2000), Yamada (2004), Gonçalves (2016), Sisto (2016) e Rosa (2017).

A alteração desta unidade no geral forma perfis rasos, conforme descrito em Prado (1986) e Zaine (2000), predominando material argiloso ou argilo-siltoso, em profundidades variando entre 0,4 m e 2 m. A textura na fração argila é descrita como predominante em grande parte das amostras analisadas por Cottas (1983), embora com resultados de granulometria na proporção d₅₀ de predominância de silte, entre 0,007 e 0,002 mm. Gonçalves (2018) obteve resultados parecidos, com argila e uma fração siltosa com diâmetro aproximado de 0,003. Quanto à composição mineralógica, predominam no solo ilita e montmorilonita, sendo este último de alto potencial para a adsorção de contaminantes, e uma propriedade fundamental para analisar a vulnerabilidade natural desta formação (YAMADA, 2004).

Por sua composição, solos da Fm Corumbataí possuem os menores valores de condutividade hidráulica saturada na área de estudo. Duarte atribui um valor de condutividade próximo a $1,0 \times 10^{-7}$ cm/s, Cottas (1983) apresenta uma média de $6,3 \times 10^{-7}$, Yamada (2004) obteve um valor próximo, com $K_{sat} = 6,0 \times 10^{-7}$ cm/s, aumentando em uma ordem de grandeza para rochas pouco alteradas ($\sim 1,00 \times 10^{-8}$ cm/s). Sisto (2016) obteve valores de K_{sat} anormalmente altos se comparado ao restante da bibliografia, com valor $7,07 \times 10^{-4}$ cm/s, o que não aparenta ser compatível e, a partir da análise dos dados, foi considerado ou *outlier* e removido.

Apesar da baixa condutividade, os solos desta unidade não podem ser considerados totalmente impermeáveis e sem a presença de um nível saturado, podendo ser considerado por suas características físicas como um aquífero fraturado. Em seu trabalho, Zaine (2000) identifica a presença da zona saturada próxima a 2 m de profundidade, Yamada (2004) define o NA entre 1 a 2 m, próximo aos resultados de Cottas (1983), que encontrou a zona saturada

para solos dessa unidade entre 1,5 m e 2 m. A partir de dados de perfis de resistividade elétrica presentes em Rosa (2017), é possível observar a zona saturada nesta unidade entre 0,7 m e 2,8 m.

Conforme o mapa de declividade elaborado a partir de dados do sistema Topodata, é possível identificar que cerca de 17% das área de afloramento desta unidade estão em zonas de “baixa” declividade, sendo zonas de “média” declividade, entre 5-12%, mais da metade da área total (56,9%). Áreas com solos da Fm Corumbataí em declividades maiores que 20% são pouco representativas, ocorrendo em apenas cerca de 4,1% da região de estudo.

Assim como na literatura para o tema, o solo de alteração da Formação Corumbataí é aquele com menor vulnerabilidade intrínseca à sua litologia, principalmente em virtude de sua baixíssima condutividade e potencial de adsorção (YAMADA, 2004; SISTO 2016). Apesar disso, o trabalho de Yamada (2004) é o único que considera a espessura do material consolidado e a profundidade do nível freático para a análise de vulnerabilidade de solos desta unidade. Os dados bibliográficos apresentados nesta seção podem ser resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Síntese de parâmetros de vulnerabilidade presentes na literatura para solos da Formação Corumbataí na área de estudo.

Parâmetro	Duarte (1980)	Cottas (1982)	Zaine (2000)	Yamada (2004)	Gonçalves (2016)	Sisto (2016)	Rosa (2017)
Granulometria d50 (mm)		Argila a 0,007 mm	Argila a silte	Argila	Argila a 0,003		
Ksat (cm/s)	$1,0 \times 10^{-7}$ cm/s	$6,3 \times 10^{-7}$ cm/s		$6,0 \times 10^{-7}$ cm/s		$7,07 \times 10^{-7}$ cm/s	
Espessura não saturada (m)			2 m	1 a 2 m			0,7 a 2,8 m

5.2. FORMAÇÃO PIRAMBÓIA

Na região estudada, locais de afloramento da Fm Pirambóia representam áreas de recarga para o Sistema Aquífero Guarani, o qual ocorre na forma de um aquífero poroso e livre. Dentro dos limites estabelecidos para este trabalho, é possível a busca de dados dos parâmetros de interesse nos trabalhos de Duarte (1980), Prado (1986), Abreu (2007), Sisto (2016), Rosa (2017) e Rocha (2018).

Perfis de solo típicos da alteração desta unidade possuem a textura na fração areia média a fina, habitualmente bem selecionado e pobre em matéria orgânica, podendo ocorrer a presença de solos areno-argilosos (PRADO, 1986; ZAINE, 2000; ABREU, 2007). Quando a valores da granulometria d50 desta fração predominante, Duarte (1980) apresenta uma média próxima a 0,15 mm, enquanto Prado (1980) caracteriza esta fração como um mais fina, em torno de 0,10 mm.

Os solos derivados desta formação possuem interesse especial no estudo da vulnerabilidade intrínseca de seus materiais por sua característica alta condutividade saturada e, na região, a presença na forma de aquífero livre. Dados de Duarte (1980) indicam valores de K_{sat} em torno de $2,0 \times 10^{-3}$ cm/s, Sisto (2016) obteve cerca de $2,61 \times 10^{-3}$ cm/s, enquanto Rocha (2018), por realizar um maior número de amostragens em uma área mais ampla, observou uma variação dos dados de condutividade saturada para estes solos entre $1,01 \times 10^{-2}$ a $6,12 \times 10^{-4}$ cm/s, com valores no geral próximos a $1,60 \times 10^{-3}$ cm/s. É interessante notar que os valores obtidos por Rocha (2018) indicam que a condutividade é bastante variável espacialmente, sendo o uso e ocupação e variações faciológicas os principais fatores dados por este autor para a diferença em até duas ordens de grandeza nos resultados de K_{sat} . Estes valores de condutividade permitem classificar os respectivos solos como de “alta” permeabilidade, embora os menores valores presentes em Rocha (2018) sejam compatíveis com a classe de “razoável” permeabilidade. A porosidade destes solos foi definida por Abreu (2007) em torno de 41%, valores bastante próximos aos dados bibliográficos obtidos para a porosidade da Fm Rio Claro.

A espessura da camada alterada é bastante variável, tendo como principal fator a declividade, segundo Abreu (2007). Este autor define perfis de alteração com cerca de 1,5 m

em áreas de encosta, enquanto Prado (1986) fornece valores entre 1,5 e 2,5 m. Dados adquiridos através de geofísica em Rosa (2017) permitem o posicionamento da zona saturada em torno de 11,3 m, o que é bastante próximo a profundidade de NA levantada através de poços pelo sistema SIAGAS, presentes na Tabela 2. Segundo Duarte (1980), o início da zona saturada se encontra muito mais rasa, por volta de 5m, tal qual alguns dados de Rosa (2017) que apontam um nível freático mais próximo da superfície (em torno de 4 m).

Tabela 2: Dados de NA extraídos de poços disponíveis no sistema SIAGAS para os municípios de Rio Claro, Analândia e Itirapina

Nº Cadastro	Prof NA (m)
3500047323	12,0 m
3500047324	14,0 m
3500047329	14,0 m
3500047329	14,0 m
3500029327	12,0 m

Fonte: Autor, com base em (CPRM, 2011)

O afloramento de solos derivados desta unidade é mais comum em áreas de média declividade, com cerca de 40,6% do total, seguido por áreas com declividades entre 12-20%, os quais ocorrem em 30,7% da região de estudo. Estando apenas 7% da unidade em áreas de baixa declividade, os dados de espessura do perfil de alteração de menor espessura são bastante compatíveis com o descrito na região, e constituem um fator de vulnerabilidade que diferencia esta unidade dos solos da Fm. Rio Claro.

É um consenso na literatura a classificação de solos da Formação Pirambóia como de elevada vulnerabilidade natural, em decorrência de sua alta permeabilidade (com os maiores valores dentre os registrados durante a fase de pesquisa bibliográfica), baixa espessura de solo e posicionamento mais raso da zona saturada se comparado com o aquífero Rio Claro; em especial se considerada sua importância como área de recarga do Sistema Aquífero Guarani

(DUARTE, 1980; SISTO, 2016; ROCHA, 2018). Diferentemente de estudos mais antigos, Rocha (2018) apresenta uma heterogeneidade que, no geral, não é evidente em outros levantamentos para a estimativa de vulnerabilidade. Os dados coletados podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3: Síntese de parâmetros de vulnerabilidade presentes na literatura para solos da Formação Pirambóia na área de estudo.

Parâmetro	Duarte (1980)	Prado (1986)	Abreu (2007)	Sisto (2016)	Rosa (2017)	Rocha (2018)
Granulometria	0,15 mm	0,10 mm	0,125-0,20 mm			
Ksat (cm/s)	2,0x10 ⁻³ cm/s			2,61x10 ⁻³ cm/s		1,01x10 ⁻² a 6,12x10 ⁻⁴ cm/s
Espessura não saturada (m)	5 m				4 - 12 m	
Porosidade do solo (%)			41%			

5.3. FORMAÇÃO SERRA GERAL E INTRUSIVAS BÁSICAS

Dados utilizados para a caracterização dos parâmetros de vulnerabilidade intrínseca para a Formação Serra Geral foram pesquisados nos trabalhos de Cottas (1983), Yamada (2004), Abreu (2007), Bodelão (2014), Sisto (2016) e Rocha (2018). Pela baixa expressão na área e baixo volume de material, não foram descritas de forma separada características em área de afloramento de intrusivas básicas relacionadas ao evento Serra Geral.

A alteração das rochas desta unidade gera, tipicamente, solos predominantemente argilo-siltosos e areno-argilosos (BODELÃO, 2014). Na fração areia, a mineralogia principal é constituída por quartzo e óxidos/hidróxidos de ferro, enquanto os minerais mais relevantes da fração fina são caulinita, hematita, gibbsita e ilita (YAMADA, 2004; ABREU, 2007; BODELÃO, 2014). Dados de Abreu (2007) indicam que na fração areia predomina a textura areia fina (d₅₀ = 0,13 mm).

A condutividade hidráulica saturada em solos de alteração de diabásio na área está na ordem de 10^{-5} , como presente em: Cottas (1993) de $4,6 \times 10^{-5}$ cm/s; $5,1 \times 10^{-5}$ cm/s em Yamada (2004), entre $4,5 \times 10^{-5}$ e $6,7 \times 10^{-4}$ cm/s medidos in situ em Bodelão (2014), $1,23 \times 10^{-4}$ cm/s segundo Sisto (2016) e com média de $2,96 \times 10^{-5}$ cm/s para Rocha (2018). Os valores de condutividade saturada obtidos por Bodelão (2014) variam em até uma ordem de grandeza em amostras de diferentes níveis pedológicos, indicando uma esperada diminuição da permeabilidade com a maior proximidade da rocha pouco alterada. Estes valores de condutividade hidráulica saturada permitem a classificação como “Baixa” segundo Vargas (1978), embora considerada “Razoável” conforme outros critérios (YAMADA, 2004). A porosidade para estes solos é bastante elevada, descrita como de 61% e 59% nos trabalhos de Cottas (1983) e Bodelão (2014), respectivamente.

Embora de textura predominantemente fina, os argilominerais descritos como típicos para perfis de alteração dos diabásios na área possuem predominância de caulinita, o qual não representa alto potencial de troca catiônica e adsorção de hidrocarbonetos contaminantes (YAMADA, 2004; BODELÃO, 2014).

A alteração de rochas básicas em climas tropicais possui o potencial de geração de perfis espessos, estimados para a área entre 4 e 15 m em Yamada (2004), o que por si é um fator interessante para diminuir a vulnerabilidade intrínseca nesta unidade. Dados da espessura da zona saturada, porém, indicam que a presença de água pode ser rasa e locais de aquífero livre: 4,5 m para Cottas (1983), 3 a 13 m em Yamada (2004) e 2,5 a 3 m em Bodelão (2012).

Uma característica intrínseca de interesse das áreas de afloramento da Fm. Serra Geral, e outros corpos intrusivos básicos no perímetro estudado, é a elevada declividade no qual estão inseridos. Conforme o mapa de declividade realizado, cerca de 27,5% da área está inserida em um contexto de declividades “médias” (5-12%), enquanto 68,9% dos locais podem ser classificados como de “alta” declividade. O posicionamento em zonas mais inclinadas permite uma maior movimentação da água subterrânea e menores profundidades do perfil de alteração, o que é um importante fator de vulnerabilidade intrínseco a ser analisado.

Analisando-se a partir da condutividade saturada, solos derivados da Fm. Serra Geral e corpos básicos relacionados se posicionam como intermediários entre a baixíssima

permeabilidade e alto potencial de adsorção de solos da Fm Corumbataí, e aqueles de maior espessura de material alterado presentes na Fm Pirambóia. O principal fator com influência na vulnerabilidade para solos desta formação é a declividade, por apresentar influência direta na profundidade da zona saturada, podendo ser muito rasa como em Bodelão (2012), o que acarretaria em áreas de maior vulnerabilidade. Os dados bibliográficos referentes a este tópico estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4: Síntese de parâmetros de vulnerabilidade presentes na literatura para solos da Formação Serra Geral e corpos intrusivos básicos na área de estudo.

Parâmetro	Cottas (1983)	Yamada (2006)	Bodelão (2012)	Sisto (2016)	Rocha (2018)
Granulometria	Areia muito fina a Argila	Areia fina a Argila	Areia fina a Argila		
Ksat (cm/s)	$4,6 \times 10^{-5}$ cm/s	$5,1 \times 10^{-5}$ cm/s	$4,5 \times 10^{-5}$ a $6,7 \times 10^{-4}$ cm/s	$1,23 \times 10^{-4}$ cm/s	$2,96 \times 10^{-5}$ cm/s
Espessura não saturada (m)	4 - 5 m	3 - 13 m	2,5 - 3 m		
Porosidade do solo (%)	61%		59%		

5.4. FORMAÇÃO RIO CLARO

A Formação Rio Claro é aquela com a maior quantidade de dados bibliográficos para a área estudada, dos quais destacam-se os estudos descritivos de características físicas gerais da formação (ZAINÉ, 1994; YAMADA, 2004; ZANETTI, 2012) e de modelagem do aquífero livre (OLIVA 2006; GONÇALVES, 2016; TOMAZELLA, 2020).

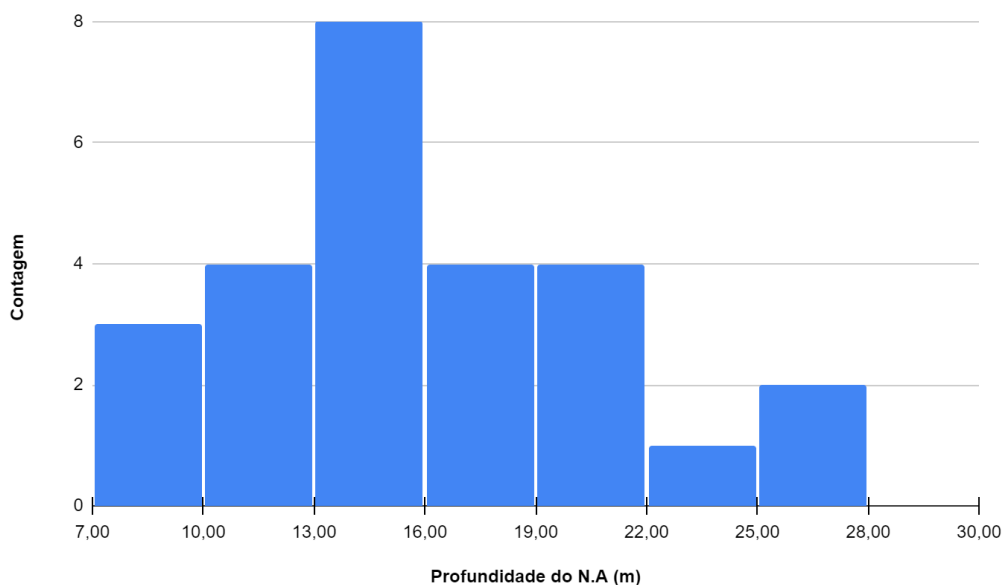
Solos derivados desta formação possuem textura arenosa (< 20% de silte e argila) ou areno-argilosas (20-40% de silte e argila na matriz). Quando homogêneo, predomina a fração areia fina, a qual está presente nos trabalhos de Gonçalves (2016) com $d_{50} = 0,13$ mm; $d_{50} = 0,165$ mm como média dos resultados de Sisto (2018); $d_{50} = 0,13$ em Oliva (2006). Apesar disso, o solo e rocha inalterada da Formação Rio Claro são bastante heterogêneos, podendo

possuir camadas conglomeráticas (ZAINED, 1994) de maior condutividade ou lâminas de argila (GONÇALVES, 2016).

Dados de condutividade saturada *in situ* podem ser sumarizadas através dos dados de Gonçalves (2016) em $4,10 \times 10^{-3}$ cm/s para porções mais arenosas e $1,60 \times 10^{-3}$ cm/s em solos em areia argilosa, $1,93 \times 10^{-3}$ cm/s em Sisto (2018), $1,76 \times 10^{-3}$ cm/s segundo Oliva (2006) para camadas homogêneas e $4,68 \times 10^{-4}$ cm/s em camadas com alta proporção de argilas, entre $1,53 \times 10^{-3}$ a $8,04 \times 10^{-2}$ cm/s segundo Zanetti (2012) e $3,90 \times 10^{-3}$ cm/s para Alfaro (2015). Diversos autores (ZANETTI, 2012; GONÇALVES, 2016; ALFARO, 2015; SISTO 2016) demonstraram que as porções com maiores quantidades de argila na matriz, ou mesmo a presença intercalada de lentes argilosas, possui grande influência na condutividade saturada ao longo do perfil de solo, em até duas ordens de grandeza (com dados em 10^{-5} cm/s). Entretanto, nenhum dos autores anteriormente citados menciona uma possível influência significativa das camadas conglomeráticas.

A fração areia dos solos desta litologia é formada por grãos de quartzo, enquanto o principal argilomineral presente nos perfis é a caulinita, tendo a illita como acessório (OLIVA 2006; YAMADA, 2004). Por seu argilomineral principal apresentar um baixo potencial de troca catiônica (YAMADA 2004), e mesmo solo argilo-arenoso desta formação não possuem um significativo potencial de adsorção de contaminantes. Aplicando-se a classificação de Vargas (1987), esta formação pode ser classificada como de “Média permeabilidade”. A porosidade do material de alteração é descrita por Zaine (2000) como em 43%, próximo ao posteriormente obtido por Sisto (2016), com dados aproximados à 37%.

Diversos autores descreveram a Formação Rio Claro na área de estudo como possuindo um espesso perfil de alteração (ZAINED, 2000; GONÇALVES, 2016; ZANETTI, 2012; OLIVA, 2006; ALFARO, 2015) geralmente superior a 10 m de profundidade o que, segundo Zaine (1994), é explicado pela baixa litificação e pouca ou inexistente cimentação desta formação. O nível de água do aquífero livre na Fm. Rio Claro para a área de estudo pôde ser identificado através de dados de poços do sistema SIAGAS, exibidos na Figura 9, no geral entre 10 a 17 m, mas podendo atingir profundidades de até 27 m. Valores de profundidade do NA próximos foram identificados por: 15 a 30 m em Oliva (2006) e entre 4 e 22 m para Zanetti (2012) (com média de 12 m).

Figura 9: Distribuição dos dados de profundidade do NA para a Fm Rio Claro na área

Fonte: Autor

A formação Rio Claro está inserida em áreas de “Baixa declividade”, constituindo, segundo Zaine (1994), colinas tabuliformes de perfil côncavo e aplainado. Yamada (2004) e Gonçalves (2016) definem a declividade como muito baixa e baixa na maior parte das áreas de afloramento desta unidade. A partir do mapa de declividade elaborado, foi obtido que cerca de 50,6% da área no qual aflora esta formação está em declividades entre 0-5%, e apenas cerca de 9,7% da área pode ser classificada como de média declividade, constituindo altos declives um total menor que 1%.

Diversos trabalhos que abordam o mapeamento ambiental do aquífero Rio Claro classificam os solos desta unidade como de “alta vulnerabilidade” (YAMADA, 2004; ZANETTI, 2012; SISTO, 2016), utilizando como principal parâmetro a alta condutividade saturada. Em concordância, os principais fatores de vulnerabilidade intrínseca dentre aqueles aqui levantados, estão o tipo do aquífero (livre), a textura predominante na fração areia, formando um meio poroso, e a composição mineralógica deste solo (majoritariamente quartzo e argilas de baixo potencial de adsorção). Apesar disso, alguns fatores podem ser utilizados para distinguir sua vulnerabilidade se comparada a outras formações arenosas, como a presença de camadas argilo-arenosas e lentes de argila que formam barreiras de condutividade, e a grande profundidade no qual se posiciona o NA, não sendo incomum sua

localização abaixo dos 15 m de profundidade. A compilação dos dados obtidos e suas fontes estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5: Síntese de parâmetros de vulnerabilidade presentes na literatura para solos da Formação Rio Claro na área de estudo.

Parâmetro	Zaine (2000)	Oliva (2006)	Zanette (2012)	Alfaro (2015)	Gonçalves (2016)	Sisto (2018)
Granulometria d50 (mm)		0,13			0,13	0,16
Ksat (cm/s)		1,76x10 ⁻³ a 4,68x10 ⁻⁴ cm/s	8,04x10 ⁻² a 1,52x10 ⁻³ cm/s	3,90x10 ⁻³ cm/s	4,10x10 ⁻³ a 1,60x10 ⁻³ cm/s	1,93x10 ⁻³ cm/s
Espessura não saturada (m)	15 - 20 m	10 - 30 m	14 - 22 m	6 - 20 m		
Porosidade do solo (%)	43%					37%

5.5 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO

Os principais critérios de vulnerabilidade natural de cada formação foram agrupados na Tabela 7.

Tabela 7: Resumo dos principais parâmetros de vulnerabilidade natural das formações Corumbataí, Pirambóia, Serra Geral e Rio Claro

	Textura	Ksat (ordem)	Espessura insaturada	Porosidade do solo	Classe de declividade predominante	Presença de minerais com potencial de adsorção
Fm. Corumbataí	Argila a Silte	10^{-7}	1 a 2 m	-	Média declividade (5-12%)	Presente em grande quantidade
Fm. Pirambóia	Areia média a fina (d ₅₀ = 0,12 mm)	10^{-3}	2 a 14 m	41 %	Alta declividade (> 20%)	Ausente
Fm. serra Geral	Argila a Areia fina	10^{-4} a 10^{-5}	3 a 5 m	61%	Alta declividade (>20%)	Presente em baixa quantidade
Fm. Rio Claro	Areia fina (d ₅₀ = 0,13 mm) a Argila	10^{-3} a 10^{-4}	10 a 25 m	43 - 37%	Baixa declividade (0-5%)	Ausente

De forma geral, em concordância com trabalhos anteriores, a análise dos parâmetros principais confirma a baixa vulnerabilidade intrínseca à contaminação por gasolina de solos da Formação Corumbataí, o que é acentuado pela alta capacidade de absorção do contaminante. Embora de composição argilosa e NA um pouco mais profunda, solos da formação Serra Geral e intrusões básicas associadas possuem vulnerabilidade consideravelmente maior que a formação Corumbataí. Caso fosse aplicado o método DRASTIC, ao se classificar o atributo S (referente ao impacto do tipo de solo), ambos receberam o valor “7”, e algo similar ocorre com o atributo I (referente ao impacto da zona vadosa), que possuem valores próximos (3 e 4, respectivamente). Isto acarretaria em distorções nos valores finais e, conseqüentemente, erros para a definição da vulnerabilidade,

dado que características como o NA mais raso presente na Formação Corumbataí, avaliadas no critério D, acarretaria em valores maiores de vulnerabilidade.

De forma similar, as duas unidades com maior vulnerabilidade à contaminação, a Fm. Pirambóia e a Fm. Rio Claro, receberiam classificações quase idênticas nos critérios que envolvem o impacto da litologia e da zona vadosa, embora trabalhos presentes na bibliografia, como Gonçalves (2016), indiquem a influência drástica de camadas mais argilosas e lentes de material pelítico, mais comuns na Fm. Rio Claro. Apesar disso, por possuir maiores declividades no geral, a área de solos da Fm. Pirambóia tenderiam a indicar maiores valores de vulnerabilidade, embora a diferença entre estas duas unidades possa não ser bem representada ao se atribuir classes qualitativas (como “alta vulnerabilidade”).

6 CONCLUSÃO

A análise de vulnerabilidade a partir dos dados coletados de diversas fontes bibliográficas permitiu a extrapolação dos conhecimentos, no geral focados à área urbana dos municípios de Rio Claro e Corumbataí, para um perímetro mais amplo, abrangendo de forma satisfatória conhecimentos que podem ser aplicados no planejamento e gestão territorial.

Afirma-se a classificação relativa exibida na literatura para as unidades estudadas, sendo área de alteração da Fm. Corumbataí aquelas de “Menor vulnerabilidade intrínseca” e solos da Fm. Pirambóia e Rio Claro como de “Maior vulnerabilidade intrínseca”. Foi possível a identificação da formação Pirambóia como a de maior vulnerabilidade natural neste conjunto através de dados numéricos, como a profundidade do NA e declividade, e fatores qualitativos, como a baixa influência de lentes argilosas em um contexto geral.

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) é propriedade no qual mais facilmente pode-se classificar a vulnerabilidade relativa entre os solos das formações estudadas, no geral diferindo entre uma ou mais ordem de grandeza mesmo em solos de textura próxima, a exemplo de solos de alteração das Fm Corumbataí e Serra Geral.

Algumas propriedades que apenas são abordadas qualitativamente na análise de vulnerabilidade por métodos tradicionais, como a influência do grau de fraturamento na condutividade, carecem de estudos para a área. Na análise de vulnerabilidade intrínseca da gasolina, a principal lacuna é um fator de impacto da adsorção por minerais de alto potencial de troca catiônica, como a montmorilonita, presente nos solos derivados da Fm. Corumbataí.

Embora não esteja presente em métodos tradicionais de análise de vulnerabilidade, a presença de argilominerais com alto potencial de adsorção foi identificado como um parâmetro importante, e que pôde ser levantado através de dados bibliográficos. Dada a relevância das contaminações por hidrocarbonetos nesta área de estudo, o uso deste parâmetro ainda é pouco utilizado.

A variabilidade composicional ao longo do perfil de solo, como descrito para a Fm. Rio Claro, foi de extrema importância para a análise de vulnerabilidade, em especial para a comparação entre esta litologia e a Fm. Pirambóia, embora seja pouco utilizada em outros

trabalhos, necessitando ainda de estudos que possam quantificar numericamente sua influência, com a possível deste parâmetro adicionalmente a métodos no mapeamento de vulnerabilidade à contaminação.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. E. S. **Mapeamento geotécnico para a gestão municipal - abordagem combinando três métodos distintos e sua aplicação em Analândia (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007

ALBINET, M., MARGAT, J. **Mapping of groundwater vulnerability to pollution**. Bulletin du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres Bull BRGM - 2nd Series, vol 3 (4), p. 13–22. 1970.

ALFARO, M. A. S.; BASSO, J. B.; CHANG, H. K.; GENUCHTEN, M. T. **Simulação de fluxo e transporte de Íons de vinhaça através de vertente da Formação Rio Claro**. Águas Subterrâneas, vol. 29, n. 2, p. 162-174. 2015

ALMEIDA, F.M.A.; ASSINE, M.L.; CARNEIRO, C.D.R. A megadesertificação mesozóica. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**. São Paulo, Beca, 2012, p. 419-428. 2012

ALLER, L., BENNET T., LEHR, J.H., PETTY, R.J. **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential using Hydro Geologic Settings**, U.S. EPA. 1987.

ASSINE M.L. & SOARES P.C. **Interação flúvio-eólica na Formação Pirambóia**. In: SBG, SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995, Águas de São Pedro, Boletim Resumos, p. 65. 1995.

ASSINE, M.L.; PIRANHA, J.L.; CARNEIRO, C.D.R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: NETO, V.M.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.; BRITO-NEVES, B.B.de. (Coordenadores), **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Editora BecA, p. 77-92. 2004

BARBER, C.; BATES, L. E.; BARRON, L.; ALLISON, H. **Assessment of the relative vulnerability of groundwater to pollution: a review and background paper for the conference workshop on vulnerability assessment**. Journal of Australian Geology & Geophysics, vol. 24, n.2, p. 147-154, 1993.

BODELÃO, T. G. **Distribuição de LNAPL na zona não saturada em solos tropicais, no município de Rio Claro - SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro. 2014

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil**. São José dos Campos, 2008. Disponível em : <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/data/geotiff/22S48_SN.zip> . Acesso em: 16 de dez. 2021.

CHENINI, I; ZGHIBI, A.; KOUZANA, L. **Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: State of the art and a case study**. Journal of African Earth Sciences, vol 109 (2015), p. 11-26, 2015.

CHRISTOFOLETTI, B.; PEIXOTO, B. C. P. M.; WARREN, L. V.; INGLEZ, L.; FERNANDES, M. A.; ALESSANDRETTI, L.; PERINOTTO, J. A. J.; SIMÕES, M. G.; ASSINE, M. L. **Dinos among the dunes: Dinoturbation in the Pirambóia Formation (Paraná Basin), São Paulo State and comments on cross-section tracks**. Journal of South American Earth Sciences, vol 109, 103252, 2021.

CL:AIRE. **An illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface**. CL:AIRE, Londres. ISBN 978-1-905046-24-9. 2014

CLAESSEN, M. E. C. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa Solos - Documentos (INFOTECA-E), 1997.

CORTÊS, A. R. P. **Fácies e associação de fácies da formação Pirambóia na região de Descalvado/SP**. Dissertação. Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro. 2013

COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro - SP**. Dissertação (Doutorado em Geologia Geral e Aplicada), Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências. São Paulo. 1983.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de São Paulo, escala 1:750.000**. São Paulo. 2006

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em : <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>> . Acesso em: 28 de dez. 2021.

DUARTE, U. **Geologia Ambiental da área de São Pedro- SP**. Dissertação (Doutorado), Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências. São Paulo. 1980

FARIAS, W. M. **Condutividade hidráulica de solos tropicais compactados a hidrocarbonetos da gasolina**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2003

FERREIRA, S.R.; CHANG, M. R. C. **Datação das formações Rio Claro e Piraçununga por termoluminescência**. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, v. 61, n. 2, p. 129 - 134, 2008.

FOSTER, S.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. CEPIS - PAHO/WHO. Lima, p. 78, 1988.

FULFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V.; VIANNA R. B. **Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, vol 12 (4), p. 590-611, São Paulo. 1982

FURLAN, L. M. **Hidrodinâmica em área úmida de cerrado na Chapada Sedimentar do Oeste Mineiro**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, São Paulo. 2019

GALANTE, G. C. S. **Plumas de contaminação por hidrocarbonetos em diferentes cenários hidrogeológicos paulistas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A.; GOMES, C. D.; IRITANI, M. A. **Groundwater pollution risk and vulnerability map of the state of São Paulo, Brazil**. Wat. ScL Tech., vol. 24, n.11, p. 159-169, 1991.

HISCOCK, K. M.; BENSE, V. F. **Hydrogeology: Principles and Practice**. 3º edição, John Wiley & Sons, Oxford. 2021

JANASI, V. de A.; FREITAS, V. A.; HEAMAN, L. H. **The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite**. Earth and Planetary Science Letters, vol 302 (2011), p 147-153. 2011

KAZAKIS, N.; VOUDOURI, K. S. **Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters**. Journal of Hydrology, vol 525, p 13-25, 2015.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM-REFO, LABHID-UFPE, 2000.

KHAN, M. A. I.; BISWAS, B.; SMITH, B.; NAIDU, R.; MEGHARAJ, M. **Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil- a review**. Chemosphere, vol. 212 (2018), p. 755-767. 2018.

LAHR, J; KOOISTRA, I. **Environmental risk mapping of pollutants: State of the art and communication aspects**. Science of the Total Environment, vol. 408 (2010), p. 3899–3907, 2010.

LIGGETT, J. E.; TALWAR, S. **Groundwater vulnerability assessments and integrated water resource management**. Streamline, vol 13(1), p. 18–29. 2009

LI, G.; GUO, S.; HU, J. **The influence of clay minerals and surfactants on hydrocarbon removal during the washing of petroleum-contaminated soil**. Chemical Engineering Journal, vol. 286, p. 191-197, 2016.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e o seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental**. Porto Alegre, 1997, 255 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997

MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. **Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia Do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, vol 28 (4), p. 473-484, 1998.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G, SOUZA, P. A; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. **Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás.** vol 15(2).p 265-287. 2007

MONTIBELLER, C. C. **Caracterização geoquímica e de proveniência da Formação Corumbataí (Permiano, Bacia do Paraná, Brasil).** Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2019.

MUIJS, B.; JONKER, M. T. O. **Assessing the Bioavailability of Complex Petroleum Hydrocarbon Mixtures in Sediments.** Environmental Science & Technology, vol 45, p. 3554-3561. 2011

NIST/SEMATECH – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. 2003. **Handbook of Statistical Methods.** 2003

OLIVEIRA, N. M. **Biorremediação de solos contaminados com gasolina pura, gasolina comercial e etanol.** Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 2015

OLIVA, A; GASTMANS, D; ZAMPROGNO, C. F; PAULA E SILVA, F; ROMUALDO, D. B; LOBO, G. A; LIMA, W. P; ROCHA, H. R; CHANG, H. K. **Utilização do método da eletrorresistividade na caracterização hidrogeológica da área de recarga do Sistema Aquífero Guarani.** In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais... Curitiba: Associação Brasileira de águas subterrâneas, 2006.

OLMER, M.; REZÁC, B.; **Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale 1:200.000.** Intl. Assoc. Hydrogeologists, *Mémoires*, Tomo X, Congrès de Montpellier, 1. Communications, p 105-107. 1974

PACHECO, F. A. AL.; FERNANDES, L.S.F. **The multivariate statistical structure of DRASTIC model.** Journal of Hydrology, vol 476, p. 442–459. 2013

PANAGOS, P.; LIEDEKERKE, M. V.; YIGINE, Y.; MONTANARELLA, L. **Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network.** Journal of Environmental and Public Health, vol 2013, 11 p. 2013

PENTEADO, M.M. **Geomorfologia do Setor Centro-Ocidental da Depressão Periférica Paulista**. Tese (Doutorado). Instituto de Geografia USP. Série Teses e Monografias nº 22. 1976

PERINOTTO, J. A. J; ZAINÉ, J. E. **Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro/Limeira/Piracicaba (SP)**. 2008. Disponível em <<https://bit.ly/3sqp7yW>> . Acesso em 29 de Julho de 2021.

PINTO, M. L. **Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná, uma nova abordagem com base em dados de métodos potenciais**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Tese nº44. Brasília. 2019.

PRADO, H. **Desenvolvimento de horizontes superficiais de solos podzólicos relacionados as Formações Corumbataí e Pirambóia**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”. Piracicaba. 1986.

ROCHA, C. B.; Davies, J. H. F. L; Janasi, A. V.; Schaltegger, U.; Nardy, J. R. A.; Greber, N. D.; Lucchetti, A. C. F.; Polo, L. A. **Rapid eruption of silicic magmas from the Paraná magmatic province (Brazil) did not trigger the Valanginian event**. *Geology* 2020, vol 48 (12), p. 1174–1178. 2020.

ROCHA, R. E.; GASTMANS, D. SACCHI, M. D.; OLIVEIRA, M. D. **Variações espaciais na condutividade hidráulica do solo em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani**. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, vol 40 (2), p. 35-51. 2019.

ROSA, F. T. G. **Análise das relações entre resistividade elétrica, vazão e parâmetros físico-químicos para o aquífero livre da região de Corumbataí (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro. 2017.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, M. S.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. **Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros de seis classes de solos na região de Lavras - MG**. *Ciênc. agrotec., Lavras*, v. 31, n. 4, p. 1167-1175. 2007

REYNOLDS, W. D; ELRICK, D. E; CLOTHIER, B. E. **The constant head well permeameter: effects of unsaturated flow**. *Soil Science*, v.139, n.2, p.172-180, 1985.

SALMAZO, G. O. **Estudo geocronológico de sedimentos correlatos à Formação Rio Claro**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Faculdade de Engenharia UNESP – Campus de Ilha Solteira. 2015.

SISTO, F. P.; REIS, F. A. G. V.; GIORDANO, L. C.; OLIVEIRA, A. **Estudo da vulnerabilidade à contaminação na porção norte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro, SP**. Geol. USP, Sér. cient. São Paulo, vol. 18, n. 3, p. 3-44, 2018

SCHNEBELEN, N., PLATEL, J.P., LENIDRE, Y., BAUDRY, D. **Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5: Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'oligocène en région bordelaise**. Rapport BRGM/RP- 51178. França, 75 p., 2002

SCHNEIDER, A. C. **Estudo em tempo real da migração de etanol na zona vadosa em experimento de campo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SORICHETTA, A.; MASETTI, M.; BALLABIO, C.; STERLACCHINI, S.; BERRETA, G. P. **Reliability of groundwater vulnerability maps obtained through statistical methods**. Journal of Environmental Management, vol. 92 (2011), p. 1215-1224. 2011.

SOUSA , M. O. L. **Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Álho e Jibóia – Centro do estado de São Paulo** . Tese (Doutorado). IGCE UNESP Rio Claro , 2002

TAVANTI, D. R.; AZEVEDO, F. Z.; MEDVEDCHIKOFF, T. G.; DE DEUS, L. R.; MOREIRA, M. A. A.; LORAND, R.; CANÇADO, J. C.; MARTINS, M. M. R. Estudo da vulnerabilidade de contaminação de Aquífero por Agrotóxicos, na região de Descalvado e Analândia (SP). Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 14, n. 1, p. 53-61. 2009

TEIXEIRA, C. E.; MOTTA, F. G.; MORAES, S. L. de. (Orgs.) **Panorama GAC** [livro eletrônico]: mapeamento da cadeia de gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo: IPT, 2016. 144 p. (IPT Publicação; 3024). 2016

TERAMOTO, E. H.; SOTO, M. A. F.; CHANG, H. K.; PEDE, M. A. Z.; MARTINS, E. P. **Modelo empírico para estimativa da condutividade hidráulica utilizando dados granulométricos**. Geotecnia, vol. 119. p. 41-53. 2010

TOMAZELLA, A. S. **Distribuição espacial dos parâmetros físico-hídricos de uma área úmida (Rio Claro, SP)**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro. 2020

VRANÀ, M. Methodology for construction of groundwater protection maps. In: KOSLOVSKY, E. A. **Hydrogeological principles of groundwater protection**. UNESCO/UNEP, Moscou, p. 147-149. 1984.

YAMADA, D. T. **Caracterização geológico-geotécnica aplicada à instalação de postos de combustíveis em Rio Claro - SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro. 2004

ZANETTI, M. **Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP**. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro. 2012.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)**. Dissertação (Mestrado). Rio Claro:Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP. 1994

ZAINE, J. E. Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente).Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro. 2000

ZUQUETTE, L. V; PALMA, J. B.; PEJON, O. J. **Initial assessment of the infiltration and overland flow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer), State of São Paulo, Brazil**. Environmental Geology, vol. 50, p. 371-387. 2006.