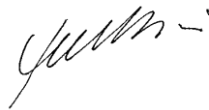


Universidade do Estado de São Paulo
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental

Risco de contaminação de aquíferos por vinhaça de cana-de-açúcar no Estado
de São Paulo

MONOGRAFIA
TF 17-44

Aluno: Saulo Vieira da Silva Filho



Orientador: Ricardo César Aoki Hirata

Coorientador: Antonio Luiz Pinhatti



São Paulo

Outubro/2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este presente trabalho às duas pessoas que proporcionaram a realização pessoal e profissional de me tornar um geólogo e, que nos momentos de maior dificuldade, sempre proporcionaram estabilidade com suas palavras e incentivos de conforto: Saulo Vieira, meu pai, e Luciana Baroni, mãe.

Fundamentais para o bom desempenho e existência deste trabalho foram o Professor Ricardo Hirata e, professor e pós-graduando Antônio Pinhatti, a quem expresso minha sincera gratidão pelos ensinamentos, paciência e esforço dedicado durante o desenvolvimento do mesmo. Agradeço também aos professores Gaston Rojas, Caetano Juliani, Rogério Azzone e Edilson Pissato, que foram importantes para a minha formação como geólogo e/ou confecção deste trabalho.

Nesses últimos cinco anos de minha vida, conheci pessoas a quem levarei como irmãos. Agradeço profundamente por todos os momentos bons e ruins compartilhados com o pessoal da Grauvaca, em especial, aqueles que pude estar mais perto: Bambi, Bug, Dipe, Navara, Pika.

Impossível não expressar meus sinceros agradecimentos ao Sambaqui e toda rapaziada sempre presente, que tornaram os dias muito mais leves e divertidos; assim como não deixarei de expressá-los à Beatriz, quem me acompanhou durante esse último semestre o deixando mais feliz.

Um forte obrigado aos meus amigos, amigas e também aspirantes a geólogos: Aids, Constipado, Manja, Mormaço e toda galera da astenos; Cozido, Hashtag, Hebe, Fernando, Intrudida, Medíocre, Pinga, Peps, Rega, Sebo, Sifu, Sininho, Smeg, Titchon e Vera Lúcia Verão. Vocês foram presentes nos melhores e piores momentos dessa graduação, sobretudo nas aulas de campo que tanto amamos.

Finalmente, agradeço também a todos os meus amigos de Campinas e Valinhos que, de alguma forma ou de outra, contribuíram na minha decisão de fazer uma universidade em outro lugar e me incentivaram com suas palavras amigas e momentos de fraternidade. Menciono por fim, o primeiro professor que acreditou na minha ideia de ser um geólogo: obrigado, Sumaré!

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | RESUMO | 4 |
| 2. | ABSTRACT | 4 |
| 3. | INTRODUÇÃO | 5 |
| 4. | OBJETIVO | 7 |
| 5. | LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE TRABALHO | 7 |
| 6. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 6.1. | Estado da Arte | 8 |
| 6.1.1. | Adaptação das Terminologias | 8 |
| 6.1.2. | Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos | 9 |
| 6.1.3. | Carga contaminante potencial | 10 |
| 6.1.4. | Risco de contaminação..... | 12 |
| 6.2. | Descrição das regiões impactadas pela vinhaça | 14 |
| 6.3. | Aquíferos paulistas | 15 |
| 7. | MATERIAIS E MÉTODOS | 17 |
| 8. | RESULTADOS | 23 |
| 8.1. | Vinhaça | 23 |
| 8.1.1. | Caracterização físico-química | 23 |
| 8.1.2. | Intensidade | 26 |
| 8.1.3. | Disposição | 27 |
| 8.1.4. | Duração | 28 |
| 8.1.5. | Consolidação de informações | 28 |
| 8.1.6. | Adaptações do método e perigo da vinhaça | 30 |
| 8.2. | Vulnerabilidade de aquíferos (GOD) | 34 |
| 8.2.1. | Grau de confinamento hidráulico (G) | 34 |
| 8.2.2. | Ocorrência do substrato e distância do lençol freático (O e D) | 35 |
| 8.2.3. | Mapas de vulnerabilidade | 39 |
| 8.3. | Risco de contaminação | 41 |
| 9. | DISCUSSÃO | 43 |
| 10. | DIFICULDADES ENCONTRADAS | 46 |
| 11. | CONCLUSÕES | 48 |
| 12. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |

1. RESUMO

A vinhaça é um efluente advindo da indústria sucro-alcooleira, que possui alta concentração de matéria orgânica, N, K, Ca, Mg, ácidos orgânicos e baixo pH. É extensamente aplicada no Estado de São Paulo por aspersão e por sulcos em dosagens que variam de 50 a 600 m³/ha nas áreas de estudo. O objetivo deste estudo foi o de determinar as áreas de maior risco de contaminação das águas subterrâneas pelo manejo desta prática de fertirrigação, entendida como a relação entre a vulnerabilidade do aquífero à contaminação e o perigo da carga contaminante antrópica. Três polígonos que abrangem toda área das usinas foram escolhidos e nomeados como, A, B e C. O perigo de contaminação da vinhaça é função do método de aplicação e dosagem. Tal parâmetro foi avaliado sob uma escala composta dos índices baixo, médio e alto, através da qual foi constatado que a maior parte das áreas estudadas está sob perigo de contaminação médio a alto, resultado de dosagens maiores que 150 e 450 m³/ha, para aspersão e canais, respectivamente. Essas áreas estão instaladas na zona de recarga do Aquífero Serra Geral e dos sistemas aquíferos Tubarão, Guarani e Bauru, onde a vulnerabilidade foi cartografada pelo método GOD com escala de cinco índices: muito baixo, baixo, médio, alto e extremo. A vulnerabilidade extrema está relacionada aos vales; meia encostas, a depender da litologia; e à Formação Botucatu em topo de morro. Finalmente, os mapas de risco apontam que: o risco de contaminação extremo é raro; risco alto é comum; e risco médio e baixo são os mais frequentes. Observa-se ainda que as regiões de risco extremo estão sob perigo de contaminação médio a alto em zonas de vulnerabilidade extrema e as regiões de risco alto, perigo médio em vulnerabilidade extrema ou vulnerabilidade e perigo altos.

2. ABSTRACT

Sugar cane vinasse is an effluent used by sugar-alcohol-industry which is composed by high concentrations of organic matter, elements like N, K, Ca and Mg, organic acids and reduced soil's pH. It's being extremely applied in the São Paulo State using aspersion or cannelures under variable doses, from 50 to 600 m³/ha in the study areas. The objective of this study was to determine the major

places of contamination risk areas (known as hot spot) possibly threatened by the fertirrigation process and understanding the relationship between aquifer contamination vulnerability and the anthropic contaminant load hazard. Three polygons which embrace whole area from factories were chosen and named as A, B and C. The vinasse contamination hazard is influenced by its application method and dosage. The analyses were performed by a scale of dosages composed by the indexes low, moderate and high. Those standards allow to verify that most of areas are under moderate to high contamination hazard, result of aspersion at dosages greater than 450 m³/ha and cannelures, greater than 150 m³/ha. The selected areas are installed on the recharge zone of Aquifer Serra Geral and Tubarão, Guarani and Bauru aquifers systems, where the vulnerability were mapped supported by GOD method using 5 grades: very low, low, moderate, high and extreme. The extreme vulnerability is related to river valleys, declivity areas, depending on the lithology and to Formação Botucatu in the top of hills. Finally, the risk maps point out that the extreme contamination risk is rare; high is common; and moderate and low are the most frequent. Besides, the extreme risk zones have moderate to high hazard and the high risk zones, moderate hazard on extreme vulnerability or high vulnerability under high hazard.

3. INTRODUÇÃO

O Estado de São Paulo possui vastas lavouras de cana-de-açúcar instaladas nas zonas de recarga dos seus aquíferos e sistemas aquíferos mais importantes (Tubarão, Guarani, Serra Geral e Bauru). Utiliza-se como fertilizante nessas regiões a vinhaça, efluente orgânico derivado da produção do álcool que ainda é pouco estudado e causa preocupações acerca do seu potencial de contaminação.

A vinhaça, também conhecida como vinho ou vinhoto, é um resíduo da indústria sucroalcooleira produzido a partir do mosto da cana-de-açúcar e aplicado ao solo no período pós-colheita com o objetivo de recuperá-lo do desgaste causado pela monocultura intensa. É considerada um efluente com elevada carga poluente, alta demanda bioquímica e química por oxigênio (DBO

e DQO, respectivamente), alto teor de nitrato, baixo pH e riqueza em ácidos orgânicos e abundância dos cátions K, Ca e Mg (Ludovice, 1997).

Muitos autores vêm considerando a vinhaça como um potencial contaminante do lençol freático dos aquíferos paulistas (e.g. Gloeden *et al.*, 1991, Gloeden, 1994; Ludovice, 1997; Lyra *et al.*, 2003; Da Silva *et al.*, 2007; Junqueira *et al.*, 2009; Barbalho & De Campos, 2010), já os que não identificaram mudança significativa nas propriedades da zona freática em regiões afetadas por vinhaça, mencionam a necessidade de estudos de maior duração visando o conhecimento dos efeitos indesejados que a fertirrigação com vinhaça em lavouras de cana-de-açúcar provoca no lençol freático a longo prazo (e.g. Cunha *et al.*, 1987; Da Silva *et al.*, 2014).

A localização das lavouras de cana-de-açúcar apresenta forte ligação com os aspectos fisiográficos da região paulista, estando associada às regiões de baixo relevo do Estado, que permitem a formação de vastos campos. Os Sistemas Aquíferos Tubarão, Guarani e Bauru e o Aquífero Serra Geral são aqueles que possuem maior correlação espacial com a produção de cana-de-açúcar, sobretudo na porção norte do Estado, região na qual essa atividade é predominante.

A amplitude das plantações de cana-de-açúcar inviabiliza a implantação de uma rede de monitoramento regional, visto que é necessário para tal, o uso de instrumentos de precisão e um aporte de funcionários altamente qualificados; o que, por requerer altos investimentos, deve ser planejado somente em projetos de pesquisa localizados.

Assim, torna-se cada vez mais comum o uso de técnicas regionais que possibilitem o direcionamento de esforços no combate à contaminação dos recursos hídricos. O contexto do presente trabalho surge com o intuito de determinar o risco de contaminação no Estado de São Paulo. Para isso, pretende-se estabelecer um conjunto de critérios e desenvolver uma técnica qualitativa para aferir o perigo de contaminação causado pela cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, aplicá-la em três áreas distintas (nomeadas como (A, B e C) e confrontá-la com mapas de vulnerabilidade a fim de se determinar o risco de contaminação.

Utilizar-se-á dos métodos clássicos da literatura, GOD e POSH, desenvolvidos e apresentados em Foster & Hirata (1988) para definir o risco de

contaminação. Ressalta-se, no entanto, que para atingir tal objetivo, será confrontada a carga contaminante com a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à contaminação, não sendo uma variável estudada por este trabalho o grau de definição. A metodologia clássica será adaptada, conforme a necessidade, levando-se em conta a situação paulista e a disponibilidade de dados.

Espera-se que a metodologia e os resultados produzidos possam possibilitar ao gestor de recursos hídricos direcionar os investimentos em monitoramento com base em informações qualitativas que relacionem as regiões mais vulneráveis à contaminação com aquelas de maior perigo da carga contaminante, o que indicará as áreas de maior risco (Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988; Foster *et al.*, 2013).

4. OBJETIVO

O presente Trabalho de Formatura tem como objetivo principal desenvolver um método para determinar o risco de contaminação dos aquíferos impactados pela aplicação de vinhaça por fertirrigação em culturas de cana-de-açúcar. O termo risco é entendido como o cruzamento da carga contaminante potencial, classificada segundo uma adaptação do método POSH (Foster & Hirata, 1988; Foster *et. al*, 2012), com a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, qualificada com o método GOD, dos mesmos autores. Adicionalmente, este trabalho aplica tais métodos em casos reais em usinas localizadas sobre aquíferos no Estado de São Paulo.

5. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE TRABALHO

As áreas de estudo se localizam na porção paulista da Bacia Hidrográfica do Paraná, onde está instalada a maior concentração de indústrias sucroalcooleiras do país. Selecionou-se três polígonos para detalhamento e determinação do risco, que contém a área das usinas escolhidas e designadas neste trabalho como A, B e C (figura 5.1). Os polígonos destacados abrangem os seguintes municípios:

Área de estudo da Usina A: Marabá Paulista, Teodoro Sampaio, Pontal do Paranapanema e Sandovalina;

Área de estudo da Usina B: São José da Bela Vista, Restinga, Franca, Batatais, Patrocínio Paulista e Nuporanga;

Área de estudo da Usina C: Jardinópolis, Brodowski, Altinópolis, Cajuru, Santa Cruz da Esperança, Ribeirão Preto, São Simão, Cravinhos e Serra Azul;

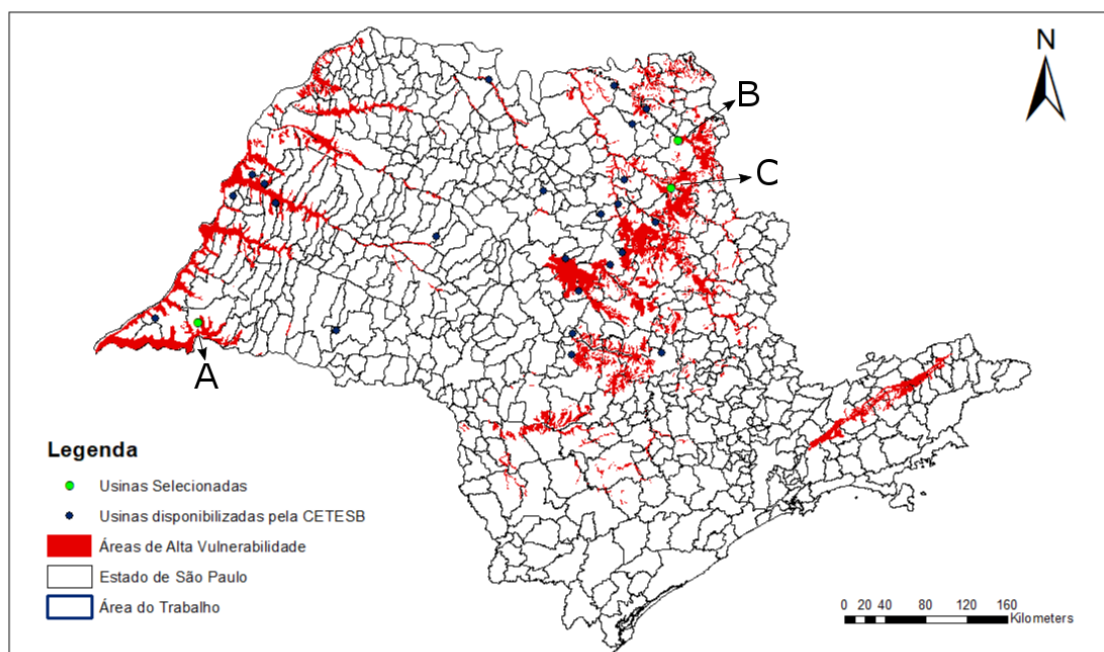


Figura 5.1: Municípios paulistas e a localização das maiores usinas de açúcar e álcool, destacando-se as três usinas estudadas (A, B, C). As áreas de alta vulnerabilidade foram definidas em DAEE/IG/IPT/CPRM (2005).

6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1. Estado da Arte

6.1.1. Adaptação das Terminologias

O mapeamento e o estudo de áreas com suspeita de contaminação é uma técnica cada vez mais utilizada para o monitoramento e a preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Utilizar-se-á neste trabalho das técnicas GOD e POSH, definidas em Foster & Hirata (1988), que vem sendo

amplamente aplicadas nos países latino-americanos, foram utilizados para determinar o risco de contaminação das águas subterrâneas do interior paulista pela principal atividade agrícola da região: o plantio de cana-de-açúcar e a fertirrigação do solo agrícola com a vinhaça de cana-de-açúcar.

O risco de contaminação das águas subterrâneas, definido como a interação entre a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação e o potencial da carga contaminante em Foster & Hirata (1988), passou a ser definido como perigo de contaminação em trabalho posterior realizado pelos mesmos autores (Foster *et al.*, 2002). Todavia, reconhece-se que o uso do termo risco vem sendo amplamente utilizado com o mesmo sentido nos trabalhos recentes (e.g. Kazakis & Voudoris, 2015; Wang *et al.*, 2012; Nobre *et al.*, 2012), e assegurado por normas técnicas (ABNT NBR/ISO 31000, 2009; UNISDR, 2017), enquanto que a carga contaminante vem sendo tratada como perigo.

Nesse contexto, então, a avaliação ou quantificação do risco é tida como a interação entre: (I) Vulnerabilidade, (II) Perigo e (III) Grau de exposição. Entretanto, neste trabalho, não será utilizada a componente (III) para determinação do risco, uma vez que o objetivo deste trabalho não é um apresentar um estudo epidemiológico ou de grau de exposição, mas sim zonas onde haja potencial de contaminação pela vinhaça da cana-de-açúcar, não se faz necessário avaliar o grau de exposição. Assim, opta-se pela definição clássica de risco e terminologia disponível em Foster & Hirata (1988) e compatível com a ABNT NBR/ISO 31000 (2009).

Sendo assim, serão definidos abaixo a vulnerabilidade de aquíferos, a carga contaminante e o risco de contaminação dos aquíferos paulistas pela vinhaça.

6.1.2. Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos

Pode-se compreender a vulnerabilidade como uma componente fundamental para o mapeamento e estudo preliminar de áreas com predisposição à contaminação, uma vez que a mesma define as propriedades intrínsecas do aquífero que determinam a sua relação com um contaminante antropogênico diverso (LeGrand 1964; Albinet & Margat, 1970; Foster & Hirata, 1988; Stempvoort *et al.*, 1993; Paralta *et al.*, 2001; Babiker *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2013; Askarimarnani *et al.*, 2014; Madi *et al.*, 2016). Em específico, Albinet &

Margat (1970) foram os primeiros a utilizar o termo com critério, que passou por continua evolução até ser melhor definido na década de 80 (Aller *et al.*, 1987; Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988). Trata-se de um conceito que tem como princípio o grau de resistência que um aquífero apresenta em relação a um contaminante genérico. Não depende do tipo ou intensidade da atividade humana instalada na região, já que é representado por meio de um índice que leva em conta somente as características intrínsecas do aquífero.

Segundo Foster (1987), o resultado da avaliação de vulnerabilidade deve ser apresentado na forma de um mapa de vulnerabilidade. Assim, convém avaliar o aquífero, identificando: (I) o quão suscetível é a zona não saturada à penetração ou infiltração de uma carga contaminante e (II) o quão efetivo é a capacidade de retenção do solo, isto é, a predisposição do solo a reações químicas e retenção física que acontecem ou não nessa porção vadosa. Representa, portanto, a variação do nível de proteção natural devido à capacidade de atenuação do contaminante na zona não saturada, como um resultado de processos físico-químicos e da inacessibilidade hidráulica.

A quantificação da vulnerabilidade se dá por meio de variáveis numéricas que se baseiam em um conjunto de atributos dos aquíferos, mas que possuem valores escolhidos de forma subjetiva (Guiguer & Kohnke, 2002). Dessa forma, a determinação da vulnerabilidade de um aquífero necessita de simplificações práticas que promovam a integração das condições do substrato geológico e dos processos hidrogeológicos. Nesse sentido, o método utilizado neste trabalho é o GOD (*Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table*), desenvolvido por Foster & Hirata (1988). Vale ressaltar que esses métodos identificam a susceptibilidade do aquífero à penetração de uma carga contaminante, mas não aos processos que ocorrem na zona saturada tais como: advecção, dispersão, retardamento e decaimento da pluma contaminante.

6.1.3. Carga contaminante potencial

O conceito de carga contaminante diz respeito ao tipo de atividade antrópica, que no caso da vinhaça de cana-de-açúcar pode ser classificada em função das suas características físico-químicas, formas e períodos de aplicação, estocagem e intensidade de uso.

Segundo Foster & Hirata (1988), a carga contaminante, independentemente do tipo de atividade a que está associada, deve ser avaliada segundo a classe do contaminante (tendência à degradação e retardamento), intensidade da contaminação, sua disposição no subsolo e a duração na aplicação da carga.

A vinhaça é a carga contaminante a ser caracterizada neste trabalho. Trata-se de um resíduo da indústria sucroalcooleira utilizado como fertilizante nas lavouras da cana-de-açúcar (Ludovice, 1997) e aplicado, por meio da fertirrigação, nas lavouras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo. A cada litro de álcool produzido, são gerados de 10 a 18 litros de vinhaça, a depender das técnicas empregadas pela usina (Lyra *et al.*, 2003; Ludovice, 1997; Rossetto, 1987).

Apesar de a maior parte dos autores que realizaram uma caracterização físico-química da vinhaça não a distinguirem quanto à sua origem e forma de produção, suas características demonstram uma consistência em sua composição química. Freirez & Cortez (2000) definem a vinhaça da cana-de-açúcar como um efluente detentor de um poder poluente cerca de 100 vezes superior ao do esgoto doméstico. Isso decorre da sua riqueza em ácidos orgânicos, baixo pH (normalmente entre 4 e 5), demanda bioquímica e química por oxigênio (doravante, DBO e DQO, respectivamente), cátions tais como K, Ca e Mg e temperatura entre 85 e 90°C na saída dos destiladores (Da Silva *et al.*, 2007; Rossetto, 1987; Silva & Filho, 1981).

Em linhas gerais, a vinhaça é um efluente rico em matéria orgânica e nitrogênio, detentor de alta DBO e DQO (tabela 6.1.3; e.g. Ludovice, 1997; Melo *et al.*, 2002; Lyra *et al.*, 2003; Dalri *et al.*, 2010; Rolim *et al.*, 2013; Da Silva *et al.*, 2014). Tais configurações apresentam o nitrogênio como um elemento com grande potencial poluidor, isso devido ao seu estado reduzido nos fertilizantes e subsequente oxidação (formação de nitrato), aumentando a sua mobilidade na zona vadosa. Em contrapartida, outros componentes tais como potássio e fosfato são incorporados pelas plantas, não apresentando um grande perigo para a água subterrânea (Foster *et al.*, 2003).

Em muitas localidades, o nitrato vem sendo encontrado acima do limite estabelecido pela OMS (Organização Mundial da Saúde) e USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) de 10 mg/L, reconhecidos por muitos autores como guia para seus estudos (Tang *et al.* 2004; Kendall & Aravena, 2000; Varnier & Hirata, 2000). Os mesmos autores apontam que o nitrato quando acima das concentrações estabelecidas internacionalmente, pode causar metemoglobinemia e câncer.

| Parâmetros | Unid. | Parâmetros físico-químicos da vinhaça segundo autores | | | | | | | |
|----------------------|-------|---|----------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|---------------------------|--|
| | | Autores | | | | | | | |
| | | Lyra <i>et al.</i> (2003) | Dalri <i>et al.</i> (2010) | Da Silva <i>et al.</i> (2014) | Ludovice (1997) | | Rolim <i>et al.</i> (2013) | Melo <i>et al.</i> (2002) | |
| Mosto/amostra | | am 1 | am 2 | melaço | Melaço | Caldo | Misto | | |
| Período de aplicação | | | | Janeiro | | Perene | | | |
| DQO | mg/L | 21.450 | 21.500 | | 65.000 | 15000-33000 | 45.000 | 21.500 | |
| DBO | mg/L | 10.000 | 12.000 | | 25.000 | 6000-16500 | 19.800 | 12.000 | |
| CE | dS/m | 14 | 14 | 9 | | | | 14 | |
| SDT | mg/L | 7.940 | 7.690 | 0 | 81.500 | 23.700 | 52.700 | 7.690 | |
| pH | - | 5 | 4 | 4 | 4,2-5,0 | 3,7-4,6 | 4,4-4,6 | 4 | |
| N amoniacal | | | | 64 | | | | | |
| N total | mg/L | 410 | 440 | | 450-1610 | 150-700 | 480-710 | 440 | |
| Fósforo | mg/L | 160 | 140 | 91 | 100-290 | 10-210 | 9-200 | 140 | |
| Potássio | mg/L | 3.100 | 3.000 | 3.120 | 18.894 | 3740-7380 | 1200-2100 | 3340-4600 | |
| Sódio | mg/L | 350 | 300 | 59 | | | | 300 | |
| Cálcio | mg/L | 640 | 560 | 58 | 450-5180 | 130-1540 | 1330-4570 | 560 | |
| Magnésio | mg/L | 340 | 280 | 423 | 420-1520 | 200-490 | 580-700 | 280 | |
| temperatura | °C | | | | 80-100 | 80-100 | 80-100 | | |
| sulfato | mg/L | | | | 6.400 | 600-760 | 3700-3730 | | |
| Carbono | mg/L | | | | 11200-22900 | 5700-13400 | 8700-12100 | | |
| Matéria orgânica | mg/L | | | | 63.400 | 19.500 | 3.800 | | |
| cloretos | mg/L | | | | | | | 1.219 | |

Tabela 6.1.3: Resultados de análises da vinhaça segundo vários autores (Lyra *et al.*, 2003; Dalri *et al.*, 2010; Da Silva *et al.*, 2014; Ludovice 1997; Rolim *et al.*, 2013; Melo *et al.*, 2002).

6.1.4. Risco de contaminação

Se a vulnerabilidade é uma característica intrínseca do aquífero e o potencial de geração da carga contaminante é o produto das características do contaminante, tais como: classe, intensidade, disposição e duração; o risco de contaminação representa a possibilidade de interação de um poluente em específico com a água subterrânea (Figura 6.1.4a). Em outras palavras, nem todos os estratos sobrejacentes ao aquífero têm a mesma capacidade de retenção, que também varia de acordo com o poluente a que estão expostos (Foster & Hirata, 1988; Freeze & Cherry, 1979). Um aquífero com vulnerabilidade muito baixa pode ser completamente afetado por uma carga poluente muito potente e vice-versa. A Figura 6.1.4b representa possíveis situações de interação entre a carga contaminante e o aquífero.

Dessa forma, pode-se definir o risco de contaminação como a probabilidade de contaminação a qual o aquífero está sujeito, que deriva diretamente:

- I- das características naturais dos estratos que separam os aquíferos da superfície sujeita a contaminação;
- II- da carga contaminante que é ou será aplicada na superfície como resultado da atividade humana local

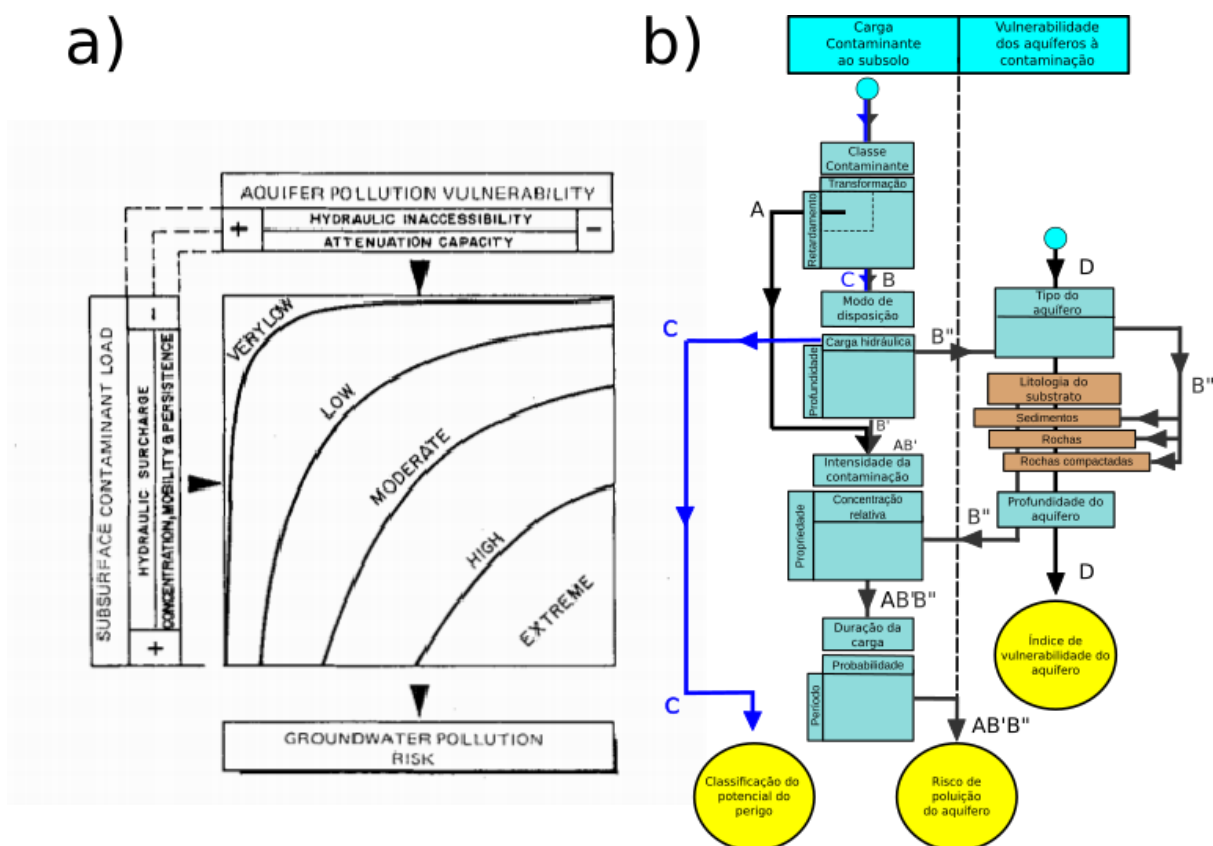


Figura 6.1.4: a) Risco de contaminação de acordo com Foster & Hirata (1988). Eixo vertical define a carga contaminante através do método POSH e o horizontal, a vulnerabilidade de aquíferos segundo o método GOD. b) Fluxograma para determinação do risco de contaminação através da carga contaminante e vulnerabilidade modificado de Foster & Hirata (1988). A- representa o caminho que contaminantes persistentes percorrem (independe do modo de disposição e da vulnerabilidade do aquífero); B/B'/B''- representam o caminho que contaminantes menos persistentes percorrem, onde podem ou não ser atenuados pelo aquífero; C- Representa o caminho para se obter o potencial de contaminação da carga contaminante. Depende somente da classe e modo de disposição do poluente, mas pode se intensificar com o aumento da intensidade e duração; D- Caminho a percorrer para se obter o índice de vulnerabilidade do aquífero.

O uso de técnicas para reconhecimento de áreas onde exista o risco de contaminação é cada vez mais recorrente em diferentes lugares do mundo (e.g. Allet *et al.*, 1987, Cutrim, 1987; Foster *et al.*, 2003; Rahman (2008); Tweed *et al.*, 2007). Faz-se necessário no Estado de São Paulo a aplicação de técnicas de baixo custo e que necessitem de baixo volume de dados, o que pode prover uma base teórica para o desenvolvimento de uma rede de monitoramento perspectiva que auxilie os órgãos gestores e autoridades competentes na tomada de decisões e aumente o conhecimento científico e prático sobre o potencial de contaminação.

Nesse contexto, escolheu-se os métodos GOD e POSH, que por possuírem a simplicidade conceitual e demandarem um sistema de informações acessível, podem ser facilmente aplicados para os aquíferos do interior do Estado de São Paulo. Foster *et al.* (2002) apontam que essas configurações, permitem a confecção de trabalhos de escala regional e aplicação em regiões com baixa disponibilidade de dados, tal como na América Latina durante a década de 90, o que assegura sua utilização neste trabalho.

6.2. Descrição das regiões impactadas pela vinhaça

Os autores clássicos da geomorfologia, tais como, Ab' Saber e Ross (e.g. Ab' Saber, 1954; Ross & Moroz, 2011) dividem o Estado de São Paulo em três grandes compartimentos geomorfológicos baseados principalmente no gradiente topográfico (sentido SE-NW): Primeiro Planalto Paulista (1° PP), Depressão Periférica Paulista (DPP) e Segundo Planalto Paulista (2° PP). A DPP e parte do 2°PP possuem relevo suave quando comparado ao íngreme do 1° PP, que é formado pela Província Mantiqueira. Esse relevo, caracterizado pela baixa declividade, é formado por zonas de colina com topo amplo, que configuram o cenário ideal para a monocultura extensiva da cana-de-açúcar, presente sobretudo na porção mais Norte e Nordeste do Estado.

As plantações de cana-de-açúcar estão instaladas na Bacia Sedimentar do Paraná, onde a estratigrafia presente nesta bacia tem seu início no Devoniano, representado pelos arenitos da Formação Furnas do Grupo Paraná

e seu limite superior pelo Grupo Bauru, mas com contribuições cenozoicas importantes, tais como das Formações Rio Claro e Itaqueri. No Estado de São Paulo, a Bacia corresponde a um pacote de sedimentos continentais e marítimos associados a rochas ígneas de gênese variada: extrusivas e intrusivas subvulcânicas discordantes e concordantes; em particular, da Formação Serra Geral (Milani *et al.*, 1993, 1994, 2007; Schneider *et al.*, 1974).

O conjunto de Unidades litoestratigráficas utilizadas nesse trabalho para definição da vulnerabilidade à contaminação é (Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2006): Formações Serra Geral, Pirambóia, Botucatu, Itaqueri e depósitos aluvionares de sedimentos quaternários inconsolidados, unidades essas, presentes nas áreas pertencentes as Usinas B e C. No entanto, fazem-se presentes na área da Usina A as Formações Serra Geral, Grupo Caiuá com as Formações Rio Paraná e Santo Anastácio e Grupo Bauru, Formação Vale do Rio do Peixe.

Milani *et al.* (2007) descreve as sedimentares pertencentes ao Grupo São Bento como arenitos bem selecionados cujo paleoambiente é eólico. Destaca-se o aspecto mais homogêneo da Formação Botucatu em relação a Piramboia, uma vez que a segunda demonstra ser formada também por planícies aluviais inter-dunas que, por sua vez, depositam também sedimentos mais finos.

Riccominni (1997) aponta que a Formação Itaqueri é composta de depósitos rudáceos de leques aluviais compostos de arenito siltoso muito fino a grosso com diagênese promovida pelo hidrotermalismo penecontemporâneo a sua sedimentação; o que ocasiona em baixar permeabilidades.

6.3. Aquíferos paulistas

Os aquíferos paulistas podem ser separados entre o domínio sedimentar, que representa 61% da área do Estado, e o domínio cristalino, relacionado aos 39% restantes. O domínio sedimentar abrange as unidades aquíferas: colúvio-aluvionares, São Paulo, Taubaté, Bauru (D), Guarani (B), Tubarão e Furnas; e o Aquitarde Passa Dois, que se interpõe entre o Sistema Aquífero Guarani, acima, e o Sistema Aquífero Tubarão (A), abaixo. O domínio cristalino reúne o Aquífero

Cristalino e Sistema Aquífero Serra Geral (D; convênio DAEE/UNESP, 2013; Rocha *et al.*, 2006; tabela 6.4). Os aquíferos estudados são:

A. Aquífero Tubarão: Está posicionado no substrato paleozoico na porção leste da DPP em contato com o embasamento cristalino. É, majoritariamente, composto pelo Grupo Itararé com uma sequência de fácies arenosas que gradam para argilosas com ocorrência esporádica de diamictitos (França & Potter, 1988); mas também abrange porções das Formações Tatuí, Rio Bonito e Palermo (Rocha *et. al*, 2006). Tal aquífero aflora em grandes centros tai como a Região Metropolitana de Campinas, Sorocaba e Itu; e se estende até a porção Norte do Estado de São Paulo, onde corresponde à Formação Aquidauana, do Grupo Itararé (Rocha *et. al*, 2006).

B. Aquífero Guarani: Ocorre em cerca de 76% do território paulista e aflora em desde o município de Rifaina a norte até Fartura a sul (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005). A oeste de sua região de afloramento está confinado pela Formação Serra Geral, onde abastece cidades como São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília e muitas outras. Este aquífero é composto das formações Piramboia e Botucatu, formações estas representadas por arenitos cujo ambiente deposicional predominante é o eólico com influência fluvial (Soares, 1972). Devido ao aspecto homogêneo de tais formações (Milani *et al.*, 2007), o Aquífero Guarani é granular e homogêneo. Sua profundidade varia de dezenas de metros até mais de 1900 m, no extremo Oeste do Estado, onde pode aparecer com 400 m de espessura (Rocha *et al.*, 2006).

C. Aquífero Serra Geral: Corresponde à formação que lhe atribui o nome, possui porosidade secundária, dada, principalmente, por juntas de resfriamento e fraturamento tectônico (Rocha *et al.*, 2006). A espessura dos magmatitos, de acordo com Milani (2004) varia de 300 m em sua região de afloramento a cerca de 2000 m na região de Pontal do Paranapanema. Aflora principalmente na porção norte do estado.

D. Aquífero Bauru: formado pelas rochas mais jovens da Bacia do Paraná, correspondentes aos Grupos Bauru e Caiuá (Fernandes & Coimbra, 1992), o Aquífero Bauru consiste em uma sequência sedimentar siliciclástica acumulada em um paleoambiente árido a semiárido que ocupa praticamente metade do

território paulista e possui uma espessura que varia entre 75 e 300 (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005). É limitado a noroeste pelo Rio Paraná; a norte, pelo Rio Grande; a sul, pelo Rio Paranapanema; e a leste, pela Formação Serra Geral. A estratigrafia de suas rochas hospedeiras gera uma discrepância no comportamento hidrogeológico do aquífero viabilizando sua divisão em duas unidades hidroestratigráficas (Bauru médio/superior e Bauru inferior, formações Bauru e Caiuá, respectivamente, que podem ocorrer de forma livre e confinada (DAEE , 1979b *apud* DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

| Unidades Aquíferas do Estado de São Paulo | | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Unidade | Área aflorante (Km ²) | Área encoberta (Km ²) | Área total (Km ²) |
| Tubarão | 25223 | 161522 | 186745 |
| Guarani | 13960 | 141824 | 155784 |
| Serra Geral | 34838 | 106996 | 141824 |
| Bauru | 106996 | 0 | 106996 |

Tabela 6.4: Principais unidades hidrogeológicas do Estado de São Paulo (DAEE/UNESP, 2013)

7. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o reconhecimento de áreas susceptíveis à contaminação, dividiu-se este trabalho nas seguintes frentes de organização: I- delimitação e caracterização da área de estudo para determinação da vulnerabilidade; II- levantamento de dados de órgãos públicos e artigos, bem como sua organização; III- caracterização da carga contaminante; IV- Integração dos dados em SIG (Sistema de Informação Geográfica) para confecção de mapas; e IV- interpretação dos dados.

Inicialmente, selecionou-se a partir de um ficheiro de pastas disponibilizado pela CETESB contendo 26 arquivos de caráter variado referentes a 26 usinas sucroalcooleiras, áreas retangulares que abrangessem os empreendimentos pertencentes a três delas (Usina A, B e C). Os arquivos disponibilizados, que foram utilizados neste trabalho são vetoriais no formato *shapefile*, mapas geológicos e hidrogeológicos em .pdf, tabelas de análise

química de vinhaça e água e informações dos Planos de Aplicação de Vinhaça – PAV, exigido na norma técnica da CETESB P 4.231/2015. O PAV deve conter, basicamente:

- Módulo de aplicação
- Área de aplicação da vinhaça
- Teor de potássio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)
- Concentração de potássio na vinhaça (mg k L^{-1})
- Teor da CTC (capacidade de troca catiônica no solo) no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)
- Dosagem máxima de vinhaça ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)
- Quantidade prevista a ser aplicada no ano

Utilizou-se como critério para selecionar as três áreas de estudo a disponibilidade de dados em formato requerido para este trabalho (arquivos vetoriais, georrefenciáveis ou com coordenadas de poços, módulos e métodos de aplicação da vinhaça) e a sua proximidade das áreas de alta vulnerabilidade do Estado de São Paulo (figura 5.1). Dessa forma, torna-se possível escolher para detalhamento através de informações de pequena escala, o que aumenta a precisão do risco e aumenta a possibilidade de técnicas.

Assim, a partir desses dados, foram confeccionados para cada usina – A, B e C - mapas de vulnerabilidade e mapas de carga contaminante, os quais serão apresentados na seção de resultados. Para confeccionar os mapas, utilizou-se os Softwares ARCMAP 10.2.2 e QGIS 2.18, que possibilitaram a produção de quatro *layers* e com sua subsequente sobreposição a determinação do risco de contaminação.

O perigo de contaminação da vinhaça da cana-de-açúcar foi aferido por meio de uma metodologia desenvolvida no decorrer deste trabalho. Inicialmente, estudou-se o método para determinar o perigo de contaminação para um contaminante genérico e, depois, as propriedades da vinhaça com vistas a estabelecer aquelas que influenciam na possibilidade de contaminação. Para tal, utilizou-se também a norma técnica da CETESB P 4.231/2015, que estipula regras e recomendações para a prática de fertirrigação com a vinhaça.

Através do estudo das propriedades e manejo da vinhaça, constatou-se que os parâmetros que influenciam no seu cômputo são a dosagem (D) e o método de aplicação (M), que se relacionam por meio da fórmula 7a e cujos valores foram atribuídos por meio da figura 7.1.

$$P (\text{perigo}) = D (\text{dosagem}) \times M (\text{método}) \quad (7a)$$

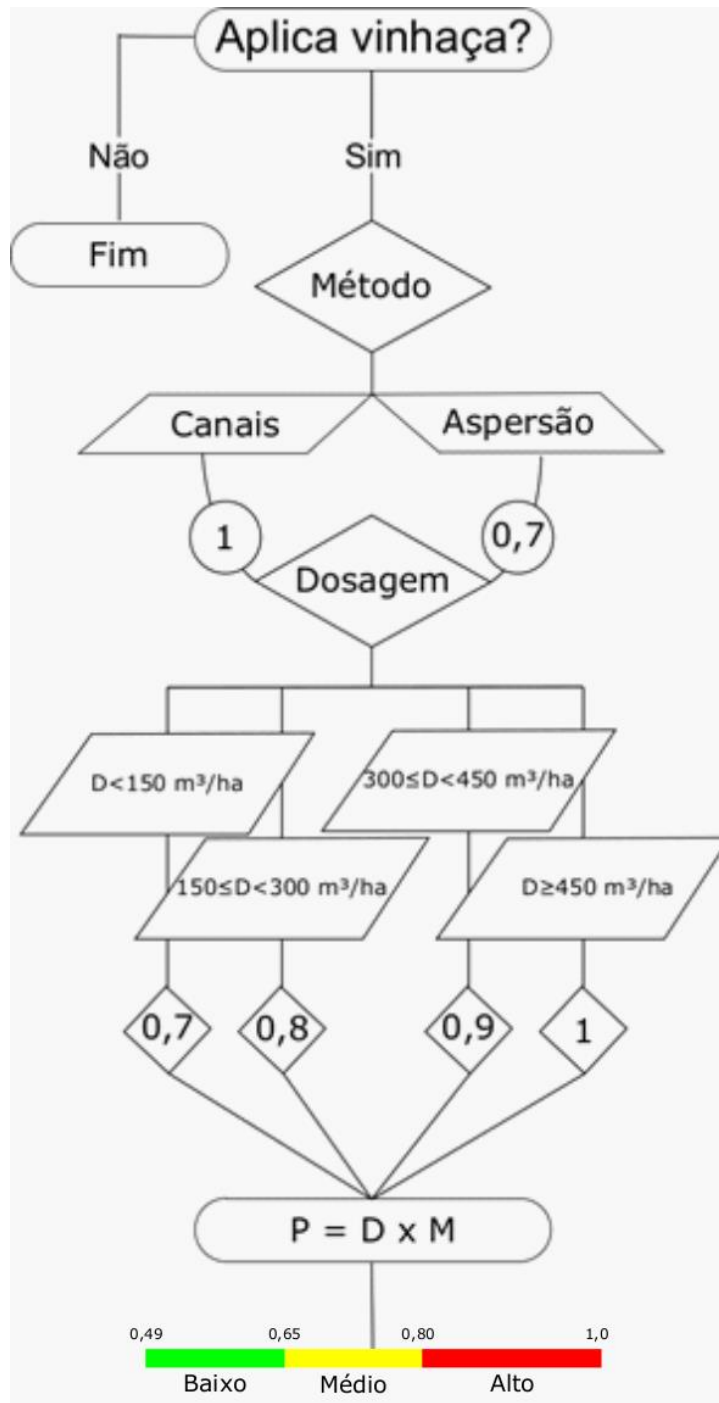


Figura 7.1: Fluxograma para determinação do perigo decorrente da prática de fertirrigação com vinhaça do Estado de São Paulo. Escala adotada: muito baixo, de 0 a 0,1; baixo, de 0,1 a 0,3; médio, de 0,3 a 0,5; alto, de 0,5 a 0,7; extremo, de 0,7 a 1,0.

A dosagem foi dividida em 4 intervalos de aplicação, que balizaram os valores atribuídos ao parâmetro D e foram organizados através da mesma escala utilizada na seção 8.2 para a determinação da vulnerabilidade dos aquíferos e apresentada na figura 7.2.

- D=0,7, para dosagens até 150 m³/ha;
- D=0,8, para dosagens de 150 a 300 m³/ha;
- D=0,9, para dosagens acima de 300 a 450 m³/ha;
- D=1,0, para dosagens maiores que 450 m³/ha (quando disponível)

São dois os métodos de aplicação levantados por este trabalho através dos dados disponibilizados pela CETESB: infiltração por canais secundários e aspersão. Atribuiu-se 1,0 como valor máximo ao método que oferece maior perigo às águas subterrâneas – canais secundários – e 0,7 à aspersão.

Para a vulnerabilidade de aquíferos, foram considerados os três parâmetros abaixo, que devem ser correlacionados de acordo com a figura 7.2:

- G (*Grade of Hydraulic Confinement*): esse parâmetro não foi avaliado uma vez que foram considerados somente os aquíferos do tipo livre, não confinados, ou as regiões de áreas de recarga de aquíferos confinados ou semi-confinados. Essa simplificação foi adotada porque o impacto que a vinhaça poderá causar irá ocorrer primeiramente sobre as águas subterrâneas do lençol freático.
- O (*Overlying Strata*): As unidades litoestratigráficas deste trabalho foram definidas a partir dos arquivos vetoriais do estado de São Paulo oriundos de CPRM (2006).
- D (*Depth to Groundwater*): A profundidade do nível d'água (NA) não pôde ser levantada por meio dos dados do SIAGAS, RIMAS e/ou DAEE devido à escassez e inconsistência desses dados para as áreas escolhidas, até mesmo devido à escala do trabalho. Também, não há consistência nem volume suficiente de dados para que sejam traçadas curvas de isopropundidade do lençol freático ou para a atribuição de uma média local

de NA. Assim, utilizou-se o ArcMap e o QGIS para aferir informações que suprimissem a falta de dados.

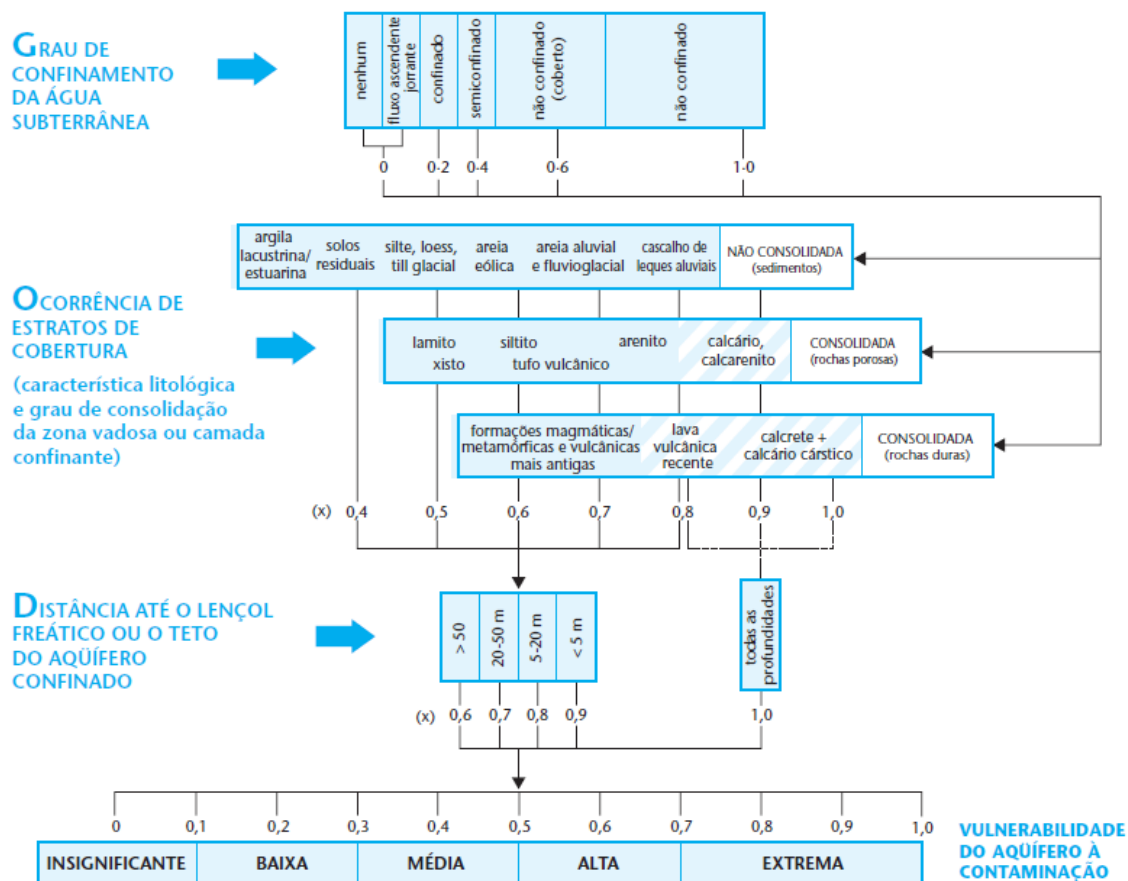


Figura 7.2: Fluxograma guia para determinação da vulnerabilidade de aquífero através do método GOD (Foster *et al.*, 2002)

Ao parâmetro O, foi confeccionada a tabela 8.2.2 onde foram atribuídos valores de 0,4 a 1 conforme o fluxograma disponível na figura 7.2. Para isso, tomou-se conta de que um solo ou rocha de granulometria fina possui maior capacidade de atenuação visto a sua tendência de possuir um gradiente hidráulico menor e que, por isso, deverá ser menos vulnerável, isto é, possuir um valor menor na escala adotada. Considerou-se assim as principais características estruturais, texturais e sedimentológicas de cada aquífero.

A produção de um *layer* de profundidade do nível d'água foi realizada através de uma sequência de processos que permitissem aferir sua profundidade. A partir de imagens SRTM Arc-Global 1 do *website Earth Explorer*

da USGS (*United States Geological Service*), extraiu-se informações tais como declividade através da ferramenta *slope*; curvas de nível, *contour lines*; e drenagens utilizando as ferramentas *fill*, *flow direction*, *flow accumulation*, *map algebra*, *stream order* e *stream to feature*. Essas informações permitiram aferir a profundidade do nível d'água (NA) através da compartimentação do relevo com NA do vale menor que 5 m, NA de meia encosta entre 5 e 10 m e, NA do topo dos morros, maior que 10 m. Para tal, criou-se uma escala onde ao vale foi atribuído 1,0; à meia encosta, 0,9; e ao topo dos morros, 0,8.

Os *layers* produzidos foram integrados a fim de se produzir um mapa de vulnerabilidade de acordo com a fórmula 7b por meio da ferramenta *map algebra* do ArcMap.

$$\text{Vulnerabilidade} = G \times O \times D \quad (8e)$$

A Usina A, no entanto, já possui um mapa de vulnerabilidade que foi utilizado por este trabalho para aferir o risco da área. Foi disponibilizada uma imagem *raster* com bandas RGB sem valores de vulnerabilidade. Assim, foi necessário adaptá-lo para gerar um mapa com valores atrelados passível de uso para se determinar o risco de contaminação:

1. Separou-se o *raster* em 3 imagens a partir das bandas R, G e B, com pixels que variam de 0 a 255;
2. Aplicou-se a condicional abaixo utilizando as bandas R e B para processar as informações e gerar um *raster* integrado que represente as variações do mapa original (onde R = Red, B = Blue e Raster = Imagem gerada a partir da aplicação da condicional):

If $R > 0$,

Then, Raster = R

If not, Raster = $B * (-1)$

3. Dessa forma, foi gerado um raster com valor mínimo igual a -255, ao qual foi somado 255 em cada pixel deixando o mínimo da escala em 0;
4. Finalmente, normalizou-se a escala para o método GOD, de 0 a 1.

Por fim, o risco de contaminação foi calculado por meio do produto integrado pela interação entre os mapas de vulnerabilidade e de perigo da vinhaça da cana-de-açúcar relativos à cada área de estudo conforme a fórmula 7c e a figura 7.3.

$$R \text{ (Risco)} = P \text{ (Perigo)} \times V \text{ (vulnerabilidade)} \quad (8f)$$

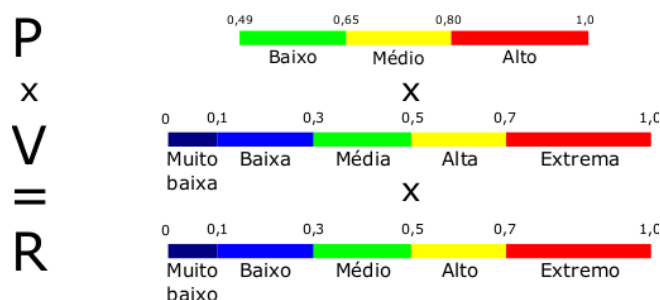


Figura 7.3: Esquema didático que demonstra a interação das escalas de perigo e vulnerabilidade para cômputo do risco de contaminação. Com exceção da vulnerabilidade da Usina A, que varia de 0 a 1,0, os demais mapas de vulnerabilidade e perigo apresentam como valor mínimo 0,49 (resultado de $0,7 \times 0,7$) e 0,9, como máximo (resultado de $0,9 \times 1$).

8. RESULTADOS

8.1. Vinhaça

8.1.1. Caracterização físico-química

A vinhaça de cana-de-açúcar é um resíduo da indústria sucroalcooleira, cuja variação química é função do tipo de mosto do qual é produzida (melaço, caldo e misto) e do processo de produção em si. A Tabela 8.1.1, que apresenta os principais resultados de análises químicas dos principais componentes presentes na vinhaça, revela um composto rico em nitrogênio, cátions tais como cálcio e potássio; sulfato, baixo pH e alta DBO e DQO.

A alta DBO, DQO e a presença de nitrogênio que caracterizam a vinhaça, demonstram que a avidéz da vinhaça por oxigênio. Em um evento hipotético, onde haja oxidação da matéria orgânica oriunda da aplicação de vinhaça, haverá muito provavelmente ainda, a degradação do nitrogênio e formação do nitrato (íon extremamente nocivo à saúde humana que pode causar metemoglobinemia

e câncer), uma vez que as aplicações são intermitentes e o aquífero é um sistema aberto onde há reentrada de oxigênio.

USINAS

| Parâmetros | Unidades | X | Y | W | Z | Média |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ano da análise | - | 2014 | ND | 2014 | 2014 | - |
| pH | - | 4,70 | 5,14 | 4,07 | 7,18 | 5,27 |
| Resíduo não Filtrável | | | | | | |
| Total | mg/l | 8,42 | - | 1480,00 | - | 744,21 |
| Dureza (Ca+Mg) | mg/l | 3132,00 | 2516,49 | 5110,70 | 89,26 | 2712,11 |
| Condutividade Elétrica | µS/cm | 11,20 | 12730,00 | 13280,00 | 3,05 | 6506,06 |
| Nitrogênio Nitrato | mg/l | 0,40 | <0,005 | 74,00 | <0,005 | 37,20 |
| Nitrogênio Nitrito | mg/l | 0,40 | <0,005 | 3,30 | 0,32 | 1,34 |
| Nitrogênio Amoniacal | mg/l | 32,40 | 37,24 | 16,00 | 0,65 | 21,57 |
| Nitrogênio Kjeldhal | mg/l | 554,60 | 280,00 | 1638,00 | 33,60 | 626,55 |
| Sódio(Na) | mg/l | 11,90 | 27,49 | 105,51 | 11,49 | 39,10 |
| Cálcio (CaO) | mg/l | 549,30 | 844,53 | 1058,55 | 15,62 | 617,00 |
| Magnésio (MgO) | mg/l | 3487,50 | 99,01 | 599,20 | 12,21 | 1049,48 |
| Potássio (K 2 O) | mg/l | 427,50 | 2944,78 | <0,005 | 109,87 | 1160,72 |
| Sulfato (SO4) | mg/l | 1198,40 | <0,005 | 1020,00 | <0,005 | 1109,20 |
| Fosfato Total (PO 43-) | mg/l | 180,20 | <0,005 | 325,01 | <0,005 | 252,61 |
| DBO | - | 29500,00 | 603,95 | 3250,00 | 2053,10 | 8851,76 |
| DQO | - | 59206,00 | 1270,37 | 51700,00 | 4926,03 | 29275,60 |
| Sólidos Suspensos Totais | mg/l | - | 2270,00 | - | 10865,00 | 6567,50 |

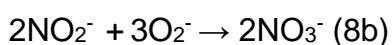
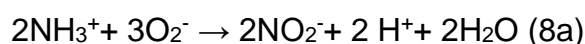
Tabela 8.1.2: Análises químicas da vinhaça de cana-de-açúcar disponibilizadas pela CETESB.

Em vista da maior disponibilidade de nitrogênio kjeldhal na vinhaça e da baixa capacidade de sua absorção pelas plantas, considera-se o mesmo como o principal elemento para determinar o potencial efetivo de contaminação da vinhaça para as águas subterrâneas no Estado de São Paulo.

Muito embora, alguns autores (Lyra *et al.*, 2003; e Madejón *et al.*, 2001) mencionem a salinização do aquífero raso como o principal processo de contaminação decorrente das práticas de fertirrigação em regiões monitoradas, ressalta-se que íons tais como potássio e cálcio, apesar de abundantes na vinhaça, são mais facilmente absorvidos pela cana-de-açúcar, planta ávida por nutrientes (Lyra *et al.*, 2003).

Uma vez que a vinhaça penetra o aquífero, espera-se que parte dos contaminantes, mesmo que diminuta, seja retida pelas camadas superficiais na zona não saturada que sobrepõem o aquífero. Os principais processos físico-químicos que controlam o potencial de atenuação de uma camada do aquífero são a biodegradação e a adsorção. A adsorção consiste, basicamente, em trocas iônicas que podem degradar um contaminante ou reter cátions passíveis de salinização do lençol freático. Por conta da adsorção, os elementos e compostos detentores de maior carga iônica possuem menor mobilidade química, sobretudo aqueles de carga positiva, que podem ser mais facilmente fixados à superfície eletricamente carregada dos argilominerais (Freeze & Cherry, 1979).

O nitrato, em específico, pode ser eliminado através da biodegradação, mas pode ser atenuado por meio da fixação de bactérias autotróficas quimiossintetizantes por respiração anaeróbia, onde o nitrogênio é reduzido a fim de formar óxido nitroso. Esse processo, de forma simplificada é composto pela amonificação - transformação de nitrogênio orgânico em amônio - e nitrificação - nitratação (8a) e nitratação (8b) - que podem ser representados pelas seguintes equações (Victoria *et al.*, 1992):



É necessário destacar que o nitrato é a principal forma do nitrogênio capaz de se mover no solo e ser incorporado pelas plantas (Victoria *et al.*, 1992). A

oxidação do nitrogênio e formação de nitrato é um processo recorrente em toda a zona vadosa, isto é, em diversas profundidades (Foster *et al.*, 2002). As raízes da cana-de-açúcar, entretanto, restringem-se aos horizontes superficiais do solo (Faroni & Trivelin, 2006), fato que se somado à profundidade de alcance da respiração anaeróbia demonstra um potencial maior de percolação do nitrato em regiões dominadas por cana-de-açúcar e fertirrigação com vinhaça.

8.1.2. Intensidade

A intensidade e o potencial de contaminação da vinhaça pode ser avaliada através da concentração provável de nitrato no fertilizante relativa aos padrões do Ministério da Saúde (Portaria nº2.914) e da sua forma de aplicação no solo no que diz respeito ao caráter de sua fonte: pontual, multipontual ou difusa.

Independente de método, a vinhaça pode ser aplicada *in natura* ou diluída com águas residuárias oriundas dos processos produtivos das usinas. Conforme disponível nas figuras 8.1.5.1 e 8.1.5.2, pode ser considerada um contaminante difuso no processo de aspersão; multipontual quando aplicada por meio de canais secundários; e pontual nos tanques reservatórios.

Parte das usinas levantadas através dos dados disponibilizados no banco, apontam a utilização de água residuária para diluição da vinhaça e parte, aplica-a diretamente no solo. Porém, nenhuma relação de concentração do fertilizante com método de aplicação foi bem detalhada, o que seria útil para definir os métodos focando na capacidade de infiltração associada com a aplicação do fertilizante. No entanto, as dosagens limites foram definidas pela norma P 4.231/2015, que apresenta a seguinte fórmula para tal:

$$\text{m}^3 \text{ de vinhaça/ha} = [(0,05 \times \text{CTC} - \text{Ks}) \times 3744 + 185] / \text{Kvi} \quad (8c)$$

A CETESB classifica cada variável como sendo:

- CTC = “Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc/dm³, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia de análise do solo do Instituto Agrônomo - IAC, devidamente assinado por responsável técnico.”

- K_s = “concentração de potássio no solo, expresso em cmolc/dm^3 , à profundidade de 0 a 0,80 metros, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de análise de solo do Instituto Agrônômico – IAC, devidamente assinado por responsável técnico.”
- 3744 = “constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc/dm^3 ou meq/100cm^3 , para kg de potássio em um volume de 01 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade.”
- 185 = “massa, em kg, de K_2O extraído pela cultura por hectare, por corte.”
- K_{vi} = “concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $\text{K}_2\text{O/m}^3$ apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico, resultante da média anual obtida nas análises semanais ou da média obtida nas análises semestrais.”

8.1.3. Disposição

A disposição de um contaminante pode ser avaliada considerando-se três fases principais: armazenagem, transporte/distribuição e aplicação. No caso da vinhaça, sua disposição está em função de seu modo de aplicação, que consiste em dois principais no Estado de São Paulo: aspersão e distribuição por canais.

Não serão considerados os métodos de armazenagem e transporte do fertilizante, já que os tanques e canais primários que cumprem essa função foram bem definidos e regulamentados pela Norma Técnica da CETESB P 4.231/2015 (CETESB 2005), que exige que os mesmos sejam revestidos com uma geomembrana impermeabilizante para impedir infiltração abaixo deles, já que possuem elevada carga hidráulica. Ressalta-se, ainda, que a mesma norma não faz distinção quanto aos métodos de aplicação da vinhaça, pois se restringe a um conjunto de critérios regulamentadores do uso do fertilizante e a uma dosagem limite que é calculada segundo a concentração de potássio no solo e na vinhaça e da capacidade de troca catiônica do solo.

A distribuição de vinhaça se dá por meio de canais e aspersão. Os canais se subdividem em primários e secundários, onde o primário escoar o fertilizante

pela lavoura de cana-de-açúcar até o ponto de interesse e é ramificado em canais de menor porte sem impermeabilização que permitem a infiltração da vinhaça, denominados como canais secundários. Após a norma técnica P 4.231/2015, os primários passaram a ser impermeabilizados com uma membrana de mesmo tipo dos tanques de armazenagem. Já a aspersão utiliza caminhões, tubos ou dutos que transportam a vinhaça até o ponto de fertirrigação. Destaca-se aqui que a aplicação por canais secundários é um método que exerce maior perturbação hidráulica no solo e que, por isso, apresenta maior perigo.

8.1.4. Duração

A vinhaça é aplicada entre os meses de abril e dezembro a fim de se evitar a estação chuvosa entre os meses de janeiro e março e de acordo com a safra da cultura de cana-de-açúcar e da produção das usinas sucroalcooleiras. Além disso, a fertirrigação com vinhaça é uma prática que ganhou forte impulso na segunda metade do século passado e é cada vez mais utilizada (Rudorff *et al.*, 2010).

8.1.5. Consolidação de informações

Para se definir a possibilidade e a intensidade de uma carga contaminante antrópica é necessário classificá-la segundo quatro parâmetros: classe das substâncias (mobilidade e persistência em subsuperfície), modo de disposição no solo, intensidade em relação às normas de potabilidade; e duração da aplicação da contaminação (Foster & Hirata, 1988).

Para analisar cada parâmetro, utilizou-se do banco de dados disponibilizado pela CETESB e da Norma Técnica P 4.231/2015, que estabelece uma série de critérios e procedimentos para o uso da vinhaça como fertilizante nas lavouras de cana-de-açúcar.

O efluente aplicado e manejado pelos usineiros envolve uma mistura de vinhaça em grande proporção e, esporadicamente, dos efluentes da própria indústria. As proporções são de difícil controle pois são variáveis segundo cada indústria e dependem da safra.

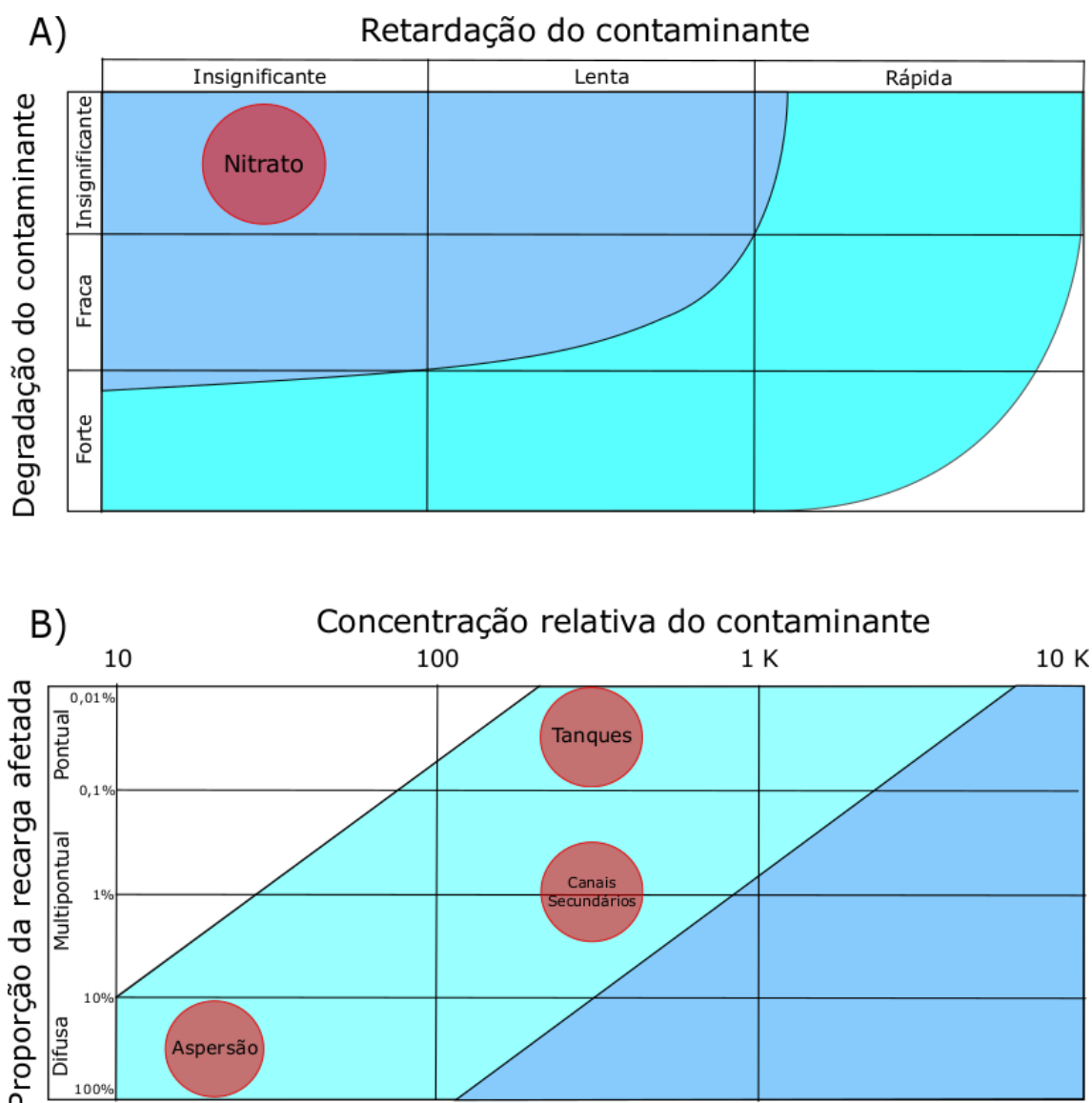


Figura 8.1.5.1: Diagramas adaptado de Foster *et al.* (2002) com nitrato, tanques reservatórios e métodos de aplicação da vinhaça da cana-de-açúcar plotados. A) Classe do contaminante considerando seu coeficiente de retardação e sua persistência provável em ambiente subterrâneo. B) Intensidade da contaminação considerando-se o concentração do contaminante em relação aos valores guia e a proporção afetada do aquífero no processo de contaminação.

Entre todos os compostos, o nitrato é aquele que terá maior atenção neste trabalho, pela sua quantidade (originariamente como nitrogênio orgânico) e característica de interesse geológico, como mobilidade e persistência em aquíferos freáticos. Os resultados da classificação segundo os quatro parâmetros estão representados nas figuras 8.1.5.1 e 8.1.5.2.

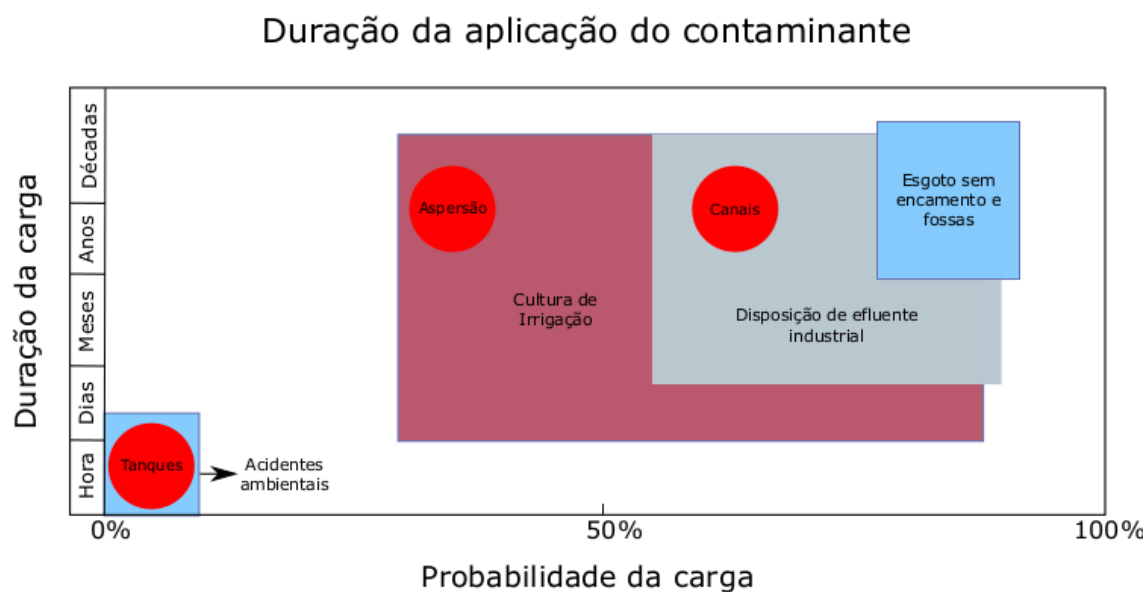
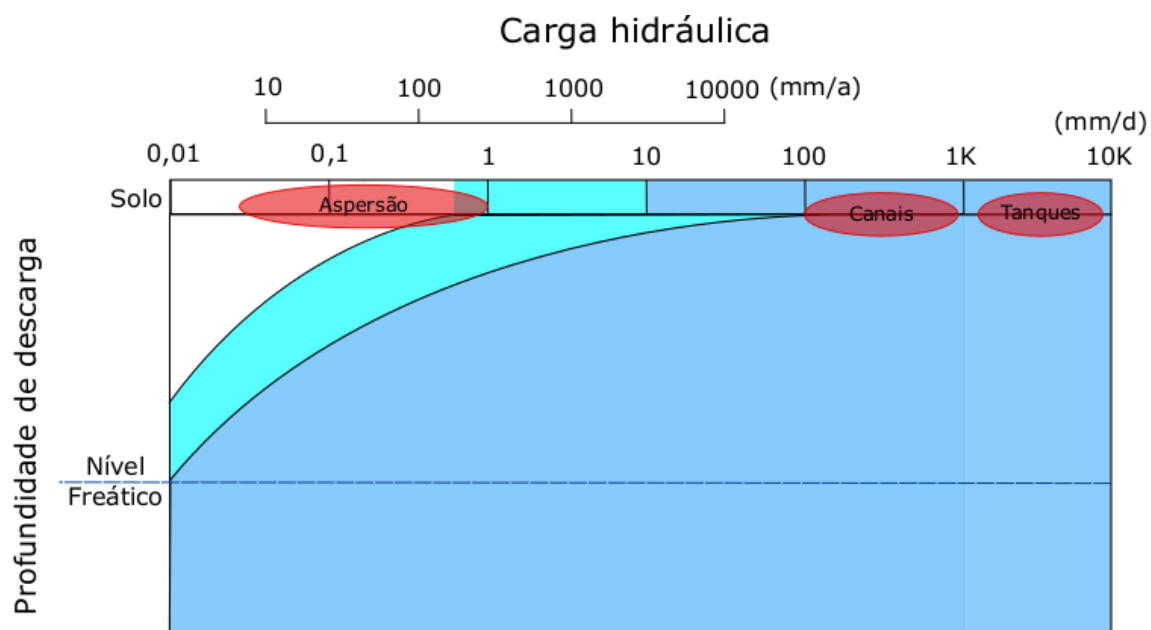


Figura 8.1.5.2: Diagramas retirados de Foster *et al.* (2002) com tanques reservatórios e métodos de aplicação da vinhaça da cana-de-açúcar plotados . A) Carga hidráulica exercida pelo contaminante. É necessário notar a variação na carga hidráulica da vinhaça, que depende diretamente de seu método de aplicação. B) A retardação do contaminante, segundo a probabilidade da carga imposta atingir o subsolo e o tempo de aplicação da carga.

8.1.6. Adaptações do método e perigo da vinhaça

Adaptando-se o método POSH ao cenário real da vinhaça no Estado de São Paulo, com vistas a determinar o risco de contaminação das águas

subterrâneas, foram eliminados parâmetros definidos pelo método POSH, mas que não são determinantes para o perigo da vinhaça.

A composição química da vinhaça, apesar de possuir variações, não é determinante para o cálculo do perigo. Isso porque, como já assinalado, o principal problema decorrente da fertirrigação é o nitrato na água subterrânea oriundo do nitrogênio da vinhaça, que independente da composição química ou tipo, é alto.

Quanto à duração da carga contaminante, a vinhaça é aplicada durante um mês do ano em cada módulo em período entre abril e dezembro, de acordo com a safra da cana e a produção da usina. O clima, da mesma forma, é uniforme para a área de estudo e, por isso, não serão parâmetros que terão influência sobre o perigo da carga contaminante.

A intensidade da vinhaça pode ser definida por meio da sua dosagem, que é bem estabelecida pela norma técnica P 4.231/2015, respeitada pelas usinas analisadas e apresentada por meio do PAV à CETESB.

Assim, apesar de os fatores cruciais para definição da vinhaça segundo o método POSH serem composição, duração de aplicação, intensidade, clima e método de aplicação, destaca-se que sua dosagem e, principalmente, seu método de aplicação são os determinantes para a avaliação do perigo.

Quanto aos métodos de aplicação de vinhaça, apenas dois foram reconhecidos neste trabalho: Infiltração por canais secundários e aspersão (figura 7.1). O primeiro se trata de uma sequência de trincheiras que seguem a topografia, são localizadas próximas as usinas e recebem vinhaça de canais transportadores impermeabilizados, também chamados de canais primários; o segundo se trata da fertirrigação através de bombas aspersoras de vinhaça transportada por dutos ou caminhos.

A perturbação hidráulica oferecida pelo diferencial de potencial no canal secundário é ligeiramente maior que aquela provocada pela aspersão, visto que os canais podem atingir até mesmo 0,5 m de profundidade no topo dos morros, enquanto a aspersão se trata de uma pulverização que tende a uma distribuição muito mais homogênea de gotículas de vinhaça por toda a área do solo. A carga

hidráulica associada é muito baixa, podendo ter alguma expressividade pontualmente, onde eventualmente houver excesso de aplicação.

Foster *et. al* (2002) retratam que os contaminantes que exercem uma maior perturbação hidráulica no aquífero, representam maior ameaça. Decorrente desse pensamento, com base em uma escala de 0 a 1, atribuiu-se aos canais secundários 1,0 e aos módulos cujo método é aspersão 0,7. Uma vez que o objetivo do trabalho é determinar o risco de contaminação da vinhaça da cana-de-açúcar, torna-se possível atribuir ao método de aplicação que representa maior perigo, o valor máximo da escala e, para os demais métodos, utilizar valores relativos.

Mapa inventário de contaminantes da Usina A

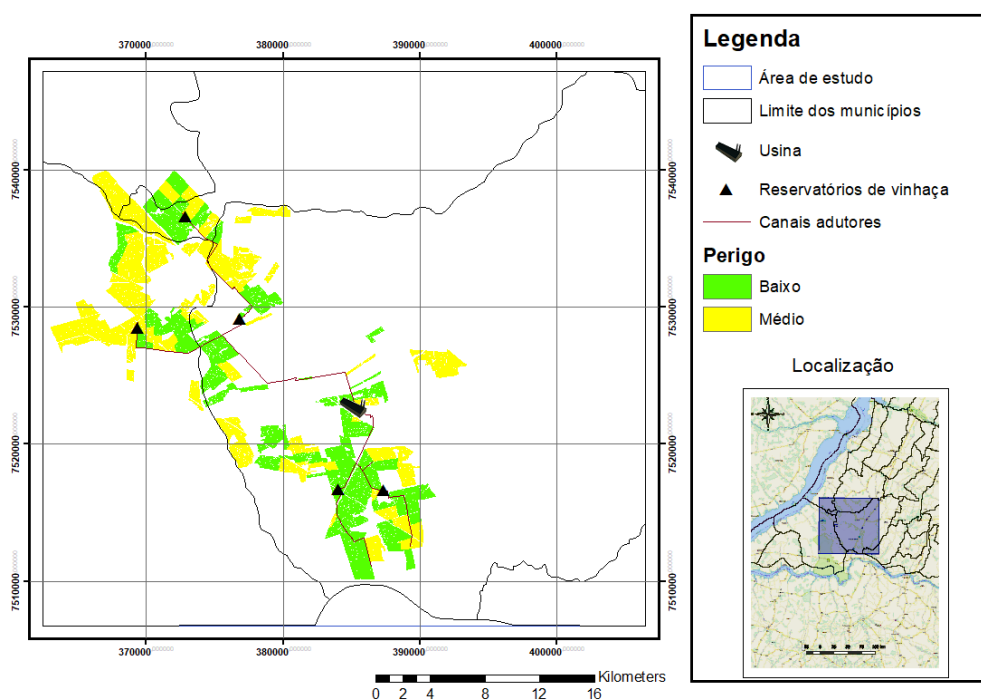


Figura 8.1.6.1: Mapa de perigo de contaminação por vinhaça da cana de açúcar da Usina A, onde o perigo aferido é o produto dos parâmetros D e M. Estão representados canais adutores e reservatórios de vinhaça.

Assim, foi escolhido aos canais secundários o valor 1,0, máximo da escala, e à aspersão, 0,7. Desse modo, o valor que representa maior perigo para os módulos que recebem aspersão de vinhaça é 0,7, quando as dosagens ultrapassam 450 m³/ha. Este valor, corresponde ao mínimo da escala para o processo de aspersão, nos casos em que a dosagem é inferior a 150 m³/ha, o que enfatiza o maior perigo oferecido pelos canais secundários. Espera-se com isso, uma escala qualitativa crescente que destaque o maior perigo dos canais

secundários, mas de forma alguma igualar o perigo oferecido pelos canais secundários a uma intensidade máxima de 150 m³/ha ao oferecido pela aspersão a uma intensidade maior que 450 m³/ha.

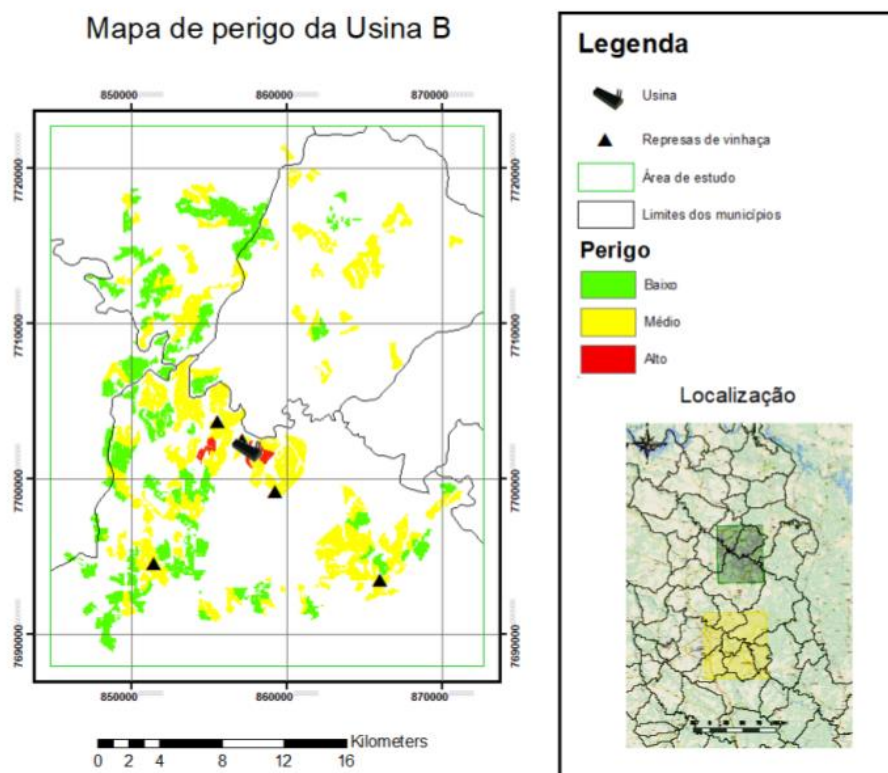


Figura 8.1.6.2: Mapa de perigo de contaminação por vinhaça da cana de açúcar da Usina B, onde o perigo aferido é o produto dos parâmetros D e M. Estão representados também reservatórios de vinhaça.

Cabe salientar que existem lacunas nos dados apresentados pelas usinas solicitados pela CETESB e que determinadas informações não são apresentadas de forma padronizada e direta, tais como os métodos de aplicação e dosagens, além dos setores e áreas onde se utilizam canais não impermeabilizados. Nesses casos, os dados deveriam ser apresentados pelas usinas à CETESB na forma de mapas georreferenciáveis e/ou arquivos vetoriais, dados esses que devem ser trabalhados a fim de complementar o inventário de cargas contaminantes.

As figuras 8.1.6.1-3, destacam os mapas de perigo de contaminação das áreas de estudo pela vinhaça da cana-de-açúcar, onde a maior parte das áreas é composta por alto perigo de contaminação, áreas essas cujo produto entre os

parâmetros D (dosagem) e M (método de aplicação) resulta em um valor entre 0,5 e 0,7. De acordo com a figura 7.1, são áreas onde o método de aplicação pode ser aspersão com dosagens maiores que 0,8, ou canais secundários

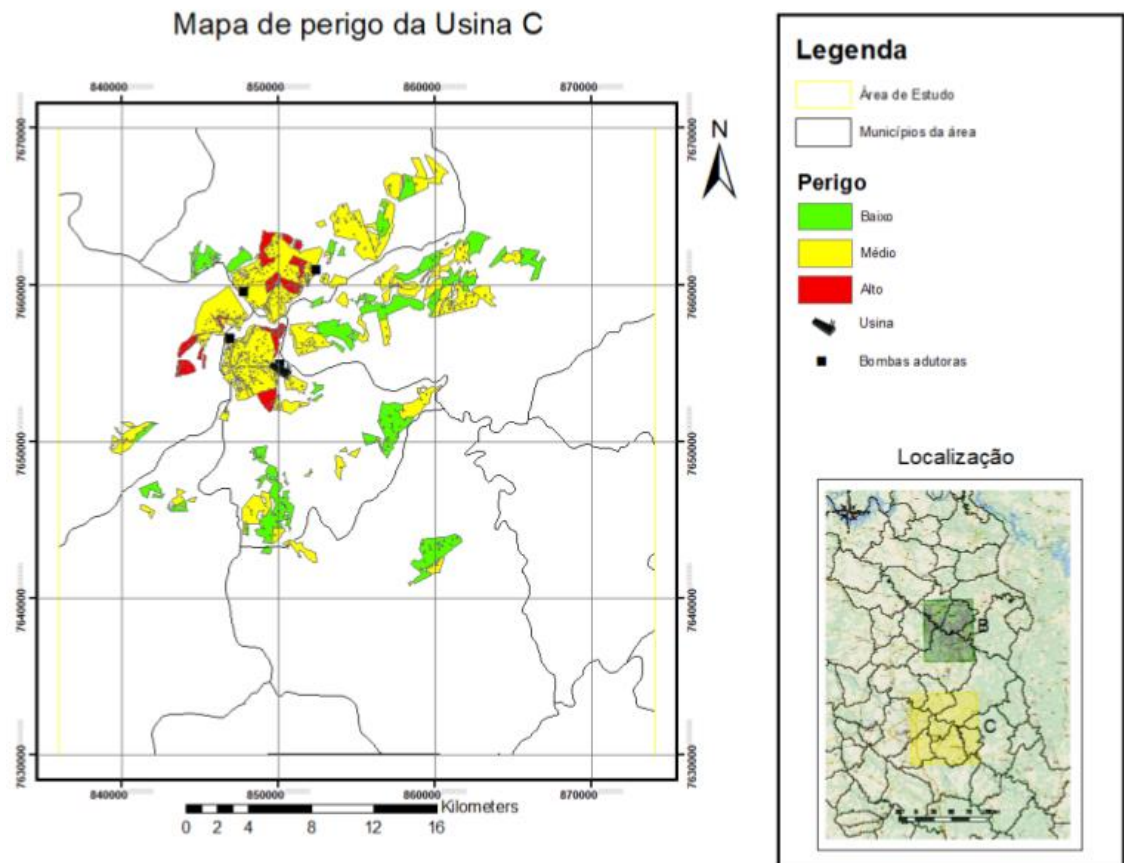


Figura 8.1.6.3: Mapa de perigo de contaminação por vinhaça da cana de açúcar da Usina B, onde o perigo aferido é o produto dos parâmetros D e M. Estão representados também bombas adutoras de vinhaça.

8.2. Vulnerabilidade de aquíferos (GOD)

8.2.1. Grau de confinamento hidráulico (G)

Ao parâmetro G foi atribuído o valor 1, máximo para todos os aquíferos segundo Foster *et. al* (2002), uma vez que são livres em toda área de trabalho. Ressalta-se que a vinhaça é um poluente potencial aplicado somente em superfície e portanto, prioriza-se neste trabalho a determinação do risco de contaminação dos aquíferos livres, que são, de um ponto de vista teórico e prático, mais ameaçados pelo manejo da vinhaça.

8.2.2. Ocorrência do substrato e distância do lençol freático (O e D)

Para produzir os mapas de vulnerabilidade, tratou-se individualmente a geologia da área de estudo pertencente às usinas e a profundidade do nível d'água. Foram produzidos mapas de ambos os parâmetros para as Usinas B e C, visto que a Usina A cedeu um mapa de vulnerabilidade confeccionado por terceiros e utilizado neste trabalho.

Os mapas geológicos estão foram gerados através dos arquivos vetoriais do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2006), que tornaram possível a espacialização dos valores para tal parâmetro segundo o método GOD. Através das características sedimentológicas, estruturas sedimentares e texturas, pôde-se classificar as unidades de forma comparativa a fim de se estimar um valor representativo utilizando a figura 7.2.

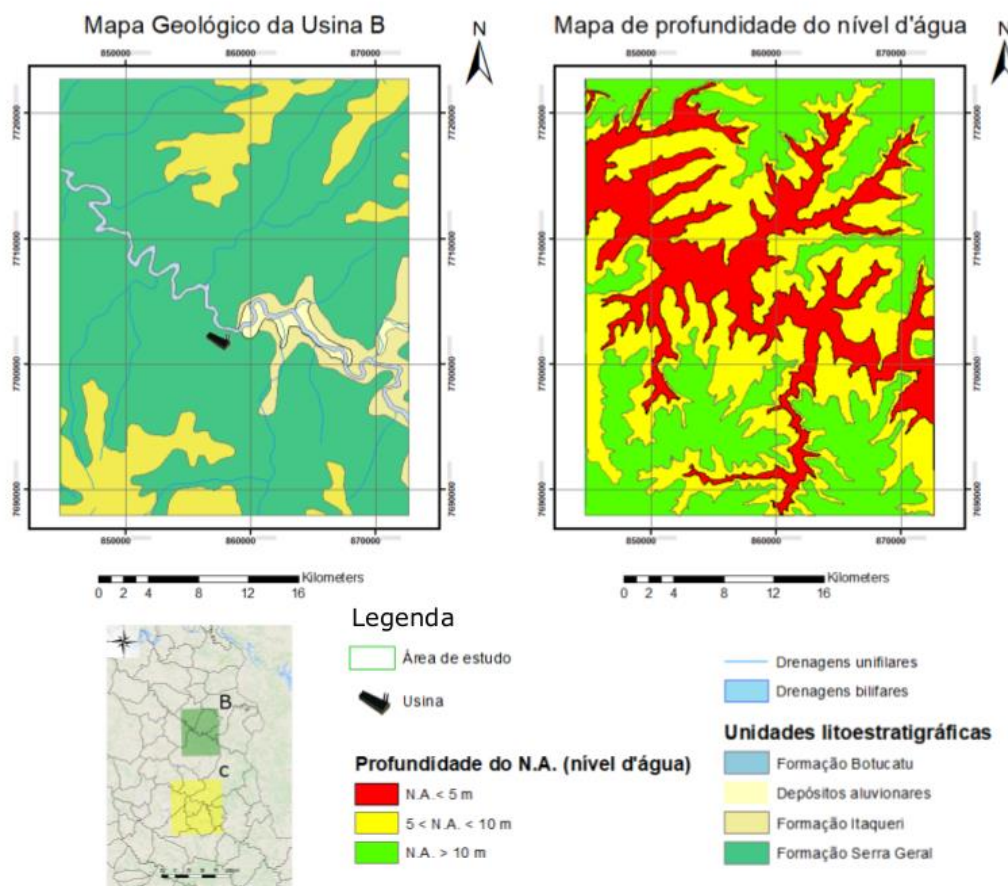


Figura 8.2.2.2: Mapas geológico e de profundidade do nível d'água da Usina B utilizados na confecção de um mapa de vulnerabilidade segundo o método GOD. Datum= Sirgas 2000 23 S.

A tabela 8.2.2 demonstra os valores que foram atribuídos para cada unidade litoestratigráfica e as figuras 8.2.2.1 e 8.2.2.2, os mapas geológicos e de profundidade do nível d'água das usinas B e C, respectivamente.

| Unidades litoestratigráficas | O |
|--|-----|
| Sedimentos quaternários inconsolidados | 0,8 |
| Formação Itaqueri | 0,7 |
| Formação Botucatu | 0,9 |
| Formação Piramboia | 0,8 |
| Formação Serra Geral | 0,7 |

Tabela 8.2.2: Tabela contendo os valores atribuídos para cada unidade litoestratigráfica presente na área de trabalho segundo o fluxograma disponível na figura 7.2.

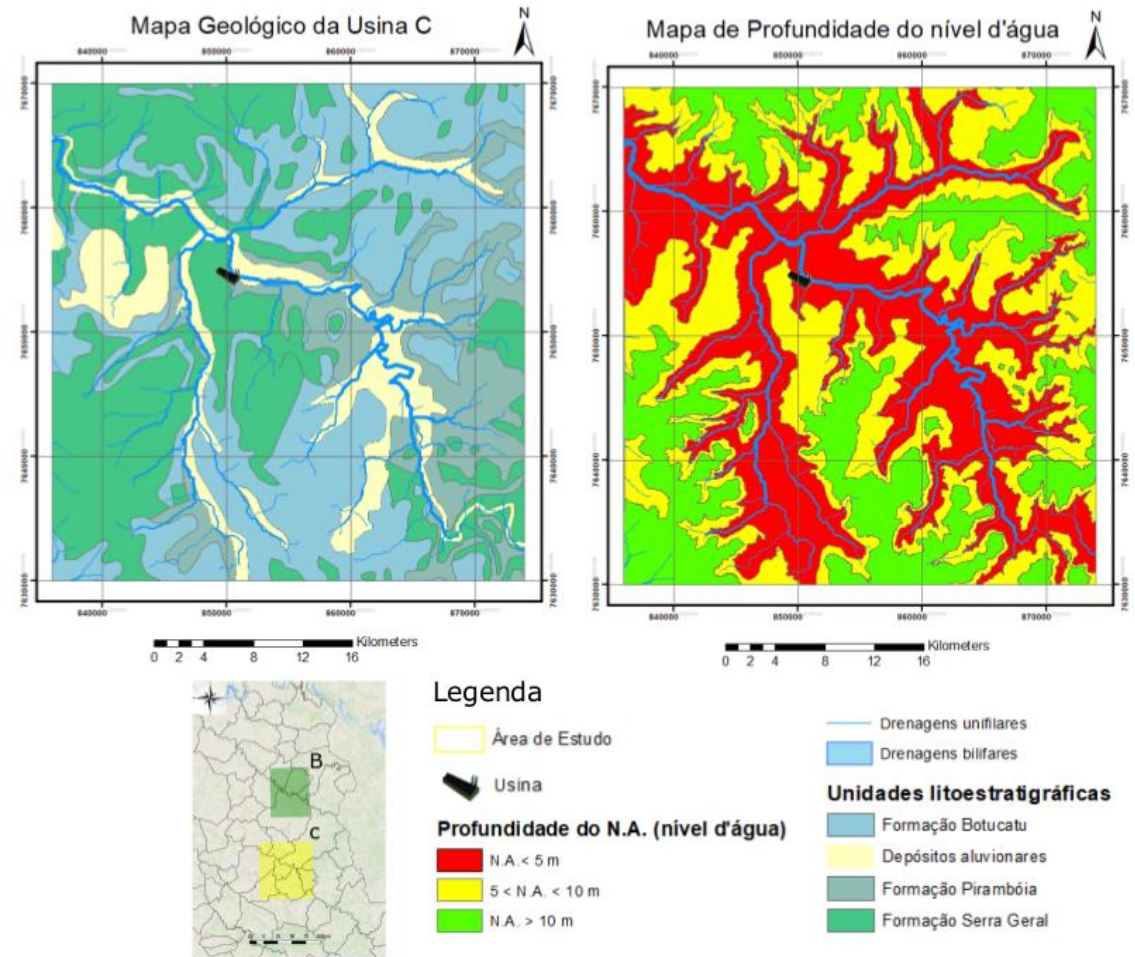


Figura 8.2.2.3: Mapas geológico e de profundidade do nível d'água da Usina C utilizados na confecção do mapa de vulnerabilidade segundo o método GOD.

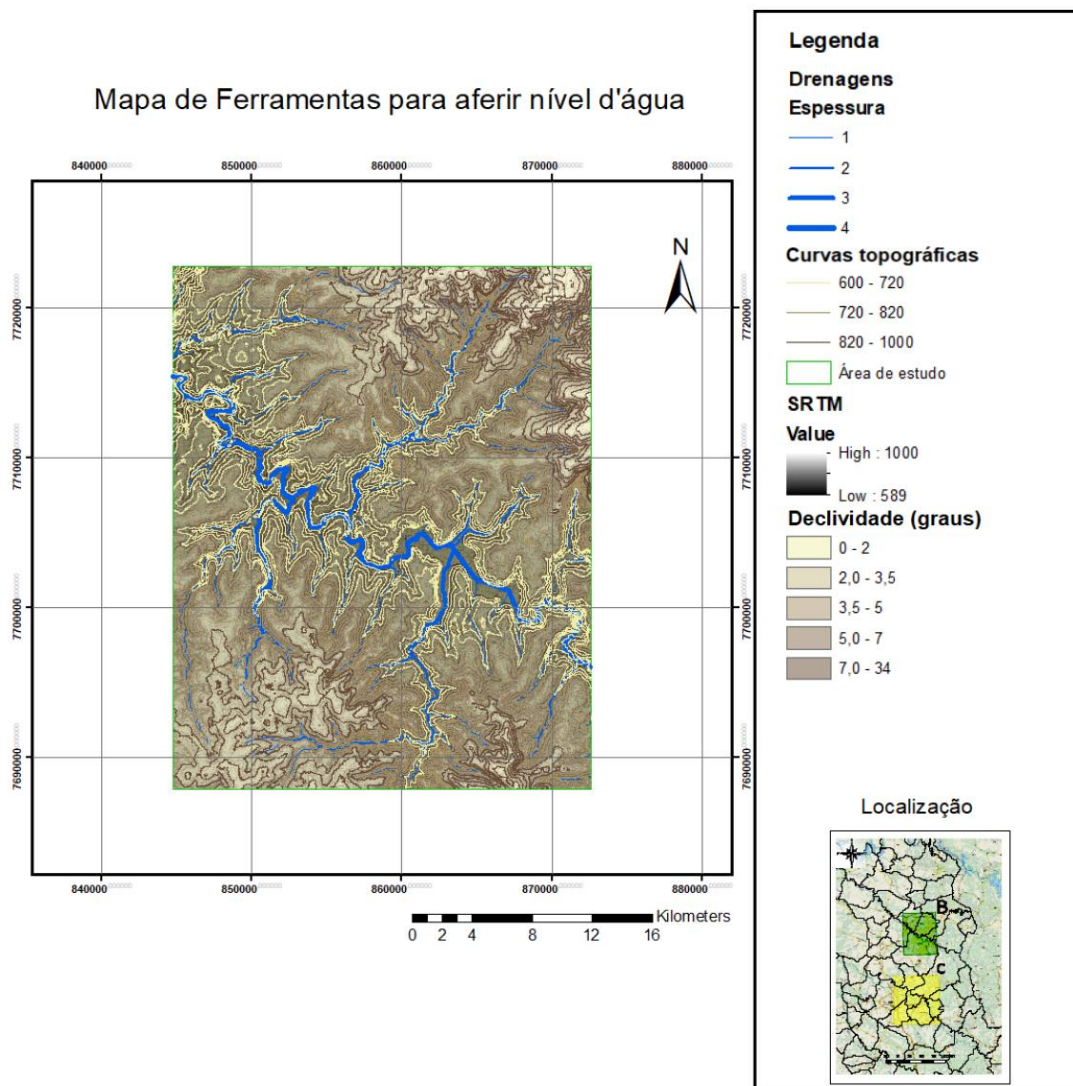


Figura 8.2.2.3: Mapa da usina B demonstrando as ferramentas utilizadas para estimativa da profundidade do nível d'água. As curvas topográficas foram geradas a partir da ferramenta *countour lines*; as drenagens, através das ferramentas da seção *spatial analyst* (*Fill, flow direction, flow accumulation, map algebra, stream order* e *stream to feature*); e a declividade, a partir do *slope*.

Para produzir o mapa de profundidade do nível d'água, utilizou-se níveis estáticos retirados das outorgas de poços do DAEE, que apesar de serem insuficientes para gerar linhas de isoprofundidade, auxiliaram o processo de estimativa no GIS. Com o auxílio das ferramentas de processamento de dados do ArcMap, foram gerados os mapas disponíveis nas figuras 8.2.2.3-4 (referentes às Usinas B e C, respectivamente), que retratam curvas de linha, drenagens e declividade extraídas a partir de imagens SRTM Arc-Global. Dessa forma, estimou-se os vales com profundidade de nível d'água inferior a 5 m, meia

encostas com nível d'água entre 5 e 10 m e as áreas de topo de morro, com profundidade maior que 10 m. As porções de baixa declividade correspondem aos vales preenchidos por drenagens quando de baixa altitude (curvas topográficas claras) e aos topos de morro, quando com altitude mais elevada (curvas topográficas escuras). As meias encostas correspondem à transição entre os dois regimes de relevo, que possuem declividade média à elevada.

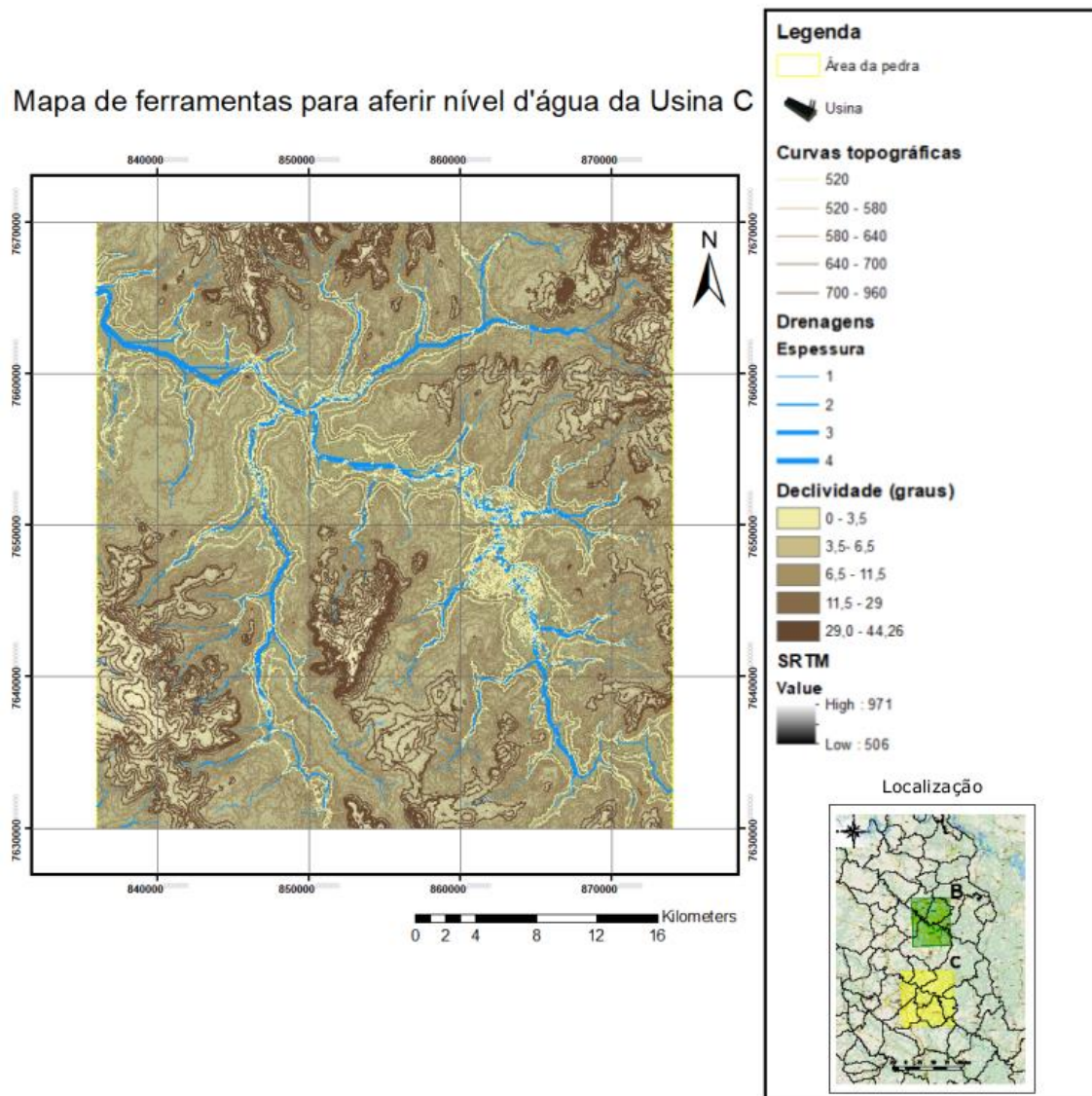


Figura 8.2.3.4: Mapa da usina C demonstrando as ferramentas utilizadas para estimativa da profundidade do nível d'água. As curvas topográficas foram geradas a partir da ferramenta *countour lines*; as drenagens, através das ferramentas da seção *spatial analyst* (*Fill*, *flow direction*, *flow accumulation*, *map algebra*, *stream order* e *stream to feature*); e a declividade, a partir do *slope*.

Foi necessário adaptar a escala apresentada pelo método GOD na tabela 7.2 à região e escala de trabalho, já que por ter baixa declividade, seria pouco precisa a estimativa de regiões com profundidade maior que 20 m. Assim, para as regiões de vale, foi atribuído 1; meia encosta, 0,9; e topo, 0,8.

8.2.3. Mapas de vulnerabilidade

Os mapas de vulnerabilidade apresentados na figura 8.2.3.2-3 foram gerados a partir da sobreposição dos dados e mapas apresentados na seção 8.2.1-2, ao passo que o mapa da figura 8.2.3.1, a partir de um mapa de vulnerabilidade produzido por terceiros para a usina A.

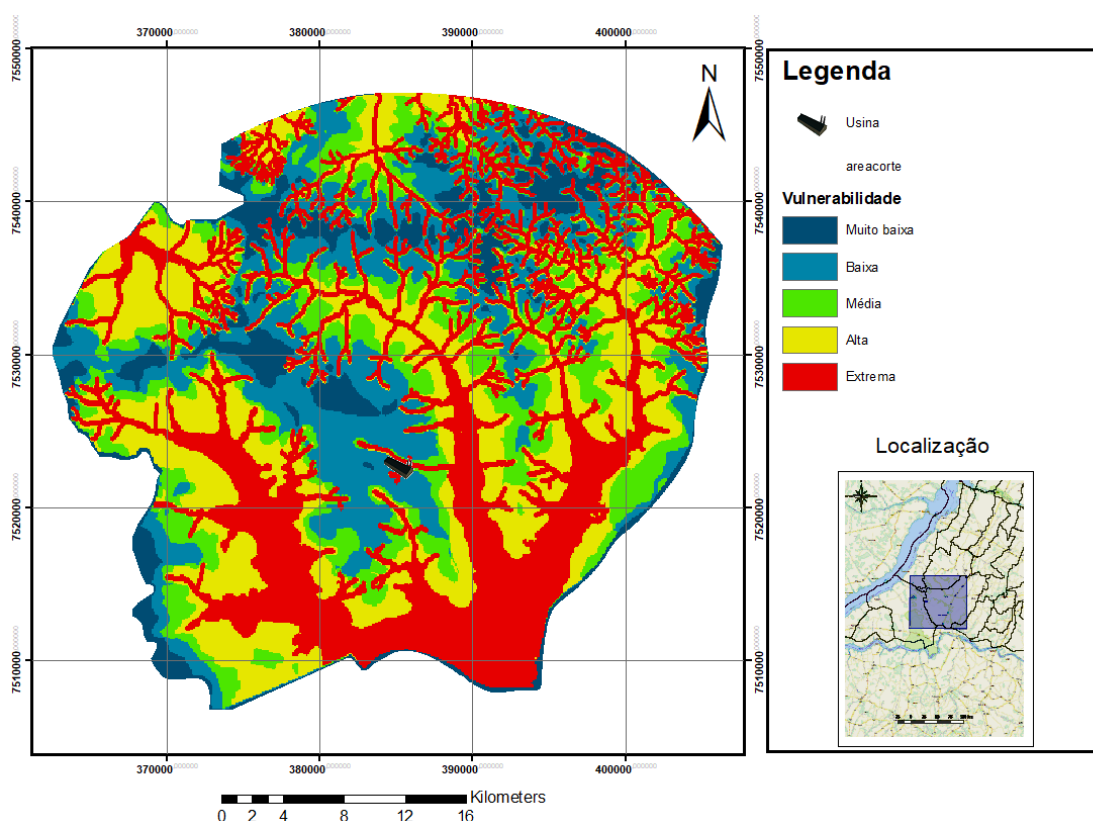


Figura 8.2.3.1: Mapa de vulnerabilidade da usina A.

As áreas de vulnerabilidade extrema estão ligadas à Formação Botucatu e/ou às proximidades dos rios, onde a profundidade do nível d'água é menor. Nota-se por meio das figuras 8.2.3.1 e 8.2.3.2 que a vulnerabilidade possui forte controle exercido pela profundidade do nível d'água, já que as usinas A e B estão

instaladas em uma área com baixa diversidade de unidades litoestratigráficas, fato esse não verificado para a Usina C.

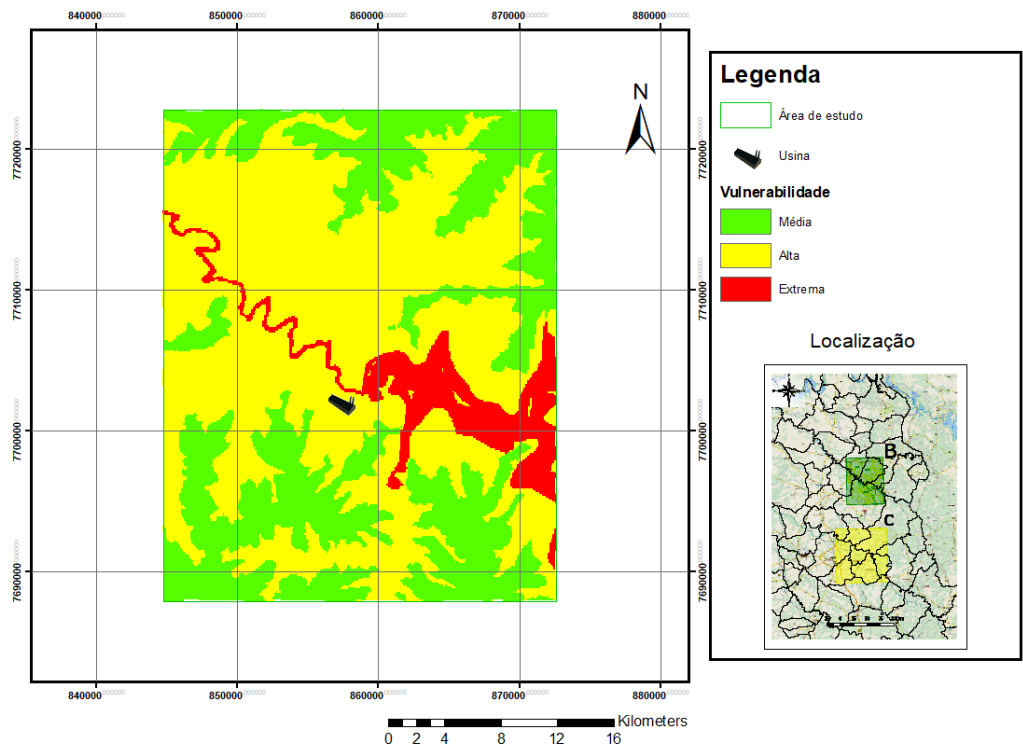


Figura 8.2.3.2: Mapa de vulnerabilidade da usina B.

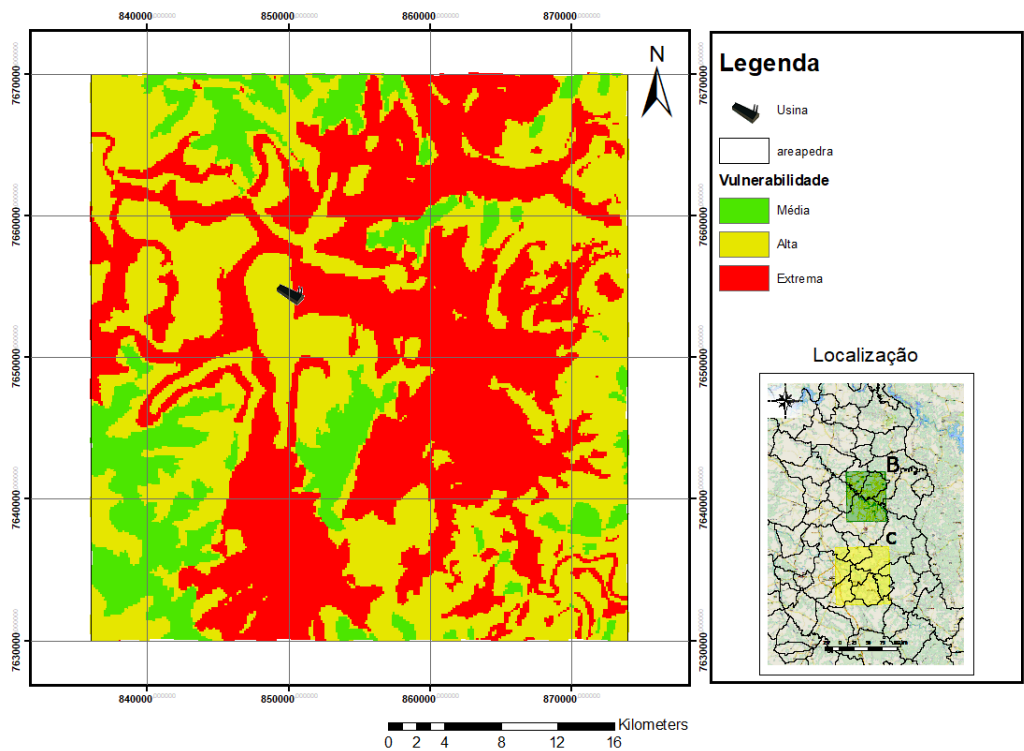


Figura 8.2.3.3: Mapa de vulnerabilidade da usina C.

Destaca-se que a maior variação de vulnerabilidade da Usina A (figura 8.2.3.1), que compreende valores tidos na escala adotada de muito baixos a extremos, se dá por conta da diferença no tipo dos arquivos que foram utilizados para gerar os mapas das Usinas B e C, em relação ao mapa da Usina A. O método utilizado para estimar a profundidade do nível d'água possibilita aferir as curvas de isoprofundidade por meio de informações de relevo e drenagem, o que inviabiliza a sua divisão em regiões de baixa declividade, tais como morro e vale.

8.3. Risco de contaminação

Os mapas de risco de contaminação apresentados na figura 8.3 são resultantes da interação entre a vinhaça, contaminante fertirrigado no Estado de São Paulo, e a vulnerabilidade dos aquíferos freáticos do interior paulista

A figura 8.3 apresenta os mapas para as usinas A, B e C (8.3 A, B e C, respectivamente). Nota-se que não há continuidade em área das informações de risco, fato esse decorrente dos objetivos deste trabalho – aferir o risco de contaminação da vinhaça da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – e do caráter intermitente ou não contínuo das lavouras da cana-de-açúcar, o que gera áreas isoladas no mapa e parte considerável da área de estudo sem valor de risco aferido.

Os canais primários, adutoras, reservatórios de vinhaça e bombas não foram utilizados para aferir o perigo de contaminação na área de estudo pois, além de não oferecerem risco mapeável para a escala de trabalho, não apresentam grande ameaça ao lençol freático, uma vez que possuem suas características ideais bem definidas pela norma P 4.231/2015. Salienta-se também, que cargas contaminantes de baixa duração (escala de dias e até horas) que não são altamente nocivas à saúde, tais como aquelas geradas por um eventual acidente com reservatórios e/ou canais primários, não apresentam alto risco de contaminação quando comparada a fontes contínuas (figura 8.1.5.2B; Foster *et. al*, 2002).

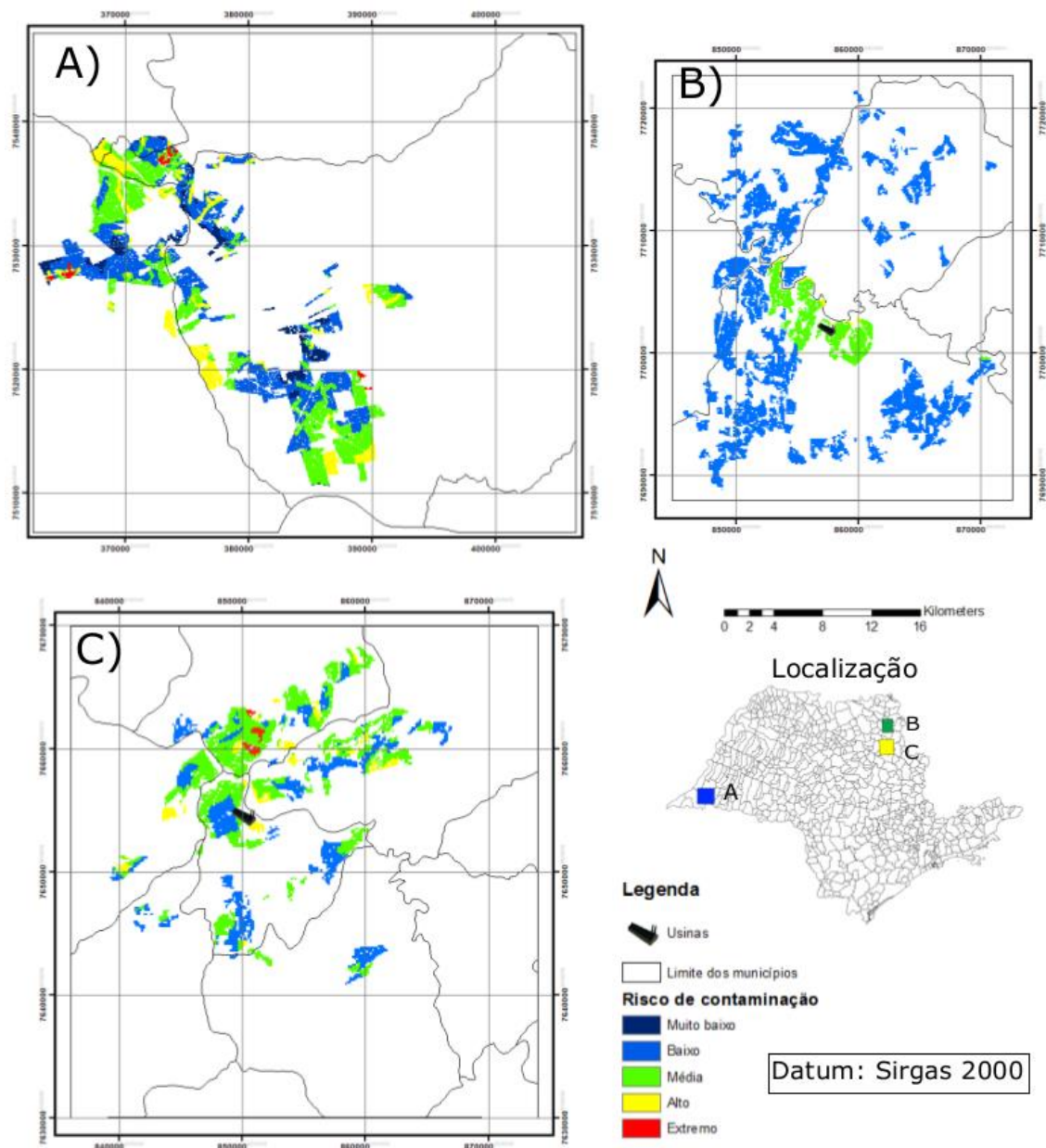


Figura 8.3: Mapas de risco de contaminação para as usinas A, B e C divididos em 5 classes diferentes: muito baixo, baixo, médio, alto e extremo. Para a produção dos mesmos foi considerada a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos livres e o perigo representado pela vinhaça da cana-de-açúcar. Nota-se que porção considerável das áreas de estudo não possuem risco aferido, fato decorrente do caráter intermitente das plantações de cana-de-açúcar e da ausência de dados de módulos pertencentes a quaisquer usinas se não as contempladas por esse estudo: A, B e C. Zona UTM: 22S, para a Usina A e 23S, para as Usinas B e C.

Os mapas confeccionados apontam que as áreas de risco de contaminação extremo são raras, enquanto as marcadas por risco alto são comuns. Destacam-se as áreas de risco médio e baixo como as mais frequentes. A correlação entre as variáveis que condicionam o risco, isto é, vulnerabilidade e perigo de contaminação, anteriormente apresentadas, permite dizer que o risco

extremo é oriundo do perigo de contaminação médio a alto em zonas de vulnerabilidade extrema e que as regiões detentoras de alto risco são marcadas por: (I) risco médio associado a uma vulnerabilidade extrema; (II) vulnerabilidade alta sujeita a perigo alto.

9. DISCUSSÃO

Com base nas análises realizadas, considera-se a existência de risco de contaminação dos aquíferos paulistas pela prática de fertirrigação da cana-de-açúcar. Tal dado é representado por conta da presença de um contaminante principal, o Nitrogênio – nitrato, de distribuição difusa, amplamente aplicado sobre o substrato litológico pertencente aos domínios da Bacia do Paraná, que possui rochas e solos de alta condutividade hidráulica.

A existência do risco pode ser melhor compreendida a partir das variáveis que foram utilizadas para sua determinação neste trabalho: a vulnerabilidade e o perigo representado pela vinhaça.

Aferiu-se a vulnerabilidade, através do método GOD em uma escala de 0 a 1, onde o grau de confinamento hidráulico (G) foi fixado em 1, mediante os aquíferos de interesse serem livres; e os dados de geologia e profundidade d'água foram analisados minuciosamente conforme os recursos disponíveis.

Como o a vulnerabilidade é o resultado do produto entre os 3 parâmetros que regem o método GOD, percebe-se que o fato de fixar a variável no valor máximo da escala contribuiu muito para que os valores de vulnerabilidade sejam elevados, fato que se comprova na prática, uma vez que o acesso de contaminantes aos aquíferos livres é realmente mais elevado.

As unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná, sobretudo as Formações Botucatu e Piramboia, apresentam alta condutividade hidráulica e são propícias para o desenvolvimento de solos arenosos de mesmo caráter. Desse modo, configuram um cenário vulnerável à incidência de contaminantes no lençol freático. Em particular, o Sistema Aquífero Guarani, notadamente um dos maiores reservatórios de água doce do planeta, encontra-se aflorando e

coberto por plantações de cana-de-açúcar na porção Norte do Estado, na sua zona de recarga.

A profundidade do nível d'água foi aferida utilizando a mesma técnica para as Usinas B e C, mas por interpolação de valores de profundidade do lençol freático para a Usina A, resultado esse que foi produzido através de uma empresa consultora terceira contratada pela usina que dispôs de um conjunto de valores suficiente para tal. Por conta da diferença de técnicas utilizadas, percebe-se uma maior variedade de valores de vulnerabilidade no mapa produzido pela consultoria, enquanto que os produzidos neste trabalho, subestimam as regiões de baixa vulnerabilidade, fato decorrente da impossibilidade de diferenciar o nível d'água em uma escala mais bem graduada com a técnica utilizada, principalmente nos morros, que possuem altitude e baixa declividade.

Ainda sobre a vulnerabilidade, destaca-se que os mapas disponíveis nas figuras 8.2.3 A e B possuem uma configuração que remete ao desenho das drenagens, ao passo que o C, apresenta-se caótico. Isso se dá diante do fato que os mapas geológicos das usinas A e B apresentam caráter uniforme quando comparado ao da usina C, sendo a rede de drenagem, nesse caso, um fator de referência na avaliação da vulnerabilidade.

Os índices utilizados para cartografar o método GOD são cinco: muito baixo, baixo, médio, alto e extremo. A vulnerabilidade extrema está relacionada aos vales; meia encostas, a depender da litologia; e à Formação Botucatu, quando nos topos de morro.

O método de aplicação e a dosagem foram definidos neste trabalho como os fatores preponderantes para a determinação do perigo, no que diz respeito à vinhaça. Dessa forma, o fluxograma disponível na figura 7.1 retrata as diretrizes do método, porém considerando apenas os métodos levantados com o banco de dados fornecido pela CETESB. Destaca-se que caso seja constatada alguma outra forma de aplicação da vinhaça, a técnica e seus impactos devem ser estudados para posicioná-la na escala de 0 a 1, juntamente com as outras técnicas aqui apresentadas.

Tal simplificação se permite, bem como se faz necessária frente ao atual problema dos órgãos gestores dos recursos hídricos subterrâneos: monitorar o impacto causado pela fertirrigação da vinhaça da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. O objetivo exclusivo permite a admissão de uma escala relativa de periculosidade do potencial contaminante estudado e a simplificação do método com a exclusão de variáveis de caráter uniforme na área de estudo, ou ainda, que são bem controladas pela CETESB.

Portanto, o resultado final do perigo é o produto dos parâmetros aqui criados e denominados como D e M (relativo à dosagem e método, respectivamente). Duas foram as situações em que se percebeu perigo médio a alto na escala adotada, que contém os índices baixo, médio e alto: aspersão em dosagens mais altas que 450 m³/ha e uso de canais secundários em dosagens maiores que 150 m³/ha. É verdade que para a aspersão, as dosagens tendem a ser maiores que as aplicadas para os canais secundários, todavia o incremento de carga hidráulica gerado pela coluna de vinhaça diluída no canal secundário, faz com que o método se apresente como o fator mais determinante e que baliza o valor final do perigo.

Atesta-se que o comportamento e influência esperada do método de aplicação são verificados nos mapas Inventário de carga contaminante, apresentados nas figuras 8.1.6.1-3, que serviram de base para o cálculo do perigo. As áreas de alto perigo cujo método de aplicação é a aspersão, possuem valor máximo 0,7, recorrente na Usina A. Esse valor é decorrente da multiplicação entre 0,7, atribuído para o método de aplicação e 1, para a dosagem acima de 450 m³/ha. As áreas de alto perigo marcadas pelos canais secundários, entretanto, possuem seu valor máximo em 0,9 para a Usina C, que faz uso de canais secundários em dosagens entre 300 e 450 m³/ha.

Finalmente, o risco de contaminação aferido neste trabalho, que retrata o produto integrado da vulnerabilidade e perigo, demonstra a presença significativa de vastas áreas de alto risco, pequena quantidade de risco extremo e a predominância de áreas de risco médio. As regiões cujo risco é extremo, são aquelas que possuem R (risco) maior que 0,7. Para a Usina A isso é recorrente quando há o uso de aspersão em dosagens maiores que 450 m³/ha próxima a

drenagens; para a Usina B, não detectado; e para a Usina C, nas regiões de canais secundários instaladas sobre a Formação Botucatu.

Salienta-se por fim, que esse método não deve ser comparado com aqueles aplicados em regiões com o clima, normas técnicas, vinhaça e seu manejo diferentes do Estado de São Paulo. Já que foram feitas simplificações para a exequibilidade do método e alguns valores foram considerados constantes. Todavia, esse método pode servir como alicerce para desenvolvimento de trabalhos de mesmo porte em localidades diferentes que podem também estarem sujeitas a uma carga contaminante diferente. Destaca-se também, que a escala de periculosidade adotada é relativa à vinhaça, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é estabelecer critérios para subsidiar redes de monitoramento prospectivas para fiscalizar a atividade canavieira e que esse método não deve ser utilizado para a avaliação de acidentes ambientais com vinhaça.

10. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Inicialmente, o objetivo do trabalho era se avaliar o “perigo” de contaminação dos aquíferos paulistas pela cultura de fertirrigação da vinhaça da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, termo esse que passou por revisão durante o relatório parcial, a fim de adequar o trabalho aos padrões internacionais utilizando o termo risco, mesmo sem utilizar o grau de exposição para a sua determinação, como sugerido pelo relator.

A ideia inicial era um trabalho que abrangesse toda a extensão do Estado dominada pela indústria da cana, o que foi modificado com a restrição da área de estudo às áreas de usinas instaladas próximo das regiões de alta vulnerabilidade, o que destinou os esforços às regiões que hipoteticamente possuem maior susceptibilidade à contaminação por vinhaça. Além disso, o estudo das propriedades da vinhaça e seu manejo foi outro fator que balizou a mudança de escala, isso porque os métodos de aplicação, tomados como relevantes para o potencial de contaminação neste trabalho, não puderam ser

visualizados na escala inicialmente pretendida, sendo assim necessário o aumento de escala para as informações de aplicação.

A mudança de escala do trabalho possibilitaria, dentre as 26 usinas do banco de dados, além de tudo, a exclusão de usinas que não disponibilizaram os arquivos necessários para a aplicação do método e a seleção de um número razoável de usinas para se trabalhar em maior escala. Entretanto, esse aumento gerou problemas com a espacialização dos dados, visto que somente a usina denominada aqui como B, propiciou quase todas as informações necessárias para aplicação do método.

Destaca-se como maior dificuldade encontrada durante a realização dessa pesquisa a ausência de dados, sobretudo os necessários para a organização de um inventário de cargas contaminantes, sugerido como ideal em Foster & Hirata (1988). Apesar disso, fizeram-se ausentes também dados de monitoramento do nível da água, visto que os arquivos do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas) não foram suficientes para contemplar a necessidade deste trabalho. Os arquivos vetoriais na maioria dos casos foram disponibilizados pelas usinas sem o .dbf, necessário para o funcionamento do .shp. Idealmente, eram pretendidos por este trabalho, os seguintes arquivos, ausentes na maioria das situações:

- Shapefile dos módulos das usinas, diferenciados pelo seu método de aplicação, ou mapa em .pdf com grid para ser georreferenciado;
- Mapa geológico/hidrogeológico disponível no formato shapefile das unidades litoestratigráficas, ou mapa em .pdf com grid para ser georreferenciado;
- Informações de monitoramento da qualidade d'água e do monitoramento do nível freático, visto que é exigido pela norma técnica P 4.231 que a vinhaça seja aplicada somente onde a profundidade do nível é maior que 1,5 m. Esse nível d'água deve ser utilizado na determinação do parâmetro D.

- Tal ausência inviabilizou o estudo de mais usinas e dificultou os avanços com a usina B, visto que nenhuma das 26 usinas disponibilizou um monitoramento do nível da água, mas somente de sua qualidade.

11. CONCLUSÕES

A determinação do risco de contaminação é extremamente importante para a preservação da qualidade dos reservatórios hídricos subterrâneos. Sua aplicação pode auxiliar órgãos gestores e autoridades competentes na tomada de decisões e estratégias de áreas potencialmente contaminadas na economia de recursos e tempo, direcionamento de esforços e, sobretudo na tomada de decisões.

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram que a vinhaça é um contaminante potencial no Estado de São Paulo. Embora sejam pouco presentes as regiões de vulnerabilidade extrema nas áreas de estudo, sabe-se que as lavouras de cana-de-açúcar possuem forte presença na Bacia Sedimentar do Paraná (Rudorff *et. al*, 2010) e que por isso, essas áreas se tornam muito mais representativas em número.

A determinação do risco de contaminação pode ser compreendida, além de tudo, como uma estratégia para a aquisição de dados e detalhamento do processo que se apresenta como potencial contaminante. Parte das dificuldades encontradas neste trabalho se deram por inconsistência e/ou ausência de informações, o que deve ser tratado com relevância, visto a importância do risco, dos dados para seu cálculo e da necessidade cada vez maior dos recursos naturais e de sua proteção.

Para efeitos deste trabalho e da metodologia de prevenção à contaminação dos aquíferos potencialmente impactados pela prática de fertirrigação com a vinhaça, faz-se necessária a presença, além de informações geológicas e hidrogeológicas, de um inventário de cargas contaminantes que contenha, minimamente, o mapeamento dos módulos de aplicação no que diz respeito à carga contaminante e aos métodos de aplicação, que se destacam por dois: aspersão e infiltração por canais secundários.

As fontes de contaminação pontuais, tais como, vazamentos em reservatórios de vinhaça e/ou canais primários não foram abordadas por este trabalho, já que cargas contaminantes de baixa duração não apresentam o mesmo perigo que cargas perenes ou de longa duração. Notadamente, tal argumento é verossímil partindo do pressuposto que as usinas obedecem às normas de aplicação estabelecidas pela norma técnica P 4.231/2015, que estabelece procedimentos seguros para a construção dos mesmos.

Finalmente, a respeito da parte técnica deste trabalho, nota-se que o que condicionou as zonas de alto e extremo risco foi a presença de canais secundários, altas dosagens próximas a drenagens (independente de método) e qualquer tipo de atividade canavieira instalada sobre as Formações Botucatu e Piramboia ou depósitos aluvionares quaternários, informações essas que podem servir como guia para análise e interpretação rápida de informações.

A eficácia do método e escala aqui desenvolvidos poderá ser testada posteriormente à aquisição de dados de uma rede de monitoramento de água subterrânea identificando, através de análises químicas de água, se as regiões com maior risco de contaminação sofrem mais que as de baixo risco.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A. N. (1954). A geomorfologia do Estado de São Paulo. Aspectos geográficos da terra bandeirantes.
- Albinet, M., & Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM, 2ème série*, 3(4), 13-22.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., & Bennett, T. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America.
- Askarimarnani, S., & Willgoose, G. (2014). Using the DRASTIC model for determination of groundwater vulnerability in shallow aquifer in broke, NSW, Australia. In *Hydrology and Water Resources Symposium 2014* (p. 174). Engineers Australia.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A., Hiyama, T., & Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1), 127-140.
- Chen, S. K., Jang, C. S., & Peng, Y. H. (2013). Developing a probability-based model of aquifer vulnerability in an agricultural region. *Journal of hydrology*, 486, 494-504.
- Coimbra, A. M., Fernandes, L. A., & Hachiro, J. (1992). Sismitos do Grupo Caiuá (Bacia Bauru, Ks) no Pontal do Paranapanema (SP). SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, 271-275.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2015). Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Decisão de Diretoria Nº 045/2015/C, Norma Técnica P 4.231/2015, 3º edição. São Paulo.

Cunha, R. D. A., da Costa, A. C. S., Maset Filho, B., & Casarini, D. C. P. (1987). Effects of Irrigation with Vinasse and the Dynamics of its Constituents in the Soil: I– Physical and Chemical Aspects. *Water Science and Technology*, 19(8), 155-165.

Barbalho, M. G. D. S., & De-Campos, A. B. (2010). Vulnerabilidade natural dos solos e águas do estado de Goiás à contaminação por vinhaça utilizada na fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar.

Da Silva, M. A., Griebeler, N. P., & Borges, L. C. (2007). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(1), 108-114.

Da Silva, A. P., Bono, J. A., & Pereira, F. A. R. (2014). Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, 18(1), 38-43.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília. São Paulo: DAEE, 1979b. v.1 e 2.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. INSTITUTO GEOLÓGICO– IG. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM (2005). *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. G. Rocha (coord.). São Paulo, 119 p., mapa.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. 2013. Águas subterrâneas no Estado de São Paulo, Diretrizes de Utilização e Proteção. Convênio DAEE/UNESP.

Faroni, C. E., & Trivelin, P. C. O. (2006). Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(6), 1007-1013.

Foster, S. S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, 38, 69-86.

Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. (1988) Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Technical Report, Lima, Peru.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). Banco Mundial. Washington D.C.: Mundi-Prensa Libros, S.A.

Foster, S., Hirata, R., & Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?. *Hydrogeology Journal*, 21(7), 1389.

França, A. B., & Potter, P. E. (1988). Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, 2(2/4), 147-191.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. In *Groundwater*. Prentice-Hall.

Freire, W. J. (2000). CORTEZ, LAB Vinhaça de cana-de-açúcar. Guaíba: Agropecuária, 203p.

Guiguer, N., & Kohnke, M. W. (2002). Métodos para Determinação da Vulnerabilidade de Aquíferos. *Águas Subterrâneas*, (1).

Gloeden, E., Cunha, R. C. A., Fraccaroli, M. J. B., & Cleary, R. W. (1991). The behaviour of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. *Water Science and Technology*, 24(11), 147-157.

Gloeden, E. (1994). Monitoramento da qualidade da água das zonas não saturada e saturada em área de fertirrigação com vinhaça (Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo).

IAC (Instituto Agrônomo), Solos do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>. Acesso em: 15/03/2017.

ISO 31.000 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Gestão de Riscos: NBR/ISO 31000, 2009: Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Junqueira, C. D. Á. R., Junior, V. E. M., Lossardo, L. F., da Cunha Felicio, B., Junior, O. M., Foschini, R. C., ... & Lorandi, R. (2009). Identificação do potencial de contaminação de aquíferos livres por vinhaça na bacia do Ribeirão do Pântano, Descalvado (SP), Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(3), 507-518.

Kazakis, N., & Voudouris, K. S. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 13-25.

Kendall, C., & Aravena, R. (2000). Nitrate isotopes in groundwater systems. In *Environmental tracers in subsurface hydrology* (pp. 261-297). Springer US.

LeGrand, H. E. (1964). System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites. *Journal (American Water Works Association)*, 56(8), 959-974.

Ludovice, M. T. F. (1997). Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático.

Lyra, M. R. C. C., Rolim, M. M., & Silva, J. D. (2003). Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(3), 525-532.

Madi, M., Meddi, M., Boutoutaou, D., & Pulido-Bosch, A. (2016). Assessment of aquifer vulnerability using a geophysical approach in hyper-arid zones. A case study (In Salah region, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 9(6), 460.

Madejón, E., López, R., Murillo, J. M., & Cabrera, F. (2001). Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). *Agriculture, ecosystems & environment*, 84(1), 55-65.

Milani, E. J. (2004). Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 265-279.

Milani, E. J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental* (Tese de doutoramento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.).

Milani, E. J., França, A. B., & Schneider, R. L. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, 8(1), 69-82.

Nobre, R. C. M., Rotunno Filho, O. C., Mansur, W. J., Nobre, M. M. M., & Cosenza, C. A. N. (2007). Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94(3), 277-292.

Paralta, E., Oliveira, M. M., Batista, S., Francés, A., Ribeiro, L. F., & Cerejeira, M. J. (2001). Aplicação de SIG na avaliação da vulnerabilidade aquífera e cartografia da contaminação agrícola por pesticidas e nitratos na região do Ribatejo. *Seminário sobre a Hidroinformática em Portugal, LNEC, 15-16 Nov. 2001.*

RICCOMINI, C. Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do Estado de São Paulo. São Paulo: Revista IG, v. 18, n. 1/2, p. 41-48, 1997.

Rocha, G., Fernandes, A. J., Mancuso, M. A., Campos, J. E., Takahashi, A. T., Oda, G. H., Perrotta, M.M., Salvador, E.D., Albuquerque, J.L., Filho, A.G., Azevedo, S. G., Denser, M., Pizzatto, & L.G., Paulon, N. (2006). Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Águas Subterrâneas.

Rolim, G. D. S., Camargo, M. B. P. D., Lania, D. G., & Moraes, J. F. L. D. (2007). Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia - Revista de ciências agronômicas. Campinas* v.66, n.4, p.711-720.

Ross, J. L. S., & Moroz, I. C. (2011). Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia, 10*, 41-58.

Rossetto, A. J. (1987). Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 2*, 435-504.

Rudorff, B.F.T.; Aguiar, D.A.; Silva, W.F.; Sugawara, L.M.; Adami, M.; Moreira, M.A. *Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data.* Remote Sens. 2010, 2, 1057-1076.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais do... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 1, p. 41-65.

Serviço Geológico do Brasil – CPRM. (2006). Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo. Mapas Geológicos Estaduais na Escala 1:750.000. *Ministério de Minas e Energia*.

SILVA, G. D. A., & Orlando Filho, J. (1981). *Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça no Brasil*. PLANALSUCAR.

SOARES, P. C. Arenito Botucatu e Pirambóia no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, Belém, Resumos. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972, p. 250-251.

Spalding, R. F., & Exner, M. E. (1993). Occurrence of nitrate in groundwater—a review. *Journal of environmental quality*, 22(3), 392-402.

Stempvoort, D. V., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1), 25-37.

Tang, C., Azuma, K., Iwami, Y., Ohji, B., & Sakura, Y. (2004). Nitrate behaviour in the groundwater of a headwater wetland, Chiba, Japan. *Hydrological processes*, 18(16), 3159-3168.

UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). Disponível em: <http://www.unisdr.org/who-we-are/what-is-drr>. Acessado em 15 de julho de 2017

Varnier, C., & Hirata, R. (2000). Contaminação da água subterrânea por nitrato no parque ecologico do Tietê-São Paulo, Brasil. *Águas Subterrâneas*.

Victoria, R. L., Piccolo, M. C., Vargas, A. A. T., Cardoso, E. J. B. N., Tsai, S. M., & Neves, M. C. P. (1992). O ciclo do nitrogênio. Microbiologia do solo. Campinas: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 105-119.

Wang, J., He, J., & Chen, H. (2012). Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*, 432, 216-226.