



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica

THIAGO AUGUSTO PEREIRA

**ANÁLISE DAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS
NA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO**

UBERABA, MG

2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica

THIAGO AUGUSTO PEREIRA

ANÁLISE DAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS NA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO

Dissertação de Mestrado apresentada à Banca Examinadora do Programa de Mestrado em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva.

UBERABA, MG

2016

**atologação na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

P496a Pereira, Thiago Augusto
Análise das implicações ambientais na extração do gás de xisto /
Thiago Augusto Pereira. -- 2016.
67 f. : il., fig., graf.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2016
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva

1. Combustíveis. 2. Xistos. 3. Poços de petróleo - Fraturamento
hidráulico. 4. Avaliação de riscos ambientais. 5. Recursos naturais.
I. Silva, Marcelo Bacci da. II. Universidade Federal do Triângulo Mi-
neiro. III. Título.

CDU 662.7



ATA DE DEFESA

Aluno(a): 20146233

Ata de defesa pública de Dissertação de Mestrado do(a) Senhor(a) **Thiago Augusto Pereira** no Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

Aos 30 dias do mês de junho de 2016, na Sala de aula do PMPIT, realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) **Thiago Augusto Pereira**, apresentada para a obtenção do título de Mestre intitulado: “*Implicações Ambientais na Exploração de Gás de Xisto*”

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

PARTICIPANTE	FUNÇÃO	IES DE ORIGEM	RESULTADO
Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva	Presidente	UFTM	APROVADO
Profa. Dra. Mônica Hitomi Okura	Titular	UFTM	APROVADO
Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer	Titular	UNIUBE	APROVADO

Resultado Final:



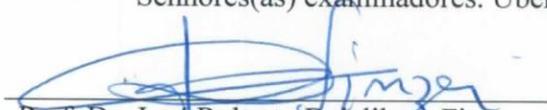
Aprovado(a)

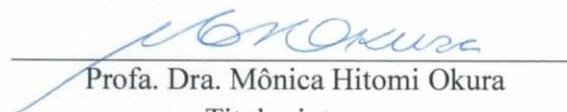
O discente terá até sessenta (60) dias após a data da defesa para entregar o Trabalho de Conclusão corrigida com aprovação do professor orientador



Reprovado(a)

Eu, Enio Umberto Alves dos Santos, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as) examinadores. Uberaba, aos 30 dias do mês de junho de 2016.


Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer
Titular externo


Profa. Dra. Mônica Hitomi Okura
Titular interno


Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva
Orientador


Enio Umberto Alves dos Santos
Secretário

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e a minha família que sempre torceram por mim e me deram força mesmo estando distante.

À minha noiva Natália pela compreensão, carinho, amor e também pelo apoio prestado na confecção deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Marcelo Bacci da Silva, pela paciência e compreensão em todas as etapas de confecção deste trabalho.

Aos meus amigos que, assim como minha família, sempre torceram pelo meu sucesso.

RESUMO

Introdução: As fontes de energia no mundo estão cada vez mais escassas especialmente em relação ao petróleo, principal matriz energética mundial. Uma fonte de energia alternativa seria o gás de xisto, conhecido como gás não convencional. No entanto, seu processo de exploração, assim como de diversas outras fontes, pode trazer danos ao meio ambiente. **Objetivo:** Este trabalho buscou analisar as implicações ambientais decorrentes da exploração do gás de xisto, sobretudo através do processo de fraturamento hidráulico. **Metodologia:** Este estudo caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura. Consultou-se as bases de dados *Science Direct*, *GeoScienceWorld* e *SciTech* do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Empregou-se os descritores *shale gas*, *environmental impact of shale gas exploitation* e *fracking*. **Resultados e discussão:** Como resultados foram encontrados um total de 3965 artigos, aplicados os critérios de exclusão, 33 foram selecionados para o presente estudo. Os principais motivos para rejeição foram a não disponibilidade na íntegra do artigo, discordância ao tema, outros tipos de publicação que não artigos científicos e duplicação de resultados. Observou-se que os principais problemas estão relacionados à poluição das águas, do solo e do ar, havendo também considerações quanto à influência em abalos sísmicos e contribuição para a poluição sonora. Os aspectos políticos, sociais e econômicos também foram abordados, uma vez que se relacionam diretamente com as questões ambientais. Muitos dos estudos são inconclusivos ou não estabelecem correlação direta entre a exploração do gás de xisto e os diferentes tipos de impactos ambientais. O Brasil carece de instrumentos legais contundentes para melhor regular a exploração no território. **Considerações finais:** Estudos de ordem técnica devem ser amplamente efetuados para a opção dessa forma de energia, já que o país possui grande carência desse tipo de material.

Palavras chave: gás de xisto, fraturamento hidráulico, implicações ambientais, recursos hídricos.

ABSTRACT

Introduction: The power supplies in the world are increasingly scarce especially on oil, the world energy matrix. An alternative energy source would be shale gas, known as unconventional gas. However, the process of exploration, as well as many other sources, can bring harm to the environment. **Objective:** This study aimed to analyze the environmental implications of the exploitation of shale gas, mainly through the hydraulic fracturing process. **Methodology:** This study is characterized as an integrative literature review. databases was consulted Science Direct, GeoScienceWorld and SciTech the US Department of Energy. It employed the descriptors shale gas, environmental impact of shale gas exploitation and fracking. **Results and discussion:** The results found a total of 3965 articles, and these have been eliminated 3932 (99.2%) as the exclusion criteria being used so, 33 (0.8%) articles. The main reasons for rejection were not available in the full article, disagreement to the subject, other types of publication not scientific articles and results of duplication. It was observed that the main problems related to the pollution of water, soil and air, and there are considerations about the influence on earthquakes and contributing to noise pollution. Political, social and economic aspects were also discussed, as are directly related to environmental issues. Many of the studies are inconclusive or do not establish a direct correlation between the exploitation of shale gas and the different types of environmental impacts. Brazil lacks compelling legal instruments to better regulate the exploitation in the territory. **Final considerations:** technical studies should be widely made to the option of this form of energy, since the country has great need of this type of material.

Keywords: shale gas, hydraulic fracturing, environmental impact, water resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Reservas de gás de xisto no Brasil e no mundo.	18
Figura 2 Projeção da capacidade de oferta da Petrobrás de 2013 a 2030.	19
Figura 3 Demanda Consuntiva total (estimada e consumida) no Brasil (m ³ /s).....	21
Figura 4 Delineamento das águas de gestão do Sistema Aquífero Guarani.....	22
Figura 5 Técnica de fraturamento hidráulico.	24
Figura 6 Comportamento das pressões, durante a operação de fraturamento.	25
Figura 7 Risco Associado à fraturas antigas (a), falhas no cimento (b) e perfurações verticais extensas(c).....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Resultado da pesquisa por base de dados.....	42
Gráfico 2 Seleção de artigos por descritores utilizados.....	42
Gráfico 3 Artigos selecionados por ano de publicação.....	43
Gráfico 4 Artigos utilizados x artigos rejeitados.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Principais aditivos e componentes de um fluido típico de fraturamento. ...	29
Quadro 2 Filtros e conectores utilizados nas bases de dados para seleção dos artigos.	35
Quadro 3 Resultados da busca integrada nas bases de dados Science Direct, Scitech Connect e GeoScienceWorld.	37
Quadro 4 Artigos levantados com o descritor shale gas sobre impactos ambientais relacionados à extração do gás de Xisto.....	39
Quadro 5 Artigos levantados com o descritor fracking sobre impactos ambientais relacionados à extração do gás de Xisto.....	41
Quadro 6 Artigos selecionados com combinação dos descritores <i>Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation AND fracking</i> sobre impactos ambientais relacionados à extração do gás de Xisto.	41
Quadro 7 Índices máximos e mínimos dos componentes de um fluido hipotético de fraturamento.....	52
Quadro 8 Anexo II da Resolução 420/09 do CONAMA, que apresenta os limites permitidos para contaminantes em solos e água.	65

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EIA	<i>Ennergy Information Administration</i>
EUA	Estados Unidos da América
CO ₂	Gás Carbônico
GNL	Gás Natural Liquefeito
VRQ	Valor de Referência de Qualidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA	15
3 OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 XISTO.....	17
4.1.1 Composição do gás não convencional.....	19
4.2 AQUÍFERO GUARANI	20
4.3 FRATURAMENTO HIDRÁULICO	23
4.3.1 A mecânica do fraturamento	25
4.4 FLUIDO DE FRATURAMENTO HIDRÁULICO	25
4.4.1 Agentes de gelificação e formação de espumas	26
4.4.2 Redutores de atrito	27
4.4.3 Compostos reticulados (“ <i>Crosslinkers</i> ”).....	27
4.4.4 Inibidor de quebra (“ <i>Breakers</i> ”)	27
4.4.5 Ajustadores de pH.....	27
4.4.6 Biocidas.....	28
4.4.7 Inibidores de corrosão	28
4.4.8 Inibidores de incrustação.....	28
4.4.9 Controladores de ferro.....	28
4.4.10 Estabilizadores de argila	28
4.4.11 Surfactantes	29
4.5 IMPACTOS AMBIENTAIS	30
5 METODOLOGIA.....	34
6 RESULTADOS	36

7 DISCUSSÃO	43
7.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO RELACIONADO AOS RECURSOS HÍDRICOS	45
7.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO RELACIONADOS AO AR.....	46
7.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO RELACIONADOS AO SOLO.....	48
7.4 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS	49
7.4.1 Aspectos legais envolvendo os solos	50
7.4.2 Aspectos legais envolvendo os recursos hídricos	53
7.5 PERSPECTIVA DA EXPLORAÇÃO DO GÁS DE XISTO NO BRASIL	54
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia no mundo estão cada vez mais escassas, especialmente em relação ao petróleo, principal matriz energética mundial. Um agravante a essa questão é que as maiores reservas do recurso se encontram em países com grande instabilidade política, como países do Golfo Pérsico, Rússia e Venezuela (SANTOS e MATAI, 2010). E não somente a escassez preocupa, mas também a agressão que o uso e exploração das atuais fontes podem causar ao meio ambiente, sobretudo referente ao aquecimento global e degradação dos recursos hídricos.

As principais fontes de energia hoje, petróleo e carvão, emitem considerável quantidade de gás carbônico (CO_2), um dos principais gases causadores do efeito estufa. A queima do gás natural emite metade de CO_2 em comparação às demais fontes. Nesse contexto se destaca o gás de xisto, o chamado gás natural não convencional (FORNETTI, 2013).

O gás não convencional vem sendo apontado como o grande trunfo rumo à independência energética dos Estados Unidos da América (EUA), atualmente o maior produtor mundial. Em termos de reservas, os EUA só estão atrás da China. O Brasil também possui reservas deste gás, aproximadamente 6 trilhões de m^3 , e pode se destacar como grande produtor (FORNETTI, 2013).

Diferentemente do gás natural convencional que comumente está localizado em rochas porosas, formando bolsões geralmente acima de depósitos de petróleo, o gás de xisto se encontra impregnado em formações rochosas impermeáveis. Sua extração é possível através de um processo chamado de fraturamento hidráulico (LAGE et al, 2013).

Contudo, essa nova fonte traz outros problemas, principalmente ligados à extração do gás. O processo de fraturamento hidráulico consiste basicamente na perfuração horizontal da rocha (folhelho de xisto) com injeção do fluido de fraturamento, composto majoritariamente de grande quantidade de água, juntamente com areia e outros produtos químicos. Tal procedimento pode contaminar os lençóis freáticos e/ou aquíferos, além de causar eventuais abalos sísmicos em virtude da instabilidade geofísica, causada pela perfuração (TAIOLI, 2013).

O Brasil ocupa a décima posição no *ranking* mundial de países detentores de reservas tecnicamente recuperáveis de gás não convencional. O país possui também grandes reservas de água potável e os mapeamentos iniciais apontaram as Bacias do Parnaíba, Parecis, São Francisco, Paraná e do Recôncavo com perspectivas de possuírem o recurso não convencional (LAGE et al, 2013).

A quantidade de água requerida no processo vem sendo bastante discutida ultimamente. Estima-se que o consumo de água para extração do gás de xisto pode variar de 7.800 m³ até 101.400 m³ dependendo do poço explorado, tamanho da reserva, localização, profundidade. Essa água injetada retorna à superfície e deve ser tratada para posterior utilização (CLARK; HORNER; HARTO, 2013).

O objetivo deste trabalho foi analisar as implicações ambientais da exploração do gás de xisto através do processo de fraturamento hidráulico por meio de pesquisa às literaturas existentes.

A importância deste trabalho está no fato da possibilidade do gás de xisto se tornar uma das principais matrizes energéticas da maior potência econômica mundial (EUA) e da perspectiva de outros países como o Brasil se tornarem grandes produtores. Outro fator relevante é que o atual processo de extração é relativamente novo e ainda há muitas incertezas no que diz respeito às suas implicações ambientais.

2 JUSTIFICATIVA

O homem sempre necessitou de energia em sua vida, desde a “descoberta/invenção” do fogo, o qual era utilizado principalmente para se aquecer e preparar alimentos, ele nunca mais parou e continua numa busca incessante por recursos para suprir suas ambições atuais.

Mundialmente, a obtenção de energia, advém prioritariamente de combustíveis fósseis. Contudo, os países que detém as maiores reservas, e exportam para o restante do mundo não possuem estabilidade política, o que pode acarretar alterações na demanda e problemas de ordem econômica.

A escassez de fontes de energia vem impulsionando a busca por novos e diferenciados recursos energéticos. Neste contexto emerge a possibilidade de exploração do gás de xisto, que assim como o gás natural convencional emite menos CO₂ em sua combustão em comparação à queima do petróleo e carvão.

Mais da metade da oferta de Gás Natural no Brasil é proveniente de fontes externas, através de importações da Bolívia e outros países. A exploração desse recurso impulsionaria uma inversão nesse panorama.

A utilização do gás natural não convencional está ligada principalmente aos setores industriais, mas pode ser utilizado em veículos e na operação das termelétricas, que são acionadas em situação de crise do setor energético, sobretudo na baixa produção das hidrelétricas. A energia proveniente de termelétricas é em geral mais cara do que a convencional.

Dessa forma é importante se pesquisar as implicações decorrentes do processo de exploração deste gás. O mesmo ocorre através do fraturamento hidráulico, que envolve grande quantidade de água na composição do fluido utilizado.

É necessário analisar não somente os benefícios da utilização dessa fonte de energia, mas também, se considerar os custos ambientais e sociais advindos de seu processo produtivo. Além disso, existem lacunas do conhecimento referentes a essa temática que demandam mais estudos.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é identificar as implicações ambientais decorrentes do processo de exploração do gás de xisto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma revisão integrativa da literatura a cerca da temática;
- Analisar as implicações ambientais da exploração do gás de xisto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão das implicações ambientais do processo de extração do gás de xisto, sobretudo sobre a luz da técnica de fraturamento hidráulico, é necessário aprofundar-se no estudo desta temática. A presente revisão bibliográfica especifica peculiaridades na obtenção e utilização do gás de xisto, bem como os impactos ambientais e socioeconômicos envolvidos neste processo.

4.1 XISTO

O xisto é uma formação rochosa de natureza sedimentar, com alta concentração de matéria orgânica, principalmente na forma de querogênio. Caracteriza-se por possuir partículas pouco espessas em sua composição, o que lhe confere uma baixa porosidade (COGO, 2008).

A forma mais tradicional de sua exploração consiste na mineração do xisto e posterior aquecimento, ocasionando uma pirólise e conseqüentemente a conversão do mineral em óleo e gás. A PETROBRÁS detém a tecnologia de extração e processamento do xisto, chamada de Petrosix[®]. Os principais produtos obtidos dessa exploração são os óleos combustíveis, gás combustível, gás liquefeito, nafta e enxofre (PETROBRÁS, 2015).

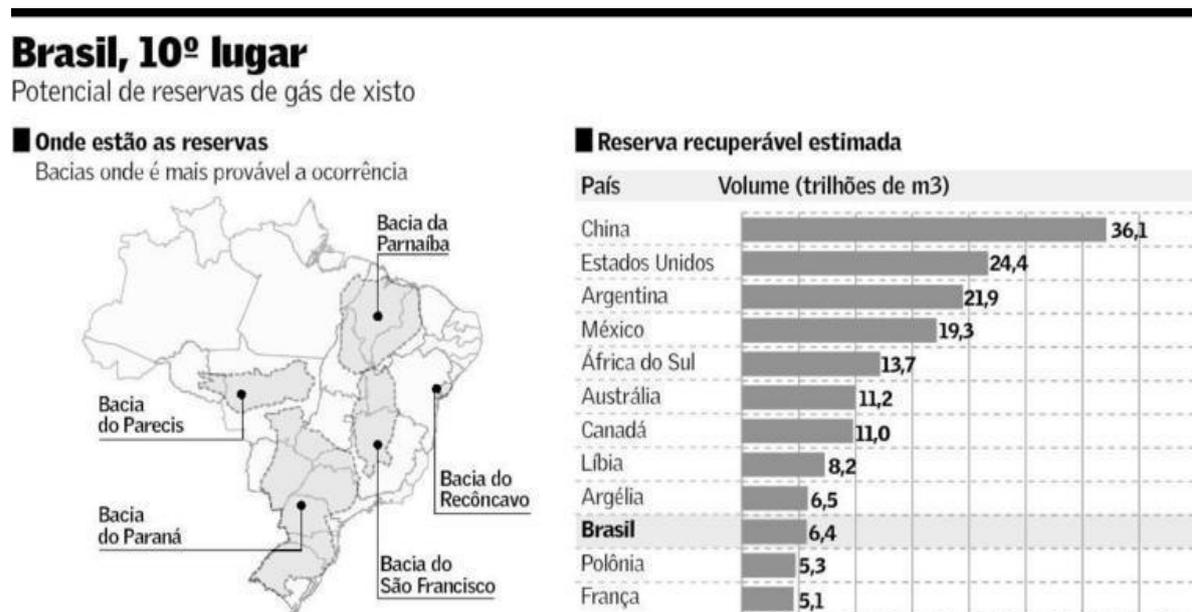
Entretanto existe outro nicho de exploração possível para o xisto, mais precisamente o gás que se encontra impregnado em suas formações. Em geral os hidrocarbonetos líquidos e gasosos se encontram em bolsões de estratos porosos e permeáveis, cobertos por rochas permeáveis. A perfuração dos poços e acesso até essas acumulações é relativamente fácil, uma vez que se encontram a poucos quilômetros da superfície. Por outro lado, esses hidrocarbonetos em estado líquido e gasoso podem estar em rochas com permeabilidade muito baixa, no caso o xisto. Logo, a sua extração demanda um processo específico. A esse hidrocarboneto gasoso impregnado na rocha de xisto deu-se o nome de gás de xisto ou gás não convencional (em virtude da especificidade de sua extração) (LECHTENBÖHMER et al, 2011).

O gás de xisto nada mais é do que o gás natural que se encontra em meio às formações rochosas de xisto. O gás natural tem ampla utilização como combustível em indústrias, termoelétricas e veículos. Pode ser utilizado também como matéria-prima para produção de fertilizantes (PETROBRÁS, 2015).

Estudos realizados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), apontam a ocorrência de possíveis reservas economicamente viáveis de exploração, principalmente para as bacias do Rio São Francisco (norte de Minas Gerais e sul da Bahia), Bacia do Paraná, Bacia do Parecis, Bacia da Parnaíba e Bacia do Recôncavo (TAIOLI, 2013).

O Brasil tem posição de destaque em relação às reservas mundiais deste recurso, ocupando a décima posição entre os países detentores das maiores reservas com 6,1 trilhões de m³ de gás potencialmente recuperável, como mostra a Figura 1 no levantamento da ANP e da *Ennergy Information Administration* (EIA).

Figura 1: Reservas de gás de xisto no Brasil e no mundo.

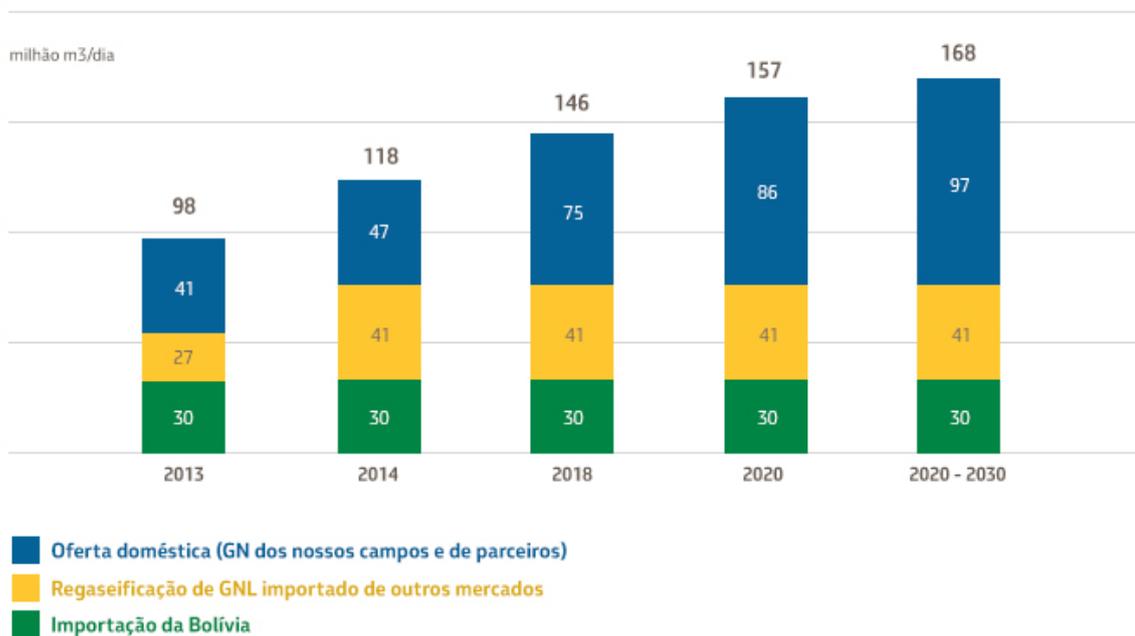


Fonte: *Ennergy Information Administration* / Agência Nacional de Petróleo, 2012

Atualmente, mais da metade da oferta de gás natural da Petrobrás é proveniente do mercado externo, seja importação do gás da Bolívia, fixada em uma taxa de 30 milhões de m³/dia, ou pela importação de Gás Natural Liquefeito (GNL) excedente de outros mercados. Esse gás é destinado aos grandes centros

consumidores, principalmente indústrias e domicílios. O Plano Estratégico da Petrobrás 2030 projeta uma produção interna superando à atual dependência do mercado externo, a partir do ano de 2018, seguindo em uma crescente da produção doméstica. Logo, o gás de xisto pode e muito contribuir para a mudança deste panorama. A meta proposta é saltar dos 47 milhões m³/dia, do ano de 2014 para 97 milhões m³/dia no decênio 2020-2030 como mostra a projeção da empresa na Figura 2 (PETROBRÁS, 2015).

Figura 2 Projeção da capacidade de oferta da Petrobrás de 2013 a 2030.



Fonte: Petrobrás, 2015

4.1.1 Composição do gás não convencional

A composição do gás não convencional ou gás de xisto varia de uma região para outra, assim como acontece com as reservas de gás convencional. Por exemplo, o gás do campo de exploração de Barnett nos EUA contém de 75 a 95% de metano o restante é uma mistura de outros hidrocarbonetos. Gases com uma maior proporção de metano são chamados de “secos” enquanto os com maior proporção de outros hidrocarbonetos são chamados de “molhados”. Os que contém sulfeto de hidrogênio são chamados de “azedo” e os sem sulfeto de hidrogênios são

chamados de “doces”. A composição média do gás de xisto não foi estabelecida ainda, admitindo-se que tem a composição semelhante a do gás convencional (STAMFORD e AZAPAGIC, 2014).

Além da aplicação na indústria e veículos, o gás de xisto pode suprir a demanda das termelétricas, que vem sendo acionadas maciçamente para entrada em operação em função de crises climáticas e econômicas na principal matriz de geração de energia no país, as hidrelétricas.

4.2 AQUÍFERO GUARANI

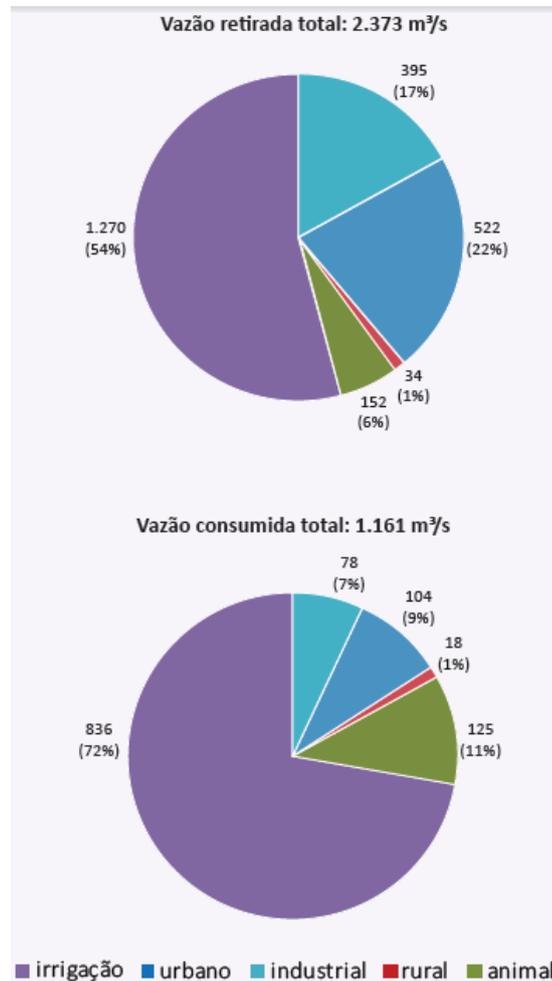
A água é um recurso essencial para a vida e o desenvolvimento humano, contudo seu uso é limitado. A redução na sua disponibilidade pode ocorrer em função de condições climáticas hidrológicas (longos períodos de estiagem), hidrogeológicas e por aumento na demanda, como é o caso dos grandes centros urbanos (GIAMPÁ e GONÇALVES, 2005).

A disponibilidade de água doce no mundo é bastante reduzida, sendo o Brasil um país privilegiado nesse quesito. Esse recurso natural pode se apresentar nas chamadas águas superficiais (lagos e rios) ou nas águas subterrâneas, encontradas no subsolo nos chamados aquíferos. Além de apresentar uma extensa rede hidrográfica, o Brasil também possui importantes reservas de águas subterrâneas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) (2015) o país possui uma disponibilidade hídrica superficial de aproximadamente 91.300 m³/s e disponibilidade hídrica subterrânea de aproximadamente 11.430 m³/s. Contudo a distribuição superficial é bastante heterogênea, estando as maiores bacias hidrográficas em regiões com baixa densidade demográfica.

A demanda de consumo estimada para o Brasil em 2010 foi de 2.373 m³/s, sendo a maior parte desse consumo destinada ao setor de irrigação, responsável por 1.270 m³/s ou 54% do total. A vazão retirada e a vazão efetivamente consumida pode ser observada na Figura 3 (ANA, 2015).

Figura 3 Demanda Consuntiva total (estimada e consumida) no Brasil (m³/s)



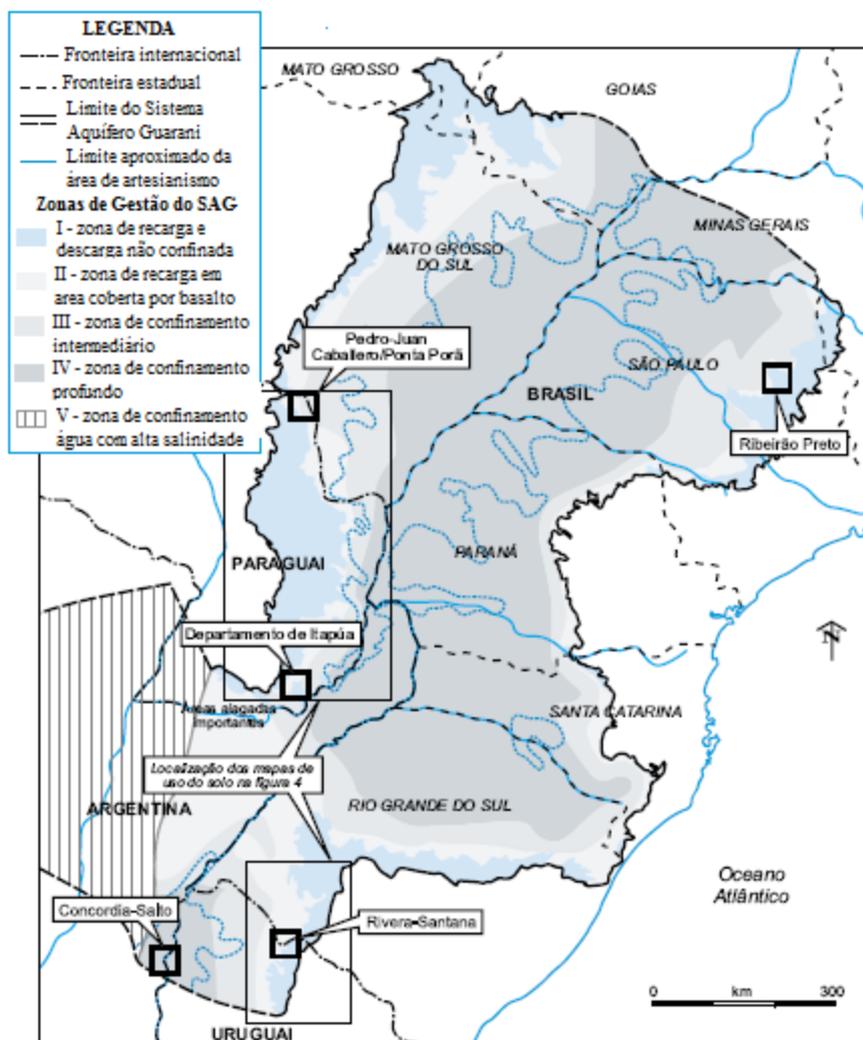
Fonte: ANA, 2015

Nota-se que de modo geral, menos da metade do volume extraído foi consumido. Principalmente para os setores de irrigação, urbano e industrial, onde se observou um maior disparate entre os volumes extraídos e os efetivamente consumidos chegando a valores cinco vezes menores do que o inicialmente extraído.

Em meio a todo esse contexto destaca-se o Sistema do Aquífero Guarani, que consiste numa reserva de água subterrânea, localizada na porção centro leste da América do Sul, com uma área de 1.100.000 km², abrangendo Brasil (71%), Argentina (19,1%), Uruguai (3,8%) e Paraguai (6,1%). O volume de água o qual abriga é estimado em 30.000 km³, sendo uma água de boa qualidade e baixo índice de mineralização (VILAR, 2010).

No Brasil ele abrange as áreas de oito estados, sendo São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás, extrapolando seus limites para outros países como Paraguai, Uruguai e Argentina. Nas áreas fronteiriças, a adoção de políticas internacionais facilita o diálogo entre as nações e proporciona um aproveitamento mais eficaz do recurso. O sistema de águas do Aquífero Guarani está sob importantes bacias hidrográficas, como mostra Foster et al (2009) na Figura 4.

Figura 4 Delineamento das águas de gestão do Sistema Aquífero Guarani



Fonte: Foster et al, 2009

A área de ocorrência do Aquífero Guarani, coincide justamente com a Bacia do Paraná, uma das regiões onde há a provável ocorrência do gás de xisto. Tal fato

leva uma preocupação em função do método utilizado para extração do gás de xisto, o fraturamento hidráulico, que será descrito adiante.

4.3 FRATURAMENTO HIDRÁULICO

O fraturamento hidráulico é uma técnica que vem sendo utilizada para explorar reservas de gás não convencional até então inacessíveis. No início da década de 2000 as empresas começaram a valer-se de tal procedimento que consiste na combinação da perfuração horizontal com o fraturamento hidráulico para explorar tais reservas. O processo envolve a perfuração horizontal das camadas de rocha/folhelho e a conseguinte injeção do fluido pressurizado de fraturamento (BOUDET et al, 2013).

Inicialmente é feito a perfuração vertical do poço até se atingir a camada de rocha de interesse, o folhelho de xisto. Após atingir a rocha parte-se para a perfuração horizontal e em seguida inicia-se o processo de fraturamento hidráulico. O bombeamento de fluido viscoso a uma pressão elevada causa inúmeras fissuras na rocha que visam aumentar a permeabilidade da rocha e facilitar o escoamento do gás através das fraturas (GROTHER et al, 2000).

A fratura vai da parede do poço e prolonga-se ao longo da formação rochosa à medida que o fluido é injetado. O fluido transporta materiais sólidos (areia ou cerâmica na maioria dos casos) que dão sustentação às fraturas permitindo assim a manutenção deste canal de comunicação por onde irá fluir o gás (SANTANA, 2013). A Figura 5 representa o esquema simplificado da operação de fraturamento hidráulico.

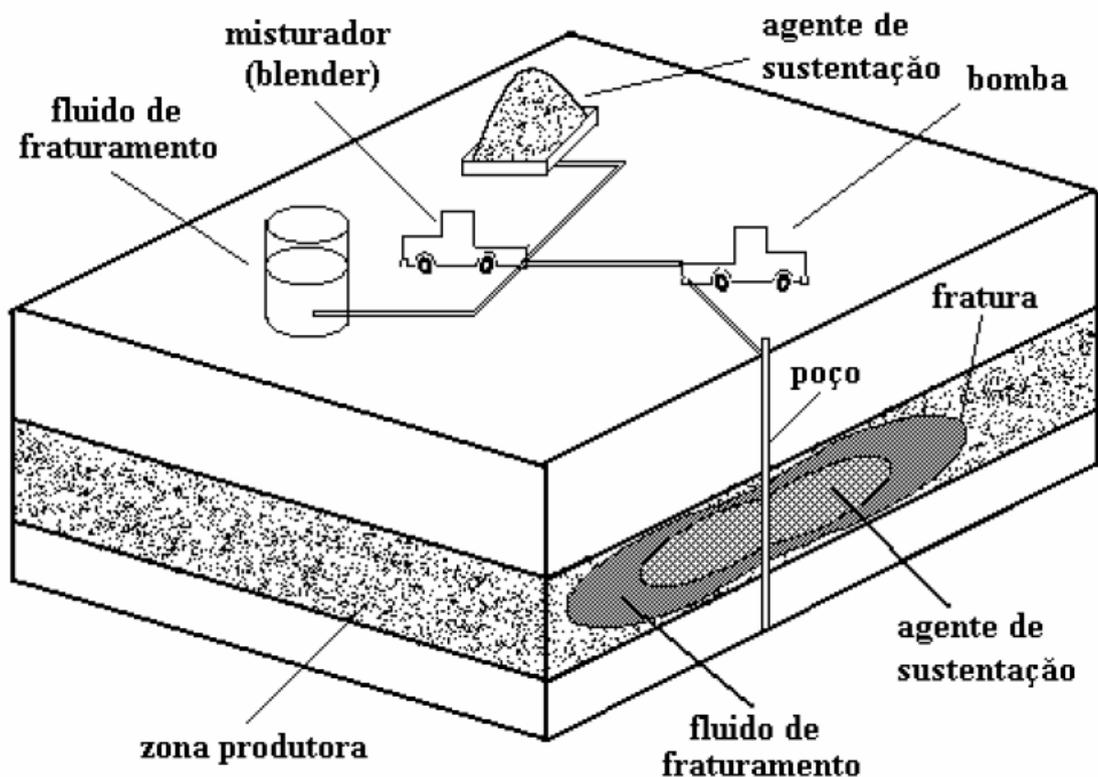
Fraturamento hidráulico é somente uma das etapas do processo produtivo do gás não convencional, que envolve ainda a limpeza da área, construção de estradas e vias de acesso, tubulações para bombeamento do fluido e condução do gás, sistema de transporte e distribuição da produção. Essas atividades interferem e dependem do potencial econômico, do meio ambiente e das características sociais da comunidade da qual se instalará a unidade de exploração (JACQUET, 2009).

Além disso, as características físico-químicas do solo irão influenciar na composição do fluido de fraturamento e gerar outras preocupações quanto ao

processo de exploração, que incluem a possibilidade de contaminação de aquíferos e a instabilidade geofísica da área (VENGOSH et al, 2013).

As taxas de gás nas quais as reservas podem ser exploradas são difíceis de serem determinadas. A razão de produção realizável constitui um elemento crítico na avaliação econômica dos recursos. Se as taxas de produção são baixas devido a barreiras geológicas e/ou das rochas e propriedades dos fluidos a serem utilizados, a exploração econômica pode ser atrasada ou em alguns casos abandonada se esses fatores que limitam a capacidade de produção não forem resolvidos em favor do projeto (EZEKWE, 2011)

Figura 5 Técnica de fraturamento hidráulico.



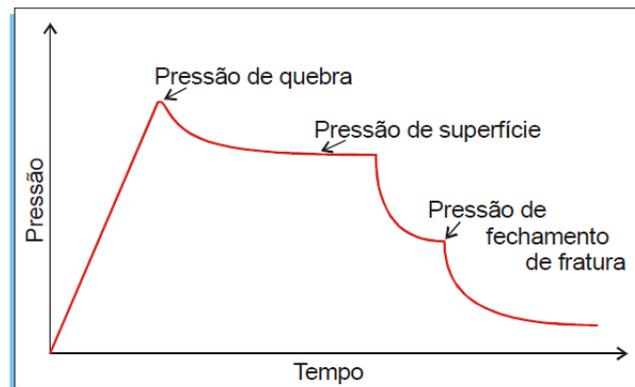
Fonte: Santana, 2003

4.3.1 A mecânica do fraturamento

As formações rochosas do subsolo estão sujeitas às forças de tensão em suas três dimensões, quando há o rompimento da formação rochosa em uma operação de fraturamento hidráulico, essas tensões tectônicas influenciarão na direção da fratura e determinarão se o plano de fratura será vertical, horizontal, ou inclinado. A resistência à ruptura de cada formação varia de acordo com sua estrutura, forma de estabilização e compactação (CASTRO, 2004).

A pressão inicial aplicada sobre a formação para início da fratura é a maior requerida, para propagação da fratura, deve haver continuidade de aplicação de pressão para que a fratura se propague. O fluido age como uma cunha forçando o crescimento da fratura (CASTRO, 2004). A Figura 6 apresenta um gráfico simplificado do comportamento das pressões ao longo da operação de fraturamento hidráulico.

Figura 6 Comportamento das pressões, durante a operação de fraturamento.



Fonte: Castro, 2004

4.4 FLUIDO DE FRATURAMENTO HIDRÁULICO

Uma das maiores controvérsias das pesquisas realizadas nos Estados Unidos está centrada na composição dos fluidos de fraturamento. As companhias não revelam sua composição com a justificativa de que tais dados são segredos industriais. No Reino Unido a regulação é mais rigorosa e as empresas devem expor a composição básica de seus fluidos em seus *websites* e a Agência de Meio

Ambiente pode exigir a descrição completa se necessário (STAMFORD E AZAPAGIC, 2014).

Não há uma formulação padrão dos fluidos de fraturamento. Existem fluidos à base de água, à base de óleo, multifásicos e à base de tensoativos. Grande parte dos fluidos de fraturamento utilizados na extração do gás de folhelho tem a água como sua maior componente (98 a 99,5%). O restante da formulação é de propante e um combinado de produtos químicos que variam de acordo com as características da água utilizada, do solo e da formação do gás a ser extraído (FERNANDES, 2014).

A utilização dos fluidos de fraturamento tem como objetivo ocasionar as fraturas na rocha e conduzir o propante ao longo da fratura, com o intuito de mantê-las abertas. A areia é comumente utilizada, sendo que há também o uso de grãos de propante cerâmicos (SANTOS e CORADESQUI, 2013).

O fluido deve possuir uma baixa viscosidade na coluna do poço para reduzir a perda de carga e deve ter uma viscosidade alta durante a propagação e fechamento da fratura para evitar a decantação do agente de sustentação (SANTOS E CORADESQUI, 2013).

Os componentes podem ser divididos em categorias de acordo com a função específica que desempenham na composição do fluido. O nome e função de algumas dessas classes são descritas a seguir conforme Stringfellow et al (2014).

4.4.1 Agentes de gelificação e formação de espumas

São responsáveis por aumentar a viscosidade do fluido de fraturamento, permitindo uma melhor suspensão do propante e seu transporte através das fraturas. Consistem em polímeros de cadeia simples ou reticulados que são juntados quimicamente a um grupo funcional específico para criar grandes moléculas, aumentando ainda mais a viscosidade do fluido. O uso dos formadores de espuma diminui a quantidade de líquido requerida para o fraturamento (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.2 Redutores de atrito

Os compostos químicos deste grupo diminuem a tensão superficial, reduzem o atrito do fluido com as demais superfícies de contato e facilitam sua remoção do interior das formações (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.3 Compostos reticulados (“*Crosslinkers*”)

Estão intimamente ligados aos agentes de gelificação na formação de grandes moléculas que resultam no aumento da viscosidade e em uma maior elasticidade. Melhoram o transporte do propante em comparação com os géis que não possuem os *crosslinkers* (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.4 Inibidor de quebra (“*Breakers*”)

Após a fratura uma enzima ou um inibidor de quebra é introduzido para reverter a reticulação do fluido, o qual permite a redução da viscosidade dos géis de fluido e permite a remoção dos resíduos dos polímeros da fratura recentemente aberta. Atuam também na prevenção da quebra prematura dos polímeros. Caso não fossem adicionados poderiam impedir o fluxo de gás e reduzir a produção do poço. Podem ser aplicados no início do bombeamento do fluido ou depois das fraturas abertas (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.5 Ajustadores de pH

Ácidos e bases são adicionados aos fluidos para garantir a efetividade de certos aditivos químicos, particularmente as moléculas de polímeros reticulados. O pH ideal vai depender do tipo de molécula de polímero reticulado utilizada (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.6 Biocidas

São utilizados no controle das bactérias que degradam os compostos químicos dos fluidos e que contribuem para a corrosão das tubulações e equipamentos (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.7 Inibidores de corrosão

São adicionados para proteger as tubulações e equipamentos das corrosões causadas por ácidos, sais e gases corrosivos. A seleção dos inibidores está ligada à temperatura no poço, formação mineral, regime de fluxo e tempo de contato com a superfície. Em geral são altamente solúveis e biodegradáveis (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.8 Inibidores de incrustação

Protegem os tubos e conexões do fenômeno da incrustação que ocasiona a redução da permeabilidade e bloqueio do fluxo na tubulação o que reduz também a produção do poço (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.9 Controladores de ferro

Esses compostos são adicionados para controlar a precipitação de ferro que bloqueiam os caminhos da formação e reduzem a permeabilidade da rocha. Os íons de ferro podem interferir também no controle da viscosidade do fluido. O uso depende também do tipo de formação do folhelho de xisto (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.10 Estabilizadores de argila

Os estabilizadores de argila são adicionados para prevenir o inchaço da argila encontrada nas camadas de folhelho de xisto. O inchaço da argila pode

causar a instabilidade do poço e reduzir em até 90% a produtividade além de contribuir para outros problemas como o estrangulamento do tubo de perfuração no poço. O grau de inchaço depende da salinidade do fluido de fraturamento e a espécie de cátions presentes. O aumento da salinidade geralmente reduz o inchaço (STRINGFELLOW et al., 2014).

4.4.11 Surfactantes

São usados para controlar a viscosidade ótima dos fluidos. Reduz a tensão superficial entre a formação do folhelho de xisto e o fluido. Auxilia também na recuperação do fluido depois do processo de fraturamento. Em alguns casos os surfactantes podem agir também como biocidas ou estabilizadores de argila. Surfactantes reduzem a umidade das interfaces da rocha e aumenta o escoamento de gás pelas fraturas em formação (STRINGFELLOW et al., 2014). O quadro 1 apresenta um resumo dos principais aditivos e componentes de um fluido de fraturamento típico e suas funções.

Quadro 1 Principais aditivos e componentes de um fluido típico de fraturamento.

COMPONENTE / TIPO DE ADITIVO	EXEMPLO	PROPOSITO	VOLUME
ÁGUA		TRANSPORTA PROPANTE E PRODUZIR PRESSÃO	90,000%
PROPANTE	SILICA ou AREIA DE QUARTZO	MANTER FRATURAS ABERTAS 9,5%	9,500%
ÁCIDO	ÁCIDO CLORÍDRICO	DISSOLVER MINERAIS e INICIAR RACHADURA	0,120%
REDUTOR DE ATRITO	POLIACILAMIDA, ÓLEO MINERAL	MINIMIZAR ATRITO ENTRE FLUIDO E TUDO	0,090%
SURFACTENTE	AUMENTAR A VISCOSIDADE	ISOPROPANOL	0,090%
SAL	CLORETO DE POTÁSSIO	EQUILÍBRIO OSMÓTICO AO MEIO	0,060%
GELIFICANTE	GOMA, HIDROXIMETIL CELULOSE	MANTER PROPANTE EM SUSPENSÃO	0,060%
INIBIDOR DE INCRUSTAÇÕES	ETILONOGLICOL	IMPEDIR INCRUSTAÇÕES NO TUBO	0,400%
TAMPÃO	CARBONATO DE SÓDIO OU POTÁSSIO	AJUSTAR O PH	0,010%
BREAKER	PERSULFATO DE AMONIA	EVITAR AQUEBRA DO POLÍMERO	0,010%
CROSSLINKER	SAIS DE BORATO	MANTER VISCOSIDADE NO AUMENTO DE TEMPERATURA	0,007%
FERRO CONTROLE	ÁCIDO CITRÍCO	EVITAR PRECIPITAÇÃO DE SAIS DE FERRO	0,004%
INIBIDOR DE CORROSÃO	N-DIMETIL FORMAMIDA	EVITA CORROSÃO DO TUBO	0,002%
BIOCIDA	GLUTARALDEÍDO	ELIMINA BACTÉRIAS	0,001%

Fonte: King, 2012

4.5 IMPACTOS AMBIENTAIS

Muitos problemas ambientais são levantados em relação à exploração do gás de xisto os quais são alguns dos entraves para uma ampla aceitação desse recurso como fonte alternativa de energia.

Os prováveis riscos ambientais relacionados à exploração do gás não convencional vão desde as etapas de preparação até a exploração propriamente dita. Os principais focos de discussão estão concentrados no impacto sobre os recursos hídricos, impacto sobre a atmosfera e impacto sobre os solos (SUN; WANG, 2015)

Quanto ao impacto nos recursos hídricos, o questionamento recai sobre o fraturamento hidráulico, principal técnica utilizada para extração do gás de xisto, e que demanda grandes quantidades de água para viabilização do processo. Dentre os principais campos de exploração americanos as quantidades de água requeridas por poço variam de 10.600 m³ (Barnett, Texas) até 21.500 m³ (Haynesville, Texas). Na China, país que detém as maiores reservas mundiais, levantamentos apontam para uma demanda de 27.490 m³ no campo de Fulling. Em 80% dos campos de exploração orientais a média de demanda de água está entre 20.000 a 40.000 m³ (YANG et al, 2015).

A contaminação tanto das águas superficiais quanto das águas subterrâneas também tem ensejado inúmeros apontamentos. Novamente o cerne do debate está na técnica do fraturamento hidráulico.

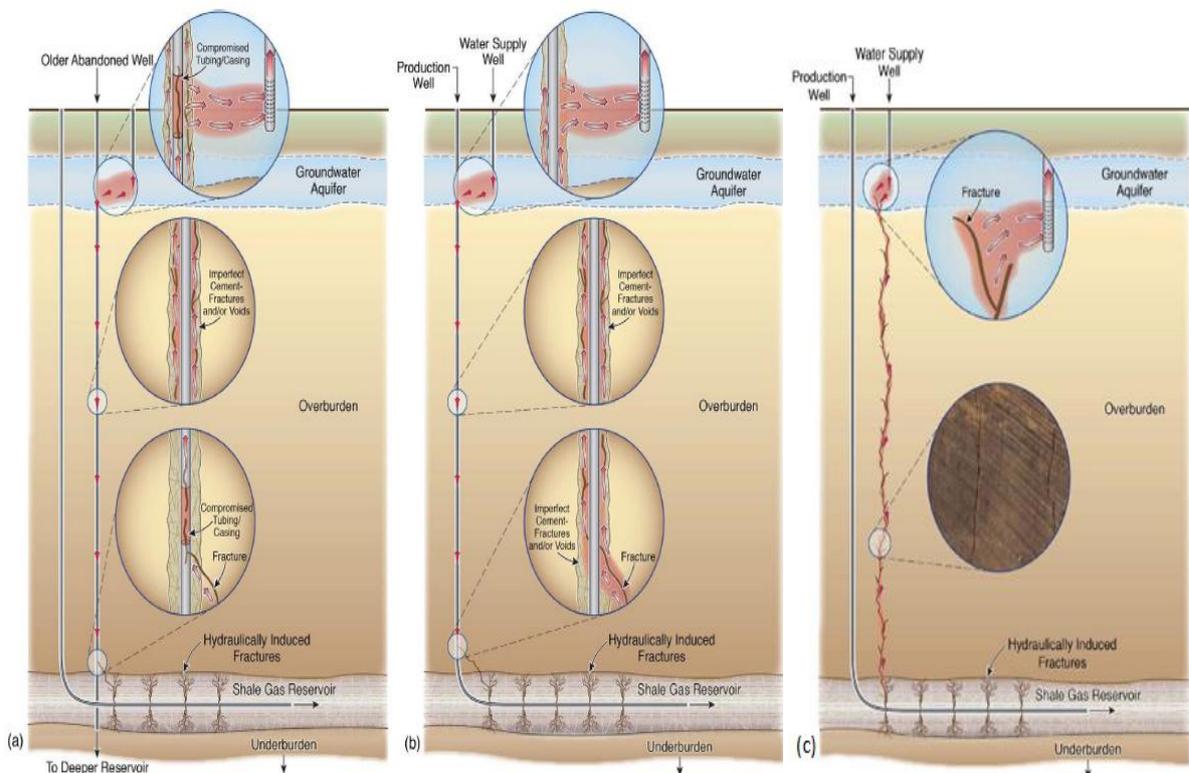
O risco temido é a contaminação das águas pelo gás proveniente do poço de perfuração ou dos aditivos químicos presentes nos fluidos de fraturamento. Em locais que demandam perfurações verticais muito extensas, estas podem causar fraturas adjacentes, as quais podem vir a comunicar com algum recurso hídrico. Da mesma forma, uma falha em alguma fratura anteriormente existente pode ser ativada por uma nova operação de fraturamento hidráulico, criando caminhos que permitirão a migração de hidrocarbonetos e outros contaminantes até um reservatório de água subterrâneo. Outro problema associado pode se dar em uma falha no agente de estabilização da fratura, o chamado “cimento”, que pode ocasionar uma contaminação como descrito anteriormente. A Figura 6 ilustra

algumas dessas possibilidades de contaminação descritas anteriormente (REAGAN et al, 2015).

Vengosh et al (2013) em estudo num campo de exploração no nordeste da Pensilvânia mostraram que os índices de metano na água estavam bastante elevados, para poços a menos de 1 km do local de exploração. Por outro lado se encontravam a níveis bem baixos em locais mais distantes. Contudo o estudo propõe que esse fato pode estar ligado às características geológicas do local e o fluxo natural do metano, e não às perfurações para extração do gás não convencional (VENGOSH et al., 2013).

No cenário brasileiro este impacto poderia ser ainda maior. Os locais de provável ocorrência do gás de xisto são justamente coincidentes com importantes bacias hidrográficas como as bacias do rio Paraná, Rio São Francisco, Rio Parnaíba, entre outras. Algumas destas reservas ainda estão situadas sob um importante reservatório de água subterrânea, o Aquífero Guarani.

Figura 7 Risco Associado à fraturas antigas (a), falhas no cimento (b) e perfurações verticais extensas(c).



Fonte: Reagan et al, 2015

Quando o gás é extraído do poço alguns compostos orgânicos podem se volatilizar durante o processo de desidratação do gás de xisto. Benzeno, tolueno, etilbenzeno, são algumas das substâncias que requerem atenção e preocupam os ambientalistas (SUN; WANG, 2015).

Uma possível contaminação ou interferência na demanda de água potável traria grandes problemas para importantes centros urbanos, seja no abastecimento de água para o consumo humano ou na sua utilização por parte de outros setores industriais.

Os riscos atmosféricos comumente elencados estão relacionados às etapas de construção. Na fase de abertura dos poços, são demandados o transporte de vários equipamentos e implementos, assim há a preocupação quanto ao risco de poluição atmosférica por meio da emissão de gases provenientes da queima dos combustíveis fósseis que alimentam os motores de equipamentos e veículos em geral os óxidos de nitrogênio (SUN; WANG, 2015).

Alguns estudos têm relacionado pequenos tremores de terra ou instabilidades geofísicas com a extração do gás de xisto. As prováveis causas estão ligadas à injeção do fluido de fraturamento, que ao ser injetado sobre alta pressão no poço pode extravasar para outras falhas pré-existentes, causando uma ruptura ou cisalhamento na formação rochosa e por consequência um tremor de terra (WESTAWAY e YOUNGER, 2014).

Outra possível causa consiste na própria perfuração do poço, seja vertical, até atingir a camada de xisto, ou na perfuração horizontal, já na formação rochosa. Nesse caso as fraturas seriam criadas diretamente pelas perfurações, originando atividade sísmica tanto pela tensão quanto pela tração exercidas no solo. A magnitude desses possíveis abalos tem sido questionada. Estudos apontam que estes seriam de níveis muito baixos e somente em áreas muito próximas aos locais de perfuração. Outro contraponto é que qualquer tipo de perfuração seja para exploração de óleo ou energia geotérmica pode causar instabilidade no solo e não exclusivamente as provenientes da exploração do gás de xisto (WESTAWAY e YOUNGER, 2014).

Impactos de menor monta podem advir da exploração desse recurso não convencional, tais como poluição sonora causada pela operação dos equipamentos,

alterações no ambiente com a fixação das instalações necessárias para operação, poluição visual, aumento do tráfego de veículos, os quais transportam os aditivos químicos e demais implementos (SUN; WANG, 2015).

No Brasil existem poucos registros relacionados a abalos sísmicos. A extração de gás de xisto pode criar um cenário novo nessa esfera. Tal problema está relacionado às características de formação dos solos. A viabilidade de exploração deve estar atrelada a levantamentos criteriosos quanto aos riscos abordados nessa seção.

5 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura. Anualmente, milhares de artigos são publicados sobre determinados temas. A revisão da literatura é uma ótima ferramenta de análise do cunho destas publicações. Por meio deste método, é possível sumarizar e traçar um perfil das publicações sobre o tema em questão. Além disso, ela proporciona uma análise geral do que está sendo produzido enquanto conhecimento científico relativo a uma temática (PAUTASSO,2013).

Baseou-se na proposta de revisão integrativa construída por Ganong (1987). Apesar de inicialmente pensada para estudos na área da enfermagem, os passos propostos pelo autor podem ser aplicados em qualquer área. Sendo assim, a revisão decorreu dos passos subsequentes: construção da questão norteadora, definição de critérios de inclusão e exclusão, seleção da amostragem, descrição dos achados, análise, interpretação e discussão dos resultados, apresentação da revisão integrativa e sùmula do conhecimento (GANONG, 1987).

A presente revisão possui como objetivo responder à seguinte questão norteadora: quais as implicações ambientais decorrentes da exploração do gás xisto? Para tal, utilizou-se de fonte secundária de dados.

Consultou-se as bases de dados Science Direct, GeoScienceWorld e SciTech do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Empregou-se os descritores *shale gas*, *environmental impact of shale gas exploitation* e *fracking*. Foram utilizados descritores em inglês uma vez que tal idioma é o que prevalece na maioria das pesquisas e publicações científicas, e também pelo fato dos Estados Unidos ser um dos países com pesquisas mais avançadas sobre o assunto e possuir uma sistema de produção de gás de xisto bastante evoluído. Além disso, as bases selecionadas são todas internacionais.

Foram inclusos nesta pesquisa artigos que atendiam ao objetivo do presente trabalho, disponíveis na íntegra em meio eletrônico, de livre acesso, nas línguas inglesas, portuguesa, espanhola, com data de publicação dos últimos cinco anos. Adotou-se como critério de exclusão os artigos cujo tema principal divergia ao proposto neste trabalho, teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso,

citações, relatórios técnicos, artigos duplicados ou que não atendiam aos critérios de inclusão.

A escolha de filtros e conectores se deu conforme disponibilidade da base. O quadro 2 sumariza o esquema de filtros e conectores utilizados.

Quadro 2: Filtros e conectores utilizados nas bases de dados para seleção dos artigos.

Base da dados	Filtros	Conector
Science Direct	Abstract, title, keyword, últimos 5 anos (2011 a 2016)	AND
Scitech Connect	Journal articles, Term search, últimos 5 anos (2011 a 2016)	AND
GeoScience World	title, abstract, full text, issue, exact match, período de 01/01/2011 a 05/06/2016	AND

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

6 RESULTADOS

Para elaboração da revisão foram utilizadas as bases de dados, Science Direct, GeoScienceWorld e SciTech Connect do Departamento de Energia dos Estados Unidos. As buscas nos referidos bancos foram realizadas utilizando os descritores *shale gas, fracking, environmental impacts of shale gas exploitation*. Também foi realizada a busca combinada entre os descritores.

Como resultados foram encontrados um total de 3965 artigos, sendo que destes foram eliminados 3932 (99,2%) conforme os critérios de exclusão, sendo utilizados, portanto, 33 (0,8%) artigos. Os principais motivos para rejeição foram a não disponibilidade na íntegra do artigo, discordância ao tema, outros tipos de publicação que não artigos científicos e duplicação de resultados.

Para a base de dados Science Direct, a busca resultou em 236 artigos. Destes foram rejeitados 214 (90,6%) e utilizados 22 (9,3%) artigos. Dentre os motivos para rejeição, 25 (11,7%) destes resultados são de artigos duplicados e 189 (88,3%) de pesquisas cuja finalidade era destoante do objeto de estudo deste trabalho.

A busca na base SciTech Connect reportou 319 resultados. Destes, foram selecionados cinco (1,6%) e excluídos 314 (98,4%) artigos. Os motivos para exclusão foram: divergência com o tema da pesquisa, 219 (69,7%), artigos duplicados na mesma pesquisa ou previamente selecionados, cinco (1,6%) e 90 (28,7%) eram outros tipos de arquivos como citações, multimídia e relatórios técnicos.

Na GeoScienceWorld, a busca retornou um total de 3410 resultados. Destes foram selecionados seis artigos (0,2%) e excluídos 3404 (99,8%). Dentre os motivos para exclusão estão artigos que possuíam acesso restrito, 3245 (95,3%), que possuíam temas divergentes a esta pesquisa, 143 (4,2%) e duplicados, que já haviam sido selecionados nesta e em outra base de dados, 16 (0,05%).

Ressalta-se que apesar da utilização de filtros, as bases de dados não impedem que um mesmo artigo apareça como resultado para diferentes buscas, implicando no valor superestimado de resultados. Além disso, há também o cadastro

de um mesmo artigo em diferentes bases, acarretando na duplicação deste resultado. O Quadro 3 sumariza os resultados encontrados.

Quadro 3 Resultados da busca integrada nas bases de dados Science Direct, Scitech Connect e GeoScienceWorld.

Base de dados	Descritor	Encontrados	Rejeitados	Selecionados
Science Direct	Shale gás	175	159	16
	Environmental impact of shale gas exploitation	4	4	0
	Fracking	18	15	3
	Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation	4	4	0
	Shale gas AND fracking	13	13	0
	Environmental impact of shale gas exploitation AND Fracking	1	1	0
	Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation AND fracking	21	18	3
Scitech Connect	Shale gás	178	173	5
	Environmental impact of shale gas exploitation	18	18	0
	Fracking	123	123	0
	Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation	0	0	0
	Shale gas AND fracking	0	0	0
	Environmental impact of shale	0	0	0

	gas exploitation AND Fracking			
	Environmental impact of shale gas exploitation AND Fracking AND shale gas	0	0	0
GeoScienceWorld	Shale gás	3116	3110	6
	Environmental impact of shale gas exploitation	160	160	0
	Fracking	88	88	0
	Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation	0	0	0
	Shale gas AND fracking	46	46	0
	Environmental impact of shale gas exploitation AND Fracking	0	0	0
	Environmental impact of shale gas exploitation AND Fracking AND shale gas	0	0	0
	Total	3965	3932	33

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o descritor *shale gas* foram selecionados 27 artigos, com ano de publicação entre 2011 e 2016, sendo que a maioria destes datava de 2014 (37%) e 2015 (37%). No periódico Energy Procedia estão contidos 7 artigos (26%) dos vinte e sete elegidos. Dos trabalhos selecionados, 16 (59%), foram extraídos da base de dados Science Direct. Os resultados esmiuçados encontram-se descritos no Quadro 4, apresentado a seguir.

Quadro 4 Artigos levantados com o descritor shale gas sobre impactos ambientais relacionados à extração do gás de Xisto.

Nº	Autor (es)	Base de dados	Periódico	Ano
1.	Sun Renjin, Wang Zhenjie	Science Direct	Natural Gas Industry B	2015
2.	Angel de la Vega Navarro,Jaime Ramírez Villegas	Science Direct	ECONOMÍA unam	2015
3.	Geoffrey P. Hammond, Áine O'Grady, David E. Packham	Science Direct	Energy Procedia	2015
4.	A.G. Bunch, C.S.Perry, L.Abraha, D.S. Wikoff, J.A. Tachovsky, J.G.Hixon, J.D. Urban, M.A. Harris, L.C.Haws	Science Direct	Science of the Total Environment	2014
5.	Liu Naizhen, Liu Ming, Zhang Shicheng	Science Direct	Natural Gas Industry B 2	2015
6.	Chunhui Cao, Zonggang Lv, Liwu Li, Li Du	Science Direct	Journal of Natural Gas Geoscience	2016
7.	Geoffrey P. Hammond, Áine O'Grady	Science Direct	Applied Energy	2016
8.	Craig C. Douglas, Guan Qin, Nathan Collier, and Bin Gong	Science Direct	Procedia Computer Science	2011
9.	C. Tagliaferri, P. Lettieri, C. Chapman	Science Direct	Energy Procedia	2015
10.	Laurence Stamford, Adisa Azapagic	Science Direct	Applied Energy	2014
11.	Christophe McGlade, Jamie Speirs, Steve Sorrell	Science Direct	Energy Procedia	2013
12.	Marina Bădileanu, Marius F.R.Bulearcă, Corneliu Russu, Mihai-Sabin Muscalu, Cornelia Neagu, Raluca Bozga, Cristian Sima, Luminița Izabell Georgescu, Daniela Nicoleta Băleanu	Science Direct	Procedia Economics and Finance	2015
13.	Sid-Ali Ouadfeul, Leila Aliouane	Science Direct	Energy Procedia	2014
14.	Avner Vengosh, Nathaniel Warner, Rob Jackson, Tom Darrah	Science Direct	Procedia Earth and Planetary Science	2013
15.	Y. K. Kharak, J. J. Thordsen, C. H. Conaway, R. B. Thomas	Science Direct	Procedia Earth and Planetary Science	2013

16.	Hong Yang, Xianjin Huang, Qingyuan Yang, Jianjun Tu, Shengfeng Li, Demin Yang, Hong Xia, Roger J. Flower, Julian R. Thompson	Science Direct	Energy Procedia	2015
17.	H. Todd Schaef, Casie L. Davidson, A. Toni Owen, Quin R.S. Miller, John S. Loring, Christopher J. Thompson, Diana H. Bacon, Vanda A. Glezakou, and B. Pete McGrail	SciTech Connect	Energy Procedia	2014
18.	Jonny Rutqvist, Antonio P. Rinaldi, Frederic Cappa, and George J. Moridis	SciTech Connect	Journal of Petroleum Science and Engineering	2015
19.	Casie L Davidson, Robert T Dahowski, James J Dooley, B Peter McGrail	SciTech Connect	Energy Procedia	2014
20.	Matthew T. Reagan, George J. Moridis, Noel D. Keen, and Jeffrey N. Johnson	SciTech Connect	Water Resources Research	2015
21.	Richard S. Middleton, J. William Carey, Robert P. Currier, Jeffrey, D. Hyman, Qinjun Kang, Satish Karra, Joaquin Jimenez-Martinez, Mark L. Porter, Hari S. Viswanathan	SciTech Connect	Applied Energy	2015
22.	Seth Blumsack	GeoScienceWorld	ELEMENTS	2014
23.	K. G. Taylor ¹ , J. H. S. Macquaker	GeoScienceWorld	Clay Minerals	2014
24.	L. Taras Bryndzia, Neil R. Braunsdorf	GeoScienceWorld	ELEMENTS	2014
25.	Rob Westaway, Paul L. Younger	GeoScienceWorld	Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology	2014
26.	Eric Von Lunen, Stephen Jensen, Jennifer Leslie-Panek	GeoScienceWorld	Geophysics in Reserves Estimation	2012
27.	Michael A. Arthur, David R. Cole	GeoScienceWorld	ELEMENTS	2014

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o descritor *fracking* a amostragem constituiu-se de três artigos, todos selecionados da base Science Direct. As outras bases também apresentaram resultados para este descritor, no entanto, a busca incorreu em duplicatas e divergência de temas. O Quadro 5 detalha os artigos que compuseram esta amostra.

Quadro 5 Artigos levantados com o descritor *fracking* sobre impactos ambientais relacionados à extração do gás de Xisto.

Nº.	Autor (es)	Base de dados	Periódico	Ano
1.	Mohammed S. Hashem M. Mehan, Angela Guggemos	Science Direct	Procedia Engineering	2015
2.	Miles P. Wilson, Richard J. Davies, Gillian R. Foulger, Bruce R. Julian, Peter Styles, Jon G. Gluyas, Sam Almond	Science Direct	Marine and Petroleum Geology	2015
3.	Geoffrey P. Hammond, Áine O'Grady and David E. Packham	Science Direct	Energy Procedia	2015

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Apesar da busca exaustiva em diferentes bases de dados e utilizando as combinações possíveis com os três descritores, a amostra ficou bastante reduzida. O que se observa é que há poucas publicações que refletem sobre os impactos ambientais relativos ao processo de fraturamento e extração do gás de xisto. Assim sendo, não foi possível selecionar artigos para o descritor *Environmental impact of shale gas exploitation* e para as combinações *Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation*, *Shale gas AND fracking*, *Environmental impact of shale gas exploitation AND fracking*. Selecionou-se três artigos para a combinação dos descritores em conjunto, como descrito no Quadro 6.

Quadro 6 Artigos selecionados com combinação dos descritores *Shale gas AND Environmental impact of shale gas exploitation AND fracking* sobre impactos ambientais relacionados à extração do gás de Xisto.

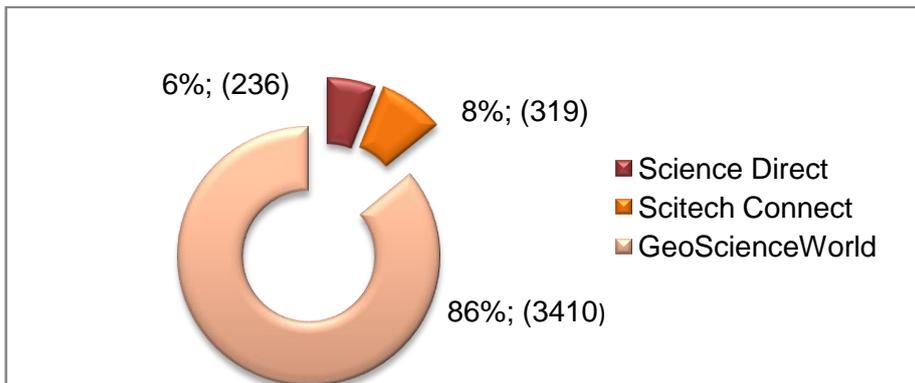
Nº.	Autor (es)	Base de dados	Periódico	Ano
1.	Paul S. Goodman, Fabio Galatioto, Neil Thorpe, Anil K. Namdeo, Richard J. Davies, Roger N. Bird	Science Direct	Environment International	2016
2.	Claudia Baranzelli, Ine Vandecasteele, Ricardo Ribeiro Barranco, Ines Mari i Rivero,	Science Direct	Energy Policy	2015

	Nathan Pelletier, Okke Batelaan, Carlo Lavallo			
3.	John Parnell, Connor Brolly, Sam Spinks, Stephen Bowden	Science Direct	Applied Geochemistry	2016

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

A demonstração gráfica dos resultados por base de dados é apresentada conforme a Gráfico 1:

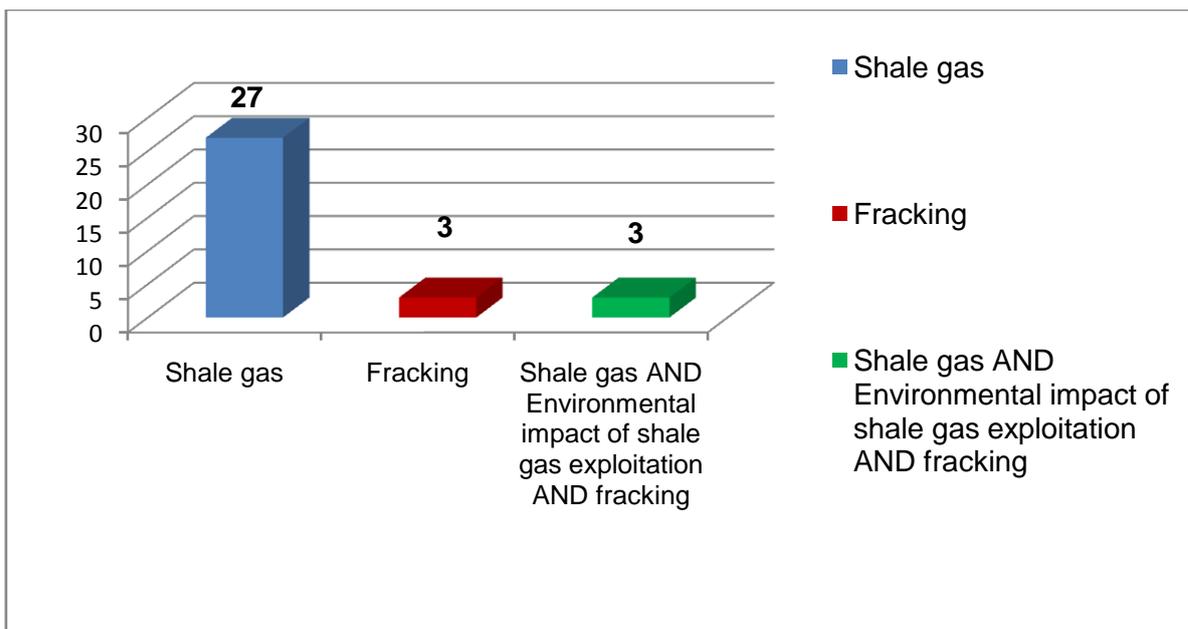
Gráfico 1 Resultado da pesquisa por base de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

A seleção dos artigos com base nos descritores utilizados foi tabulada e está expressa conforme o Gráfico 2.

Gráfico 2 Seleção de artigos por descritores utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

O Gráfico 3 traz a representação no formato de barras, do quantitativo dos artigos selecionados considerando seu ano de publicação.

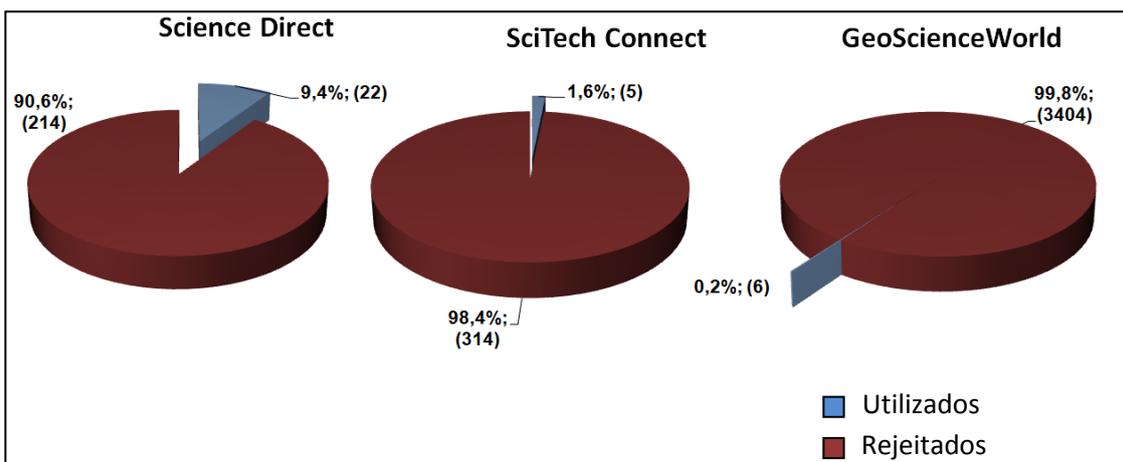
Gráfico 3 Artigos selecionados por ano de publicação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Na pesquisa dentro das diferentes bases de dados, foram empregados critérios de exclusão; possibilitando assim, a melhor seleção dos artigos de interesse. O Gráfico 4 mostra o percentual de artigos rejeitados e utilizados dentro de cada base de dados.

Gráfico 4 Artigos utilizados x artigos rejeitados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

7 DISCUSSÃO

A extração do gás de xisto ou gás não convencional é relativamente recente, porém em alguns países, sua exploração é mais difundida, como nos Estados Unidos, onde fatores econômicos e a busca pela independência energética forçou o país a buscar novas fontes de energia.

O processo de fraturamento hidráulico da rocha de xisto, que libera o gás natural ali impregnado, tem gerado diversas discussões, principalmente no campo dos impactos ambientais. Apesar de inúmeros estudos referentes aos diversos tipos de implicações que podem estar associados, não se chegou a um consenso, até porque os efeitos de uma exploração em longo prazo ainda não são amplamente conhecidos.

Parte desses estudos é inconclusivo ou mesmo não permitem estabelecer relação direta entre os impactos ambientais e a exploração. O que se percebe nas abordagens presentes nos artigos selecionados é a cautela ao tratar este tema.

No campo político principalmente, estudos convergem para a máxima de que um mecanismo legal deve ser estabelecido para doutrinar as etapas de extração e produção (SUN; WANG, 2015; BĂDILEANU et al, 2015; MEHANY; GUGGEMOS, 2015).

Há estudos que tratam da questão no México, Reino Unido e China (países com reservas potencialmente exploráveis). Abordam o aspecto político e legal como essenciais para a opção de exploração dessa fonte de energia (NAVARRO; VILLEGAS, 2015; HAMMOND; O'GRADY; PACKHAM, 2015; SUN; WANG, 2015).

Hammond, O'Grady e Packham (2015) propõe ainda que diversos setores da sociedade devem estar envolvidos nesse processo de decisão. Os aspectos políticos, sociais, ambientais devem estar interligados para o julgamento da viabilidade de adoção dessa matriz energética.

Sun e Wang (2015) propõe uma análise matricial com base no peso de importância que cada matéria teria, a fim subsidiar decisões futuras. Outros autores concordam no fato de que estudos técnicos aprofundados devem ser realizados com exaustão para que o máximo de informação seja aglutinada e possa subsidiar

qualquer processo decisório no âmbito de medidas de cunho político (BARANZELLI et al, 2015; CLARK; HORNER; HARTO, 2013).

Os impactos de cunho social se concentram nas comunidades que estarão próximas aos locais de extração. A mudança do próprio meio geográfico criará um novo panorama de vida e novas rotinas para as populações próximas instaladas (HAMMOND; O'GRADY, 2016).

Assim, deve-se fazer inúmeros ponderamentos antes de qualquer processo decisório e mesmo formalização de políticas que regulamentem a exploração. No campo social e econômico, os benefícios estariam ligados à possibilidade de geração de empregos e aumento da oferta de uma nova fonte de recurso, ocasionando redução de tarifas de energia elétrica ou gás, tanto para a população quanto para a indústria (HAMMOND; O'GRADY; PACKHAM, 2015; MCGLADE; SPEIRS; SORRELL, 2013).

Contudo esses benefícios chocam-se justamente com os riscos a que as comunidades próximas estariam sujeitas, principalmente no que diz respeito às questões ambientais e que envolve atenção especialmente para os recursos hídricos, qualidade do ar e aspectos relacionados aos solos.

7.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO RELACIONADO AOS RECURSOS HÍDRICOS

Nesse quesito a literatura reporta o que seriam os grandes problemas ambientais envolvidos no processo de exploração do gás de xisto. Os principais tópicos discutidos concentram-se nas questões relacionadas à poluição das águas, sejam superficiais (rios, lagos e lagoas) ou subterrâneas (lençóis freáticos) (TAGLIAFERRI; LETTIERI; CHAPMAN, 2015; STAMFORD; AZAPAGIC, 2014; VENGOSH et al 2013).

Tal contaminação está atrelada ao fluido utilizado no fraturamento da rocha, no qual são adicionados diversos produtos químicos e que trariam risco de contaminação da água. Outro aspecto ligado aos recursos hídricos é que a quantidade de água gasta no processo de extração é relativamente alta, o que pode interferir na oferta de água para o consumo da população (YAN et al, 2015).

Há uma lacuna do conhecimento no que diz respeito a composição dos fluidos de fraturamento. Ela pode variar de acordo com as características geográficas de cada região.

Muitas empresas não apresentam detalhes de sua composição, por consistir um segredo industrial (STAMFORD; AZAPAGIC, 2014). Porém, uma formulação genérica apresentada por King (2012) revela que mais de 90% de sua composição é água, sendo outros 5% areia e o restante da composição estariam divididos em vários compostos químicos exercendo diferentes funções no processo. Assim as quantidades de compostos que oferecem risco à saúde humana seriam bastante irrisórias; para se atingir um nível que causasse preocupação seria necessário um grande volume de fluido (KING, 2012).

Quanto à quantidade de água requerida para o processo, Yang et al (2015) faz uma comparação com outros processos, concluindo que outras atividades consomem ainda mais água do que a extração do gás de xisto, como é o caso, por exemplo, da agricultura, com a irrigação, ou outras fontes de energias derivadas de combustíveis fósseis. Além disso, demais estudos ressaltam que tratamentos na água demandada, para posterior reutilização, o ciclo de renovação da água e o uso de fluidos não aquosos para o fraturamento hidráulico, podem ser atenuantes do consumo neste processo (ZIEMKIEWICZ et al., 2012; MIDDLETON et al., 2015).

Relatos apontam que o processo de extração estaria causando a impregnação de metano nas águas subterrâneas em campos de exploração de Barnett, no estado americano do Texas. Contudo os mesmos estudos reportam que tal fato pode estar ligado às características do local e não em decorrência da extração do gás de xisto (VENGOSH et al, 2013; BUNCH et al, 2014, BRYNDZIA; BRAUNSDORF, 2014).

7.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO RELACIONADOS AO AR

Outro fato apresentado e que preocupa os envolvidos é a qualidade do ar nas regiões onde se tem os campos de exploração. A qualidade pode ser afetada pelo próprio meio produtivo, ao passo que na extração alguns compostos orgânicos podem vir a se volatilizar e comprometer a qualidade do ar. Além do sistema de

escoamento da produção e abastecimento de suprimentos, que são atrelados ao transporte.

No estudo feito por Bunch et al (2014) em um campo de exploração no estado do Texas, foi monitorada a qualidade do ar ao longo de vários anos, levando-se em consideração a presença desses compostos orgânicos. O que se pode notar é que a ocorrência desses compostos de interesse no ar se mostrou bastante recorrente, contudo as taxas não excederam aos limites recomendados naquele país (BUNCH et al., 2014).

Somente um composto excedeu os limites permitidos, mas esse valor pode ser explicado pelo local de medição, na qual o composto pode ter tido sua origem adversa da exploração do gás de xisto, como abastecimento de aeronaves e carros de corrida. O referido estudo também não conseguiu provar a relação direta da qualidade do ar com operações de extração de gás de xisto (BUNCH et al, 2014).

Abordagens científicas correlacionam a qualidade do ar com o aumento de fluxo de automóveis em virtude da instalação de um complexo industrial para exploração do gás de xisto, apresentando inclusive comparações com emissões de gases em áreas urbanas. Os resultados apontam que houve um aumento das emissões de CO₂ e demais gases que ocasionam o efeito estufa (GOODMAN et al, 2016; CAREY; SIMPSON; ZIOCK, 2010).

Contudo, a elevação desses índices não pode ser atribuída somente à operação de um setor industrial. Os índices de qualidade do ar é produto de diversas atividades, inclusive das poluições próprias da urbanização (GOODMAN et al, 2016; CAREY; SIMPSON; ZIOCK, 2010).

Goodman et al (2016) ainda reflete sobre as consequências do aumento de ruídos em virtude da exploração do gás de xisto. Os autores trazem que as maiores taxas de ruídos se dão na fase inicial da operação, normalizando após algum tempo com alguns períodos de exacerbação. No entanto o estudo é inconclusivo, pois segundo os autores, a metodologia utilizada pode subestimar os impactos avaliados (GOODMAN et al., 2016).

7.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DO GÁS DE XISTO RELACIONADOS AO SOLO

Grande discussão também ocorre quanto aos efeitos danosos causados ao solo; seja na contaminação eventual pelo fluido ou na instabilidade que podem sofrer mediante o fraturamento. A contaminação do solo pode ter causa principalmente em um mau revestimento dos tubos utilizados na perfuração (ARTHUR; COLE, 2014; LIU; LIU; ZHANG, 2015; REAGAN et al., 2015; TAYLOR; MACQUAKER, 2014).

O cimento utilizado no revestimento dos dutos pode apresentar fissuras, decorrente de material de baixa qualidade ou ainda falhas no processo. Com a alta pressão de bombeamento no interior dos tubos, as fissuras aumentam ocasionando um extravasamento do fluido de fraturamento para o solo ou mesmo do próprio gás durante sua extração (ARTHUR; COLE, 2014; LIU; LIU; ZHANG, 2015; REAGAN et al., 2015; TAYLOR; MACQUAKER, 2014).

Além da possível contaminação direta do solo, os vegetais estariam sujeitos a contaminação, tanto na absorção de nutrientes presente no solo, quanto nas águas subterrâneas. Nesse ciclo os contaminantes poderiam chegar diretamente aos seres humanos e animais. Quanto à contaminação proveniente do extravasamento do fluido, vale destacar novamente que a quantidade de aditivos existentes em sua composição é relativamente baixa, sendo que somente alguns se enquadram em risco potencial à saúde ou ao meio ambiente (KHARAK et al., 2013; VIDIC, 2015; BLUMSACK, 2014).

Deve-se considerar também a capacidade de renovação do solo, com o próprio ciclo dos nutrientes. Ainda assim o que deve haver é um monitoramento constante, com análises periódicas a fim de identificar um possível contaminante ou redução de nutrientes importantes para uma boa fertilidade dos solos (CAO et al., 2016; PARNELL et al., 2016; SCHAEF et al., 2014)

Quanto à instabilidade dos solos, a discussão tem como eixo central, as fraturas causadas na rocha de xisto para liberação do gás natural impregnado. Iniciada a fratura não há um mecanismo eficaz capaz de controlar, direcionar a fratura. Dessa forma esta poderia se prolongar demasiadamente, causando algum tipo de instabilidade sísmica nos locais de exploração. Novamente o que se vê são possíveis associações e não causa direta, impossibilitando conhecer os reais efeitos

deste processo (WESTAWAY; YOUNGER, 2014; WILSON et al., 2015; DOUGLAS et al., 2011; OUADFEUL; ALIOUANE, 2014; DAVIDSON et al., 2014).

Outro argumento seria o de que em poços próximos, o prolongamento dessas fraturas poderiam encontrar outras já existentes e agravar a instabilidade do solo. Relatos e medições de eventos sísmicos estão muito mais associados às regiões onde se dá a extração do que propriamente ocasionados pelo fraturamento da rocha de xisto. Alguns dos campos de exploração nos EUA estão situados em áreas historicamente com relatos de atividades sísmicas. Assim os dados podem estar atrelados a uma condição natural e não em virtude da exploração (VON LUNEN; JENSEN; LESLIE-PANEK, 2012; CAST, et al., 2013; RUTQVIST et al., 2015).

Na realidade brasileira os eventos sísmicos são raros. Das regiões com potencial de exploração, a bacia do São Francisco, mais precisamente no norte de Minas Gerais tem registrado alguns abalos dessa natureza, porém sem reportar maiores problemas. Estudos geográficos aprofundados são necessários para se estabelecer uma relação de causa ou contribuição que essa atividade exploratória pode exercer na estabilidade dos solos. Fornecendo mais uma forma de subsidiar qualquer tomada de decisão no âmbito político-econômico.

7.4 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS

Associado à exploração do gás de xisto, há a preocupação com a manutenção da qualidade dos solos, sujeitos a contaminação durante a injeção do fluido de fraturamento ou mesmo pelo escoamento do gás através dos dutos de perfuração. Assim também as águas subterrâneas e mananciais estariam sujeitas a uma possível degradação.

Desse modo faz-se necessário uma abordagem dos principais instrumentos legais que regem o assunto, sobretudo no que diz respeito as questões ambientais envolvendo solos e recursos hídricos.

7.4.1 Aspectos legais envolvendo os solos

Associado à exploração do gás de Xisto, há a preocupação com a manutenção da qualidade dos solos que com a injeção do fluido de fraturamento ou mesmo pelo escoamento do gás através dos dutos de perfuração, pode sofrer contaminação.

A lei Nº 6938 de 31 de Agosto de 1981 dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, que além de tratar o solo como um recurso ambiental, define alguns conceitos básicos de degradação e poluição. Objetiva também a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, a qual deve garantir condições de desenvolvimento socioeconômico aos interesses da segurança nacional sem prejuízo da dignidade da vida humana (BRASIL, 1981).

A Constituição Federal de 1988 em seu artigo 20, inciso IX estabelece que são bens da União os recursos minerais, inclusive os do subsolo. Cabendo regulamentação e controle para sua manutenção e adequada exploração (BRASIL, 1988).

A Resolução Nº 420, de 28 dezembro, de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) traz valores norteadores de qualidade dos solos de acordo com as substâncias químicas ali presentes, além de estabelecer diretrizes de gerenciamento ambiental das áreas contaminadas.

A referida legislação visa assegurar que as inúmeras funções do solo sejam mantidas, tais como: manter o ciclo da água e dos nutrientes, servir como meio de produção de alimentos e outros bens primários de consumo, agir como filtro natural, tampão e meio de adsorção, degradação e transformação de substâncias químicas e organismos, proteger as águas superficiais e subterrâneas (BRASIL, 2009).

A lei Nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000 que altera a lei Nº 6938/81, classifica as atividades industriais com base no potencial de poluição e utilização de recursos ambientais, sendo que a atividade de extração e tratamento de minerais, que engloba a perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural, está classificada com risco muito alto. As atividades da indústria química, que compreende entre outras a fabricação de produtos derivados do processamento de

petróleo, de rochas betuminosas e da madeira, está classificada como risco alto (BRASIL, 2000).

Devido ao risco potencial de contaminação que a exploração do gás de xisto pode levar aos solos, atenção especial deve ser dada ao art. 14 da Res. 420/09:

Art. 14. Com vista à prevenção e controle da qualidade do solo, os empreendimentos que desenvolvem atividades com potencial de contaminação dos solos e águas subterrâneas deverão, a critério do órgão ambiental competente:

I - implantar programa de monitoramento de qualidade do solo e das águas subterrâneas na área do empreendimento e, quando necessário, na sua área de influência direta e nas águas superficiais; e

II - apresentar relatório técnico conclusivo sobre a qualidade do solo e das águas subterrâneas, a cada solicitação de renovação de licença e previamente ao encerramento das atividades (BRASIL, 2009).

Quanto aos solos, vale ressaltar que cada unidade da federação pode determinar o valor de referência de qualidade de seu solo (VRQ). Para regiões limítrofes com características semelhantes os estados devem procurar estabelecer VRQ's comuns. A definição e o controle desses índices devem estar amparados em análises sistemáticas das características físicas, químicas, físico-químicas e biológicas do solo, utilizando de metodologia amplamente reconhecida e aceita internacionalmente (BRASIL, 2009).

Em relação aos possíveis contaminantes que podem afetar os solos e águas, pode-se fazer uma estimativa das quantidades a partir da composição genérica de um fluido de fraturamento proposta por King (2012).

Partindo-se da informação de que são gastos aproximadamente de 7.800 m³ a 101.400 m³ de água no processo de fraturamento e que na composição do fluido cerca de 90% é água (CLARK; HORNER; HARTO, 2013), pode-se estimar o volume de fluido gasto (8.666,67 m³ a 112.666,7 m³) e também os volumes das demais substâncias. Com os dados das densidades teóricas das substâncias obtidas através do Handbook of Chemistry and Physics (2008), pode-se obter os valores em massa estimada envolvida no processo, como descrito no Quadro 7.

Vale ressaltar, mais uma vez que como a composição do fluido constitui-se segredo industrial, logo pode haver divergência nos valores encontrados devido a concentrações diferentes dos compostos.

Desse modo a viabilização da exploração do gás de xisto estará associada a um controle rigoroso dos níveis de contaminação a que os solos estarão sujeitos, associado às técnicas de recuperação e manutenção de sua fertilidade, o que pode alongar ou diminuir o tempo de exploração de determinado campo de produção do gás não convencional. Essas variáveis auxiliarão no julgamento da opção por essa matriz energética considerando o confronto da viabilidade econômica x implicações ambientais.

Os limites estabelecidos pela legislação estão expostos no Quadro 8, no anexo A deste trabalho.

Quadro 7 Índices máximos e mínimos dos componentes de um fluido hipotético de fraturamento.

Volume estimado de fluido de fraturamento envolvido no processo - 8.666,67 m³ a 112.666,7 m³						
Componente/tipo de aditivo	% em Volume	Densidade teórica (g/cm³)	V_{min} (m³)	V_{max} (m³)	M_{min} (Kg)	M_{max} (Kg)
Água	90	1,00	7800,003	101400	7800003	101400000
Areia	9,5	1,50	823,3337	10703,33	1235000,475	16055000
Ácido Clorídrico	0,12	1,18	10,4	135,2	12272,00472	159536
Poliacrilamida	0,09	1,10	7,800003	101,4	8580,0033	111540
Isopropanol	0,09	0,9611	7,800003	101,4	7496,582883	97455,54
Cloreto de potássio	0,06	1,988	5,200002	67,6	10337,60398	134388,8
Hidroximetilcelulose	0,06	1,831	5,200002	67,6	9521,203662	123775,6
Etilenoglicol	0,4	1,108	34,66668	450,6667	38410,68144	499338,6667
Carbonato de sódio	0,01	2,54	0,866667	11,26667	2201,33418	28617,33333
Persulfato de amônia	0,01	1,98	0,866667	11,26667	1716,00066	22308
Sais de borato (Borato de sódio)	0,007	2,46	0,606667	7,886667	1492,400574	19401,2
Ácido Cítrico	0,004	1,665	0,346667	4,506667	577,200222	7503,6

N-Dimetilformamida	0,002	0,944	0,173333	2,253333	163,6267296	2127,146667
Glutaraldeído	0,001	1,06	0,086667	1,126667	91,866702	1194,266667

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

7.4.2 Aspectos legais envolvendo os recursos hídricos

Outro ponto de grande debate referente à exploração do gás de xisto está associado à possível contaminação que pode haver aos recursos hídricos, especialmente na etapa do fraturamento hidráulico. Logo faz-se necessário uma contextualização do entendimento jurídico sobre o assunto para compreender a que cenário o Brasil estaria sujeito.

A Constituição Federal de 1988 estabelece em seu artigo 20, inciso III que são bens da União todos os lagos, rios e correntes de água em seu território, que componham divisas entre estados ou países, estendendo-se ou provendo-se de território estrangeiro, bem como as margens e praia fluviais (BRASIL, 1988).

A preocupação da União com esse recurso natural se expressa através da Lei Nº 9.433 de 08 e Janeiro de 1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, que destaca a importância dos recursos hídricos e o compromisso do Estado em assegurar a preservação e disponibilidade de água para a população e também para as gerações futuras, assim expressos nos artigos 1º e 2º:

Art. 1º A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos:

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Art. 2º São objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

- I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;

III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997).

Tal preocupação também está evidente nos mecanismos de controle e repressão a quem causar qualquer tipo de dano ou prejuízo aos recursos hídricos. Como se vê no artigo 49, inciso II da citada Lei: considera-se infração das normas de utilização de recursos hídricos a implantação de empreendimentos, que se utilizem deste recurso causando alteração na disponibilidade de água quantitativamente ou qualitativamente, sem autorização dos órgãos ou entidades competentes (BRASIL, 1997).

Outra ferramenta jurídica de repressão é a Lei Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 que dispõe sobre as sanções penais e administrativas de condutas lesivas ao meio ambiente. Nela o legislador determina pena de reclusão de um a quatro anos, além de multa, para quem causar poluição de qualquer natureza em níveis que causem danos à saúde humana, ou provoquem a mortandade de animais ou destruição significativa da flora. Se o crime causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade a pena será de um a cinco anos (BRASIL, 1998).

Quanto às substâncias que podem vir a causar a contaminação das águas subterrâneas, pode-se amparar nos mesmos instrumentos legais citados para as questões do solo, uma vez que também se aplicam às águas. Assim a Lei Nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000 e a Res. 420/09 do CONAMA podem nortear a análise e posterior julgamento da opção de exploração dessa matriz energética, frente aos impactos ambientais advindos desse tipo de atividade industrial.

7.5 PERSPECTIVA DA EXPLORAÇÃO DO GÁS DE XISTO NO BRASIL

No Brasil as possíveis reservas coincidem com extensas bacias hidrográficas. A confirmação dessas correlações é de extrema importância para se preservar os recursos hídricos, vistos como um bem mais precioso que o recurso energético aqui estudado. O Brasil possui instrumentos legais bastante contundentes que asseguram uma preservação dos recursos hídricos, Leis, Resoluções do CONAMA e

o próprio Código Penal estabelecem mecanismos de repressão ao mau uso dos recursos hídricos.

Esses instrumentos jurídicos norteariam uma possível exploração ou poderiam fazer-se constar neles essa modalidade de utilização de recurso hídrico. Em uma possível exploração, um esquema de monitoramento constante dos níveis poluição das águas deve ser adotado, junto com uma fiscalização eficaz. Como dito anteriormente a definição de meios legais deve estar bastante coesa para minimizar os riscos à população e ao meio ambiente.

Em termos de legislação o Brasil ainda não possui nenhum instrumento jurídico que regulamente a extração do gás de xisto, especialmente quanto ao processo de fraturamento hidráulico.

Discussões sobre o tema ainda são bastante modestas em território brasileiro, o que deve ser estimulado com o intuito de se obter diferentes entendimentos e pontos de vistas. A importância de tais debates está fixada no fato de que o país pode se destacar como grande produtor.

Outro ponto importante, e que requer ampla discussão, diz respeito aos locais apontados como grandes reservas exploráveis. Nessas regiões, populações menos favorecidas econômica e socialmente podem estar instaladas. Uma interferência na qualidade, fornecimento de água ou alterações das características do solo, podem potencializar os impactos sociais.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O que se percebe é que ainda há muitas incertezas em relação ao assunto. Nos possíveis impactos ambientais causados pelo gás de xisto, grande parte dos estudos é inconclusivo ou não conseguem estabelecer uma relação direta do evento estudado com o processo de extração, como é o caso dos abalos sísmicos.

Essa incerteza se torna ainda maior quando o foco é o fluido de fraturamento. Mesmo sabendo-se que as quantidades de aditivos são bem pequenas, o desconhecimento da composição do fluido ou mesmo a possibilidade dele assumir diferentes formulações de acordo com a área de interesse de exploração torna a matéria ainda delicada. Os riscos advindos das interações das substâncias nele presentes com a água, o solo ou mesmo o ar são muito amplos. O efeito crônico da exposição e contato ainda é uma incógnita.

Fazendo o debate frente a realidade brasileira, o que não deve acontecer é um sacrifício dos recursos hídricos, uma degradação do solo ou perda da qualidade do ar em prol de uma fonte de recurso energética pouco estudada no país. Deve-se destacar que existem fontes de recursos energéticos renováveis a serem exploradas, com estudos concisos sobre os impactos ambientais, como a energia eólica e a solar. O aspecto financeiro também deve ser levando em conta, lembrando que atualmente o Brasil não possui uma independência no que diz respeito ao gás natural, havendo grandes importações da Bolívia.

As questões legais devem ser mais bem trabalhadas, com leis específicas sobre o assunto, abordando todos os aspectos relacionados aos impactos ambientais, sociais, políticos e econômicos, fazendo com que o assunto tenha ampla discussão nos mais variados setores, principalmente nas questões técnicas.

Dessa forma devem ser preenchidas todas as lacunas do conhecimento, para subsidiar a tomada de decisão sobre a opção de exploração do gás de xisto, não se esquecendo de que a recuperação de um meio do meio ambiente degradado pode ser muito mais oneroso do que os ganhos por ele proporcionados. A situação piora se esses danos forem irreversíveis.

O presente trabalho contribui ao apontar o construto da literatura até o presente momento. No entanto, como se percebe, outros estudos são necessários,

utilizando-se de diferentes metodologias e instrumentos, para averiguar os impactos ambientais relativos ao processo de extração do gás de xisto.

Apesar da grande quantidade de produção, ainda não foi possível concluir quais os reais impactos desta atividade. Além disso, a necessidade de fontes de energia impulsiona novas pesquisas, apontando um vasto campo a ser explorado pela ciência.

REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos hídricos no Brasil. Brasília-DF. Maio, 2015

ANA, Agência Nacional de Águas. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília-DF. Maio, 2005.

ARTHUR, M. A.; COLE, D. R.. Unconventional Hydrocarbon Resources: Prospects and Problems. **Elements**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.257-264, 1 ago. 2014. GeoScienceWorld. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.10.4.257>.

BĂDILEANU, Marina et al. Shale Gas Exploitation– Economic Effects and Risks. **Procedia Economics And Finance**, [s.l.], v. 22, p.95-104, 2015. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)00231-2](http://dx.doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00231-2).

BARANZELLI, Claudia et al. Scenarios for shale gas development and their related land use impacts in the Baltic Basin, Northern Poland. **Energy Policy**, [s.l.], v. 84, p.80-95, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.032>.

BLUMSACK, S.. Dash for Gas, 21st-Century Style! **Elements**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.265-270, 1 ago. 2014. GeoScienceWorld. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.10.4.265>.

BOUDET, H. et al. “Fracking” controversy and communication: Using national survey data to understand public perceptions of hydraulic fracturing. *Energy Policy* 65 (2014) 57 – 67, Fevereiro, 2014.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da Republica Federativa do Brasil. Brasília, 05 de Outubro 1988.

BRASIL. Lei Nº 6938 de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, 31 de Agosto de 1981.

BRASIL. Lei nº 9.433 de 08 e Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 08 e Janeiro de 1997.

BRASIL. Lei Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas de condutas lesivas ao meio ambiente. Brasília, 12 de fevereiro de 1998.

BRASIL. Lei Nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000. Brasília, 27 de dezembro de 2000.

BRASIL. Resolução Nº 420, de 28 dezembro, de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, 28 dezembro de 2009.

- BRYNDZIA, L. T.; BRAUNSDORF, N. R.. From Source Rock to Reservoir: The Evolution of Self-Sourced Unconventional Resource Plays. **Elements**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.271-276, 1 ago. 2014. GeoScienceWorld. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.10.4.271>
- BUNCH, A.g. et al. Evaluation of impact of shale gas operations in the Barnett Shale region on volatile organic compounds in air and potential human health risks. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 468-469, p.832-842, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.080>.
- CAO, Chunhui et al. Geochemical characteristics and implications of shale gas from the Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China. **Journal Of Natural Gas Geoscience**, [s.l.], p.1-8, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnggs.2016.05.001>.
- CAREY, James W.; SIMPSON, Wendy S; ZIOCK, Hans-joachim. Shale-Gas Experience as an Analog for Potential Wellbore Integrity Issues in CO2 Sequestration. **National Energy Technology Laboratory: Los Alamos National Laboratory**,Pittsburgh,Pennsylvania,, p.1-45, dez. 2010.
- CAST, J.C et al. Integration of Water Resource Models with Fayetteville Shale Decision Support and Information System, Final Technical Report, October 01, 2009-September 30, 2013.
- CASTRO, A. O. S. Seleção de poços de petróleo para a operação de fraturamento hidráulico: uma comparação entre sistemas – Fuzzy- Genético e neuro-fuzzy. [Rio de Janeiro] 2004 vii, 172 p. 29,7cm(COPPE/UFRJ, D.sc., Engenharia de Produção, 2004) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- CLARK, C. E.; HORNER, R. M.; HARTO, C. B. Life Cycle Water Consumption for Shale Gas and Conventional Natural Gas. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 20, p. 11829-11836, 2013/10/15 2013.
- COGO, S.L. Um estudo dos subprodutos e rejeitos do Xisto por Ressonância Paramagnética Eletrônica. Julho, 2008. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa-PR. Julho, 2008.
- CRC Handbook of Chemistry and Physics, 89th ed.; Lide, D.R., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2008.
- DAVIDSON, Casie L. et al. Modelling the Deployment of CO2 Storage in U.S. Gas-bearing Shales. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 63, p.7272-7279, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.763>.
- DOUGLAS, Craig C. et al. Intelligent fracture creation for shale gas development. **Procedia Computer Science**, [s.l.], v. 4, p.1745-1750, 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.189>.

ENERGY API, 2010, "American Hydraulic Fracturing: Unlocking America's Natural Gas Resources

EZEKWE, N. Petroleum Reservoir Engineering Practice. Pearson Education, 2011. ISBN 9780132485173.

FERNANDES, A. P. C. Potencial de riscos ambientais com ênfase aos recursos hídricos decorrentes da exploração do *shale gas* e medidas mitigadoras. Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Eletrotécnica e Energia. São Paulo, 2014.

FORNETTI, V. Um poço de esperança verde. Exame. 47: 102+ p. 2013.

FOSTER, S. et al.. The Guarani Aquifer Initiative – Towards realistic groundwater management in a transboundary context. Case profile number 9. In. Sustainable groundwater management: Lessons from practice. GW-MATE, The World Bank, Water Partnership Program. 2009

GANONG LH. Integrative reviews of nursing research. Res Nurs Health, v. 10, n. 1, pp:1-11, 1987.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. FIESP, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Orientações para a utilização de águas subterrâneas no estado de São Paulo. São Paulo-SP. Setembro, 2005.

GOODMAN, Paul S. et al. Investigating the traffic-related environmental impacts of hydraulic-fracturing (fracking) operations. **Environment International**, [s.l.], v. 89-90, p.248-260, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.002>.

GROTHER, V. P. et al. Hydraulic fracturing physical simulation: na analysis of crosslinked fluids leakoff. Rio Oil & Gas Expo and Conference. Rio de Janeiro, Brasil. Outubro, 2000. Instituto Brasileiro de Petróleo.

HAMMOND, Geoffrey P.; O'GRADY, Áine. Indicative energy technology assessment of UK shale gas extraction. **Applied Energy**, [s.l.], p.1-12, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.024>.

HAMMOND, Geoffrey P.; O'GRADY, Áine; PACKHAM, David E.. Energy Technology Assessment of Shale Gas 'Fracking' – A UK Perspective. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 75, p.2764-2771, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.526>.

JACQUET, J.B.,. Energy Boomtowns & Natural Gas: Implications for Marcellus Shale Local Governments & Rural Communities (No. NERCRD Rural Development Paper No. 43). Northeast Regional Center for Rural Development, The Pennsylvania State University, University Park/PA, 2009.

KHARAK, Y.k. et al. The Energy-Water Nexus: Potential Groundwater-Quality Degradation Associated with Production of Shale Gas. **Procedia Earth And Planetary Science**, [s.l.], v. 7, p.417-422, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2013.03.132>.

KING, G.E. "Hydraulic Fracturing 101: What every representative, environmentalist, regulator, reporter, investor, university researcher, neighbor and engineer should know about estimating frac risk and improving frac performance in unconventional gas and oil wells," SPE Paper 152596, apresentado na SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, TX. 6-8 February 2012.

LAGE, E. S. et al. Gás não convencional: experiência americana e perspectivas para o mercado brasileiro. BNDES Setorial, v. 37, n. Petróleo e gás, p. 33-88, 03/2013.

LECHTENBÖHMER, S. et al. Impacto da extração de gás e óleo de xisto no ambiente e na saúde humana. Parlamento Europeu. Departamento temático de Políticas Econômicas e Científicas. Bélgica-Bruxelas. Junho , 2011.

LIU, Naizhen; LIU, Ming; ZHANG, Shicheng. Flowback patterns of fractured shale gas wells. **Natural Gas Industry B**, [s.l.], v. 2, n. 2-3, p.247-251, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ngib.2015.07.017>.

MCGLADE, Christophe; SPEIRS, Jamie; SORRELL, Steve. Methods of estimating shale gas resources – Comparison, evaluation and implications. **Energy**, [s.l.], v. 59, p.116-125, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.031>.

MEHANY, Mohammed S. Hashem M.; GUGGEMOS, Angela. A Literature Survey of the Fracking Economic and Environmental Implications in the United States. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 118, p.169-176, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.415>.

MIDDLETON, Richard S. et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂. **Applied Energy**, [s.l.], v. 147, p.500-509, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.023>.

NAVARRO, Angel de La Vega; VILLEGAS, Jaime Ramírez. El Gas de Lutitas (Shale Gas) en México. Recursos, explotación, usos, impactos1. **Economía Unam**, [s.l.], v. 12, n. 34, p.79-105, jan. 2015. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1665-952x\(15\)30006-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1665-952x(15)30006-2).

OUADFEUL, Sid-ali; ALIOUANE, Leila. Shale Gas Reservoirs Characterization Using Neural Network. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 59, p.16-21, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.343>.

PARNELL, John et al. Selenium enrichment in Carboniferous Shales, Britain and Ireland: Problem or opportunity for shale gas extraction?. **Applied**

Geochemistry, [s.l.], v. 66, p.82-87, mar. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.12.008>.

PAUTASSO, M. Ten Simple Rules for Writing a Literature Review. Bourne PE, ed. *PLoS Computational Biology*, v. 9, n. 7, 2013. Disponível em:
 <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3715443/pdf/pcbi>>. Acesso em: Jun 2016.

PETROBRÁS. Oferta de Gás Natural. Disponível em:
<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/oferta-de-gas-natural/> . Acesso em 30 Set 2015a.

_____. Unidade de Industrialização do Xisto (SIX). Disponível em:
<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/unidade-de-industrializacao-do-xisto-six.htm>. Acesso em 31 Set 2015b.

REAGAN, Matthew T. et al. Numerical simulation of the environmental impact of hydraulic fracturing of tight/shale gas reservoirs on near-surface groundwater: Background, base cases, shallow reservoirs, short-term gas, and water transport. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 51, n. 4, p.2543-2573, abr. 2015. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/2014wr016086>.

RUTQVIST, Jonny et al. Modeling of Fault Activation and Seismicity by Injection Directly into a Fault Zone associated with Hydraulic Fracturing of Shale-gas Reservoirs. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, California, Usa, p.1-23, 2015.

SANTANA, V.C. Obtenção e estudo das propriedades de um novo fluido de fraturamento hidráulico biocompatível. UFRN- Recife, PE, 2013.

SANTOS, M. M. D.; MATAI, P. H. L. D. S. A importância da industrialização do xisto brasileiro frente ao cenário energético mundial. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 63, p. 673-678, 2010.

SANTOS, P. R. D., CORADESQUI, S. Análise de viabilidade econômica da produção de *shale gas*: um estudo de caso em *Fayetteville*. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2013.

SCHAEF, H. Todd et al. CO2 Utilization and Storage in Shale Gas Reservoirs: Experimental Results and Economic Impacts. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 63, p.7844-7851, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.819>.

STAMFORD, Laurence; AZAPAGIC, Adisa. Life cycle environmental impacts of UK shale gas. **Applied Energy**, [s.l.], v. 134, p.506-518, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.063>.

STRINGFELLOW, W. T. et al. Physical, chemical, and biological characteristics of compounds used in hydraulic fracturing. *Journal of Hazardous Materials* 275 (2014) 37–54

SUN, Renjin; WANG, Zhenjie. A comprehensive environmental impact assessment method for shale gas development. *Natural Gas Industry B*, [s.l.], v. 2, n. 2-3, p.203-210, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ngib.2015.07.012>.

TAGLIAFERRI, C.; LETTIERI, P.; CHAPMAN, C.. Life Cycle Assessment of Shale Gas in the UK. *Energy Procedia*, [s.l.], v. 75, p.2706-2712, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.685>.

TAIOLI, F. Gás de Folhelho no Brasil – Perspectivas e Dúvidas. Anais da 65ª Reunião Anual da SBPC – Recife, PE, Julho/2013.

TAYLOR, K. G.; MACQUAKER, J. H. S.. Diagenetic alterations in a silt- and clay-rich mudstone succession: an example from the Upper Cretaceous Mancos Shale of Utah, USA. *Clay Minerals*, [s.l.], v. 49, n. 2, p.213-227, 1 maio 2014. Mineralogical Society. <http://dx.doi.org/10.1180/claymin.2014.049.2.05>.

VENGOSH, Avner et al. The Effects of Shale Gas Exploration and Hydraulic Fracturing on the Quality of Water Resources in the United States. *Procedia Earth And Planetary Science*, [s.l.], v. 7, p.863-866, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2013.03.213>.

VIDIC, Radisav D.. Sustainable Management of Flowback Water during Hydraulic Fracturing of Marcellus Shale for Natural Gas Production. **U.s. Department Of Energy National Energy Technology Laboratory 626 Cochran Mill Road: Final Technical Report**, Pittsburgh, PA, p.01-201, abr. 2015.

VILAR, P. C. Gestão das águas subterrâneas e o Aquífero Guarani. V Encontro Nacional da Anppas 4 a 7 de outubro de 2010. Florianópolis - SC – Brasil.

VON LUNEN, Eric; JENSEN, Stephen; LESLIE-PANEK, Jennifer. Strategies in geophysics for estimation of unconventional resources. *The Leading Edge*, [s.l.], v. 31, n. 9, p.1090-1097, set. 2012. Society of Exploration Geophysicists. <http://dx.doi.org/10.1190/tle31091090.1>.

WESTAWAY, R.; YOUNGER, P. L.. Quantification of potential macroseismic effects of the induced seismicity that might result from hydraulic fracturing for shale gas exploitation in the UK. *Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology*, [s.l.], v. 47, n. 4, p.333-350, 11 nov. 2014. Geological Society of London. <http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2014-011>.

WILSON, Miles P. et al. Anthropogenic earthquakes in the UK: A national baseline prior to shale exploitation. *Marine And Petroleum Geology*, [s.l.], v. 68, p.1-17, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.08.023>.

YANG, Hong et al. Water Requirements for Shale Gas Fracking in Fuling, Chongqing, Southwest China. **Energy Procedia**,[s.l.], v. 76, p.106-112, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.862>.

ZIEMKIEWICZ, Paul et al. Zero Discharge Water Management for Horizontal Shale Gas Well Development. **West Virginia Water Research Institute: West Virginia University**, Morgantown,, p.1-46, jun. 2012.

ANEXO A

Quadro 8 Anexo II da Resolução 420/09 do CONAMA, que apresenta os limites permitidos para contaminantes em solos e água.

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg-1 de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L-1)
		Referência de qualidade	Prevenção	Investigação			Investigação
				Agrícola APMáx	Residencial	Industrial	
Inorgânicos							
Alumínio	7429-90-5	E	-	-	-	-	3.500**
Antimônio	7440-36-0	E	2	5	10	25	5*
Arsênio	7440-38-2	E	15	35	55	150	10*
Bário	7440-39-3	E	150	300	500	750	700*
Boro	7440-42-8	E	-	-	-	-	500
Cádmio	7440-48-4	E	1,3	3	8	20	5*
Chumbo	7440-43-9	E	72	180	300	900	10*
Cobalto	7439-92-1	E	25	35	65	90	70
Cobre	7440-50-8	E	60	200	400	600	2.000*
Cromo	7440-47-3	E	75	150	300	400	50*
Ferro	7439-89-6	E	-	-	-	-	2.450**
Manganês	7439-96-5	E	-	-	-	-	400**
Mercúrio	7439-97-6	E	0,5	12	36	70	1*
Molibdênio	7439-98-7	E	30	50	100	120	70
Níquel	7440-02-0	E	30	70	100	130	20
Nitrato (como N)	797-55-08	E	-	-	-	-	10.000*
Prata	7440-22-4	E	2	25	50	100	50
Selênio	7782-49-2	E	5	-	-	-	10*
Vanádio	7440-62-2	E	-	-	-	1000	-
Zinco	7440-66-6	E	300	450	1.000	2.000	1.050**
Hidrocarbonetos aromáticos voláteis							
Benzeno	71-43-2	na	0,03	0,06	0,08	0,15	5*
Estireno	100-42-5	na	0,2	15	35	80	20*
Etilbenzeno	100-41-4	na	6,2	35	40	95	300**
Tolueno	108-88-3	na	0,14	30	30	75	700**
Xilenos	1330-20-7	na	0,13	25	30	70	500**
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos							
Antraceno	07/12/20	na	0,039	-	-	-	-
Benzo(a)antraceno	56-55-3	na	0,025	9	20	65	1,75
Benzo(k)fluoranteno	207-06-9	na	0,38	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perileno	191-24-2	na	0,57	-	-	-	-
Benzo(a)pireno	50-32-8	na	0,052	0,4	1,5	3,5	0,7*
Criseno	218-01-9	na	8,1	-	-	-	-
Dibenzo(a,h)antraceno	53-70-3	na	0,08	0,15	0,6	1,3	0,18

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg-1 de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L-1)
		Referência de qualidade	Prevenção	Investigação			Investigação
				Agrícola APMáx	Residencial	Industrial	
Fenantreno	85-01-8	na	3,3	15	40	95	140
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	193-39-5	na	0,031	2	25	130	0,17
Naftaleno	91-20-3	na	0,12	30	60	90	140
Benzenos clorados							
Clorobenzeno (Mono)	108-90-7	na	0,41	40	45	120	700**
1,2-Diclorobenzeno	95-50-1	na	0,73	150	200	400	1000
1,3-Diclorobenzeno	541-73-1	na	0,39	-	-	-	-
1,4-Diclorobenzeno	106-46-7	na	0,39	50	70	150	300
1,2,3-Triclorobenzeno	87-61-6	na	0,01	5	15	35	(a)*
1,2,4-Triclorobenzeno	120-82-1	na	0,011	7	20	40	(a)*
1,3,5-Triclorobenzeno	108-70-3	na	0,5	-	-	-	(a)*
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	634-66-2	na	0,16	-	-	-	-
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	634-90-2	na	0,01	-	-	-	-
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	95-94-3	na	0,01	-	-	-	-
Hexaclorobenzeno	118-74-1	na	0,003(3)	0,005	0,1	1	1*
Etanos clorados							
1,1-Dicloroetano	75-34-2	na	-	8,5	20	25	280
1,2-Dicloroetano	107-06-2	na	0,075	0,15	0,25	0,50	10*
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	na	-	11	11	25	280
Etenos clorados							
Cloreto de vinila	75-01-4	na	0,003	0,005	0,003	0,008	5*
1,1-Dicloroetano	75-35-4	na	-	5	3	8	30*
1,2-Dicloroetano - cis	156-59-2	na	-	1,5	2,5	4	(b)
1,2-Dicloroetano - trans	156-60-5	na	-	4	8	11	(b)
Tricloroetano – TCE	79-01-6	na	0,0078	7	7	22	70*
Tetracloroetano – PCE	127-18-4	na	0,054	4	5	13	40*
Metanos clorados							
Cloreto de Metileno	75-09-2	na	0,018	4,5	9	15	20*
Clorofórmio	67-66-3	na	1,75	3,5	5	8,5	200
Tetracloroetano de carbono	56-23-5	na	0,17	0,5	0,7	1,3	2*
Fenóis clorados							
2-Clorofenol (o)	95-57-8	na	0,055	0,5	1,5	2	10,5
2,4-Diclorofenol	120-83-2	na	0,031	1,5	4	6	10,5
3,4-Diclorofenol	95-77-2	na	0,051	1	3	6	10,5
2,4,5-Triclorofenol	95-95-4	na	0,11	-	-	-	10,5
2,4,6-Triclorofenol	88-06-2	na	1,5	3	10	20	200*
2,3,4,5-Tetraclorofenol	4901-51-3	na	0,092	7	25	50	10,5
2,3,4,6-Tetraclorofenol	58-90-2	na	0,011	1	3,5	7,5	10,5
Pentaclorofenol (PCP)	58-90-2	na	0,16	0,35	1,3	3	9*

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg-1 de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L-1)
		Referência de qualidade	Prevenção	Investigação			Investigação
				Agrícola APMax	Residencial	Industrial	
Fenóis não clorados							
Cresóis	-	na	0,16	6	14	19	175
Fenol	108-95-2	na	0,20	5	10	15	140
Ésteres ftálicos							
Dietilexil ftalato (DEHP)	117-81-7	na	0,6	1,2	4	10	8
Dimetil ftalato	131-11-3	na	0,25	0,5	1,6	3	14
Di-n-butil ftalato	84-74-2	na	0,7	-	-	-	-
Pesticidas organoclorados							
Aldrin	309-00-2	na	0,015	0,003	0,01	0,03	(d)*
Dieldrin	60-57-1	na	0,043	0,2	0,6	1,3	(d)*
Endrin	72-20-8	na	0,001	0,4	1,5	2,5	0,6*
DDT	50-29-3	na	0,010	0,55	2	5	(c)*
DDD	72-54-8	na	0,013	0,8	3	7	(c)*
DDE	72-55-9	na	0,021	0,3	1	3	(c)*
HCH beta	319-85-7	na	0,011	0,03	0,1	5	0,07
HCH – gama (Lindano)	58-89-9	na	0,001	0,02	0,07	1,5	2*
PCBs							
TOTAL	-	na	0,0003 (3)	0,01	0,03	0,12	3,5

(1) – Para comparação com valores orientadores, utilizar as recomendações dos métodos 3050b (exceto para o elemento mercúrio) ou 3051 da USEPA–SW–846 ou outro procedimento equivalente, para digestão ácida de amostras de solos na determinação das substâncias inorgânicas por técnicas espectrométricas.

E - a ser definido pelo Estado.

na - não se aplica para substâncias orgânicas.

(a) somatória para triclorobenzenos = 20 µg.L-1.

(b) somatória para 1,2 dicloroetenos; = 50 µg.L-1.

(c) somatória para DDT-DDD-DDE = 2 µg.L-1.

(d) somatória para Aldrin e Dieldrin = 0,03 µg.L-1.

* Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde definidos na Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 3).

** Valores calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta Resolução. Diferem dos padrões de aceitação para consumo humano definidos na Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 5) e dos valores máximos permitidos para consumo humano definidos no Anexo I da Resolução CONAMA nº 396/2008.