



**ESTUDO SOBRE A OCORRÊNCIA DE NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL, ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE
CARLOS BARBOSA – RS**

Porto Alegre, 2016

KALIL LUCCA EL HAJJAR

**ESTUDO SOBRE A OCORRÊNCIA DE NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL, ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE
CARLOS BARBOSA – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde

Supervisor: Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato

Porto Alegre, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Lucca El Hajjar, Kalil

Estudo sobre a ocorrência de nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral, área urbana do município de Carlos Barbosa ? RS.

/ Kalil Lucca El Hajjar. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016.
[55 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Gustavo Barbosa Athayde
Coorientador(es):Pedro Antonio Roehe Reginato

1. Nitrato. 2. Uso e ocupação do solo. 3. Carlos Barbosa. 4. Sistema Aquífero Serra Geral. I. Título. CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**ESTUDO DO NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL, ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE CARLOS BARBOSA – RS**" elaborado por "KALIL LUCCA EL HAJJAR", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. José Luiz Flores Machado

Prof. Dr. Marcos Alexandre Freitas

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa

Dedico este trabalho aos meus pais Sandra Maria Lucca El Hajjar e Sleiman El Hajjar.

AGRADECIMENTOS

Durante os anos de graduação em Geologia e elaboração deste trabalho, muitas pessoas foram importantes e a elas se direcionam os meus agradecimentos:

Sobretudo, agradeço aos meus pais pelo incentivo e ensinamentos dedicados ao longo dos meus 27 anos de vida.

À minha irmã que me acompanha desde o meu nascimento.

Aos meus amigos Eduardo Trein Salgado, Marcelo Barrios, Maurício Aliprandini, João Vitor, Débora Sayuri Watanabe, Débora Baú, Juliana Job, Tamires Valençoella, Hemeli, Danilo, Tael Dreyer e todos outros. Agradeço pelos bons momentos ao lado de vocês.

Ao meu orientador, Professor Gustavo Barbosa Athayde pela confiança, dedicação e ensinamentos depositados ao longo do projeto.

Ao IPH por disponibilizar suas análises físico-químicas, fundamentais para a realização do trabalho.

Ao professor Pedro Antônio Reginato pela grande ajuda no início deste projeto e por sempre se disponibilizar em ajudar.

Aos professores de geologia da UFRGS, particularmente aos que realmente se importam com o ensino dos alunos e que colaboram com mudanças positivas no IGEO, visando o universal e não seus projetos de pesquisas somente.

Ao YouTube pelos vídeos explicativos sobre os softwares utilizados neste trabalho. Principalmente ao canal Processamento Digital, um dos mais explicativos dentre os vários canais visitados.

RESUMO

O nitrato é o contaminante de maior frequência nas águas subterrâneas. Na área de estudo, região urbana do município de Carlos Barbosa, Rio Grande do Sul, o monitoramento físico-químico semanal de 15 poços tubulares profundos, realizado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) identificou nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). O município de Carlos Barbosa é abastecido exclusivamente pelas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral mediante poços tubulares profundos. Na área urbana do município, o sistema de saneamento in situ foi utilizado por um longo período, aproximadamente entre os anos de 1912 e 2006. Sendo esse sistema uma das principais fontes de contaminação por nitrato, o presente estudo teve como objetivo principal avaliar a ocorrência do nitrato no SASG na área urbana do município de Carlos Barbosa. O trabalho foi elaborado a partir das análises químicas realizadas pelo monitoramento semanal, em um período de 6 meses, de 15 poços pertencentes à CORSAN, que estão distribuídos na área urbana de Carlos Barbosa. As atividades realizadas compreenderam o tratamento estatístico dos dados químicos, a elaboração de mapas de isoconcentração de nitrato e a espacialização das concentrações em um mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa, em um período de 1960 a 2006. O trabalho constatou que há uma relação entre as concentrações de nitrato e o uso e ocupação do solo na região. Os maiores valores são encontrados nas porções mais antigas da cidade, onde os sistemas de saneamento in situ foram ativos por mais tempo. Além disso, identificou-se que a pluviosidade foi um fator que influenciou nas variações das concentrações de nitrato, sugerindo que as recargas no aquífero estejam diluindo a carga do contaminante.

Palavras-Chave: Nitrato. Uso e ocupação do solo. Carlos Barbosa. Sistema Aquífero Serra Geral.

ABSTRACT

Nitrate is the most frequent groundwater contaminant. In the study area, urban area of the municipality of Carlos Barbosa, Rio Grande do Sul, the weekly physico-chemical monitoring of 15 deep tubular wells, conducted by the Hydraulic Research Institute (HRI), identified some unusual nitrogen values in the groundwater of the Serra Geral Aquifer System (SGAS). The municipality of Carlos Barbosa is supplied in ground water from the Serra Geral Aquifer System in deep tubular wells. In the urban area of the municipality, the in situ sanitation system was used for a long period, between the years of 1912 and 2006. Being this system of main sources of contamination by nitrate, the main objective of this study was to evaluate the occurrence of nitrate in ASSG in the urban area of the municipality of Carlos Barbosa. The work was elaborated from chemical analyzes carried out by weekly monitoring, in a period of 6 months, of 15 wells belonging to CORSAN, which are distributed in the urban area of Carlos Barbosa. The activities carried out included the statistical analysis of the chemical data, a mapping of nitrogen isoconcentration and concentration spatialization in a map of the evolution of the urban perimeters of Carlos Barbosa, during a period from 1960 to 2006. The study found that there is a relationship between nitrate concentrations and the use and occupation of the soil in the region. The highest values are found in the oldest portion of the city, where in situ sanitation systems have been active for a longer time. In addition, it was identified that rainfall was a factor that influenced the variations of nitrate concentrations, suggesting that the refills in the aquifer are diluting the contaminant load.

Keywords: Nitrate. Use and occupation of the soil. Carlos Barbosa. Serra Geral Aquifer System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização do município de Carlos Barbosa e sua área urbana, onde foi feito o presente estudo. O município localiza-se a noroeste do estado do Rio Grande do Sul.....	14
Figura 2 – Mapa Geológico do Rio Grande do Sul ilustrando as duas unidades litológicas identificadas no município de Carlos Barbosa.....	16
Figura 3 – Mapa hidrogeológico destacando-se o Sistema Aquífero Serra Geral no RS e suas subdivisões entre SASG I, SASG II e SASG III. A subdivisão foi baseada de acordo com a produtividade do aquífero.....	17
Figura 4 – Mapa da capacidade de infiltração dos solos. Evidencia-se que na área de estudo predominam solos com boa capacidade de infiltração.....	19
Figura 5 – Mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa entre os anos de 1961 e 2006. Mapa modificado da Prefeitura Municipal de Carlos Barbosa.....	24
Figura 6 – Percentis e seus valores utilizados na produção dos mapas de isoconcentração de nitrato.....	28
Figura 7 – Mapa de satélite da região urbana de Carlos Barbosa e a distribuição dos 15 poços na área de estudo.....	33
Figura 8 – Mapa potenciométrico da área de estudo. Observa-se duas direções preferenciais de fluxo a partir da zona de maior carga hidráulica, uma para sudoeste e outra para sudeste.....	34
Figura 9 – Mapa de isoconcentração de nitrato referente às medianas totais, sobreposto ao mapa potenciométrico.....	35
Figura 10 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 1 e 6. Observa-se baixos valores de nitrato da semana 1 à semana 5 e um aumento nas concentrações a partir da semana 6.....	37
Figura 11 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 7 e 12. Observa-se um aumento nas concentrações de todos os poços marcado por áreas mais extensas acima do percentil 75.....	38
Figura 12 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 13 e 18.....	39

Figura 13 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 19 e 24. O mesmo padrão que ocorreu entre a semana 6 e 9 volta a ocorrer entre a semana 19 e 21.....	40
Figura 14 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 25 e 27.....	41
Figura 15 – Gráfico que relaciona as medianas semanais com as pluviometrias semanais.....	44
Figura 16 – Gráfico que relaciona as medianas mensais de nitrato com as pluviometrias mensais.....	44
Figura 17 – Gráfico contendo as relações entre as concentrações de nitrato e a pluviometria dos 15 poços individualmente.....	45
Figura 18 – Mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa sobreposto ao mapa das medianas totais de nitrato. Evidencia-se que os poços de maiores medianas encontram-se nos perímetros mais antigos da cidade.....	47
Figura 19 – Imagem de satélite da área de estudo sobreposta ao mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa. Os poços CB03, CB34, CB06 e CB09 apresentam as medianas de nitrato mais elevadas e encontram-se em áreas mais densamente povoadas comparados aos poços de menores medianas.....	48
Figura 20 – Mapa das medianas de nitrato sobreposto ao mapa potenciométrico e a localização do cemitério da cidade.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultado das análises estatísticas para cada poço e para o total da amostragem.....	30
Quadro 2 – Quadro contendo os resultados das análises químicas semanais, dados estatísticos e pluviométricos dos 3 primeiros meses de análises. Estão destacados em vermelho, os valores máximos e mínimos para cada semana.....	31
Quadro 3 – Quadro contendo os resultados das análises químicas semanais, dados estatísticos e pluviométricos do quarto ao último mês de análise. Estão destacados em vermelho, os valores máximos e mínimos para cada semana.....	32
Quadro 4 – Quadro contendo os valores das medianas semanais de nitrato e as pluviometrias.....	42
Quadro 5 – Medianas totais de nitrato e a localização dos poços referentes aos perímetros urbanos.....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 HIPÓTESE	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	13
2 ESTADO DA ARTE	15
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	15
2.2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	16
2.3 HIDROQUÍMICA DO SASG	20
2.4 O NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	21
2.5 HISTÓRICO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E ASPECTOS POPULACIONAIS DE CARLOS BARBOSA	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.2 BANCO DE DADOS.....	25
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS	26
3.3.1 Tratamento estatístico dos dados	26
3.3.2 Elaboração de gráficos.....	26
3.4 CARTOGRAFIA DIGITAL.....	26
3.4.1 Mapas de isoconcentração de nitrato.....	27
3.4.2 Mapa de uso e ocupação do solo.....	28
3.4.3 Mapa potenciométrico	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 NITRATO EM CARLOS BARBOSA	29
4.2 ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO	33
4.2.1 Relação entre o nitrato e a pluviometria	41
4.2.2 Relação entre o nitrato e o uso e ocupação do solo	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	52
ANEXOS	55
ANEXO A – MAPA DE EVOLUÇÃO DA ÁREA URBANA DE CARLOS BARBOSA	55

1 INTRODUÇÃO

O município de Carlos Barbosa localiza-se a nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Esse município se encontra em grande desenvolvimento, com diversas indústrias instaladas na sua área urbana, entre as mais conhecidas a Tramontina e a Cooperativa Santa Clara. Ele possui 25.192 habitantes, dos quais 5.200 vivem na zona rural e 19.992 na zona urbana (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010). A população do município de Carlos Barbosa é abastecida somente pelas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) cujo responsável pelo abastecimento é a CORSAN. Segundo o plano municipal de saneamento básico de Carlos Barbosa (PJS Geologia, 2013) é previsto para o ano de 2032; um aumento populacional para 41.964 habitantes, gerando-se cada vez maiores volumes de exploração do aquífero.

O monitoramento físico-químico semanal de 15 poços tubulares profundos pertencentes a CORSAN, realizado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) no período de 02/04/2015 e 09/10/2015, identificou alguns valores incomuns de nitrato nas águas subterrâneas do SASG na área urbana do Município de Carlos Barbosa, Rio Grande do Sul.

O nitrato é o contaminante mais comum das águas subterrâneas. Ele é móvel, persistente e gera grandes plumas de contaminação; principalmente em ambientes oxigenados como nos aquíferos fraturados (Feitosa & Manoel Filho, 2000). Em países subdesenvolvidos uma das principais fontes de contaminação por nitrato são os sistemas de saneamento in situ, como fossas sépticas e rudimentares (Varnier, 2001). No Rio Grande do Sul, dos 3.599.604 Domicílios Particulares Permanentes, 1.695.720 utilizam como tipo de esgotamento sanitário as fossas sépticas ou rudimentares, representando 47,1% do total de domicílios (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010). Na área de estudo, região urbana do município de Carlos Barbosa, RS, segundo dados da prefeitura da cidade, os efluentes domésticos desde o início de sua urbanização, no ano de 1910, eram lançados em fossas sépticas com destino final em poços sumidouros. As primeiras redes de esgoto doméstico, Sistema Separador Absoluto, surgiram somente em 2006, anteriormente havia no município apenas a rede de esgoto pluvial.

A crescente urbanização e industrialização da área urbana de Carlos Barbosa, junto com o longo período de uso das fossas sépticas como sistema de saneamento

(entre 1912 e 2006) podem ter causado aumentos do contaminante nas águas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) da área urbana do município. Diante desse cenário o presente trabalho visa avaliar a ocorrência desse contaminante no aquífero e a influência antrópica nos seus níveis.

1.1 HIPÓTESE

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é caracterizado como um aquífero livre com porosidade por fraturas (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2007) e sua recarga hídrica se dá principalmente mediante infiltração das águas pluviais.

O nitrato apresenta alta mobilidade química, sendo facilmente lixiviado pelas águas das chuvas até o lençol freático. Outra característica desse contaminante é sua alta persistência, principalmente em aquíferos livres que são mais oxigenados, impedindo o processo de redução do nitrato no ciclo do nitrogênio (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

Devido às características hidrogeológicas do SASG somadas às características químicas do nitrato, é esperado que em períodos mais chuvosos sejam encontradas concentrações de nitrato mais elevadas. Além disso, prevê-se que as maiores concentrações sejam encontradas nas porções mais antigas da área urbana de Carlos Barbosa e mais densamente povoadas, onde provavelmente haviam um maior número de fossas sépticas instaladas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a ocorrência do nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na zona urbana do município de Carlos Barbosa.

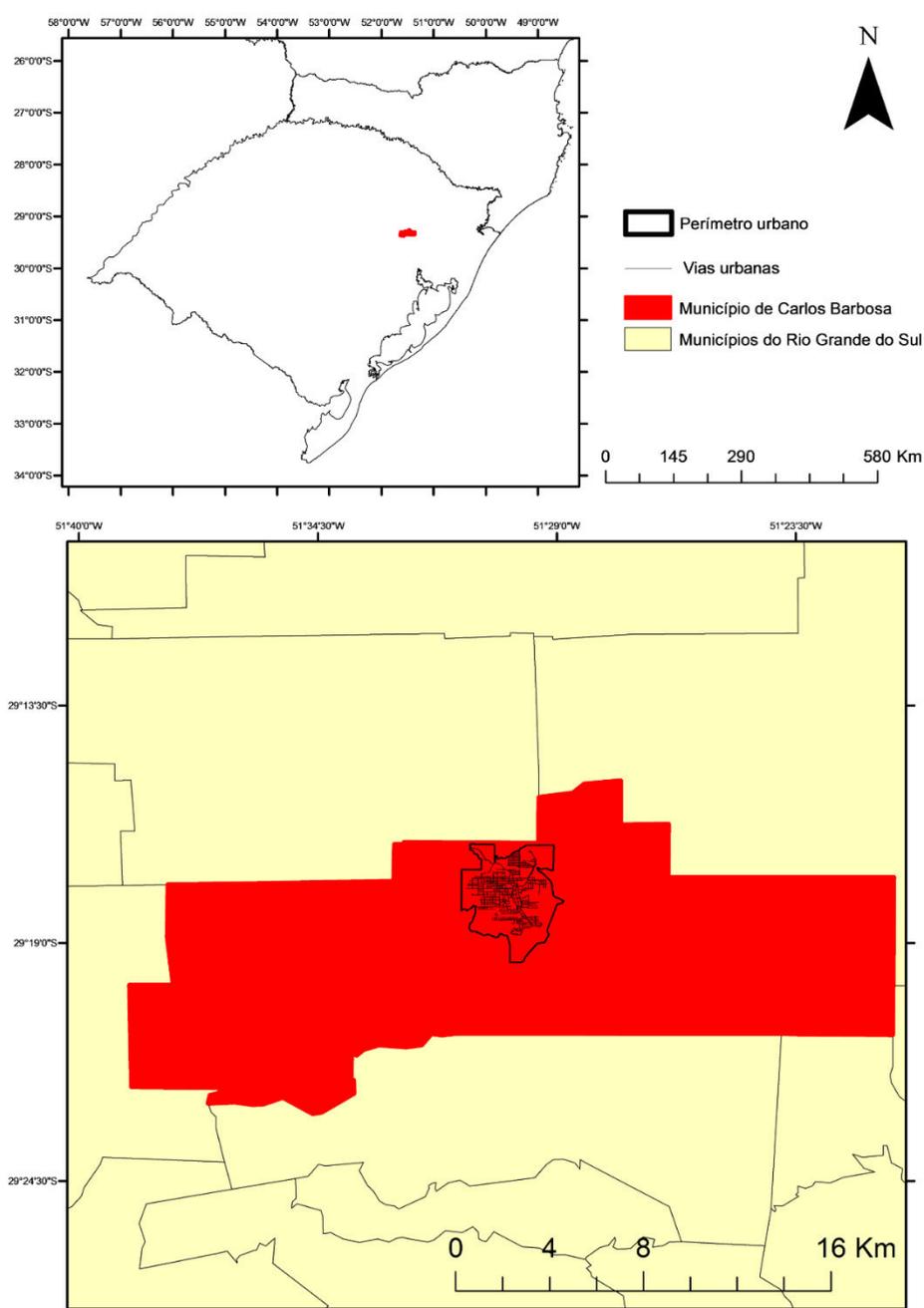
Os objetivos específicos foram identificar uma relação entre as concentrações de nitrato e o uso e ocupação do solo e identificar a influência da pluviosidade nos níveis de nitrato ao longo do tempo.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo localiza-se na região nordeste do Rio Grande do Sul (Figura 1) na zona urbana do município de Carlos Barbosa, local onde estão distribuídos os 15 poços tubulares estudados. O município situa-se entre a latitude 29°17'51" sul e a longitude 51°30'13" oeste em uma altitude de 676m. Segundo dados do Instituto

Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), o município ocupa uma área total de 228,669 Km² sendo dividida em cinco distritos: Sede, Arcoverde, Santo Antônio de Castro, Santa Luiza e Cinco da Boa Vista. Faz divisa a noroeste com Garibaldi, a nordeste com Farroupilha, a sudeste com Alto Feliz e São Vendelino, a sul com Barão e a oeste com Boa Vista do Sul.

Figura 1 – Mapa de localização do município de Carlos Barbosa e sua área urbana, onde foi feito o presente estudo. O município localiza-se a noroeste do estado do Rio Grande do Sul.



2 ESTADO DA ARTE

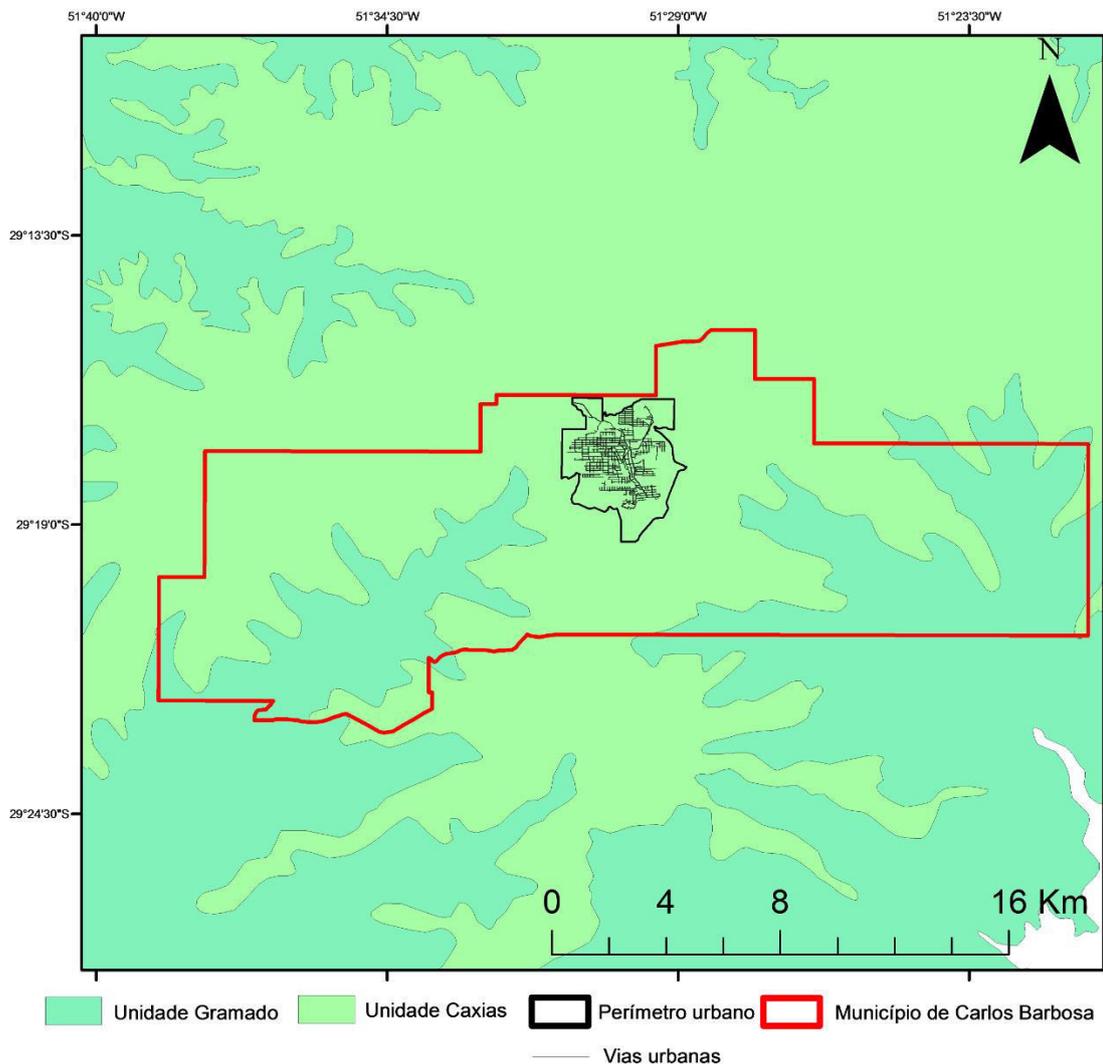
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A região de estudo situa-se sobre uma sequência de rochas vulcânicas classificada litoestratigraficamente como Formação Serra Geral, que recobrem grande parte da Bacia do Paraná. As rochas vulcânicas se originaram da ruptura e separação do Gondwana durante o Cretáceo Inferior que foi acompanhada por um expressivo evento vulcânico que recobriu com lavas a porção centro-sul da América do Sul e o noroeste da Namíbia (Wildner, Orlandi Filho, & Giffoni, 2006). Segundo Hausman (1995), essa formação, na América Latina, ocupa uma área de 137000 km² e equivale a aproximadamente 50% da área total do estado do Rio Grande do Sul. As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, têm composições ácidas e básicas, que juntas apresentam espessuras médias de 800 metros e máximas de 1500 metros (Roisenberg & Viero, 2002).

Segundo o mapa geológico do Rio Grande do Sul realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2007), há duas litologias principais na área de estudo, as vulcânicas ácidas denominadas Palmas (Caxias) e as vulcânicas básicas denominadas Gramado (Figura 2). A Fácies Palmas tem idade mesozóica de $132,3 \pm 0,5$ Ma Ar-Ar, é caracterizada pelos derrames mais espessos de até 80 metros. Essa fácies é composta por rochas ácidas de riolitos e principalmente riodacitos, que se apresentam com forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciços na porção central. Dobras de fluxo e autobrechas são frequentes e suas vesículas são preenchidas predominantemente por calcedônia e ágata (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2007).

A Fácies Gramado tem idade de $132,4 \pm 1,4$ Ma pelo método Ar-Ar, mais jovem do que a facie Palmas/Caxias. Seus derrames de basalto têm espessuras entre 15 a 35 metros, freqüentes texturas de fluxo pahoehoe, zonas vesiculares bem desenvolvidas no topo e incipientes na base, preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita. Sua porção central é formada por uma rocha de cor cinza-escuro, granular homogênea, com disjunção colunar bem desenvolvida e de textura microfanerítica. Por se tratarem dos primeiros eventos eruptivos, há intercalações com os arenitos Botucatu (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2007).

Figura 2 – Mapa Geológico do Rio Grande do Sul ilustrando as duas unidades litológicas identificadas no município de Carlos Barbosa.



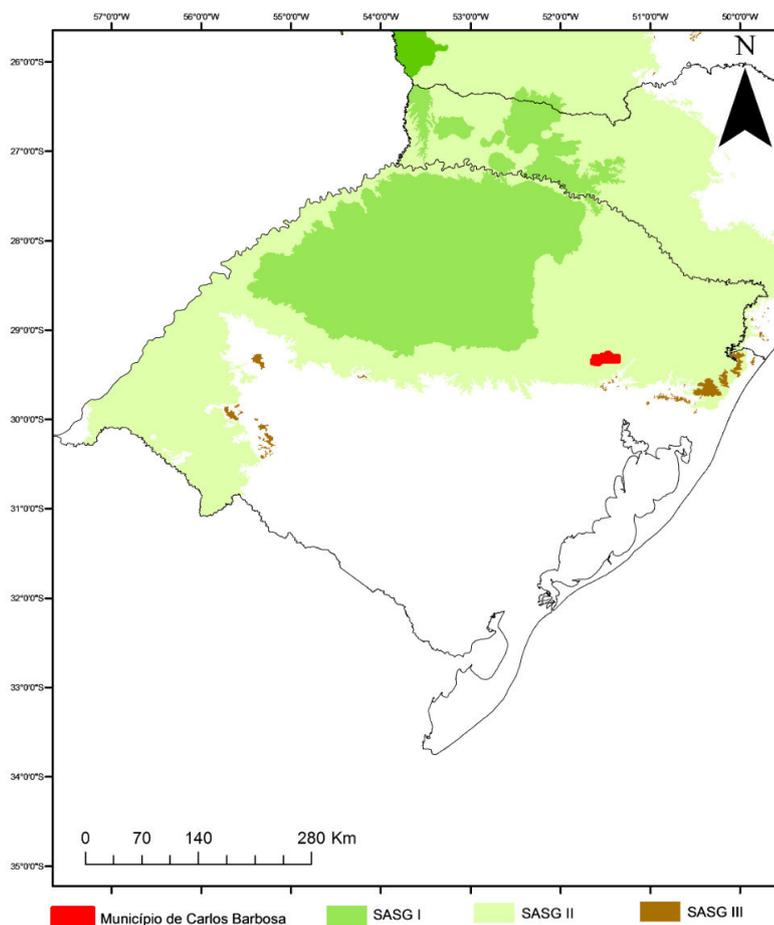
Segundo Bortolin, Reginato, Leão e Schneider (2014) no município de Carlos Barbosa, em altitudes de até 500 metros a fácies encontrada é a Gramado e acima dos 500 metros encontra-se a fácies Palmas (Caxias), dividida em 5 derrames. Os derrames ácidos apresentam disjunção horizontal e zonas vesiculares e amigdaloidais que no geral são preenchidas por quartzo e calcita.

2.2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

No Brasil o SASG encontra-se sobreposto ao Sistema Aquífero Guarani e sotoposto ao aquífero Bauru-Caiuá. Ocupa uma área de recarga de 411.855 km² e o uso principal de suas águas é para o abastecimento doméstico (Agência Nacional de Águas, 2005).

Segundo estudos realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2005) para o mapeamento hidrogeológico do RS, o Sistema aquífero Serra Geral (SASG) foi dividido em 3 áreas principais de acordo com sua possibilidade de água, o SASG I, II e III (Figura 3). O SASG I, localiza-se na região centro-oeste do estado, caracteriza-se geologicamente por litologias basálticas, amigdalóides e fraturadas. As capacidades específicas variam bastante, predominando entre 1 e 4 $m^3/h/m$ e excepcionalmente poços superiores a 4 $m^3/h/m$. As águas subterrâneas analisadas no presente estudo, localizam-se no SASG II, que ocupa a parte oeste do estado, porém este aquífero também ocupa extensas áreas a nordeste do estado (região do estudo). A litologia predominante é de riolitos, riodacitos e em menor porção, basaltos fraturados. A capacidade específica é inferior a $0,5m^3/h/m$, entretanto em áreas mais fraturadas ou com arenitos na base, podem ser encontrados valores superiores a $2m^3/h/m$.

Figura 3 – Mapa hidrogeológico destacando-se o Sistema Aquífero Serra Geral no RS e suas subdivisões entre SASG I, SASG II e SASG III. A subdivisão foi baseada de acordo com a produtividade do aquífero (CPRM, 2013).



Segundo Reginato (2003) na região nordeste do Rio Grande do Sul estão presentes dois tipos de aquíferos, o freático e o fraturado. O aquífero freático tem menor volume de água, comporta-se de forma heterogênea, tem dimensões e continuidade lateral reduzidas e circulação localizada. Este aquífero está localizado sobre um manto de alteração sobre as rochas vulcânicas, e sua água é captada através de poços cavados ou de forma direta em nascentes.

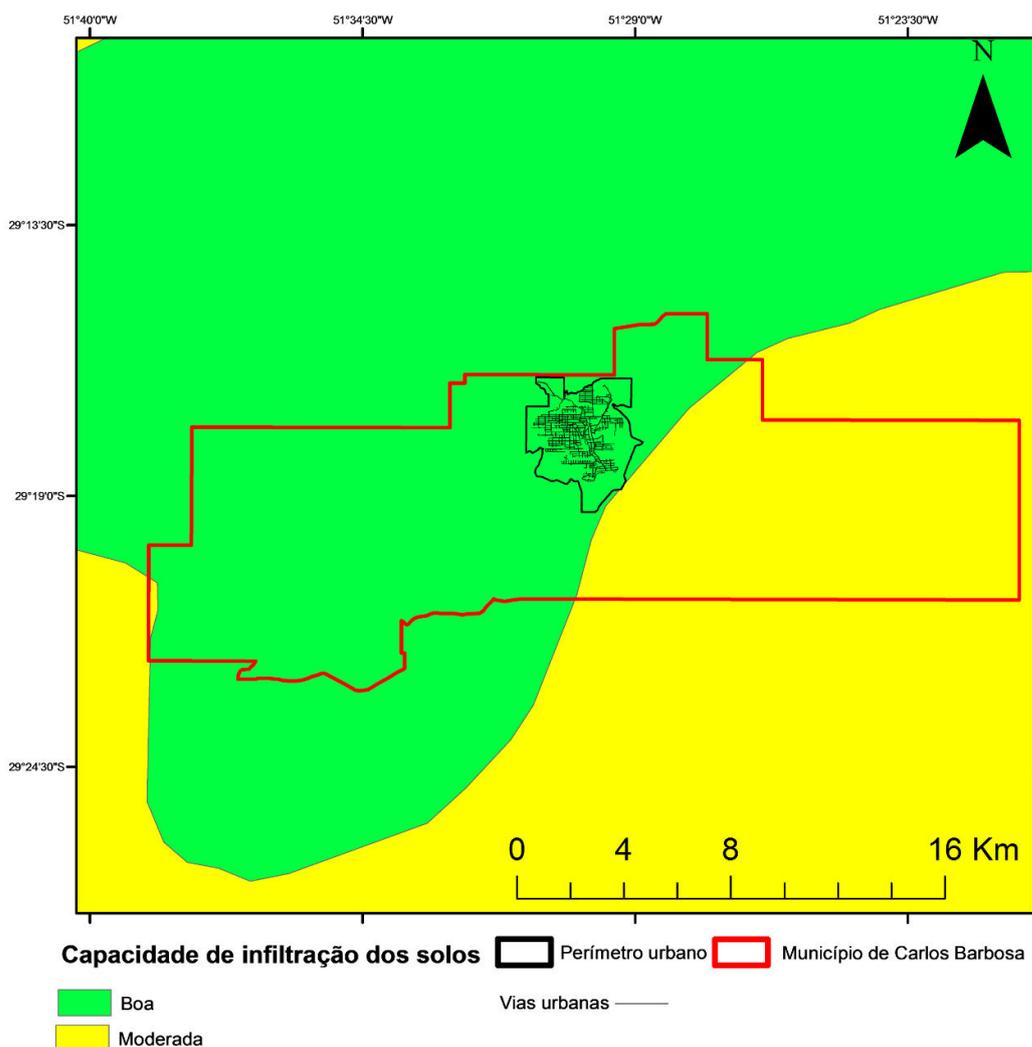
A segunda forma de captação da água subterrânea na região nordeste, é através de poços tubulares em aquíferos fraturados em rochas vulcânicas básicas e principalmente ácidas. O principal condicionante desse aquífero são as estruturas tectônicas (fraturas e zonas de fraturas) que são responsáveis pela formação e circulação da água subterrânea (Reginato & Strieder, 2004). Devido ao fato de algumas regiões apresentarem zonas com mais fraturas e outras com menos fraturas, os autores caracterizaram a presença de uma forte anisotropia, responsável por vazões variáveis e capacidades específicas geralmente baixas. Segundo Bortolin et al. (2014), em um estudo sobre poços tubulares em rochas ácidas na região de Carlos Barbosa, a partir de um levantamento de dados feito através de, trabalhos de campo, consultas ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SIAGAS-CPRM) e consultas à Companhia Riograndense de Abastecimento (CORSAN), puderam identificar 137 poços tubulares no município. Dos 137 poços que possuem dados, a maioria das captações possuem profundidades entre 50 e 150 metros, nível estático localizado entre 0 e 5 metros, capacidade específica baixa entre 0 e 0,3 m³/h/m e vazão que varia entre 5 a 20 m³ h⁻¹. Estas características são concordantes com o estudo de Reginato na região nordeste do Rio Grande do Sul. Ao comparar os dados dos níveis estáticos com os dados das diferentes entradas de água, Bortolin et al. (2014) evidenciou que o comportamento do aquífero não é típico de um aquífero livre, mas sim de um aquífero confinado, estando a água sob pressão e tendendo a subir para além da entrada de água. Os dados das entradas de água são as seguintes, 37% localizadas entorno de 50 a 100, 21% com entradas até 20 metros e 26% dos poços possuem entradas de água entre 20 e 50 metros.

A vulnerabilidade a contaminação do SASG na região nordeste do RS, obtida pelo método DRASTIC, ocorrem em 3 classes, baixa (45%), intermediária (54,1%) e alta (0,4%) (Reginato & Ahlert, 2013). Este estudo abrangeu 20 municípios próximos a área do presente estudo, e dois deles fazem divisa com o município de Carlos

Barbosa, o primeiro é o município de Garibaldi e o segundo o município de Farroupilha.

A capacidade de infiltração das águas da chuva nos solos da área de estudo varia de moderada a boa (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2007). Estas classes foram baseadas a partir de estimativas da capacidade de drenagem dos tipos de solo existentes nas regiões. Na porção amarela da área de estudo o tipo de solo é o de ordem neossolos de subordem litólico, cuja drenagem interna é boa. Na porção verde do mapa, o tipo de solo é o nitossolos háplico, cuja drenagem interna é boa (Diniz, Monteiro, Silva, & Paula, 2014). Estes dados sugerem que na área urbana de Carlos Barbosa ocorra uma boa recarga hídrica a partir da infiltração das águas das chuvas.

Figura 4 – Mapa da capacidade de infiltração dos solos. Evidencia-se que na área de estudo predominam solos com boa capacidade de infiltração (CPRM, 2013)



2.3 HIDROQUÍMICA DO SASG

Quanto a hidroquímica dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral no noroeste do Rio Grande do Sul, Reginato (2003) baseando-se em 137 análises químicas da CORSAN, distribuiu as águas em 3 campos principais: águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (80,1%), águas bicarbonatadas sódicas (18,4%) e águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas (1,4%). O primeiro campo é resultado do intemperismo das rochas que compõe o aquífero (controle litoquímico) e dependendo do nível em que está a água, ela pode estar associada a derrames vulcânicos com composições químicas variadas (rochas ácidas e básicas), portanto elas podem apresentar diferentes características hidroquímicas (Reginato & Ahlert, 2013). O segundo campo é resultado da mistura entre as águas do SASG e do Sistema Aquífero Guaraní (SAG), resultado de um controle geotectônico, morfoestrutural e o terceiro assim como o segundo, é resultado de misturas com outros sistemas de aquífero devido a um controle morfoestrutural e morfotectônico.

No geral, as águas subterrâneas do SASG têm boa qualidade, porém, há problemas de contaminação bacteriológica e por metais pesados principalmente em regiões de maior desenvolvimento urbano e industrial. Boff, Medeiros, Muller e Koppe (2006), em um estudo sobre a hidroquímica na mesma região, apesar de não identificarem o mesmo padrão para o terceiro campo, constataram um resultado de 88% de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. Os autores também identificaram níveis equilibrados de pH, próximos a 7, mas que varia de 5,97 até 8,54. A concentração de sódio (Na^{2+}) varia de 6,56 mg/L a 40,56 mg/L, porém mais comumente foram identificados valores entre 10 e 15 mg/L.

Reginato e Ahlert (2013), em um estudo mais detalhado envolvendo um número maior de amostras comparado ao estudo de Boff et al. (2006), identificaram valores de condutividade entre 44 e 498 uS/cm e pH entre 5,8 e 9,9. Identificaram também uma relação entre estes valores e as profundidades dos poços, condutividades inferiores a 200 uS/cm e de pH menores que 7,5, estão associados a poços rasos, devido a maior recarga e circulação das águas em poços rasos, o que leva a menor concentração de elementos como cálcio, magnésio e sódio. Já valores de condutividade entre, 200 e 498 uS/cm e pH entre, 7,5 e 9,9 estão associados a poços mais profundos, sendo estes valores explicados devido a uma provável conexão com o Sistema Aquífero Guarani (SAG) situado abaixo do SASG ou devido a um maior

grau de confinamento (menos rasos). Em estudos sobre a hidroquímica do SASG no estado do Paraná, Bittencourt, Rosa Filho, Hindi e Buchmann Filho (2003) identificaram alguns valores aproximados aos estudos de Boff et al. (2006) e Reginato (2003; Reginato & Ahlert, 2013), além de analisar outros parâmetros físico-químicos como sólidos totais. O pH teve valor médio de 7,32 sendo a média para STD de 103,27 mg/L. Identificou uma média de cloretos de 1,39 mg/L, sendo seu valor máximo de 6 mg/L. Para valores de sódio, identificou uma média de 8,49 mg/L, sendo que 85,3 % das amostras estão abaixo de 15 mg/L e em 2 poços identificou valores de sódio acima de 55 mg/L. Para Bittencourt et al. (2003), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2005), Lisboa (1996) e Reginato e Ahlert (2013), as águas do SASG são bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e quando sódicas ou sulfatadas, estão relacionadas a contaminações com águas do SAG.

Na área do presente estudo ocorre apenas um campo que é o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (Bortolin et al., 2014). As águas nesses aquíferos demonstram uma forte correlação com a composição litoquímica das rochas em que as águas circulam, o ânion predominante é o bicarbonato HCO_3^- e os cátions Ca^+ e Na^+ tem teores equilibrados. Bortolin et al. (2014) indicam que as águas do aquífero em Carlos Barbosa apresentam baixo tempo de residência e baixo grau de mineralização exceto para poços mais profundos.

2.4 O NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O nitrogênio é o principal componente da atmosfera, ocupando aproximadamente 78% de seu volume. O ciclo do nitrogênio pode ser dividido em quatro mecanismos diferentes, fixação do nitrogênio atmosférico em nitratos, amonificação, nitrificação e desnitrificação (Braga et al., 2002). Segundo Braga et al. (2002), o nitrogênio gasoso é fixado por bactérias e após sua fixação, é incorporado nas plantas e passa a fazer parte dos seres vivos através da cadeia alimentar. A partir da decomposição das matérias orgânicas produzidas pelos seres vivos é iniciado o processo de amonificação, em que bactérias mineralizam o nitrogênio e produzem gás amônia (NH_3) e sais de amônio (NH_4^+). A amônia é oxidada para nitrito (NO_2^-) por bactérias do grupo nitrosomonas e o nitrito oxidado para nitrato (NO_3^-) por bactérias autótrofas do grupo nitrobactérias, em um processo chamado de nitrificação (Feitosa & Manoel Filho, 2000). Por fim, a partir da ação de bactérias pseudomas, ocorre o processo de desnitrificação no qual o nitrato é reduzido a nitrito e posteriormente a

nitrogênio gasoso (N_2); voltando à atmosfera, processo que exige um ambiente mais anóxico (Braga et al., 2002). Este processo raramente remove os excessos de nitrato no solo (Parker, 1975).

A maior parte dos processos do ciclo do nitrogênio ocorrem nos solos. O teor de nitrato é geralmente baixo nesse ambiente devido à assimilação do nitrogênio pelas raízes das plantas e lixiviação por percolação de água através do solo (Parker, 1975). Segundo a United States Environmental Protection Agency, o excesso de nitrogênio do solo; geralmente provenientes de fontes antrópicas, não são assimilados pelas plantas, e eventualmente entram nos aquíferos na forma de nitrato a partir da infiltração das águas das chuvas, processo chamado de lixiviação.

O nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^-) é o contaminante mais comum das águas subterrâneas. Ele é móvel e estável, principalmente em ambientes oxidantes onde não sofre redução, como, aquíferos em rochas fraturadas, em sedimentos de alta permeabilidade ou pouco profundos (Feitosa & Manoel Filho, 2000). Sua presença nos aquíferos apresenta relação direta às atividades humanas, dentre elas, às atividades agrícolas (esterco animal e uso de fertilizantes), lançamento de esgoto sobre e abaixo da superfície terrestre, lixões e cemitérios (Feitosa & Manoel Filho, 2000). Fontes comuns, principalmente em países subdesenvolvidos são os sistemas de saneamento in situ, como fossas sépticas e negras. Áreas sem esgotamento sanitário, onde há apenas sistemas de saneamento in situ, podem contribuir como focos de contaminação em aquíferos livres e rasos, principalmente em áreas de grande densidade populacional (Varnier, 2001). Em um estudo sobre o nitrato, realizado por Varnier et al. (2010) na região de Marília/SP, foi identificado que as maiores concentrações de nitrato (em alguns pontos chegando a 16,9 mg/L de $N-NO_3^-$) estão localizadas nos bairros mais antigos da cidade (zona central), sugerindo que essa elevada carga de nitrato está relacionada com a urbanização, cuja origem provavelmente está associada às antigas fossas sépticas e vazamentos das redes coletoras de esgoto.

O nitrato quando encontrado em concentrações acima de 10mg $N-NO_3^-$ ou 44 mg/L NO_3^- , a água é considerada imprópria para consumo humano (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005). Acima destes níveis, sua ingestão contínua pode ocasionar a síndrome do bebê azul. O nitrato ingerido resulta em metemoglobinemia em adultos e mais comumente em recém-nascidos (Baird & Cann, 2011). Segundo Baird e Cann (2011), o nitrato é reduzido a nitrito no estômago e o nitrito oxida os íons

de ferro na hemoglobina do sangue, impedindo a transferência do oxigênio nas células. Outros problemas que sua ingestão pode ocasionar são, problemas na tireoide, defeitos congênitos e câncer.

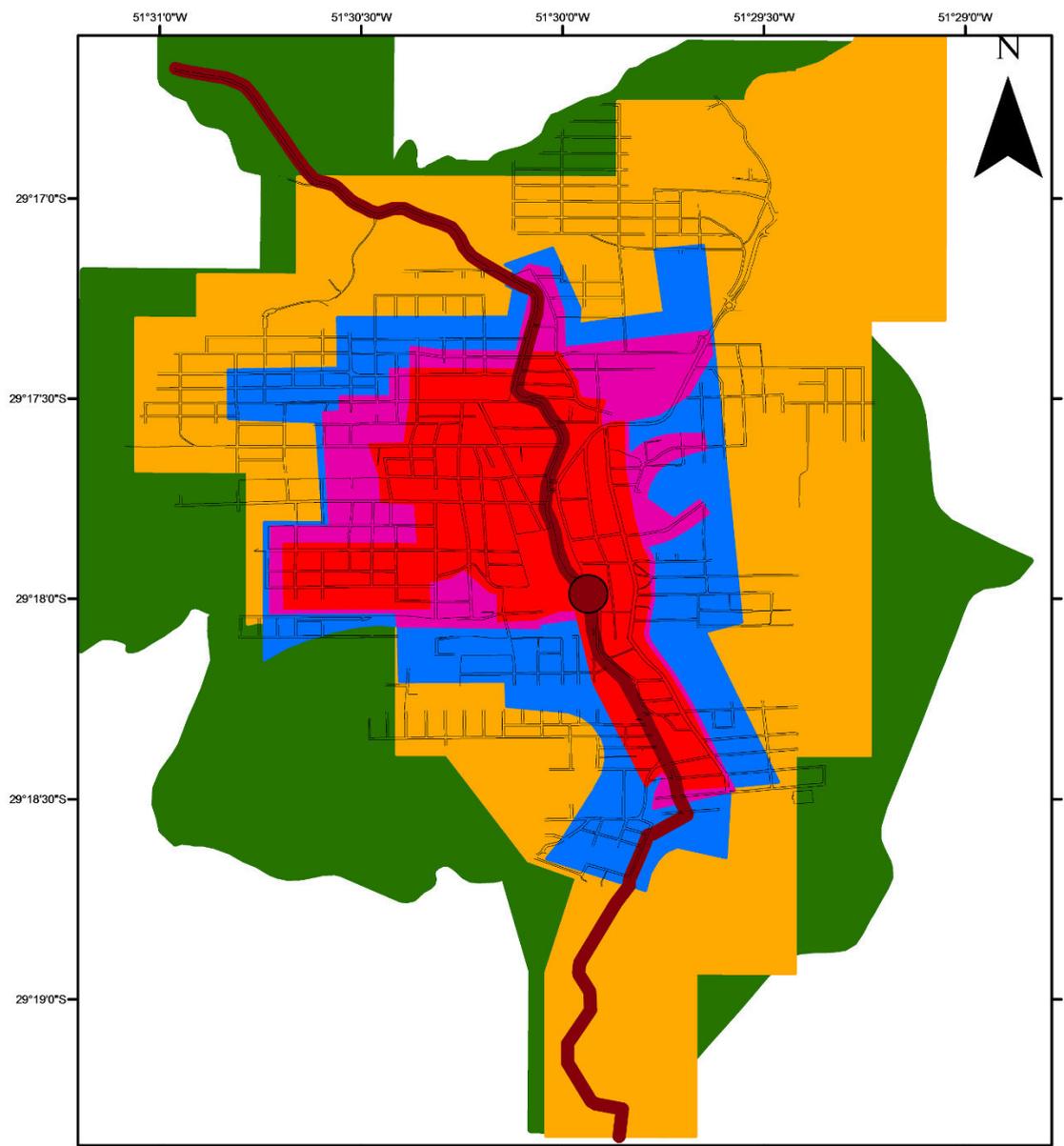
2.5 HISTÓRICO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E ASPECTOS POPULACIONAIS DE CARLOS BARBOSA

Segundo informações da prefeitura de Carlos Barbosa, o início da ocupação do município deu-se em 1883, na antiga Colônia Trinta e Cinco, um dos primeiros nomes dado ao município. Em 1910, com o surgimento da ferrovia Montenegro-Caxias, deu-se início a expansão urbana do município, com o surgimento de um núcleo urbano próximo a ferrovia. A área urbana desenvolveu-se para norte e para sul, a partir desse núcleo (Figura 6), ladeando a estação ferroviária e a estrada Buarque de Macedo (atual rua Buarque de Macedo). Atualmente, o desenvolvimento urbano do município continua acompanhando o sentido destas vias como pode ser observado na figura 6 que mostra a evolução dos perímetros urbanos de 1961 a 2006. A urbanização da cidade pode ser dividida em duas partes: a primeira, a oeste, com topografia menos acidentada e a segunda, a leste, com relevo mais acidentado.

Carlos Barbosa possui 25.192 habitantes, dos quais 5.200 (20,6%) vivem na zona rural e 19.992 (79,4%) na zona urbana (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010). Até meados de 1980, a população concentrava-se em maior número na área rural. Com o crescimento industrial, a população rural migrou para a zona urbana, em busca de melhores condições financeiras e de vantagens como educação, comércio, lazer e conforto. Segundo o plano municipal de saneamento básico de Carlos Barbosa (PJS Geologia, 2013), é previsto para o ano de 2032, um aumento populacional para 41.964 habitantes.

A indústria representa a maior parcela do Produto Interno Bruto de Carlos Barbosa seguida do setor de serviços e agropecuário (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010). Há diversas indústrias na cidade, especialmente no ramo metalmeccânico, com fabricação de ferramentas e utensílios domésticos, e de alimentos, como laticínios, embutidos cárneos e conservas. Dentre as indústrias, a Tramontina, Irwin, Grendene, Galvanotek e Cooperativa Santa Clara, têm um maior destaque.

Figura 5 – Mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa entre os anos de 1961 e 2006. Mapa modificado da Prefeitura Municipal de Carlos Barbosa.



3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será feita a descrição de todas as etapas necessárias para atingir os objetivos propostos neste trabalho, bem como as metodologias e materiais utilizados em cada etapa. As etapas do trabalho estão divididas da seguinte forma, revisão bibliográfica, aquisição de dados existentes e geração de novos dados, tratamento dos dados, cartografia digital e geoprocessamento.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fase inicial deste projeto consistiu em uma revisão bibliográfica para obter informações principalmente sobre o contexto geológico e hidrogeológico da área de estudo. Dada a boa qualidade de pesquisas hidrogeológicas feitas no SASG e no município de Carlos Barbosa foi possível obter informações suficientes principalmente sobre as características hidroquímicas do SASG, para fornecer uma visão bastante detalhada sobre estes aspectos. A revisão bibliográfica foi feita a partir de livros, artigos científicos, teses, relatórios empresariais, mapas geológicos, hidrogeológicos e consulta a Prefeitura Municipal de Carlos Barbosa.

3.2 BANCO DE DADOS

Os dados mais importantes para a realização deste projeto foram os dados de monitoramento físico-químicos disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Ao longo do ano de 2015, do dia 02.04.15 ao dia 09.10.15; datas anteriores ao início deste projeto, foi realizado um monitoramento físico-químico com análises semanais de água em 15 poços tubulares de Carlos Barbosa. As coletas de água eram feitas pela CORSAN que posteriormente disponibilizava ao IPH para que este fizesse as análises físico-químicas, entre elas as análises de Nitrato utilizadas no presente estudo.

Os dados de índices pluviométricos diários e mensais, essenciais para poder compara-los com as concentrações de nitrato, foram obtidos pela Estação Agroclimática da Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. Esta estação está localizada nas coordenadas geográficas, latitude $-29,1675^{\circ}$ e longitude $-51,5347^{\circ}$, a uma altitude de 640 metros e a uma distância de aproximadamente 17 km da área de estudo.

Dados sobre o nível estático e cota do terreno dos poços, utilizados para calcular o valor da carga hidráulica na elaboração do mapa potenciométrico, foram adquiridos através de um cadastro feito pelo doutorando Taison Anderson Bortolin. Todos os dados listados anteriores foram compilados e organizados em planilhas do software Microsoft Excell 2016, formando o banco de dados do projeto.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

3.3.1 Tratamento estatístico dos dados

O tratamento estatístico dos dados foi feito no software Excell 2016 e visou melhorar o entendimento dos dados, bem como utiliza-los para a elaboração dos gráficos que serão situados no próximo subcapítulo e dos mapas de isoconcentração de nitrato, que será visto mais detalhadamente no subcapítulo 3.3. As análises estatísticas obtidas foram, valores máximos e mínimos, médias, medianas, desvio padrão e os percentis.

3.3.2 Elaboração de gráficos

Para identificar a influência da precipitação pluviométrica na hidroquímica das águas subterrâneas da área de estudo, foram elaborados gráficos que correlacionam os valores do parâmetro físico-químico com os valores da pluviometria. Para cada poço foram elaborados gráficos que comparam a concentração semanal e a concentração média mensal dos parâmetros, com a pluviometria acumulada semanal e a pluviometria mensal.

Para ter uma visão regional do comportamento hidroquímico foi feita a mediana total de cada semana de análise para cada parâmetro físico-químico e comparados os valores com a pluviometria semanal.

3.4 CARTOGRAFIA DIGITAL

Esta etapa do trabalho teve como objetivo principalmente identificar a relação entre as concentrações de nitrato e o uso e ocupação do solo na área de estudo. Em um primeiro momento foram feitos mapas de isoconcentração de nitrato e em seguida os mapas de uso e ocupação do solo que posteriormente foram sobrepostos. Também foi elaborado um mapa potenciométrico para identificar as direções de fluxo no aquífero. Para esses trabalhos foram utilizados os softwares ArcGis 10.1, Golden

Software Surfer 13.3 e o Google Earth Pro. Os métodos utilizados para a produção desses mapas serão descritos nos próximos subcapítulos.

3.4.1 Mapas de isoconcentração de nitrato

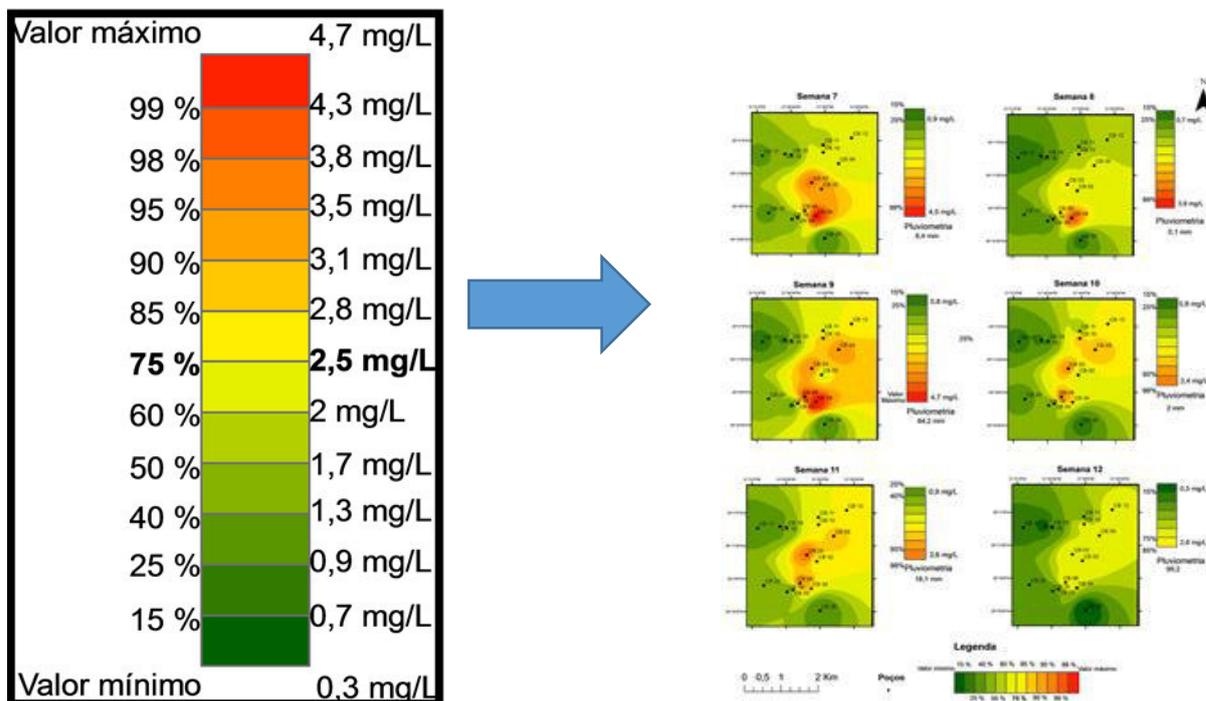
Para a análise espacial das concentrações de nitrato, foram elaborados mapas de isoconcentração pelo método Interpolação pelo Inverso da Distância (Inverse Distance Weighted - IDW). Interpolação consiste em um procedimento matemático que estima o valor da variável em um ponto que não se sabe o valor (Landim, Monteiro, & Corsi, 2002). O método IDW é o mais utilizado entre os métodos de distância ponderada e consiste em determinar uma influência maior dos pontos com valores conhecidos, aos pontos desconhecidos mais próximos aos pontos amostrados (Landim, 2000). O expoente de ponderação é o expoente dado ao valor da distância na fórmula do método e quanto maior for esse expoente maior será a influência do ponto com valor conhecido aos pontos com valores desconhecidos que estiverem mais próximos àquele ponto (Landim et al., 2002). Landim (2000) destacou os seguintes efeitos nos mapas, dependendo do expoente usado, sendo chamado de Inverso do Quadrado da Distância (IQD):

- expoentes baixos (0-2): destacam anomalias locais;
- expoentes altos (3-5): suavizam anomalias locais;
- expoentes ≥ 10 : resultam em estimativas "poligonais" (planas);
- expoente = zero: resulta em estimativas de "média móvel".

Foram realizados 27 mapas (um por semana de análise), com os valores das concentrações semanais dos 15 poços e 1 mapa com as medianas totais de nitrato de cada poço, totalizando 28 mapas. Estes mapas serão posteriormente sobrepostos ao mapa de uso do solo para identificar a relação entre o nitrato e o uso do solo próximas aos poços.

As legendas dos mapas foram feitas a partir dos percentis ilustrados na figura 6. Foi gerado uma cor para cada intervalo de percentil, dado que na gradação da cor verde escuro ao verde claro estão os percentis menores que o 3º quartil (percentil 75) e a partir da cor amarela estão os valores de nitrato acima do 3º quartil.

Figura 6 – Percentis e seus valores utilizados na produção dos mapas de isoconcentração de nitrato.



3.4.2 Mapa de uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo corresponde ao mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa. Ele foi adquirido através da consulta a prefeitura municipal de Carlos Barbosa e posteriormente adaptado para utilização no ArcGis. Este mapa foi sobreposto ao mapa de isconcentração de nitrato referente as medianas totais do nitrato em cada poço, para identificar a relação entre os mesmos.

3.4.3 Mapa potenciométrico

O mapa potenciométrico foi elaborado a partir do Golden Software Surfer 13.3 pelo método da Triangulação com Interpolação Linear e posteriormente utilizado no ArcGis. Os valores da cota e do nível estático dos poços tubulares, necessários para calcular os valores da carga hidráulica e elaborar o mapa, foram adquiridos a partir de um banco de dados fornecido pelo doutorando Taison Anderson Bortolin do Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 NITRATO EM CARLOS BARBOSA

As análises químicas semanais do nitrato realizadas no IPH durante o período de 02/04/2015 a 09/10/2015, totalizaram 27 semanas de análises para cada poço (Quadros 2 e 3) resultando em 396 dados. O quadro 1 mostra as análises estatísticas de cada poço e as análises estatísticas do total da amostragem. Os quadros 2 e 3 mostram os resultados das análises químicas do nitrato, dos dados estatísticos (medianas semanais e mensais) e dos dados pluviométricos.

As amostras analisadas indicam que as águas do SASG na região urbana de Carlos Barbosa apresentam valores que variam de 0,3 a 4,7 mg/L N-NO₃⁻. O total da amostragem possui mediana de 1,7 mg/L N-NO₃⁻. Estes valores estão abaixo do Valor Máximo Permitido (VMP) para o nitrato, que é de 10 mg/L N-NO₃⁻ ou, quando não recalculado para nitrogênio, de 45 mg/L NO₃⁻, de acordo com a resolução de número 357 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005). Apesar disso, encontra-se valores muito próximos ao valor de alerta do nitrato, de 5 mg/L N-NO₃⁻, estabelecido pela Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CTESB).

A maior mediana, de 3,2 mg/L N-NO₃⁻, pertence ao poço CB06, porém no poço CB34 foi encontrado o valor máximo de nitrato, que é de 4,7mg/L N-NO₃. A menor mediana pertence ao poço CB26A, de 0,6 mg/L N-NO₃⁻. Este poço contém o menor valor de nitrato, 0,3 mg/L N-NO₃⁻.

A variância do total de dados é de 0,92, e o desvio padrão de 0,963, este último varia de 0,154 a 0,755 mg/L N-NO₃⁻. Estes valores são considerados baixos e indicam que há uma homogeneidade grande das concentrações de nitrato nas águas.

Quadro 1 – Resultado das análises estatísticas para cada poço e para o total da amostragem.

Total de dados	Poços	Média por poço	Valor mínimo	1° Quartil	Mediana por poço	3° Quartil	Valor máximo	Desvio-Padrão
396	Poço CB02	2,225925926	1,4	2	2,2	2,5	3,2	0,391832571
Média total 1,760406091	Poço CB03	2,851851852	1,9	2,4	2,8	3,3	3,7	0,523575261
	Pço CB05	1,544444444	0,8	1,3	1,5	1,8	2,4	0,34899122
Valor mínimo 0,3	Poço CB06	3,074074074	1,7	2,6	3,2	3,5	4,3	0,635847462
	Poço CB09	2,614814815	1,7	2,1	2,7	2,9	3,7	0,567520724
1° Quartil 0,9	Poço CB10	2,085185185	0,8	1,6	2,1	2,5	3	0,543283255
	Poço CB11	1,619230769	1	1,275	1,5	1,825	3,5	0,508345733
Mediana total 1,7	Poço CB12	2,2	1,3	1,7	2,2	2,7	3,1	0,5144078
	Poço CB16	0,691666667	0,3	0,525	0,7	0,8	1,7	0,276494621
3° Quartil 2,5	Poço CB17	0,707692308	0,5	0,6	0,7	0,8	1,2	0,154720592
	Poço CB18	0,930769231	0,6	0,7	0,9	1,05	1,3	0,214977637
Valor máximo 4,7	Poço CB19	1,181481481	0,6	0,9	1,2	1,4	1,8	0,31383121
	Poço CB20	0,942307692	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	0,198339259
Variância 0,92	Poço CB26	0,614814815	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	0,170302228
	Poço CB34	3,095652174	2,2	2,5	2,9	3,6	4,7	0,755872922
Desvio padrão 0,963	Todos os valores estão na unidade mg/L N-NO3-							

Quadro 2 – Quadro contendo os resultados das análises químicas semanais, dados estatísticos e pluviométricos dos 3 primeiros meses de análises. Estão destacados em vermelho, os valores máximos e mínimos para cada semana.

Mês					Mês 1				Mês 2				Mês 3
Semana de análise	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13
Data da análise	02.04.15	10.04.15	17.04.15	24.04.15	30.04.15	08.05.15	14.05.15	22.05.15	29.05.15	05.06.15	11.06.15	19.06.15	26.06.15
Poço CB02	1,4	1,7	2	1,8	1,7	2,3	3,2	2,2	2,4	2,1	2,6	2,4	2,5
Poço CB03	2	2,3	2,7	2,6	2,1	3,3	3,6	2,6	3,5	3,3	3,7	2,4	3,1
Pço CB05	1,3	1,2	1,4	1,4	0,8	1,7	1,7	1,3	2,1	1,7	1,8	1,4	1,6
Poço CB06	2,4	2,3	2,5	3	1,7	3,5	3	2,8	4	3,4	3,5	2,6	3,2
Poço CB09	1,8	1,9	2,1	2,5	1,7	2,9	2,2	2,1	3,4	3,1	2,9	2,4	2,7
Poço CB10	1,6	1,6	1,9	2,1	1,6	2,5	2,4	1,8	2,9	3	2,7	2,1	2,2
Poço CB11	1,1	1,1	1,4	1,4	1,3	3,5	1,8	1,4	2,1	1,7	2	1,4	1,7
Poço CB12	1,5	1,5	1,9	1,8	1,7	2,4	2,2	2	2,5	2,7	2,8	2,1	2,3
Poço CB16	Sem análise	Sem análise	0,7	0,6	0,6	0,7	1,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,6	0,5
Poço CB17	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7		1,2	0,7	0,8	0,8	0,9	0,7	0,6
Poço CB18	0,7	0,7	0,9	Sem análise	0,7	0,9	1,3	0,9	1,2	1,3	1,3	0,9	1
Poço CB19	0,9	0,8	0,8	1	1,3	1,2	1,5	1,1	1,7	1,3	1,5	1	1,4
Poço CB20	0,8	0,7	0,8	0,7	1		1,2	1,1	1,3	1,1	1,3	0,9	1
Poço CB26A	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,5	0,7
Poço CB34	2,8	2,2	2,6	2,6	Sem análise	3,3	4,5	3,9	4,7	Sem análise	Sem análise	Sem análise	3,6
Valor mínimo (por semana)	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,9	0,7	0,8	0,8	0,9	0,5	0,5
Valor máximo (por semana)	2,8	2,3	2,7	2,6	2,1	3,5	4,5	3,9	4,7	3,7	3,7	2,6	3,6
Mediana por semana (mg/L)	1,35	1,35	1,4	1,6	1,3	2,4	1,8	1,4	2,1	1,7	1,9	1,4	1,7
Pluviometria semanal (mm)	42,2	41,8	12,2	76,6	0,1	16,1	8,4	0,1	84,2	2	18,1	99,2	75
Mediana mensal (mg/L)					1,4				2,05				1,7
Pluviometria mensal (mm)					172,9				108,8				194,3

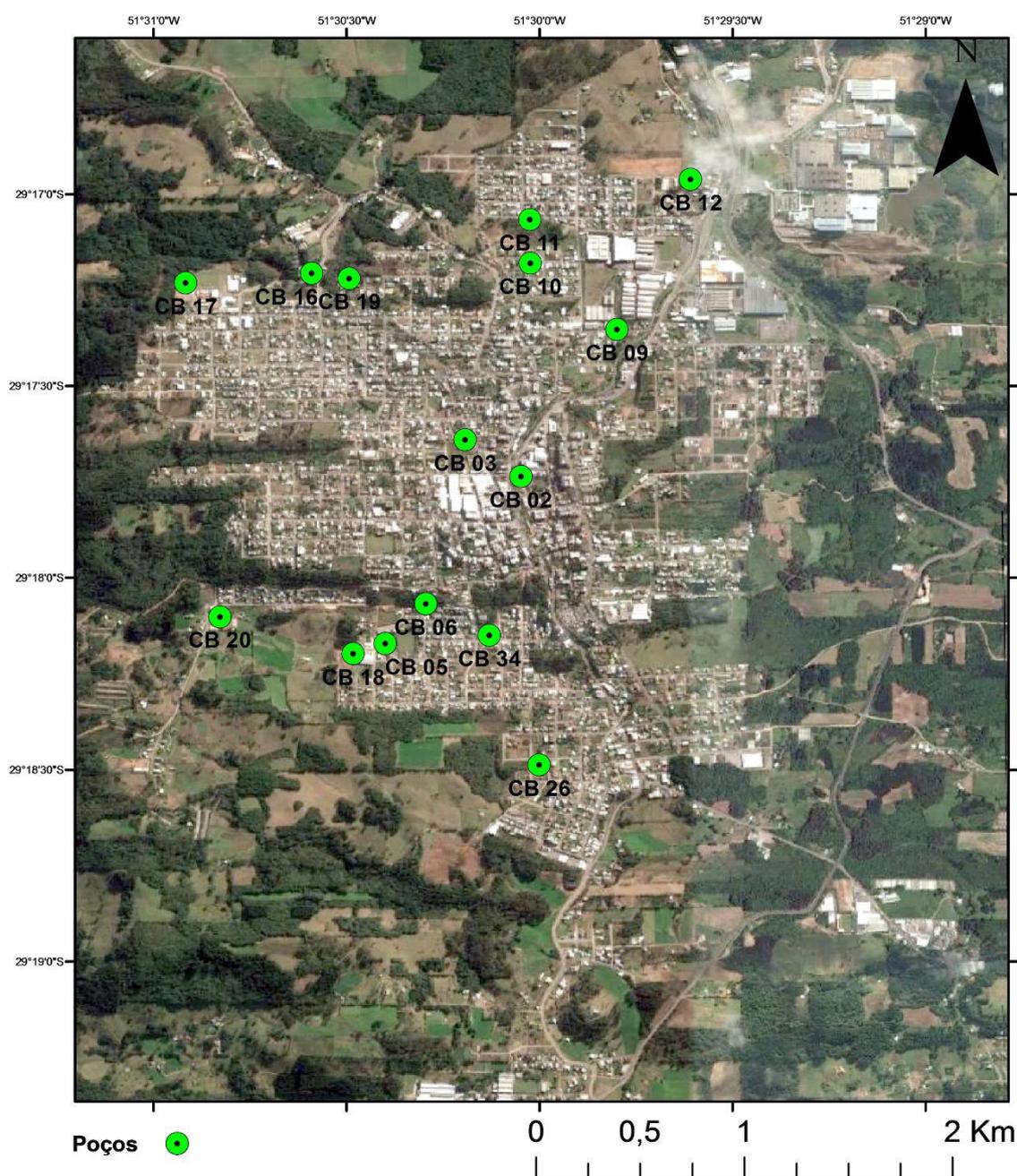
Quadro 3 – Quadro contendo os resultados das análises químicas semanais, dados estatísticos e pluviométricos do quarto ao último mês de análise. Estão destacados em vermelho, os valores máximos e mínimos para cada semana.

Mês				Mês 4				Mês 5				Mês 6		Mês 7
Semana de análise	Semana 14	Semana 15	Semana 16	Semana 17	Semana 18	Semana 19	Semana 20	Semana 21	Semana 22	Semana 23	Semana 24	Semana 25	Semana 26	Semana 27
Data da análise	03.07.15	10.07.15	17.07.15	24.07.15	07.08.15	14.08.15	21.08.15	28.08.15	04.09.15	11.09.15	17.09.15	25.09.15	02.10.15	09.10.15
Poço CB02	2,1	1,9	2,5	2,2	2	2,1	2,9	2,7	2,6	2,1	2	2,5	2,2	2
Poço CB03	2,7	2,5	3,3	3,1	2,8	2,7	3,7	3,3	3,1	2,3	2,3	3	3,1	1,9
Pço CB05	1,5	1,2	1,8	1,6	1,5	1,4	2,1	2,4	1,7	1,3	1,1	1,8	1,8	1,1
Poço CB06	3,4	2,6	3,5	3,6	3,2	2,8	4,3	4	3,2	2,8	2,1	3,5	3,8	2,3
Poço CB09	2,8	2,1	3	2,8	2,7	2,5	3,7	3,7	2,8	2,4	1,9	2,9	3,5	2,1
Poço CB10	2,1	0,8	2,1	2,1	2,1	1,6	2,7	2,9	2,1	1,8	1,2	2,3	2,7	1,4
Poço CB11	1,6	1,2	Sem análise	1,4	1,7	1,3	1,9	2	1,7	1,2	1	1,8	2,2	1,2
Poço CB12	2,2	1,7	2,8	2,3	2,5	1,7	2,8	3,1	2,3	2,1	1,4	2,8	3	1,3
Poço CB16	0,6	0,4	0,8	0,7	0,7	0,4	0,9	Sem análise	0,5	0,6	0,4	0,7	1	0,3
Poço CB17	0,7	0,5	0,8	0,6	0,6	0,5	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,8	0,9	0,5
Poço CB18	1	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	1	1,2	0,9	0,8	0,6	1	1,2	0,6
Poço CB19	1,3	0,8	1,3	1,2	1,4	1	1,6	1,5	1,1	0,9	0,7	1,2	1,8	0,6
Poço CB20	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,7	1,1	1,1	0,9	0,9	0,6	0,9	1,3	0,7
Poço CB26A	0,6	0,3	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,7	0,6	0,6	0,3	0,6	0,9	0,4
Poço CB34	3,3	2,4	2,3	2,8	3	2,2	3,2	3,6	3,1	2,8	2,3	2,9	4,6	2,5
Valor mínimo (por semana)	0,6	0,3	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,7	0,5	0,6	0,3	0,6	0,9	0,3
Valor máximo (por semana)	3,4	2,6	3,5	3,6	3,2	2,8	4,3	4	3,2	2,8	2,3	3,5	4,6	2,5
Mediana por semana (mg/L)	1,6	1,2	1,95	1,6	1,7	1,4	2,1	2,55	1,7	1,3	1,1	1,8	2,2	1,2
Pluviometria acumulada semanal (mm)	14,3	55,9	92,8	77,3	17,1	0	6,9	58	1,4	35,2	18,9	184	8,3	125
Mediana mensal (mg/L)				1,6				1,9				1,55		1,6
Pluviometria acumulada mensal (mm)				240,3				82				239		123,3

4.2 ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO

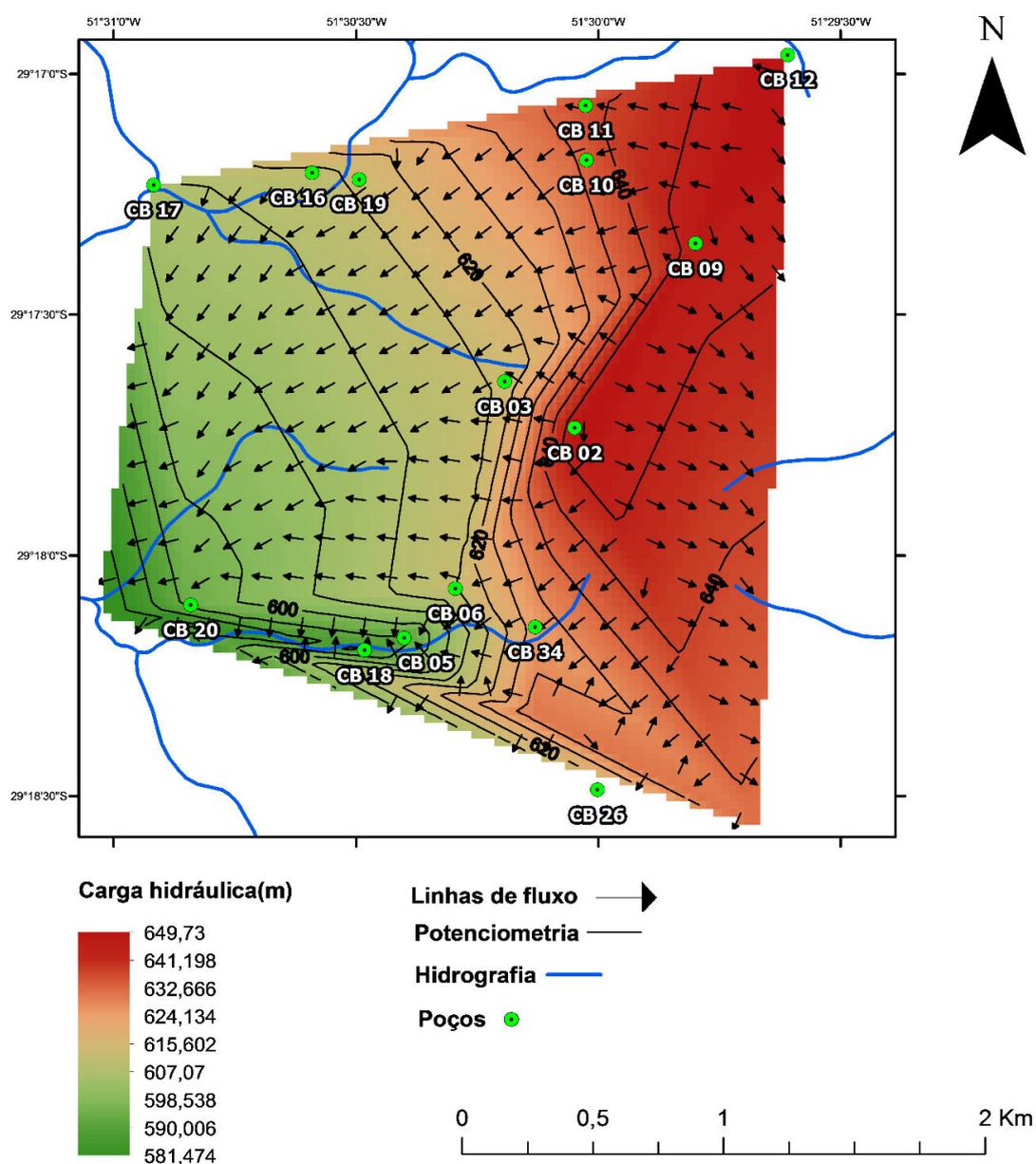
A figura 7 corresponde a imagem de satélite da região urbana de Carlos Barbosa com a distribuição espacial dos 15 poços estudados. Podemos identificar que os poços estão bem distribuídos na área, com alguns situados mais próximos as margens da malha urbana e outros mais no interior.

Figura 7 – Mapa de satélite da região urbana de Carlos Barbosa e a distribuição dos 15 poços na área de estudo.



A figura 8 ilustra o mapa potenciométrico da área de estudo. O mapa foi realizado a partir dos valores da carga hidráulica dos poços, calculados pela diferença da cota do terreno e do nível estático de cada poço. As diferenças de carga hidráulica são importantes, pois elas indicam a direção do fluxo subterrâneo. Não foi possível obter a carga hidráulica do poço CB26, o que prejudicou a precisão do mapa. A faixa de variação da cota potenciométrica foi de 581,4 a 649,73 metros.

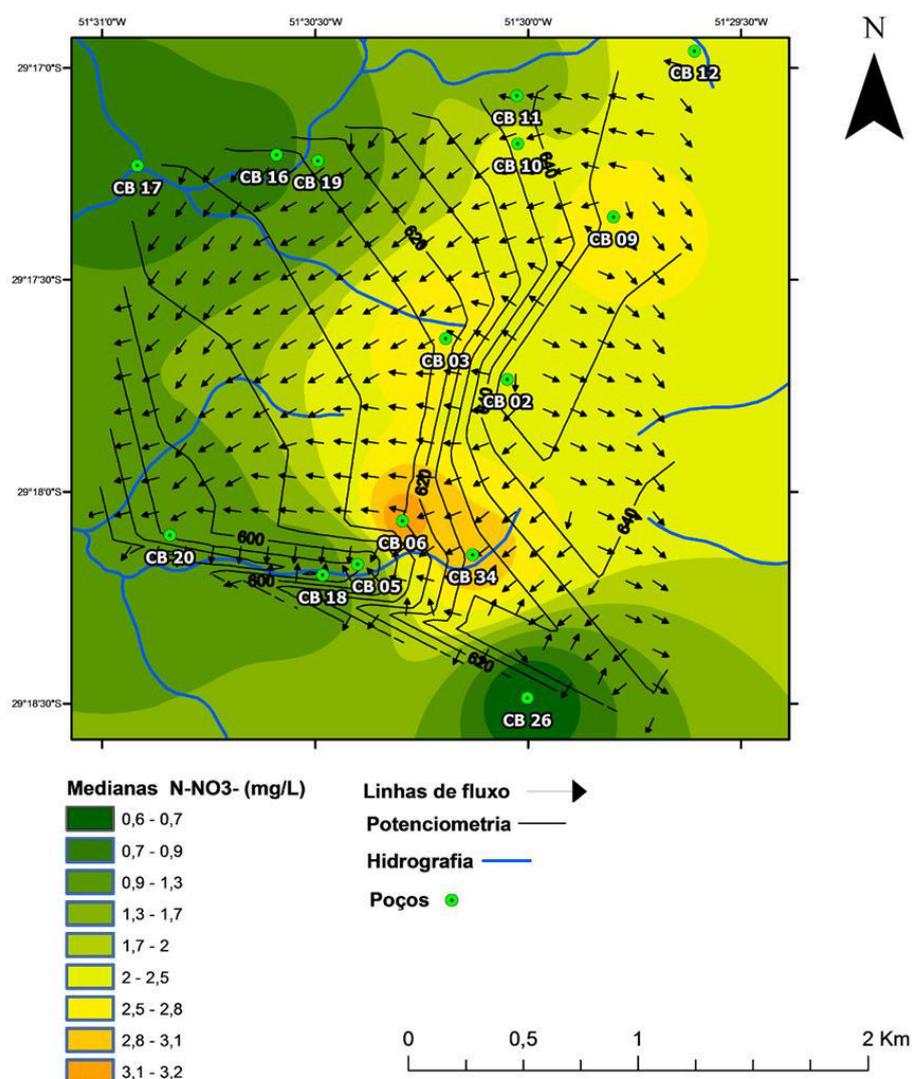
Figura 8 – Mapa potenciométrico da área de estudo. Observa-se duas direções preferenciais de fluxo a partir da zona de maior carga hidráulica, uma para sudoeste e outra para sudeste.



Observa-se no mapa (Figura 8) que as linhas de fluxo apresentam múltiplas direções. A partir dos poços CB02, CB09 e CB12, os quais se encontram nas áreas de maior carga hidráulica, as linhas de fluxo convergem preferencialmente para sudoeste e para sudeste em direção aos cursos d'água da região. Estes cursos d'água correspondem a pequenos afluentes. Por fim, as linhas de fluxo convergem para a região de menor carga hidráulica situada na parte sudoeste do mapa em que os poços CB20, CB18 e CB05 estão locados, adjacentes a um afluente. Esta zona corresponde a uma zona de descarga.

As figuras de 10 a 14 contém os mapas de isoconcentração de nitrato das 27 semanas de análises químicas e a figura 9 o mapa das medianas totais de cada poço sobreposto ao mapa potenciométrico.

Figura 9 – Mapa de isoconcentração de nitrato referente às medianas totais, sobreposto ao mapa potenciométrico.



Os mapas têm como objetivo ilustrar as variações das concentrações ao longo do tempo e espaço e identificar suas relações com os índices pluviométricos e o uso do solo. Em cada mapa está ilustrado o valor da pluviometria da semana, o intervalo de percentil (cores) das concentrações de nitrato e o valor mínimo e máximo.

Verifica-se que as concentrações mínimas se encontram sempre nas bordas oeste e sul dos mapas, mesmas zonas para onde se dá o fluxo hídrico. Em tais regiões compreendem os poços, CB16, CB17, CB18 e CB20, na borda oeste, e ao poço CB26 na borda sul. Estes poços apresentam as menores medianas (Figura 9) com valores semanais que raramente ultrapassam o percentil 25. Verifica-se que sempre ocorre uma variação gradativa positiva nas concentrações de nitrato nos sentidos de oeste para leste e de sul para norte e que as concentrações máximas se apresentam quase sempre no centro ou próximas ao centro dos mapas. Nessas regiões compreendem os poços CB03, CB06, CB34 e CB09. Estes poços possuem as maiores medianas de nitrato (Figura 9) e seus valores estão geralmente acima do 3 quartil.

Dada as direções de linhas de fluxo observadas na figura 9, somados aos constantes valores acima do percentil 90 dos poços CB34 e CB06; observado nos mapas de isoconcentração semanal, esperava-se concentrações mais elevadas de nitrato para os poços CB05 e CB18 que estão mais próximos àqueles. É provável que haja uma barreira hidráulica para o fluxo da água entre esses poços. Isso se deve ao fato de que a circulação da água subterrânea em meio fraturado dependa da existência de estruturas tectônicas, como fraturas; estruturas de resfriamento das rochas vulcânicas, como disjunções e estrutura vesicular, do contato entre derrames e litologia; presença de brechas e vesículas. Entre estes poços, possivelmente ocorram zonas com poucas fraturas, com menos conexões, fraturas mais estreitas ou de diferentes direções. Um estudo estrutural mais detalhado é necessário para um melhor entendimento.

Figura 10 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 1 e 6. Observa-se baixos valores de nitrato da semana 1 à semana 5 e um aumento nas concentrações a partir da semana 6.

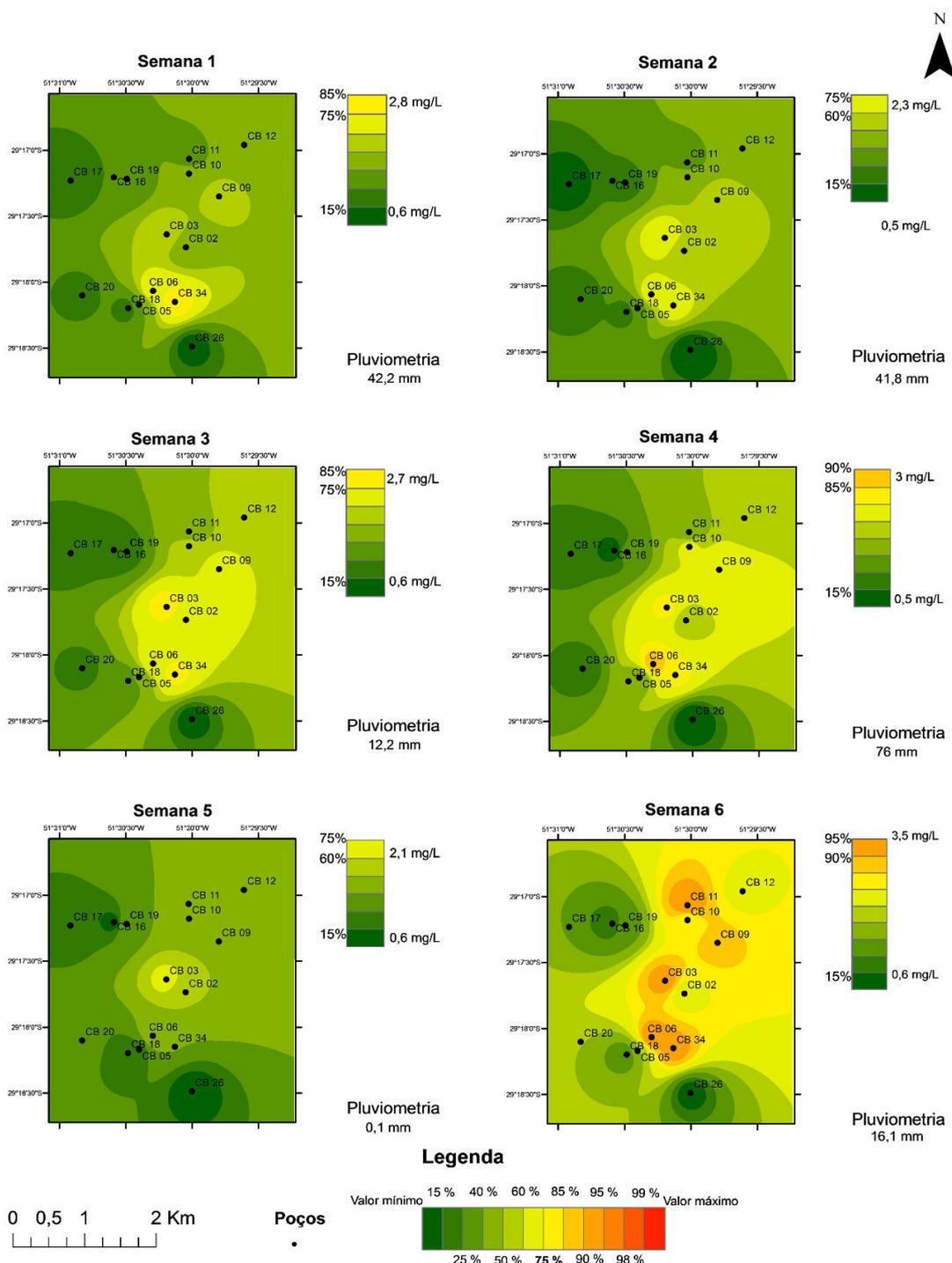


Figura 11 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 7 e 12. Observa-se um aumento nas concentrações de todos os poços marcado por áreas mais extensas acima do percentil 75.

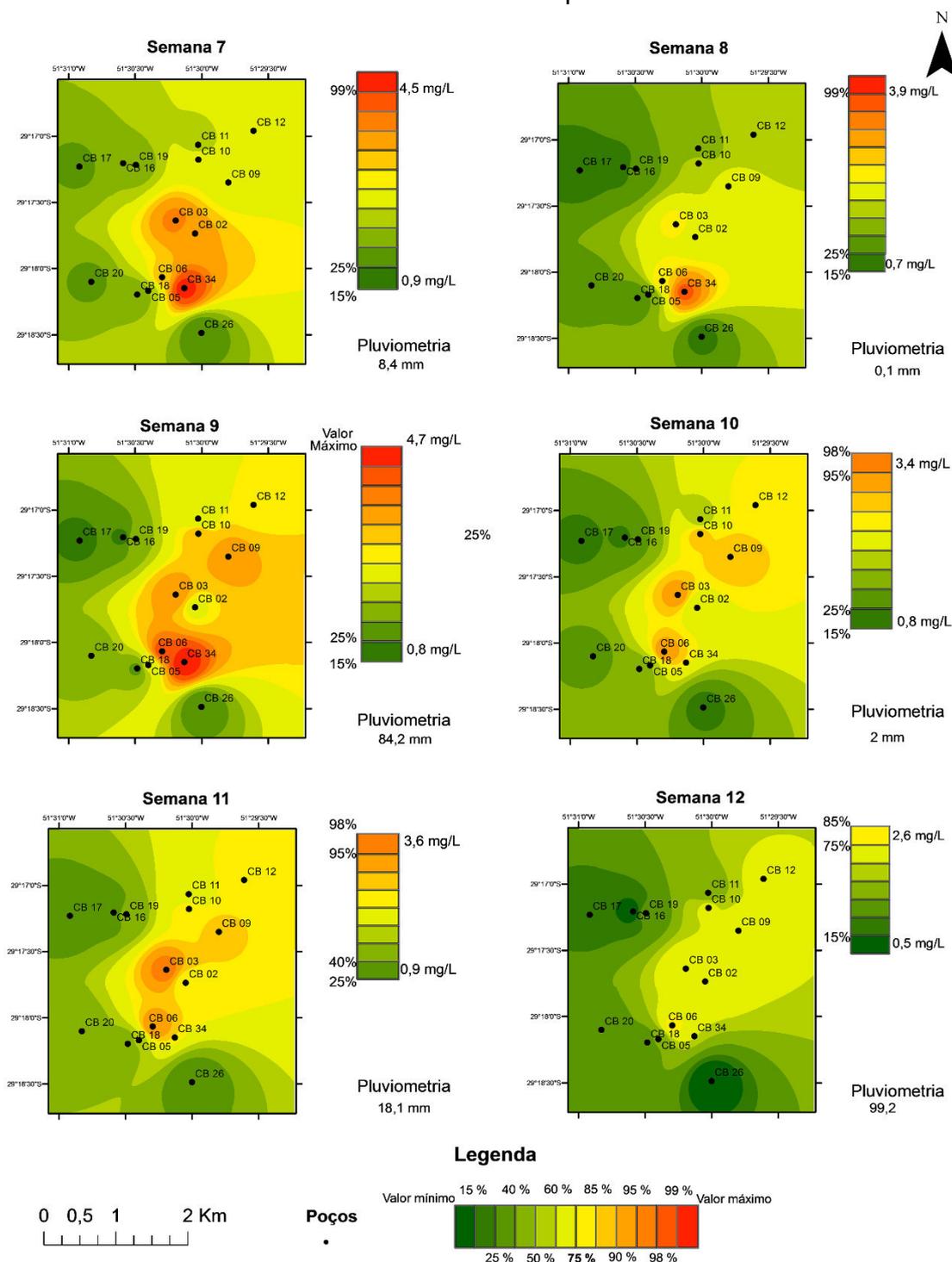


Figura 12 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 13 e 18.

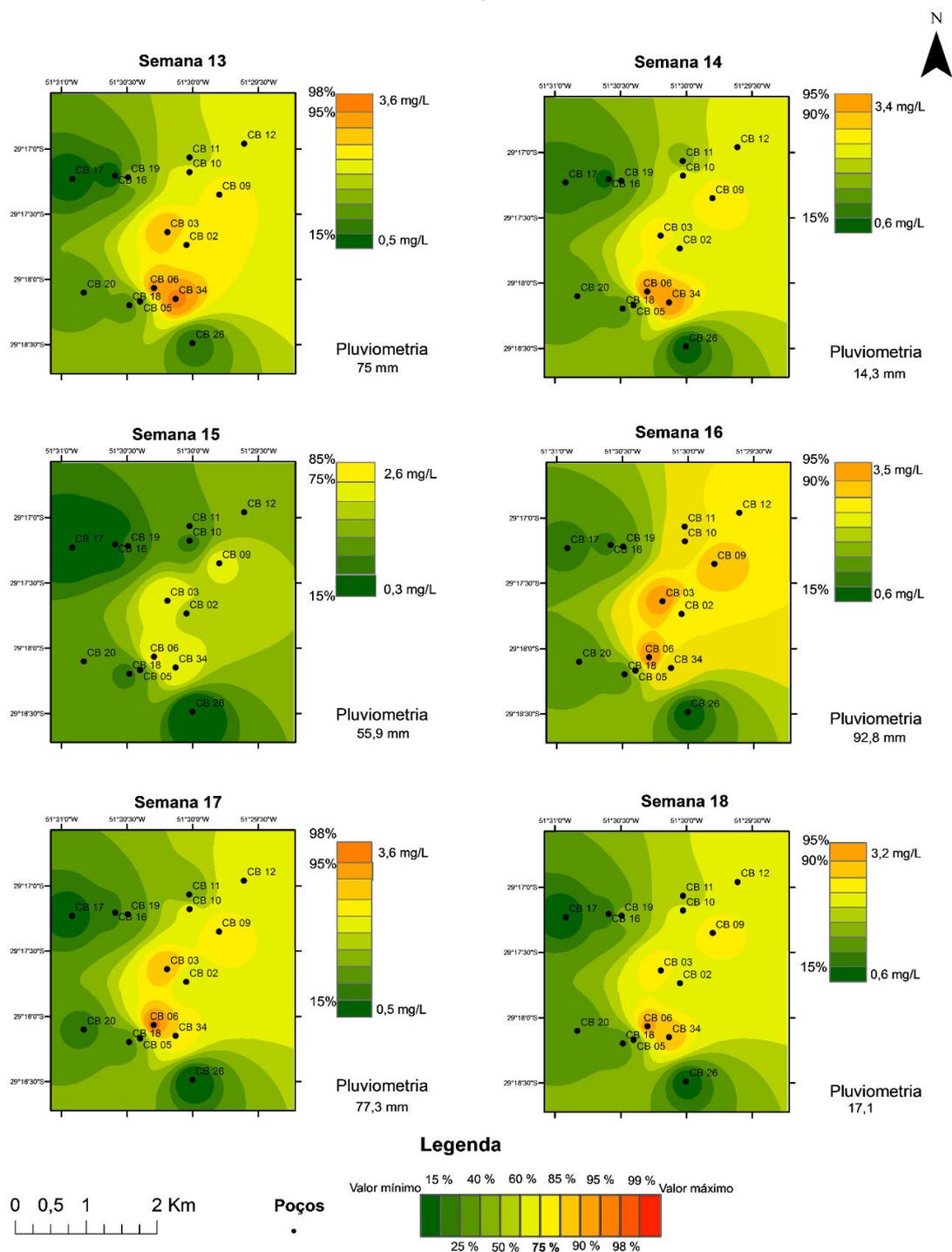


Figura 13 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 19 e 24. O mesmo padrão que ocorreu entre a semana 6 e 9 volta a ocorrer entre a semana 19 e 21.

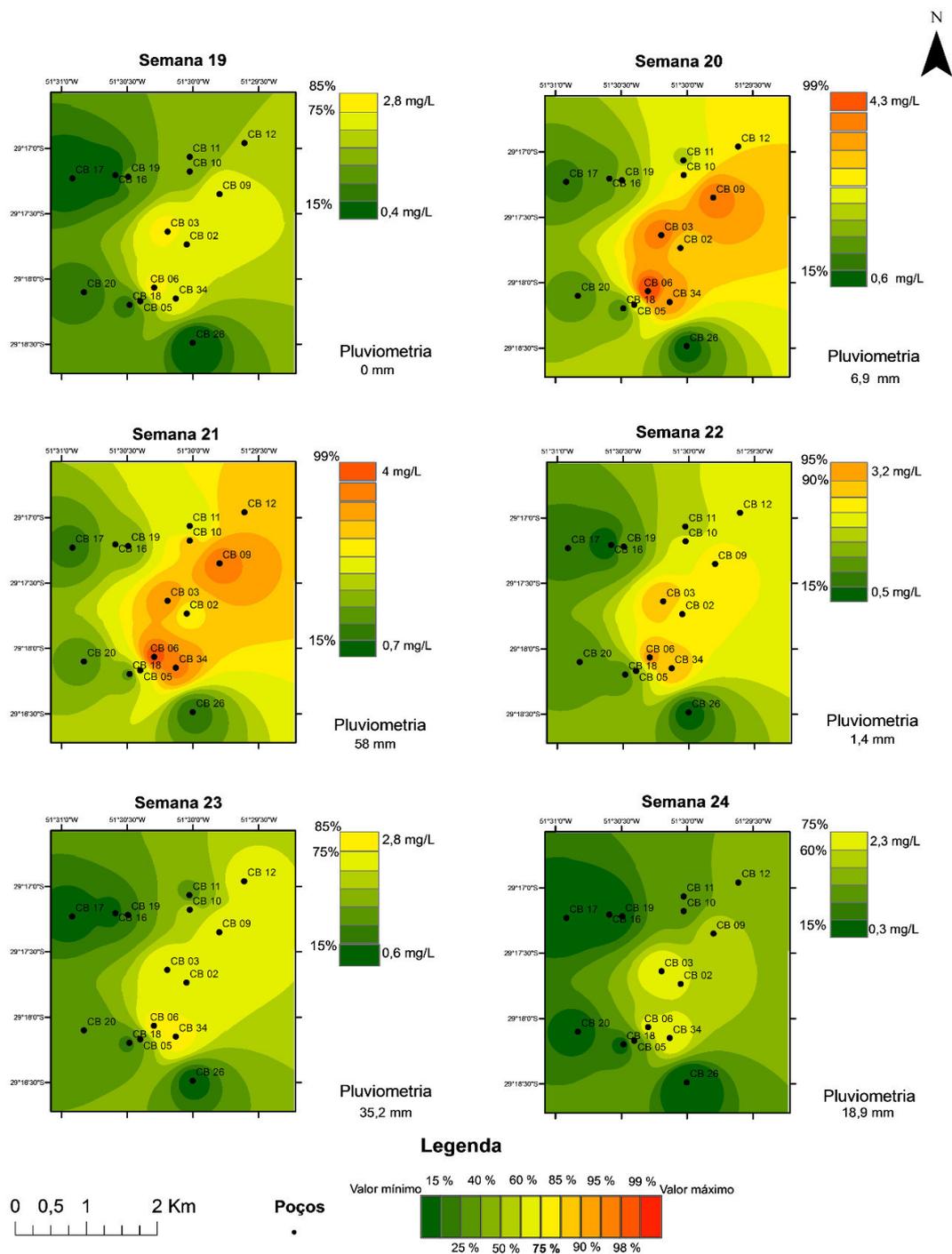
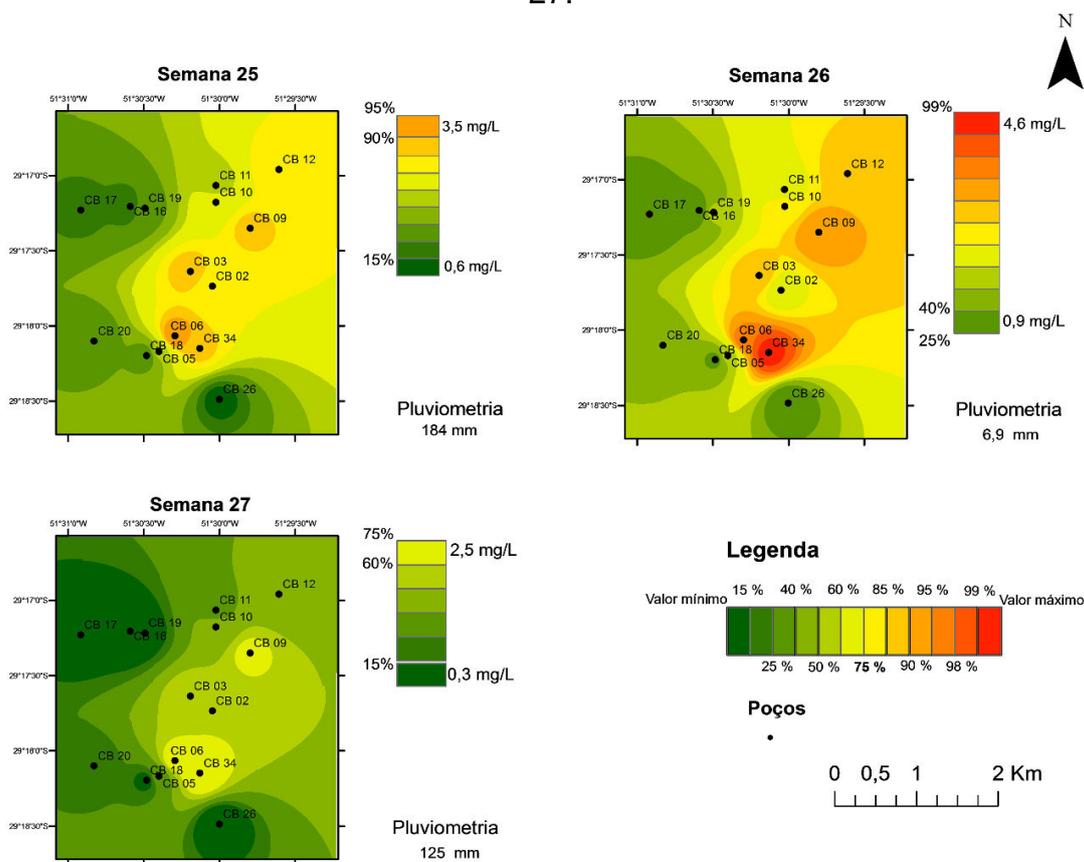


Figura 14 – Mapas de isoconcentração semanal de nitrato entre a semana 25 e 27.



4.2.1 Relação entre o nitrato e a pluviometria

A análise geral dos mapas das figuras 10 a 14, dos gráficos das figuras 15 a 17 e dos dados do quadro 5, indicam a ocorrência de aumentos consideráveis nas concentrações do nitrato principalmente em períodos de menores índices pluviométricos. Verifica-se este padrão estritamente entre as semanas de 5 a 9 e de 19 a 21, períodos onde são encontrados semanas com as maiores medianas de nitrato (Quadro 5) e os menores índices pluviométricos.

Os mapas da semana 1 a 5 (Figura 10) indicam concentrações de nitrato da maioria dos poços abaixo do 3º quartil. Da semana 6 a semana 9 (Figuras 10 e 11) observa-se um aumento das concentrações de todos os poços marcado por áreas mais extensas acima do 3º quartil, valores acima do percentil 99, pelo valor máximo de nitrato encontrado na semana 9 e por índices pluviométricos baixos. Entre as semanas 13 e 19 os índices pluviométricos se mantêm constantes, geralmente acima dos 50 mm nas quais não há grandes áreas acima do 3º quartil. O mesmo padrão que ocorreu entre a semana 6 e 9 volta a ocorrer entre a semana 19 e 21.

O gráfico da figura 15 compara as medianas semanais de todos os poços com as pluviometrias semanais, seu objetivo foi ilustrar uma visão regional do comportamento do nitrato em relação a pluviometria. Juntamente a esse gráfico, o quadro 5 contém os valores dessas medianas e pluviometrias. Nota-se que as maiores medianas semanas são antecedidas por semanas com índices pluviométricos baixos ou nulos. O padrão é encontrado da semana 5 para a 6, da semana 8 para a 9, da 10 para 11, da 19 para 20 e da 20 para 21. Isso ocorre provavelmente devido ao processo de evaporação que o aquífero sofre nos períodos mais secos, tornando as águas mais concentradas.

Apesar desse padrão, a relação inversa não é verificada a todo momento. Em algumas semanas observa-se uma clara relação diretamente proporcional entre pluviometria e as concentrações de nitrato. Entre a semana 25 e 26, 15 e 16 e 14 e 15, por exemplo, nota-se o inverso. Isso se deve à dependência da intensidade das chuvas e da capacidade de infiltração do solo na infiltração da água no mesmo. Se a intensidade da chuva for maior que a capacidade de infiltração do solo ocorrerá um maior escoamento superficial. Para estudos mais detalhados a análise destes fatores seria interessante.

Quadro 4 – Quadro contendo os valores das medianas semanais de nitrato e as pluviometrias.

Mês	Semana	Pluviometria (mm)	Mediana (mg/L)
Mês 1	Semana 1	42,2	1,35
	Semana 2	41,8	1,35
	Semana 3	12,2	1,4
	Semana 4	76,6	1,6
	Semana 5	0,1	1,3
Mês 2	Semana 6	16,1	2,4
	Semana 7	8,4	1,8
	Semana 8	0,1	1,4
	Semana 9	84,2	2,1
Mês 3	Semana 10	2	1,7
	Semana 11	18,1	1,9
	Semana 12	99,2	1,4
Mês 4	Semana 13	75	1,7
	Semana 14	14,3	1,6
	Semana 15	55,9	1,2
	Semana 16	92,8	1,95
	Semana 17	77,3	1,6
Mês 5	Semana 18	17,1	1,7
	Semana 19	0	1,4
	Semana 20	6,9	2,1
	Semana 21	58	2,55
Mês 6	Semana 22	1,4	1,7
	Semana 23	35,2	1,3
	Semana 24	18,9	1,1
	Semana 25	184	1,8
Mês 7	Semana 26	8,3	2,2
	Semana 27	125	1,2

O gráfico da figura 16 relaciona as medianas mensais do nitrato na região com as pluviometrias mensais. Ele demonstra que o padrão geral do comportamento do nitrato em relação às chuvas é inversamente proporcional. Isto sugere que as maiores recargas hídricas acabam por diluir as cargas de nitrato.

Por fim, a figura 17 mostra a variação de nitrato dos 15 poços agrupadas em um gráfico. A análise deste gráfico indica uma boa correlação entre as variações de nitrato nos poços, demonstrando que as concentrações nos poços apresentam o mesmo comportamento frente aos índices pluviométricos.

Figura 15 – Gráfico que relaciona as medianas semanais com as pluviometrias semanais.

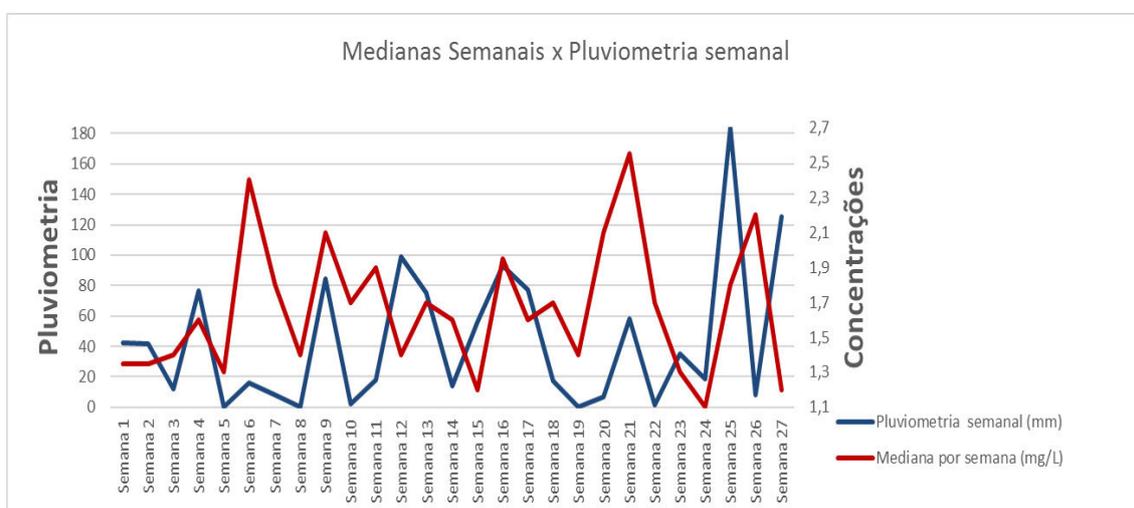


Figura 16 – Gráfico que relaciona as medianas mensais de nitrato com as pluviometrias mensais.

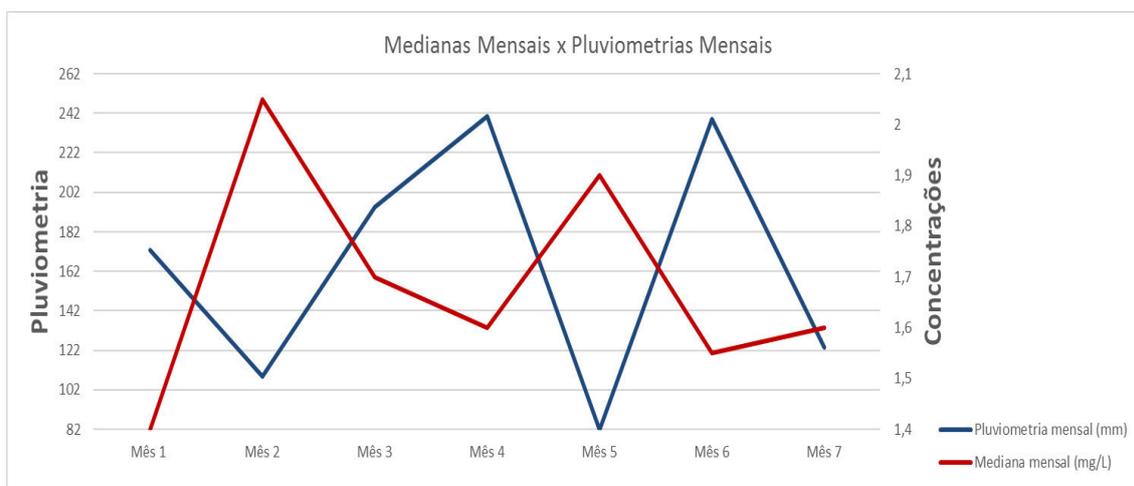
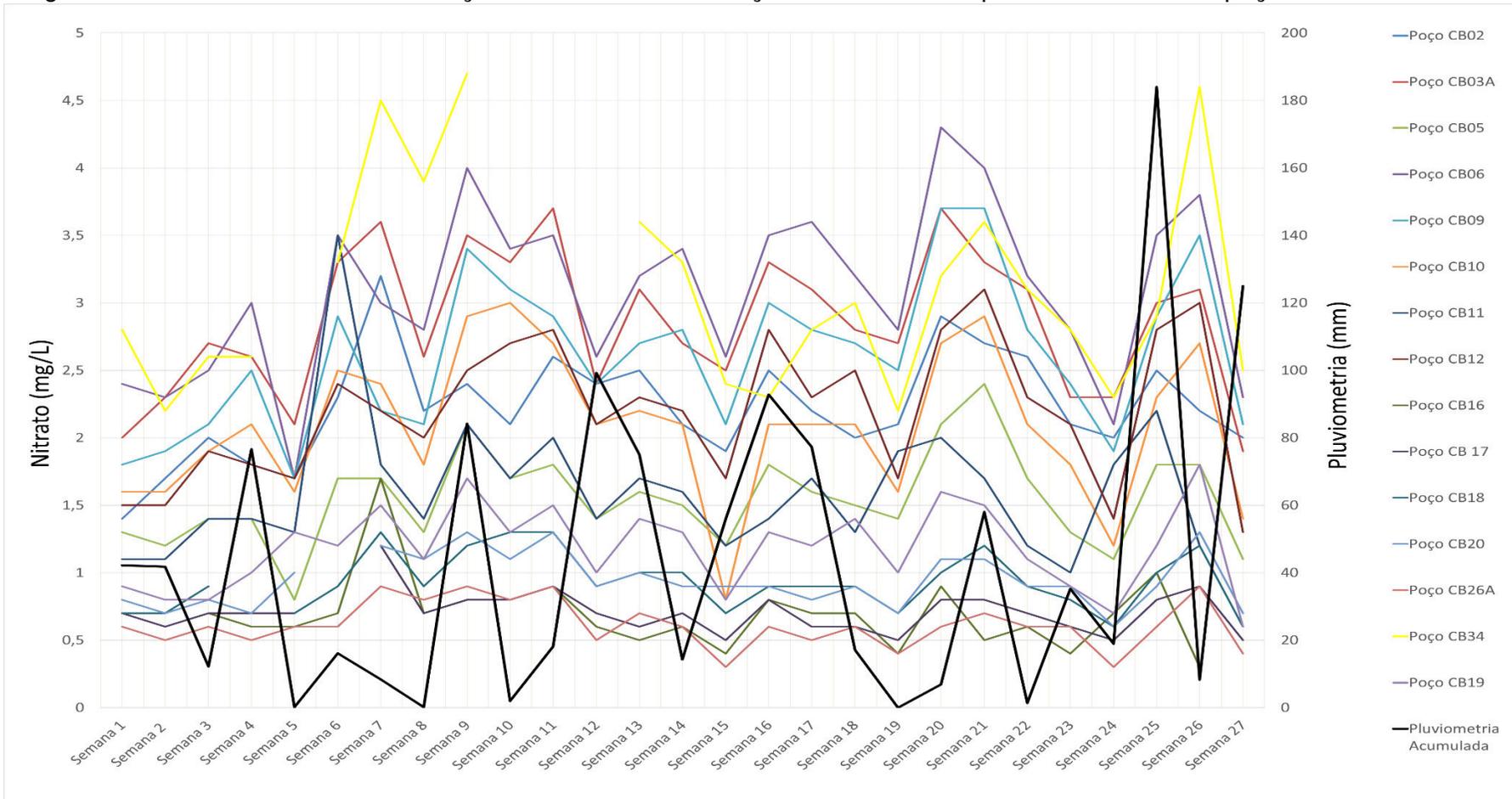


Figura 17 – Gráfico contendo as relações entre as concentrações de nitrato e a pluviometria dos 15 poços individualmente.



4.2.2 Relação entre o nitrato e o uso e ocupação do solo

Apesar das análises não evidenciarem concentrações de nitrato acima do VMP estabelecido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o mapa da figura 18, que relaciona o mapa da evolução dos perímetros urbanos (Figura 6) com o mapa das medianas de nitrato indica que as maiores concentrações de nitrato se encontram nas regiões mais antigas da cidade, nas quais os sistemas de saneamento in situ foram utilizadas por períodos de tempo mais longos.

As maiores medianas pertencem em ordem crescente aos poços, CB09, CB03, CB06 e CB34 (Quadro 6). Estes poços localizam-se predominantemente nos perímetros mais antigos, entre 1961 e 1974 (Quadro 6). O poço CB34 possui o maior valor de nitrato, 4,7 mg/L e está mais próximo a origem do núcleo urbano. Por outro lado, os poços com menores medianas estão localizados entre os perímetros de 1985 e 2006. Podemos observar no mapa da figura 19 que esses poços além de se localizarem em zonas mais novas, estão locados em zonas de menor densidade populacional; inseridos em áreas periféricas a malha urbana, ao contrário dos poços de maiores medianas.

Quadro 5 – Medianas totais de nitrato e a localização dos poços referentes aos perímetros urbanos.

Poços	Medianas(mg/L)	Perímetro
CB26A	0,6	1985
CB16	0,7	1985
CB17	0,7	2006
CB18	0,9	2006
CB20	0,9	2006
CB19	1,2	1985
CB05	1,5	1985
CB11	1,5	1985
CB10	2,1	1974
CB02	2,2	1961
CB12	2,2	1985
CB09	2,7	1970
CB03	2,8	1961
CB34	2,9	1974
CB06	3,2	1970

Figura 18 – Mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa sobreposto ao mapa das medianas totais de nitrato. Evidencia-se que os poços de maiores medianas encontram-se nos perímetros mais antigos da cidade.

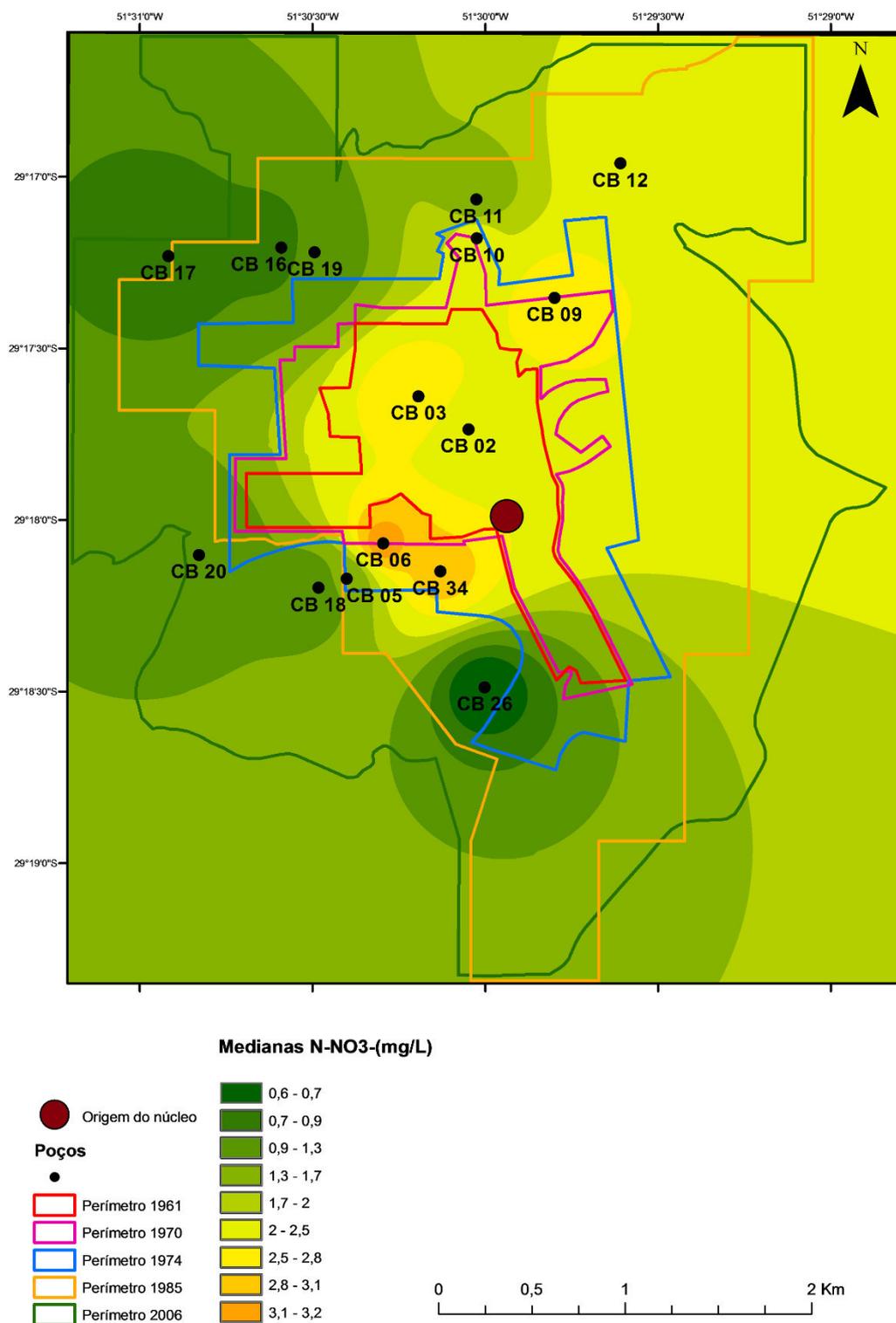
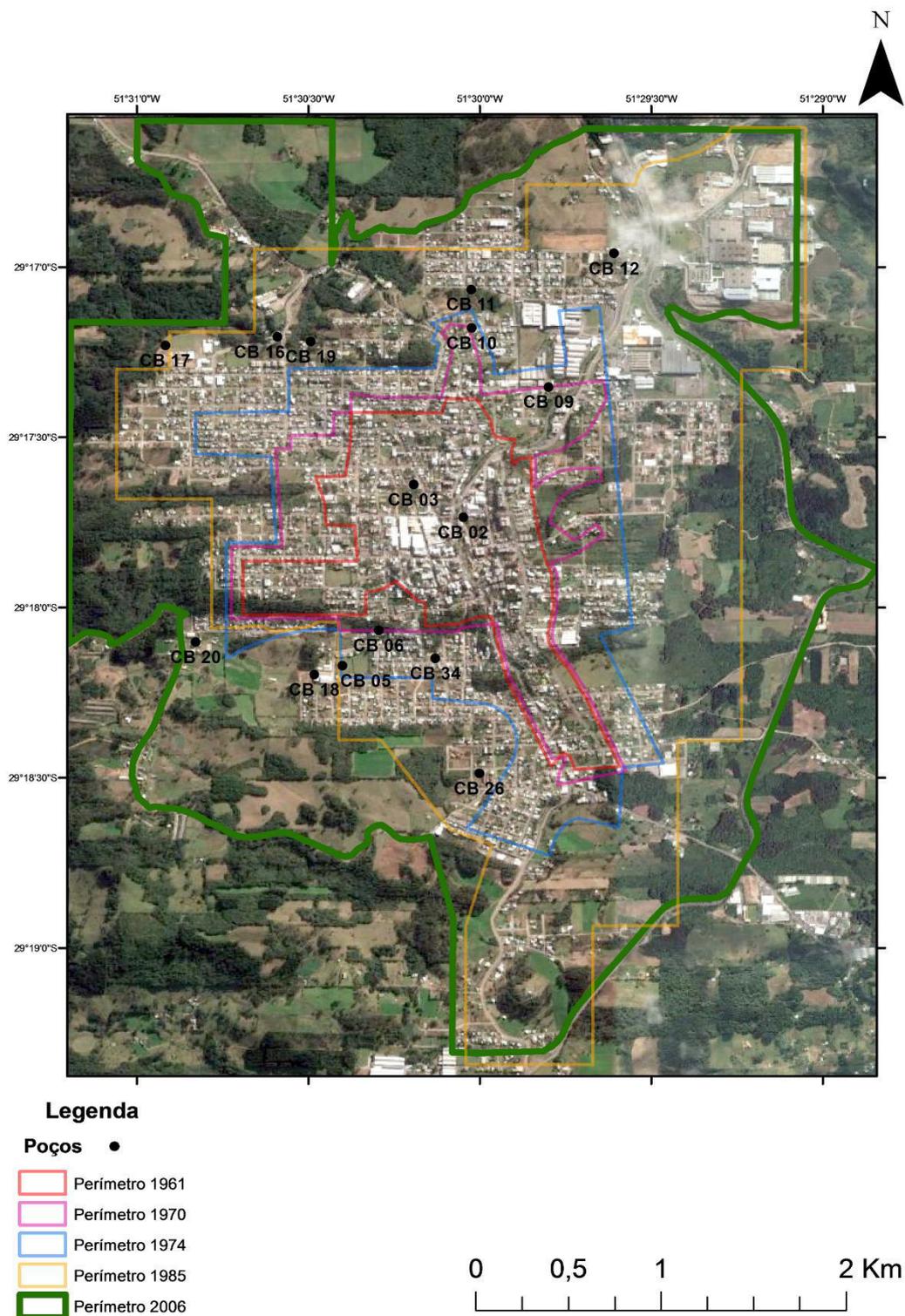
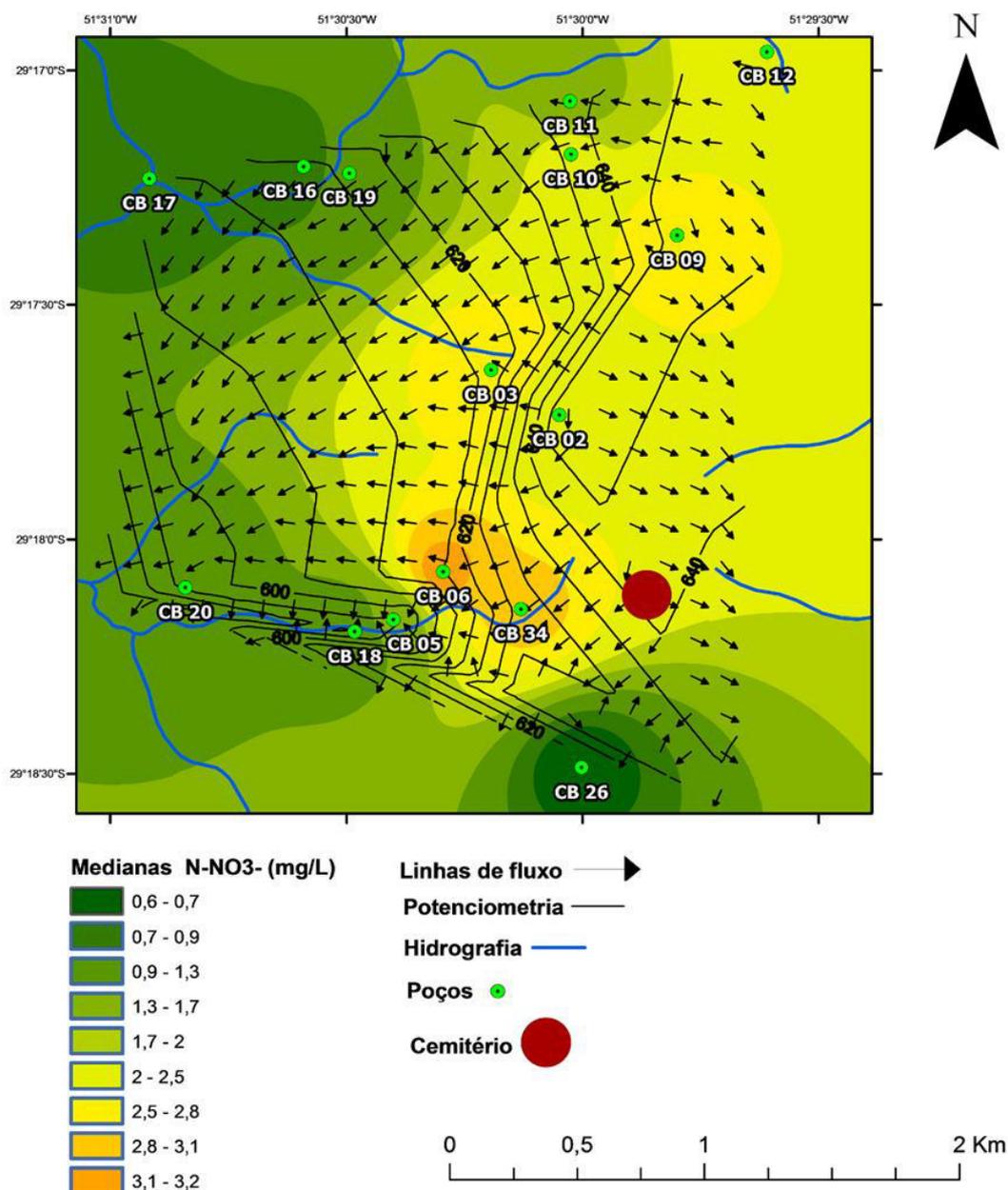


Figura 19 – Imagem de satélite da área de estudo sobreposta ao mapa da evolução dos perímetros urbanos de Carlos Barbosa. Os poços CB03, CB34, CB06 e CB09 apresentam as medianas de nitrato mais elevadas e encontram-se em áreas mais densamente povoadas comparados aos poços de menores medianas.



As evidências anteriores sugerem que as concentrações de nitrato estão relacionadas a expansão urbana e potencialmente aos sistemas de esgotamento sanitários in situ. Na busca por diferentes fontes potenciais de contaminação por nitrato, foi identificado a localização do cemitério de Carlos Barbosa. A figura 20 ilustra o mapa potenciométrico sobreposto ao mapa das medianas de nitrato, juntamente com a localização do cemitério.

Figura 20 – Mapa das medianas de nitrato sobreposto ao mapa potenciométrico e a localização do cemitério da cidade.



Esta fonte pode ser uma das causadoras dos valores anômalos dos poços CB34 e CB06; para se ter certeza, necessita-se de análises mais aprofundadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No município de Carlos Barbosa houve um longo período de uso das fossas sépticas como sistema de saneamento básico. As primeiras redes de esgoto doméstico, Sistema Separador Absoluto, surgiram no ano de 2006.

O nitrato nas águas do Sistema Aquífero Serra Geral na região urbana do município varia de 0,3 a 4,7 mg/L N-NO₃⁻. Estes valores estão abaixo do Valor Máximo Permitido pela CONAMA, porém os maiores valores determinados nas análises não são naturalmente encontrados nos aquíferos.

Corroborando com as hipóteses do trabalho, a análise espacial das concentrações de nitrato demonstrou haver uma relação com o uso e ocupação do solo na região. Os maiores valores de nitrato foram encontrados nas zonas mais antigas da cidade, nas quais há uma maior probabilidade de ter ocorrido problemas com as fossas sépticas devido ao maior tempo de uso das mesmas. Além disto os poços com as menores medianas além de se localizarem nas zonas mais novas da cidade, estão localizados em zonas de menor densidade populacional; periféricas a malha urbana, onde há menos fossas sépticas. Essas evidências sugerem uma forte influência antrópica na qualidade das águas do aquífero na região.

O mapa potenciométrico indicou um fluxo subterrâneo de direções preferenciais orientadas para sudoeste e sudeste, a partir das zonas de maior carga hidráulica.

Apesar do presente trabalho apontar as fossas sépticas como fonte do nitrato, na busca por fontes potenciais de contaminação foi identificado o cemitério da cidade. O cemitério está localizado próximo aos poços com maiores medianas de nitrato. Em relação ao cemitério esses poços estão localizados em uma zona para onde se destina o fluxo hídrico, portanto não se elimina a possibilidade desse local estar elevando as concentrações de nitrato.

A precipitação pluviométrica foi um fator que influenciou na variação das concentrações de nitrato ao longo do tempo. Constatou-se no geral, uma diminuição das medianas de nitrato nos períodos de maior pluviosidade. Isto sugere que a água da chuva esteja diluindo as concentrações de nitrato nas águas subterrâneas da região. Apesar da constatação, em algumas semanas ocorre o contrário, provavelmente devido à forte dependência da intensidade

da chuva na quantidade de água infiltrada no solo. Se a intensidade da chuva for maior que a capacidade de infiltração do solo ocorrerá um maior escoamento superficial e conseqüentemente menor infiltração.

Como trabalhos complementares sugere-se a obtenção de análises mais detalhadas de parâmetros químicos e físico-químicos. É indicado a realização de análises de correlações entre o nitrato e outros elementos provenientes de efluentes domésticos, como o cloreto, sódio e amônia. Além disso sugere-se a realização de análises bacteriológicas, importantes para a identificação de contaminação tanto por necrochorume, no caso do cemitério, quanto pelos dejetos humanos, no caso das fossas sépticas. Ademais, um mapa de fluxo mais detalhado, envolvendo valores de cargas hidráulicas de um número maior de poços na região seria interessante.

A persistência do nitrato pode fazer com que o problema evolua, tornando a água imprópria para o consumo. Isto somado a alta dependência dessas águas para o abastecimento do município, sugere-se aos órgãos competentes que haja um monitoramento com análises físico-químicas mais frequentes, principalmente nos poços CB06, CB34 e CB03.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas. (2005). *Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil*. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas, Ministério do Meio Ambiente. Recuperado de <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20Qualidade%20AguasSubterraneas.pdf>
- Baird, C., & Cann, M. (2011). *Química ambiental* (4. ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Bittencourt, A. V. L., Rosa Filho, E. D., Hindi, E. C., & Buchmann Filho, A. C. (2003). A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do rio Piquiri, Paraná - BR. *Revista Águas Subterrâneas*, (17), 67-75. doi: 10.14295/ras.v17i1.1313
- Boff, F. E, Medeiros, M. A. de, Muller, A. L., & Koppe, J. C. (2006). Caracterização hidroquímica das águas minerais da Serra do Nordeste Gaúcho. In *Suplemento Revista Águas Subterrâneas: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas* (pp. 1-18). Curitiba, PR. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22215/14565>
- Bortolin, T. A., Reginato, P. A. R., Leão, M. I., & Schneider, V. E. (2014). Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). *Revista Ambiente & Água*, 9(1), 55-67. doi: 10.4136/ambi-agua.1270
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Barros, M. T. L. de, Spencer, M., Porto, M., ... Eiger, S. (2002). *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. (2005). *Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul: Escala 1:750.000*. Porto Alegre: Ministério de Minas e Energia. Recuperado de http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_hidrogeologico_RS.pdf
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. (2007). *Mapa geológico do Rio Grande do Sul: Escala 1:750.000*. Porto Alegre: Ministério de Minas e Energia. Recuperado de http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf

- Diniz, J. A. O., Monteiro, A. B., Silva, R. de C. da, & Paula, T. L. F. de. (2014). *Manual de cartografia hidrogeológica*. Recife: CPRM.
- Feitosa, F. A. C., & Manoel Filho, J. (2000). *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações* (2. ed.). Recife: CPRM.
- Hausman, A. (1995). Províncias hidrogeológicas do estado do Rio Grande do Sul, RS. In *Estudos Tecnológicos: Acta Geológica Leopoldensia* (Mapas, Vol. 2, pp. 1-127). São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Censo 2010*. Recuperado de <http://censo2010.ibge.gov.br/>
- Landim, P. M. B. (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Rio Claro: UNESP. Recuperado de <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>.
- Landim, P. M. B., Monteiro, R. C., & Corsi, A. C. (2002). Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER. Rio Claro: UNESP. Recuperado de <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>
- Parker, D. S. (Ed.). (1975). *Process design manual for nitrogen control*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Retrieved from <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED162870.pdf>
- PJS Geologia. (2013). *Plano municipal de saneamento básico: Água, esgoto e drenagem, Carlos Barbosa-RS*. Novo Hamburgo: PJS Geologia.
- Reginato, P. A. R. (2003). *Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS)* (Tese de doutorado). Recuperado de <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/117392/000402125.pdf?sequence=1>
- Reginato, P. A. R., & Ahlert, S. (2013). Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, 27(2), 32-46. doi: 10.14295/ras.v27i1.27061
- Reginato, P. A. R., & Strieder, A. J. (2004). Caracterização hidroquímica dos aquíferos fraturados da formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. In *Suplemento Revista Águas Subterrâneas: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas* (pp. 1-14). Curitiba, PR. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23400>

- Resolução Nº. 357, de 17 de março de 2005.* Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. (2005). Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasil. Recuperado de <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>
- Roisenberg, A., & Viero, A. P. (2002). O vulcanismo mesozoico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In M. Holz, & Ros, L. F. de (Eds.). (2000). *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 355-374). Porto Alegre: CIGO/UFRGS.
- Varnier, C. L. (2001). O efeito do nitrogênio proveniente de sistemas de saneamento “in situ” na qualidade das águas subterrâneas em aquíferos livres e rasos (Dissertação de mestrado). Recuperado de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-10092015-163723/pt-br.php>
- Varnier, C., Iritani, M. A., Viotti, M., Oda, G. H., & Ferreira, L. M. R. (2010). Nitrate nas águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 31(1-2), 1-21. doi: 10.5935/0100-929x.20100001
- Wildner, W., Orlandi Filho, V., & Giffoni, L. E. (2006). Itaimbezinho e Fortaleza, RS e SC: Magníficos canyons esculpidos nas escarpas Aparados da Serra do planalto vulcânico da Bacia do Paraná. In M. Winge, C. Schobbenhaus, M. Berbert-Born, E. T. Queiroz, D. A. Campos, C. R. G. Souza, & A. C. S. Fernandes (Eds.), *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil* (pp. 1-12). Recuperado de <http://sigep.cprm.gov.br/sitio050/sitio050.pdf>

ANEXOS

ANEXO A – MAPA DE EVOLUÇÃO DA ÁREA URBANA DE CARLOS BARBOSA

