



Combinação Linear Ponderada na Determinação da Capacidade de Armazenamento de Água Subterrânea

José Carlos Benício do Nascimento Filho¹; Paulo Sérgio de Rezende Nascimento¹

✉ psrn.geologia@gmail.com

1. *Universidade Federal de Sergipe.*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 03 de fevereiro de 2021

Aceito em: 19 de julho de 2021

Publicado em: 30 de abril de 2022

Resumo: No estado de Sergipe, a escassez de água superficial compromete o consumo humano, dessedentação animal, irrigação e uso industrial. Esse cenário é mais crítico na região semiárida, e a captação da água subterrânea tornou-se uma alternativa para suprir a carência desse recurso hídrico, principalmente em períodos críticos de seca. Esse trabalho visou determinar as áreas favoráveis ao armazenamento de água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, no estado de Sergipe, por técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, visando otimizar a perfuração de poços tubulares, minimizar os custos operacionais e subsidiar a gestão hídrica com as atividades socioeconômicas ambientalmente sustentáveis. Os principais procedimentos foram a compilação e confecção de mapas temáticos e a sua integração pela técnica de Combinação Linear Ponderada. Como resultado, obteve-se cinco classes de favorabilidade ao armazenamento de água subterrânea, muito baixa, baixa, média, alta e muita alta, perfazendo 19%, 34%, 28%, 11%, e 8% da área de estudo, respectivamente. A metodologia foi adequada pois delimitou as principais áreas com potencialidade de acumulação de água nos aquíferos fraturados do semiárido sergipano. O produto cartográfico final, na escala 1:100.000 é um documento técnico-gerencial para subsidiar trabalhos futuros em escala de detalhe na área de estudo.

Palavras-chave: Geotecnologias, Recurso hídrico, Aquífero fraturado, Semiárido.

Weighted Linear Combination in Determination Capacity for Groundwater Storage

Abstract: In the state of Sergipe, the scarcity of surface water compromises human consumption, animal watering, irrigation and industrial use. This scenario is more critical in the semi-arid region, and the catchment groundwater has become an alternative to supply the lack of this hidric resource, especially in critical dry periods. Thus, the objective of the work was to determine the most favorable areas for underground water storage in the São Francisco River Basin, in the state of Sergipe, using remote sensing and geoprocessing techniques, aiming to optimize the drilling of tubular wells, minimizing costs and subsidize water management with environmentally sustainable socioeconomic activities. The main procedures were the compilation and preparation of thematic maps and their integration using the Weighted Linear Combination technique. As a result, there were five classes of favorability for the storage of groundwater, very low, low, medium, high and very high, occupying 19%, 34%, 28%, 11% and 8% of the study area, respectively. The methodology was adequate because it delimited the main areas with potential for water accumulation in the fractured aquifers of the Sergipe's semiarid region. The final cartographic product, on a scale of 1:100,000, is a technical-managerial document to support future work on a detailed scale in the study area.

Keywords: Geotechnologies, Water resource, Fractured aquifer, Semiarid.

Combinación Lineal Ponderada en la Determinación de la Capacidad del Almacenamiento de Agua Subterránea

Resumen: En el estado de Sergipe, la escasez de agua superficial compromete el consumo humano, el riego de los animales, el irrigación y el uso industrial, convirtiéndose en un obstáculo para las necesidades humanas básicas y el crecimiento económico. Este escenario es más crítico en la región semiárida, y el agua subterránea de captación se ha convertido en una alternativa para suplir la carencia de este recurso hídrico, especialmente en períodos críticos de sequía. Así, el objetivo del trabajo fue determinar las áreas más favorables para el almacenamiento de agua subterránea en la Cuenca del Río São Francisco, en el estado de Sergipe, utilizando técnicas de teledetección y geoprocésamiento, con el objetivo de optimizar la perforación de pozos tubulares, minimizando costos y subsidiar la gestión del agua con actividades socioeconómicas ambientalmente sostenibles. Los principales procedimientos fueron la recopilación y elaboración de mapas temáticos y su integración mediante la técnica de Combinación Lineal Ponderada. Como resultado, hubo cinco clases de favorabilidad para el almacenamiento de agua subterránea, muy baja, baja, media, alta y muy alta, ocupando el 19%, 34%, 28%, 11% y 8% del área de estudio, respectivamente. La metodología fue adecuada porque delimitó las principales áreas con potencial de acumulación de agua en los acuíferos fracturados del semi árido de Sergipe. El producto cartográfico final, a escala 1:100.000, es un documento técnico-gerencial para sustentar el trabajo futuro a escala detallada en el área de estudio.

Palabras clave: Geotecnologías, Fuente de agua, Acuífero fracturado, Semi árido.

INTRODUÇÃO

Mais da metade da população mundial depende das águas subterrâneas para sobreviver, pois o aumento populacional as tornou fontes essenciais no atendimento total ou suplementar para o consumo humano e atividades agropecuárias e industriais (YISA; JIMOH; OYIBO, 2012). A partir da década de 1950 foi atribuído aos reservatórios hídricos subterrâneos um papel de destaque no equacionamento do problema de água em regiões áridas, semiáridas e desérticas do planeta (FREEZE; CHERRY, 1979; CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983). No Brasil, embora se perfurem poços desde o século XIX, somente a partir de 1959, com a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), que a hidrogeologia começou a ser considerada como ciência, tendo como marco o Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste (FEITOSA *et al.*, 2008). No entanto, estes estudos foram paralisados em meados da década de 1960, em função da desmobilização da SUDENE por quase três décadas (COLOMBO, 2013).

Uma das consequências diretas da desmobilização da SUDENE foi o aumento do desperdício financeiro de recursos públicos na perfuração de poços tubulares rasos ou profundos, decorrente da falta de conhecimento hidrogeológico e de controle das perfurações de poços (REBOUÇAS; MARINHO, 1970; REBOUÇAS, 1997). No entanto, na década de 1990, as pesquisas do Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SGB/CPRM) retomaram o desenvolvimento do conhecimento hidrogeológico do semiárido nordestino. Destacam-se o Programa de Água Subterrânea para o Semi-Árido Brasileiro e o Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil – PROASNE (CPRM, 2003; CPRM, 2005). A partir destes



programas, as metodologias foram amplamente adaptadas para exploração hidrogeológica, com destaque para o semiárido do Brasil (PINÉO *et al.*, 2013).

No estado de Sergipe, os recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) apresenta relevância ecossistêmica e socioeconômica, por sua utilização no abastecimento público, irrigação e pecuária (AGUIAR NETTO; SANTANA, 2015; ANA, 2019). Destaca-se a utilização da água subterrânea principalmente no semiárido sergipano. Além dos afluentes do rio São Francisco serem intermitentes, os custos para a utilização de águas subterrâneas são menores que os de águas superficiais, decorrente da menor necessidade de construção de infraestruturas de tratamentos (CALLJURI; CUNHA, 2013).

A análise integrada, em uma plataforma digital unificada proporcionado por um Sistema de Informação Geográfica (SIG), de dados climáticos, geomorfológicos, pedológicos, litológicos, grau de fraturamento e cobertura do solo obtidos por sensoriamento remoto possibilita o desenvolvimento de estudos eficientes, rápidos e de baixo custo sobre o armazenamento de águas subterrâneas (NASCIMENTO, 2019). A rapidez e a qualidade na interpretação de feições estruturais favoráveis ao fluxo de água subterrânea justificam as técnicas de sensoriamento remoto como ferramentas na seleção de áreas prioritárias para estudos na locação para a perfuração de poços tubulares, evitando o desperdício de recursos públicos e auxilia a gestão hídrica de poços (LIU, 2007; NASCIMENTO *et al.*, 2017; NASCIMENTO; SILVA, 2019; ABIJITH *et al.*, 2020).

Diante do exposto, o objetivo geral desse trabalho foi determinar as áreas potenciais ao armazenamento de águas subterrâneas em terrenos geológicos sedimentar e cristalino, empregando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, na BHRSF no estado de Sergipe, na escala de 1:100.000.

Os objetivos específicos foram compilar, gerar e integrar os mapas de pluviosidade, litologia, pedologia, declividade, densidade de lineações de relevo e cobertura da terra para a espacialização e hierarquização da capacidade à acumulação de águas subterrâneas; e confeccionar uma base cartográfica para subsidiar estudos futuros de detalhes para perfuração de poços tubulares, visando minimizar os custos operacionais e subsidiar a gestão hídrica.

Aquíferos fraturado e Granular e Combinação Linear Ponderada

Para a melhor compreensão deste artigo foi imprescindível uma breve descrição de aquíferos fraturados ou fissurais e granulares ou porosos, pois são os tipos de aquíferos que

ocorrem na área de estudo. Foi imperativo também, contextualizar a análise multicriterial empregada no desenvolvimento do presente trabalho.

Um aquífero é uma formação geológica saturada, constituída de rocha ou sedimento, suficientemente permeável ($> 5 \times 10^{-8} \text{m/s}$) para permitir a extração de água de forma econômica e através de técnicas convencionais (FEITOSA *et al.*, 2008). Os aquíferos sedimentares (granulares ou porosos) são aqueles onde a água subterrânea é armazenada e circula através dos espaços existentes entre os grãos dos sedimentos não consolidados e das rochas sedimentares (FREEZE; CHERRY, 1979). Os aquíferos formados por rochas cristalinas são caracterizados pela ausência ou baixa frequência de espaços vazios na rocha. Este tipo de aquífero é marcado pela elevada anisotropia e heterogeneidade onde a porosidade e permeabilidade estão relacionadas às descontinuidades rochosas, como as fissuras ou fraturas, juntas e falhas (SINGHAL; GUPTA, 1999).

No modelo de porosidade granular, o fluxo é dado por meios rochosos que têm em seu arcabouço grãos e/ou matriz que permitem a condução e armazenamento de fluidos pelos espaços vazios intergranulares conectados entre si. Por outro lado, o modelo de fluxo por porosidade fissural, é dado por um meio em que a condutividade e o armazenamento de águas subterrâneas são resultantes exclusivamente pela interconexão de fraturas e/ou falhas em meios rochosos com ausência de matriz porosa (PAULA; CAMPOS, 2015).

Os aquíferos fraturados possuem produtividade inferior à média dos aquíferos granulares. No entanto, em regiões carentes de recursos hídricos, como no semiárido sergipano, têm um papel fundamental no abastecimento público (JICA, 2000). A produtividade dos poços depende principalmente da abertura, conectividade e intensidade das fraturas. É importante ressaltar que a intensidade ou grau de fraturamento determinam a porosidade e permeabilidade secundárias das rochas cristalinas. Dessa forma, quanto maior o grau de fraturamento, maior a probabilidade do fluxo da água (infiltração, percolação e acumulação) em aquíferos fraturados (SINGHAL; GUPTA, 1999; ABIJITH *et al.*, 2020).

Para definir o grau de fraturamento pode ser considerado a densidade de lineações de relevo, a qual quando fortemente estruturada é interpretada como sistema de fraturamento (juntas ou falha) do tipo distensivo e penetrativo (NASCIMENTO; SILVA, 2019). Além das características geológicas, as áreas disponíveis para ocorrência da recarga direta e indireta dependem da pedologia, geomorfologia, uso do solo e intensidade das chuvas (RIBEIRO *et al.*, 2014).

As técnicas de geoprocessamento são capazes de formar e caracterizar relacionamentos entre os dados de sensoriamento remoto, para transformá-los em conhecimento que contribua à tomada de decisões (BENJMEL *et al.*, 2020; KMOCH *et al.*, 2018; ZAIDAN, 2017). A priorização de áreas potenciais ao armazenamento de água subterrânea pode ser realizada pela espacialização e integração de diferentes informações da paisagem por Sistema de Informação Geográfica (SIG) e representa um dos métodos mais eficientes e econômicos (NASCIMENTO, 2019). Muitas das aplicações de SIG, na área de análise hidrogeológica, é comum a utilização de múltiplos critérios, como a Combinação Linear Ponderada (CLP - WLC - Weighted Linear Combination) para definir áreas prioritárias de recarga e descarga de água subterrânea (MALCZEWSKI, 1999). A determinação destas áreas prioritárias é o primeiro passo para a tomada de decisão (RODRIGUES; CORRÊA, 2020).

O procedimento WLC permite uma completa compensação entre todos os pesos dos fatores ou pesos de compensação. Estes pesos indicam a importância relativa de cada fator em relação aos demais e controlam como os fatores se compensarão uns aos outros, gerando um mapa de áreas potenciais (FEITOSA *et al.*, 2008). Os pesos determinam como os fatores são compensados entre si, combinando todos os fatores normalizados por uma média ponderada. Dessa forma, suas soluções não serão nem arriscadas e nem aversas a risco, porque sempre estarão no meio dos extremos AND e OR (MALCZEWSKI, 1999).

O método apresenta o rigor matemático para determinar a robustez do processo de tomada de decisão, é de fácil implementação e permite a análise dos produtos intermediários e final, possibilitando assim incorporar a experiência do profissional (SARTORI; SILVA; ZIMBACK, 2012; SARTORI *et al.*, 2012). Uma vez que os mapas de critérios (fatores e restrições) tenham sido gerados, é uma simples questão de multiplicar cada mapa de fator pelo seu peso e, então, somar os resultados, atingindo a unidade (VOOGD, 1983).

Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF), no estado de Sergipe, localiza-se entre as coordenadas 9°30'59" a 10°42'10" de latitude Sul e 36°13'56" a 38°10'03" de longitude Oeste (Figura 1).

Combinação Linear Ponderada na Determinação da Capacidade de Armazenamento de Água Subterrânea

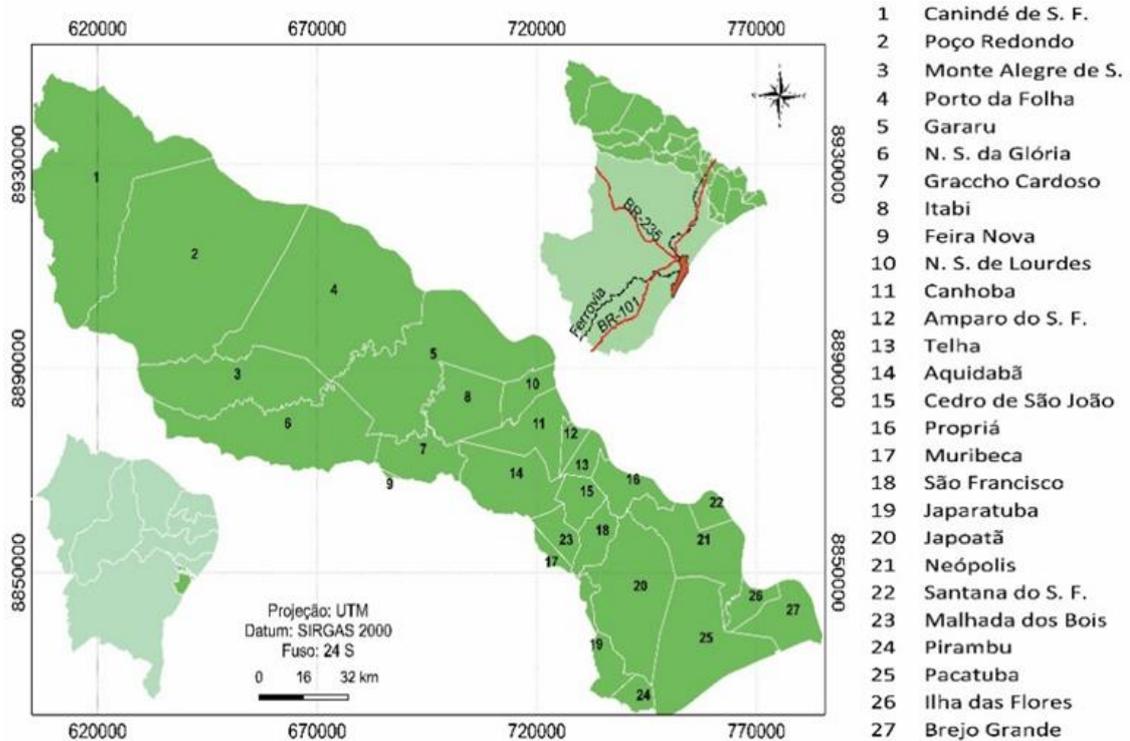


Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba
Fonte: Os autores.

A área de estudo é formada pelos climas Megatérmico Sub-úmido Seco (semiárido) e Megatérmico Sub-úmido (agreste), que representam, respectivamente, 77% e 33% da bacia. O agreste apresenta temperatura entre 18°C a 33°C, com médias anual de evapotranspiração de 1.400 mm e de pluviosidade, 900 mm; por sua vez, a pluviosidade e a evapotranspiração médias anual do semiárido são de 700 mm e 1.500 mm, respectivamente, com temperatura entre 16°C e 36°C (SERGIPE, 2014).

As unidades geomorfológicas são compostas pelas planícies costeira e fluvial dos Depósitos Quaternários, pelos tabuleiros costeiros do Grupo Barreiras, classificadas geologicamente como Coberturas Cenozoicas e pelo Pediplano Sertanejo desenvolvido em rochas metamórficas e magmáticas proterozoicas da Faixa de Dobramentos Sergipana (BRITO NEVES *et al.*, 2014). Os aquíferos Recente e Barreiras das Coberturas Cenozoicas são aquíferos granulares livres e os aquíferos das rochas cristalinas proterozoicas são aquíferos fraturados livres (SERGIPE, 2010).

Os tipos de solos são variados e sobrepostos pelos biomas Caatinga e Mata Atlântica, os quais se encontram, praticamente, convertidos em atividades agropecuárias (SERGIPE, 2013). Os Neossolos, espodosolos e gleissolos encontram-se expostos ou recobertos por cana-de-açúcar ou por resquícios de Mata Atlântica e associados aos sedimentos costeiros da faixa litorânea

(BARROS *et al.* 2020). Os argissolos, latossolos, planossolos, vertissolos e neossolos estão associados às rochas cristalinas do pediplano sertanejo sem nenhum tipo de cobertura vegetal ou compostos por pastagens ou resquícios de Caatinga (EMBRAPA, 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram: (i) dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011); (ii) dados geológicos do Serviço Geológico do Brasil (SANTOS *et al.*, 2001); (iii) dados pedológicos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2014); (iv) dados de pluviosidade e cobertura da terra do Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe (SEMARH, 2013); e (v) programa de geoprocessamento QGIS (Versão 3.14) da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral (GNU).

Os procedimentos metodológicos, adaptados do Programa de Água Subterrânea Para o Semi-Árido Brasileiro e do Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil (PROASNE), constaram de quatro etapas: (i) seleção empírica dos fatores (o grau de fraturamento das rochas, declividade, pluviosidade, litologia, pedologia e cobertura do solo); (ii) determinação das classes temáticas dos fatores supracitados; (iii) atribuição de pesos e ponderações a cada um dos fatores e das respectivas classes e (iv) realização da integração entre os fatores. O mapa de potencialidade hídrica subterrânea foi adaptado de Feitosa *et al.* (2008). A modelagem baseia-se na integração de mapas temáticos por Combinação Linear Ponderada (Equação 1).

$$\frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} * Y_j}{\sum_{i=1}^n Y_j} \quad (1)$$

Onde *i* é a classe temática, *j* é o fator, *W_{ij}* é a ponderação atribuída à classe e *Y* é o peso atribuído ao fator.

O mapa de lineações de relevo foi realizado pela extração manual do Modelo Digital de Elevação dos dados SRTM e espacialização automática pelo Interpolados Kernel (NASCIMENTO; SILVA, 2019). O mapa de declividade foi confeccionado a partir dos dados SRTM. Os mapas de litologia, pedologia, pluviosidade e cobertura do solo foram compilados de Santos *et al.* (2001), EMBRAPA (2014) e SEMARH (2013), respectivamente. Nestes mapas, as variadas classes foram



associadas para produzir produtos cartográficos visualmente compreensíveis e de acordo com a escala de trabalho (1:100.000).

A determinação dos pesos e ponderações foi realizada a partir de Brandão e Gomes (2003), Feitosa *et al.* (2008), Oikonomidis *et al.* (2015), Abijith *et al.* (2020), Lentswe e Molwalefle (2020). A litologia por se tratar das rochas superficiais e não as rochas formadoras dos aquíferos foi interpretada como menor influenciadora na favorabilidade ao armazenamento de água subterrânea e foi atribuída a ponderação de 5% de importância. A pedologia, que geralmente apresenta pequena espessura e com horizontes de solos incompletos (EMBRAPA, 2014), lhe foi atribuída a ponderação de 10%. O peso para a declividade e pluviosidade foi de 15% para ambos, pois a pluviosidade define a quantidade de água que atinge o terreno e a inclinação do terreno facilita a infiltração em áreas menos íngremes.

Para a cobertura da terra foi atribuído o peso 25%, exemplificando em dois casos extremos, uma densa vegetação facilita a infiltração e solo exposto, o escoamento superficial. A densidade de lineação de relevo, por representar o sistema de fraturamento e este a porosidade e permeabilidade secundárias, sem as quais não formariam aquífero fraturado em rochas cristalinas recebeu o maior peso de ponderação (30%).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número total de lineações de relevo extraídos foi de 2.982 e sua distribuição não foi uniforme em uma área de 7.345 km². Dessa forma, 2.258 lineações com 2.031 km de extensão encontram-se distribuídas em uma área de 5.971 km², e 724 lineações, totalizando 526 km em uma área de 1.374 km², representando as regiões semiárida e agreste, respectivamente (Figura 2).

Por uma simples análise visual, é possível verificar que na região agreste, a heterogeneidade na distribuição das lineações, com regiões praticamente ausentes de lineações. Esse fato é decorrente do Grupo Barreiras e dos Depósitos Quaternários Flúvio-marinhos, que formam os aquíferos granulares. A concentração das lineações ocorrem no Grupo Barreiras, pois somente os arenitos possuem capacidade de se fraturar. Porém, o processo de colmatação no interior das fraturas impedem ou dificultam a infiltração da água.

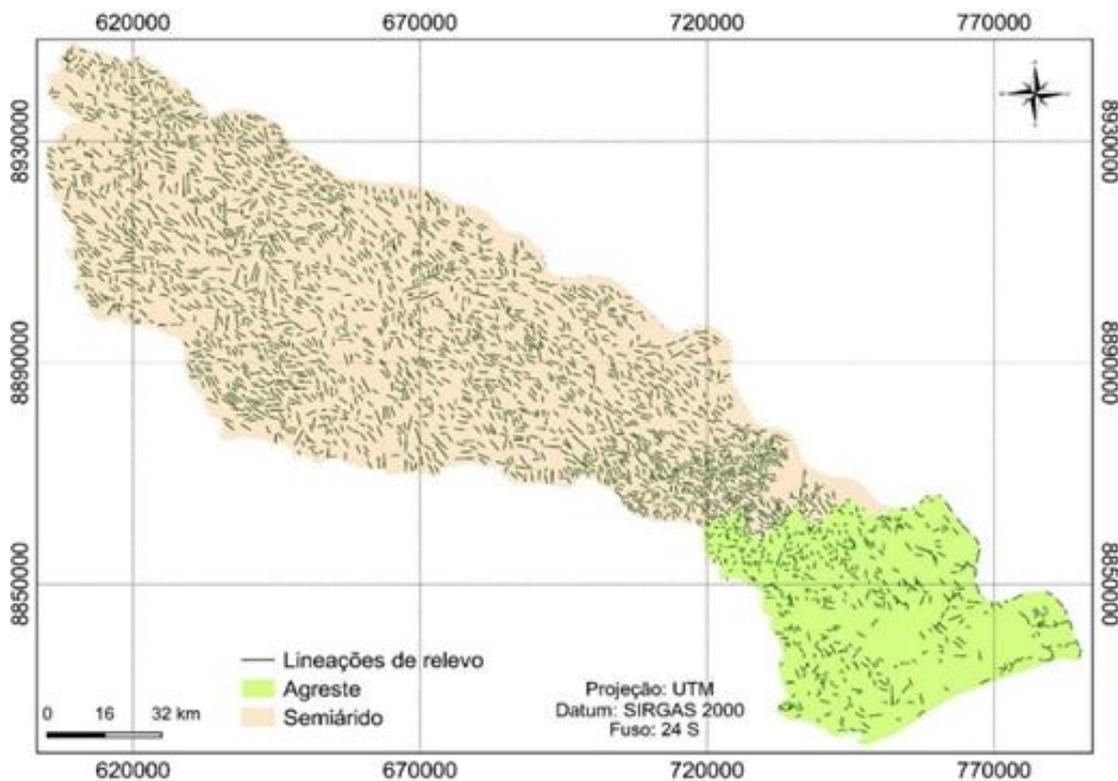


Figura 2. Mapa de lineações de relevo da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
Fonte: Os autores.

A heterogeneidade na região semiárida também é nítida, em decorrência da variedade de rochas cristalinas. Como a densidade de lineações indica o sistema de fraturamento e este, a potencialidade de infiltração da água subterrânea, é notória a heterogeneidade da capacidade das rochas cristalinas em armazenar água subterrânea na área de estudo. Resultados análogos foram encontrados por Nascimento e Silva (2019) na região Agreste sergipana.

Dessa forma, há diferentes probabilidades de ocorrência de infiltração de água subterrânea, indicando um ambiente geológico de fluxo anisotrópico. Nesse sentido, há regiões mais ou menos propícias à infiltração, percolação e acumulação de águas subterrâneas, dependendo das condições geológicas do terreno. As diferentes capacidades de recarga indicam que a porosidade e a permeabilidade secundárias oriundas do sistema de rochas são distintas, indicando diferentes aquíferos fraturados, desde pouco a muito fraturado. Nascimento *et al.* (2017) concluíram resultados similares do fluxo de água subterrânea nos terrenos cristalinos do semiárido do Estado de Sergipe.

A aplicação do Interpolador Kernel possibilitou a identificação mais precisa das áreas de maiores densidades de lineações e favoráveis ao acúmulo de águas subterrâneas (Figura 3).

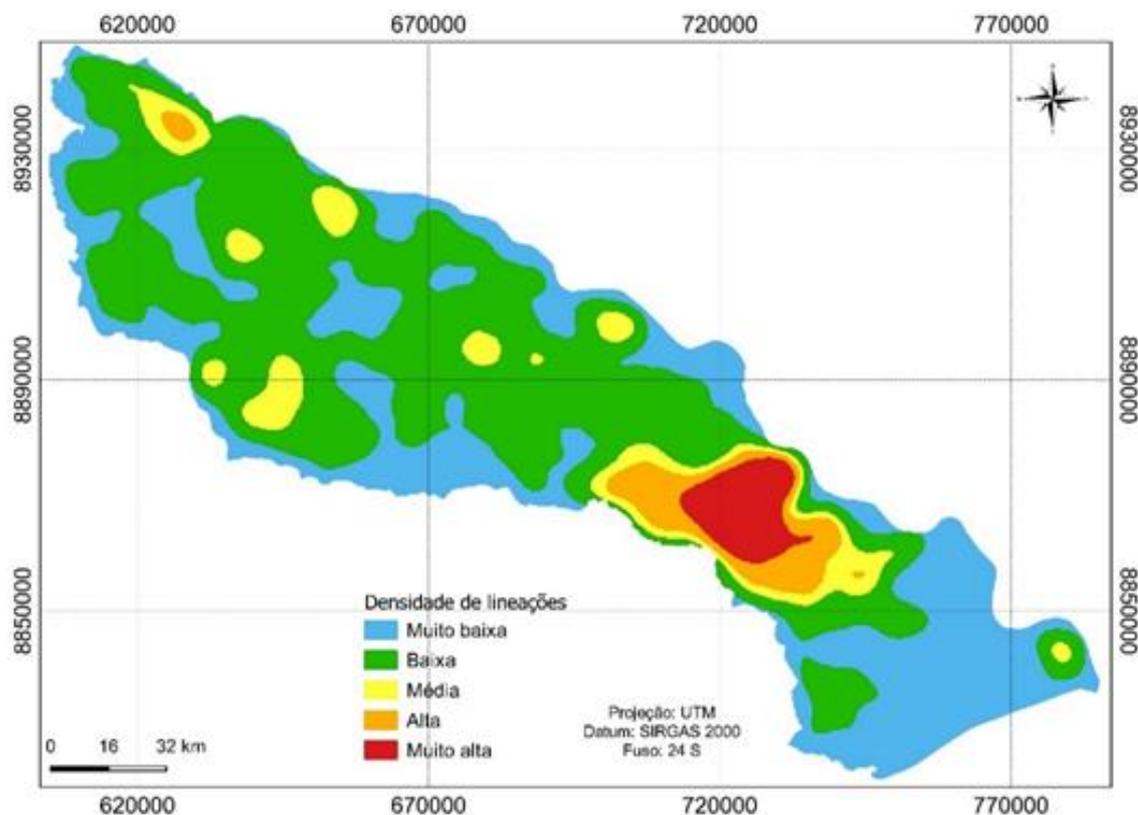


Figura 3. Mapa de densidade de lineações de relevo por Interpolador Kernel da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Fonte: Os autores, 2021.

Foram geradas cinco classes de densidade de lineações: muito alta (3,5%), alta (4%), média (10%), baixa (58%) e muito baixa (25,5%), cujas ponderações podem ser vistas na Tabela 1.

“As densidades da rede de drenagem e das lineações de relevo espacializadas em superfície pelo interpolador Kernel são fundamentais para uma análise indireta em subsuperfície” (ALVES; NASCIMENTO, 2020).

A relação entre estas densidades com a permeabilidade é inversamente proporcional, indicando a menor densidade no terreno permeável, propícias à infiltração de água subterrânea.

Tabela 1. Ponderações das classes de densidade de lineações de relevo

Classes	Ponderações
Muito baixa	2
baixa	4
Média	6
Alta	8
Muito Alta	10

Fonte: Baseado em Feitosa *et al.*, 2008.

Os intervalos das classes de declividade do terreno (Figura 4) foram reclassificadas em quatro das seis classes estabelecidas pela EMBRAPA (1979).

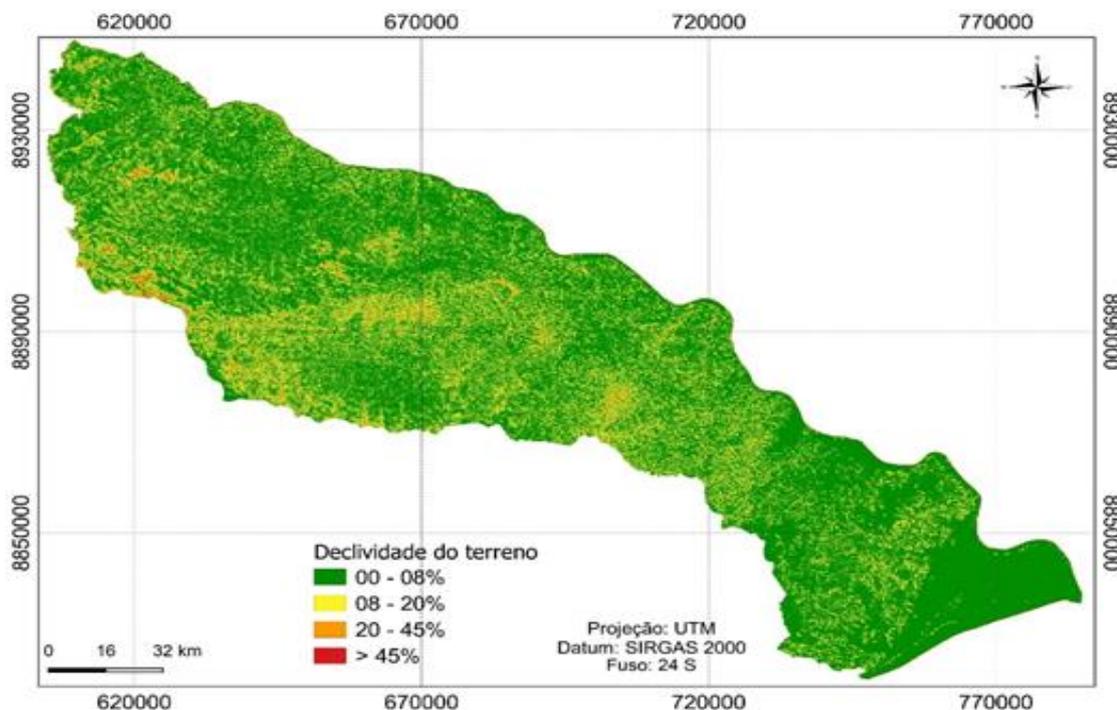


Figura 4. Mapa de declividade do terreno da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Fonte: Baseado em EMBRAPA, 2008.

As classes de declividade entre 0 e 20% representaram 98,2% da área de estudo, favorecendo a infiltração e as ponderações podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2. Ponderações das classes de declividades de terreno

Classes (%)	Ponderações
00-08	9
08-20	7
20-45	3
>45	1

Fonte: Baseado em Feitosa *et al.*, 2008.

O mapa de pluviosidade (Figura 5) apresentou maiores precipitações anuais foz do Rio São Francisco e na região central área de transição com o semiárido e as ponderações podem ser vistas na Tabela 3. A ordem crescente de pluviosidade abrangeu 22%, 29%, 7%, 8% e 34%.

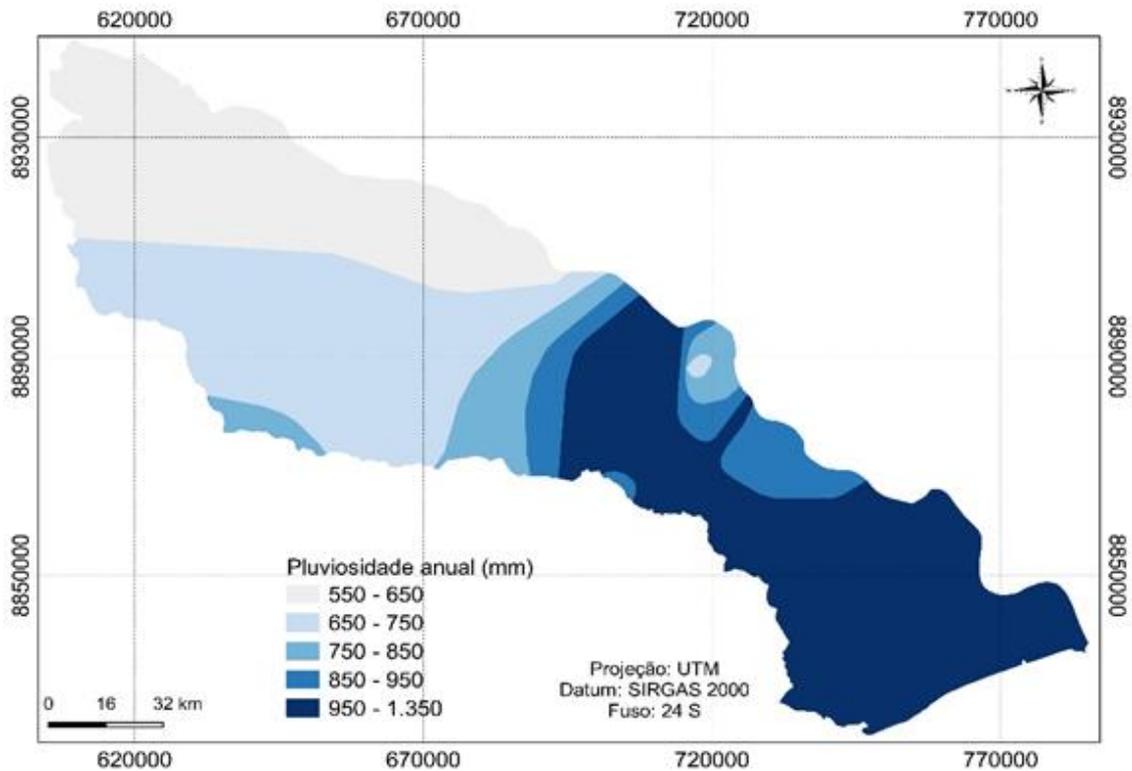


Figura 5. Mapa de pluviosidade da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
Fonte: Adaptado de SEMARH, 2013.

Tabela 3. Ponderações das classes de pluviosidade anual

Classes (mm)	Ponderações
550-650	2
650-750	4
750-850	6
850-950	8
950-1.350	10

Fonte: Baseado em Feitosa *et al.*, 2008.

Segundo Barreto, Monsorens e Pimentel (2001), a litologia (Figura 6) é o tema de menor relevância, pois a existência de água nas rochas é condicionada pelas fraturas existentes. No entanto, existe uma hierarquia entre suas classes, que leva em consideração as características como a presença de descontinuidades tais como bandeamento/xistosidade, facilidade de intemperismo, suscetibilidade ao fraturamento, grau metamórfico, entre outras. Benjmel *et al.* (2020) destacam estruturas tectônica e neotectônicas distensivas de pequena a grande extensão horizontal e vertical.

As porcentagens, em ordem crescente, das rochas são: pelito (2%), migmatito (2%), areia (5%), metacalcário (6%), metavulcanito (6%), folhelho (6%), calciossilicático (8%), Granito e granodiorito (11%) e quartzito (54%). As ponderações podem ser vistas na Tabela 4.

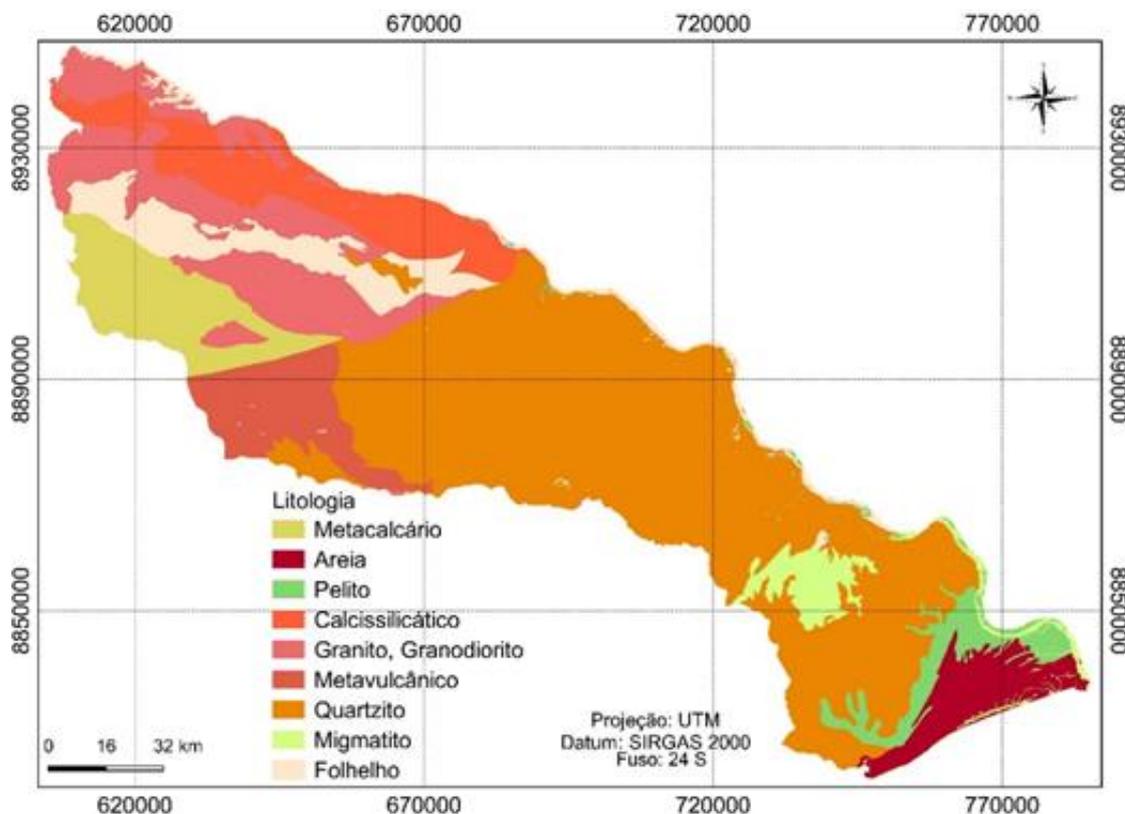


Figura 6. Mapa litológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
 Fonte: Adaptado de Santos *et al.*, 2001.

Tabela 4. Ponderações das classes litológicas

Classes (mm)	Ponderações
Granito e granodiorito	2
Migmatito	4
Quartzito	6
Metacalcário, calciossilicático e metavulcânico	8
Areia, pelito e folhelho	10

Fonte: Baseado em Feitosa *et al.*, 2008.

O mapa pedológico apresentou sete classes de solos (Figura 7) e as porcentagens em ordem crescente são: gleissolos (1%), vertissolos (2%), espodossolos (3%), argissolos (7%), planossolos (9%), luvisolos (16%) e neossolos (62%). As ponderações podem ser vistas na Tabela 5.

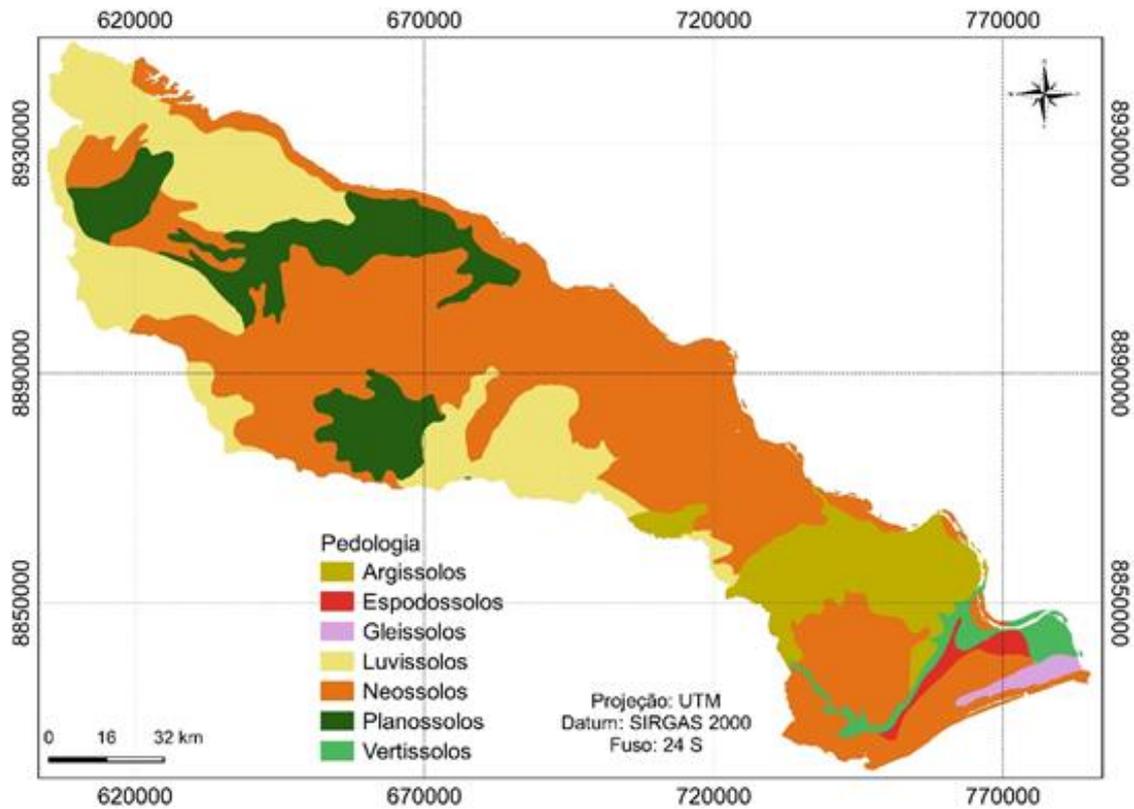


Figura 7. Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
 Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2014.

Tabela 5. Ponderações das classes pedológicas

Classes (mm)	Ponderações
Gleissolos	1
Argissolos	2
Planossolos	3
Vertissolos	5
Luvisolos	6
Neossolos	8
Espodossolos	10

Fonte: Baseado em Feitosa *et al.*, 2008.

A Bacia Hidrográfica do São Francisco no estado de Sergipe apresenta grande parte um total de 83% da área ocupado por pastagem (Figura 8). Essa caracteriza a pecuária extensiva, em que o pisoteio do solo pelo gado acarreta a sua compactação, aumenta a densidade e o escoamento superficial, que dificulta a recarga do aquífero. Dessa forma, justifica-se a baixa ponderação atribuída às áreas de pastagem, pois 5% da área é composta por agricultura e solos exposto e 12%, com as demais classes.

A vegetação propicia a infiltração da água no solo, principalmente quando se tem estratos arbóreos, arbustivos, gramíneas e serapilheira. A vegetação absorve grande parte das águas das chuvas e a libera lentamente para o solo, propiciando a sua infiltração e percolação no perfil do solo e subsolo. Logo, os manguezais, as vegetações de restinga e a caatinga arbustiva obtiveram altos valores de ponderação, em oposição aos solos expostos, que facilitam o escoamento superficial. As ponderações podem ser vistas na Tabela 6.

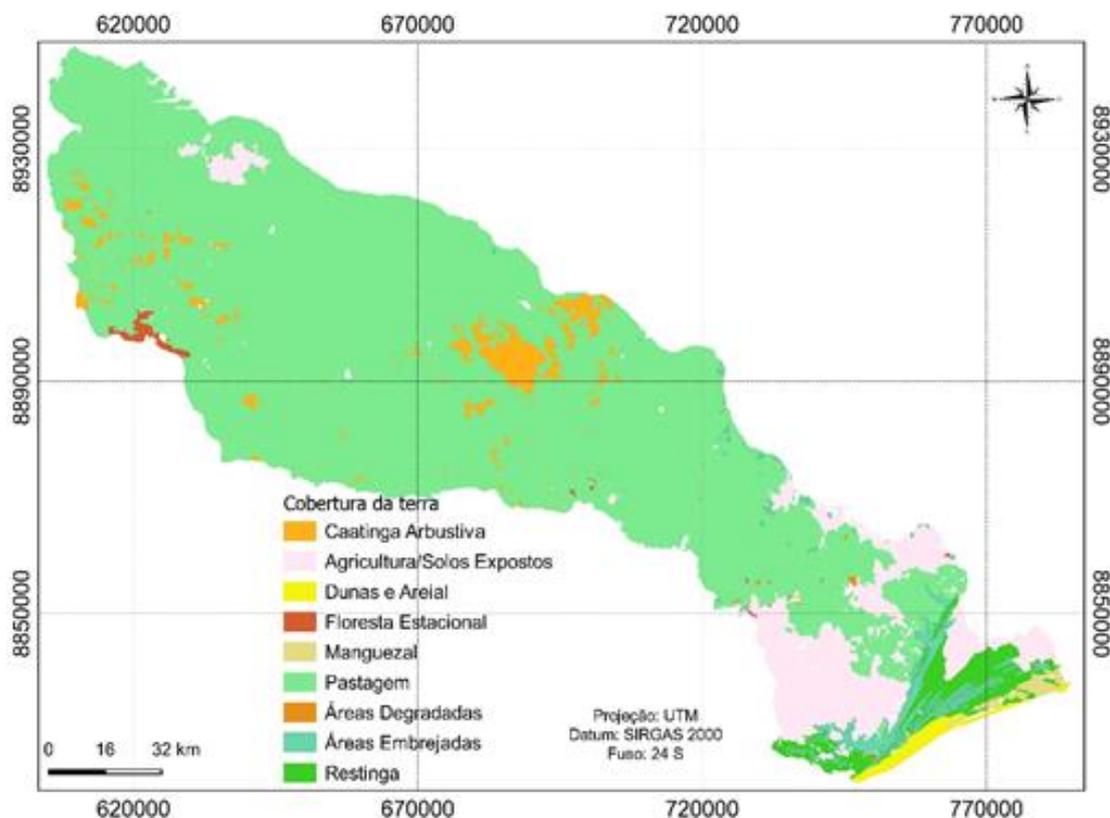


Figura 8. Ponderações das classes de cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Fonte: Adaptado de SEMARH, 2013.

Tabela 6. Ponderações das classes de cobertura da terra

Classes (mm)	Ponderações
Agricultura e solo exposto	1
Áreas degradadas e embrejadas	2
Pastagem	4
Caatinga arbustiva	6
Restinga, manguezal e floresta estacional	8
Dunas e areial	10

Fonte: Baseado em Feitosa *et al.*, 2008.

Combinação Linear Ponderada na Determinação da Capacidade de Armazenamento de Água Subterrânea

O mapa de favorabilidade ao armazenamento de água subterrânea (Figura 9) se assemelhou muito ao mapa de lineação, pois recebeu o maior peso. A classe de baixa favorabilidade, a mais expressiva na área de estudo, abrangeu os municípios de Gararú, Porto da Folha, Pacatuba, Pirambu, Japaratuba e Santana do São Francisco. A região norte destacou-se pela classe de muita baixa favorabilidade, com grande parte nos municípios Monte Alegre, Poço Redondo, Porto da Folha, Canindé de São Francisco e Nossa Senhora da Glória.

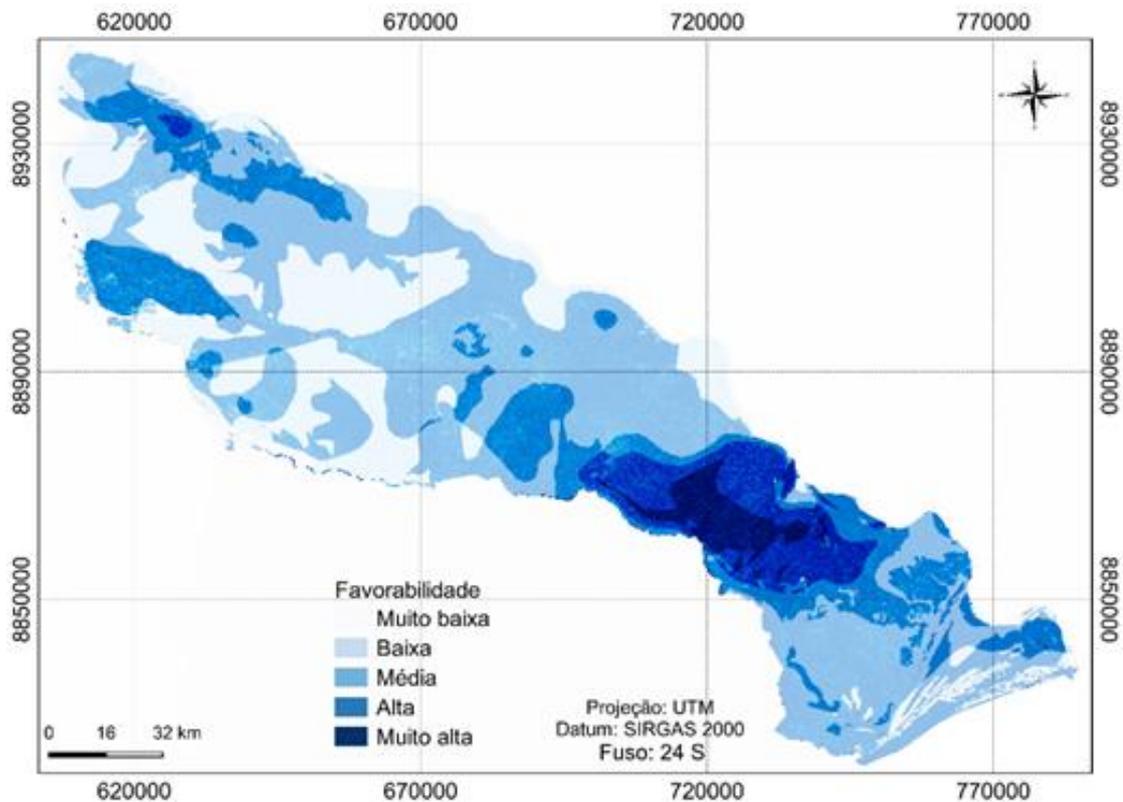


Figura 9. Mapa de favorabilidade ao armazenamento de água subterrânea da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Fonte: Os autores.

Importante ressaltar o trabalho participativo e interdisciplinar, com visão sistêmica do meio físico, considerando a indissociabilidade das águas subterrâneas e superficiais no combate aos efeitos da seca no Nordeste (CIRILO, 2008). Hirata *et al.* (2019) destacam os riscos de contaminação por falta de saneamento e concentração da salinidade nas região semiárida brasileira. Nesta seara, destaca-se a importância do fortalecimento e qualificação de políticas públicas eficazes no combate à seca do Nordeste do Brasil, cujos impactos socioeconômicos aumentaram com a pandemia do coronavírus. As políticas públicas de acesso à água para a população são a curto prazo e a seca é um fenômeno cíclico hidrometeorológico no tempo geológico e que tem se intensificado com as atividades antrópicas. Felix e Marquesan (2020)

constataram recorrência das mesmas técnicas ao longo do tempo, focadas na solução temporária das demandas por água em detrimento de políticas públicas especiais de convivência com a seca.

CONCLUSÕES

A modelagem por Combinação Linear Ponderada possibilitou determinar a capacidade de armazenamento de água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco no Estado de Sergipe. O produto cartográfico final (mapa de favorabilidade), na escala 1:100.000, é um documento técnico-gerencial para subsidiar a seleção de áreas prioritárias para a perfuração de poços tubulares, minimizando os recursos públicos e maximizando a gestão hídrica de subsuperfície.

A base cartográfica de dados geoespaciais, em uma plataforma unificada propiciado pelo banco de dados georreferenciado do QGIS, gerada a partir da compilação e da confecção dos mapas de pluviosidade, litologia, pedologia, declividade, densidade de lineações de relevo e cobertura da terra é uma ferramenta técnico-gerencial para subsidiar estudos futuros de detalhes para perfuração de poços tubulares, visando minimizar os custos operacionais e subsidiar a gestão hídrica com as atividades socioeconômicas ambientalmente sustentáveis da área de estudo.

A metodologia aplicada apresentou-se mais eficiente na região semiárida formada por aquíferos fraturados. A metodologia utilizada necessita de adaptações conforme os aspectos geológicos intrínsecos que definem as unidades hidrogeológicas. Dessa forma, recomenda-se que a área de estudo seja estudada separadamente, ou seja, nas províncias hidrogeológicas fraturada do semiárido e granular do agreste. Além das distintas características de permeabilidade e porosidade, os aspectos bióticos e abióticos são bastante distintos, como por exemplo: as classes de rochas, os tipos de solos, as formas de relevo, o índice pluviométrico, os biomas (Caatinga e Mata Atlântica), entre outros.

Esta é uma divisão dinâmica, pois à medida que surgem novas informações relevantes e novos processos de modelagens, uma determinada província é modificada ou subdividida, como por exemplo, a compartimentação das Cobertura Cenozoicas em aquíferos granulares dos arenitos consolidados do Grupo Barreiras e dos sedimentos inconsolidados dos Depósitos Quaternários.

Combinação Linear Ponderada na Determinação da Capacidade de Armazenamento de Água Subterrânea

Recomenda-se também, que a escala de trabalho seja de semidetalhe a detalhe (entre 1:50.000 e 1:5.000), facilmente possível a partir de produtos de sensoriamento remoto de alta e altíssima resolução espacial. Como a análise por imagens de satélite é indireta, o trabalho de campo é um procedimento fundamental, tanto na checagem dos produtos gerados quanto para extração direta de dados hidrogeológicos *in situ*. Dessa forma, sugere-se que a escala de trabalho seja maior e a utilização de variáveis mais detalhadas e sensíveis à variabilidade espacial do fluxo d'água subterrânea. Estas variáveis podem ser obtidas por testes de infiltração, coleta de amostras e ensaios laboratoriais em conjunção com as técnicas aplicadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABJIJITHA D.; S.; SINGHA, L. JENNIFER, J. J.; SARANYA, T. PARTHASARATHY. K. S. S. GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyaru watershed, TamilNadu, India. **Hydro Research**, v. 3, p. 1-14, 2020.

AGUIAR NETTO, A. O. A.; SANTANA, N. R. F. **Contexto socioambiental das águas do Rio São Francisco**. 1 ed. São Cristóvão: Editora UFS, 2015.

ALVES, C. C.; NASCIMENTO, P. S. R. Geotecnologias aplicadas na identificação de áreas de recarga de água subterrânea. In: PIRES, P. F. **Engenharia: a máquina que constrói o futuro**. Editora Conhecimento Livre: Piracanjuba, 2020, p. 149-165.

ANA. Agência Nacional da Água. **Conjuntura dos recursos hídricos do Brasil 2019**: Informe Anual. Brasília, ANA, 2019.

BARRETO, A. B. C.; MONSORES, A. L. M.; PIMENTEL, J. Modelo de favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fissurais: a utilização de técnicas de geoprocessamento no cristalino do estado do Rio de Janeiro. **Águas Subterrâneas**, v. 1, p. 467-475, 2001.

BARROS, G. V. P.; NASCIMENTO, P. S. R.; CRUZ, M. A. S.; SANTOS, L. A. N. Atualização do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (SE). In: ULHÔA, J. L. R. **Meio ambiente e saneamento básico: impactos e desafios no Brasil**. Editora Conhecimento Livre: Piracanjuba, 2020, p. 562-583.

BRITO NEVES, B.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M. The Brasiliano Collage in South America: a review. **Brazilian Journal Geology**, v. 44, n.3, p. 493 - 518, 2014.

CALIJURI M. C.; CUNHA D. G. F. **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CIRILO, J. A. Public water resources policy for the Semi-Arid Region. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61 - 82, 2008.

COLOMBO, L. A. Sudene e a mudança institucional no regime militar. **Cadernos do Desenvolvimento**, v. 8, n. 13, p. 153 - 175, 2013.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Programa de Águas Subterrâneas para o Semiárido Brasileiro**. Brasília: MME, 2003.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Northeastern Brazil Groundwater Project: PROASC (2000 - 2004)**. Gatineau: GSC, 2005.



- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, R. R. Hidrologia subterrânea. 2 ed. Barcelona: Omega, 1983, 235p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1 ed Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 1979.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Base de dados para o Estado de Sergipe**: referenciais de solos para o desenvolvimento. 1 ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2014.
- FEITOSA, F. A. C. MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C; DEMÉTRIO, J. G. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: LABHID, 2008.
- FELIX, E. M.; MARQUESAN, F. F. S. Implicações das políticas públicas de combate à seca no semiárido brasileiro para o antropoceno. **Rebela**, v.10, n.2, p. 340 – 360, 2020.
- FREEZE, R. A; CHERRY, J. A. **Groundwater**. 1 ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1979.
- GBENJMEL, K.; AMRAOUI, F.; BOUTALEB, S.; OUCHCHEN, M.; TAHIRI, A.; TOUAB, A. Mapping of ground potential zones in crystalline terrain using remote sensig, GIS techniques, and Multicriterial Data Analysis (case of the Ighem Region, Wetern Ati-atlas, Marroco). **Water**, v. 12, n. 471, p. 1-16, 2020.
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. **Instituto Trata Brasil**, [S.l: v..n.], p. 1- 36, 2019.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Projeto Topodata. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>. Acessado em 31 mai 2020.
- JICA. Japan International Cooperation Agency. **The study on water resources development in the state of Sergipe in the Federative Republic of Brazil**. JICA, 2000.
- LENTSWE, G. B.; MOLWALEFHE, L. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. **Journal of Hydrology**: v. 28, p. 1-22, 2020.
- KMOCH, A.; UUEMAA, E.; KLEIG, H.; CAMERON, S. G. Enhancing locatization-related hydrogeological knowledge. **Internation Journal of Geo-Information**, v.7, n. 132, p. 1-34.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2 ed. Campo Grande: UNIDERP, 2007.
- MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriterial decision analysis**. 1 ed. New York: John Wiley, 1999.
- NASCIMENTO, P. S. R. Mapeamento das áreas favoráveis à infiltração de águas subterrâneas pela densidade de lineamento estrutural. In: FUFFO A. M. **Engenharia Sanitária e Ambiental**: tecnologias para a sustentabilidade. Editora Atena, Ponta Grossa, 2019, p. 221-230.
- NASCIMENTO, P. S. R.; NASCIMENTO FILHO, J. C. B.; MENDONÇA, A. K. F.; WALLACUELLA, G. J. Análise da capacidade de armazenamento de águas subterrâneas em aquíferos fissurais por técnicas de sensoriamento remoto. In: SEABRA, G. **Educação ambiental**: sustentabilidade dos ambientes rurais e urbanos. Ed. Barlavento, Ituiutaba, 2017, p. 724-735.
- NASCIMENTO P. S. R.; SILVA N. P. C. Aplicação de sensoriamento remoto e análise espacial de alinhamentos geológicos como indicador da potencialidade de acumulação de águas subterrâneas. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 7, n. 4, p. 200-222, 2019.
- OIKONOMIDIS, D.; DIMOGIANNI, S.; KAZAKIS, N.; VOUDOURIS, K. A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Greece. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 197-208, 2015.
- PAULA, T. L. F.; CAMPOS, T. E. G. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 11-14, 2016.



Combinação Linear Ponderada na Determinação da Capacidade de Armazenamento de Água Subterrânea

PINÉO, T. R. G.; BRANCO, R. M. G. C.; CUNHA, L. S.; SOUZA, M. L. Airborne and ground geophysics applied to groundwater prospection in hard rocks in Irauçuba, Ceará State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n. 4, p. 699-709, 2013.

REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.

REBOUÇAS, A. C.; MARINHO, E. **Hidrologia das secas**. 1 ed. Recife: SUDENE, 1970. 130 p.

RIBEIRO, J. P. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; CARVALHO FILHO, C. A.; FLEMING, P. M. Análise da recarga no sistema aquífero granular e fissural na área do Campus da Universidade Federal de Minas Gerais. **Genomos**, v. 20, n. 2, p. 28-48, 2014.

RODRIGUES, J. L. CORRÊA, L. R. S. **Recursos hídricos em Minas Gerais: Bacia Hidrográfica do Rio Mucuri**. 1 ed. Curitiba: Appris, 2020.

SANTOS, R. A.; MARTINS A. A.; NEVES, J. P.; LEAL, R. A. **Geologia e recursos minerais do Estado de Sergipe - texto explicativo**. 1 ed. Brasília: CPRM, 2001.

SANTOS, W. J. S.; PAIVA, A. L. R.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P. Fluxo e armazenamento de água em aluvião do semiárido pernambucano para abastecimento de pequenas comunidades. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 55, n. 4, p. 479-497, 2020.

SARTORI, A. A. C.; SILVA, R. F. B.; ZIMBACK, C. R. L. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1079-1090, 2012.

SARTORI, A. A. C.; NOSSACK, F. A.; SILVA, R. F. B.; ZIMBACK, C. R. L. Restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos por meio da combinação linear ponderada. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 201-212, 2012.

SEMARH. Secretária de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju: SRH, 2013.

SERGIPE. **Elaboração do plano estadual de recursos hídricos**. 1 ed. Aracaju: SEMARH, 2010.

SERGIPE. **Bacias Hidrográficas do Estado de Sergipe**. 1 ed. Aracaju: SRH, 2013.

SERGIPE. **Panorama energético de Sergipe**. 1 ed. Aracaju: SUDEM/SE, 2014.

SILVA, D. B. S.; ANDRADE, R. O.; NASCIMENTO, P. S. R. Potencialidade à salinização e à desertificação de perímetros irrigados por sensoriamento remoto. In: MELLO, R. G.; FREITAS, P. G. **Meio ambiente: gestão, preservação e desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: E-Publicar, 2020, p. 393-412.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied hydrogeology of fractured rocks**. 1 ed. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.

VOOGD, H. **Multicriteria evaluation for urban and regional planning**. 1 ed. London: Pion, 1983.

YISA, J.; JIMOH, T. O.; OYIBO, O. M. Underground water assessment using water quality index. **Journal of Sciences**, v. 21, p. 33-42, 2012.

ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento conceitos e definições. **Revista de Geografia**, v. 7, n. 2, p. 195-201, 2017.

