



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA,
BAHIA

NATANAEL DA SILVA BARBOSA

SALVADOR

2016

HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA, BAHIA

Natanael da Silva Barbosa

Orientador : Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca do Instituto de Geociências - UFBA

B238 Barbosa, Natanael da Silva
Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia, Bahia / Natanael da
Silva Barbosa.- Salvador, 2016.
168 f. : il. Color.

Orientador: Prof. Luiz Rogério Bastos Leal
Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de
Geociências, 2016.

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos. 3. Águas subterrâneas - Bahia.
I. Leal, Luiz Rogério Bastos. II. Universidade Federal da Bahia
. III. Título.

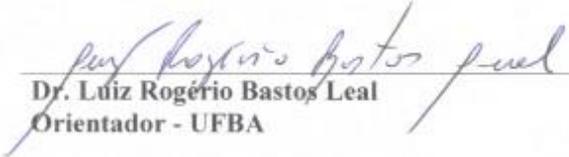
CDU: 556.3(813.8)

NATANAEL DA SILVA BARBOSA

**“HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA,
BAHIA”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, em 19/08/2016.

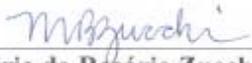
TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Orientador - UFBA



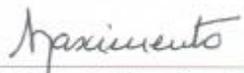
Dr. José Eloi Guimarães Campos
Examinador Externo – UnB



Dra. Maria do Rosário Zucchi
Examinadora Externa – UFBA



Dr. Cristovaldo Bispo dos Santos
Examinador Externo – CPRM/UFBA



Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento
Examinador Interno – UFBA

Salvador – BA
2016

Uma mulher existe que, pela imensidão de seu amor, tem um pouco de Deus, e muito de anjo pela incansável solicitude dos cuidados seus; uma mulher que, ainda jovem, tem a tranquila sabedoria de uma anciã e, na velhice, o admirável vigor da juventude; se de pouca instrução, desvenda com intuição inexplicável os segredos da vida e, se muito instruída age com a simplicidade de menina; uma mulher que sendo pobre, tem como recompensa a felicidade dos que ama, e quando rica, todos os seus tesouros daria para não sofrer no coração a dor da ingratidão; sendo frágil, consegue reagir com a bravura de um leão; uma mulher que, enquanto viva, não lhe damos o devido valor, porque ao seu lado todas as dores são esquecidas; entretanto quando morta, daríamos tudo o que somos e tudo o que temos para vê-la de novo ao menos por um só momento, receber dela um só abraço, e ouvir de seus lábios uma só palavra. Para a minha mãe, Maria da Silva Barbosa (in memoriam), dedico

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar cientes de que fazem parte do meu pensamento e da minha gratidão.

Agradeço à **DEUS**, por ter confiança em meu potencial e ter me atribuído um desafio tão importante para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço, o reconhecimento da minha família, em especial a meu pai **Natalino** e as minhas irmãs (**Silvânia**, **Elisabete** e **Jaqueline**). Especialmente a minha irmã **Natali** pela apoio, tempo dispendido, discussões geológicas e ajuda incondicional. Enfim, sem o apoio deles seria muito mais difícil vencer esse desafio.

A **Virgínia**, minha companheira, por todo amor compreensão e paciência para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao **Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal**, pela orientação, pelo inestimável incentivo e enorme apoio dados desde o início do trabalho.

Aos amigos do NEHMA, **Lucas** e **Raquel** pelo apoio concedido nas etapas de campo. Agradeço à **Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia (CERB)** e ao seu corpo técnico especialmente a **Marco Antônio Peixinho**, **Cristovaldo Bispo dos Santos** e **José de Castro Mello**, a **Hydrolog Serviços de Perfilagem** por disponibilizar os perfis geofísicos dos poços para realização de parte desta pesquisa.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O Sistema Aquífero Urucua (SAU) consiste de seqüências de arenitos, conglomerados e siltitos que integram um conjunto de aquíferos inter-relacionados do Grupo Urucua, unidade neocretácea da Bacia Sanfranciscana. O estudo apresenta de maneira holística a evolução paleogeográfica e a hidrogeologia do SAU, no que concerne a determinação dos diferentes comportamentos hidrogeológicos a depender de sua posição geográfica na bacia. O SAU localiza-se na região centro-ocidental do Brasil. Em termos geológicos, é composta de nove litofácies relacionados a seis associações de fácies que representam a deposição em sistemas eólicos secos e fluviais entrelaçados. Esses sistemas registram modificações nas condições tectônicas e climáticas importantes na geração de espaço de acomodação de sedimentos e no suprimento sedimentar. Cinco seqüências sedimentares foram identificadas com base no reconhecimento de superfícies regionais caracterizadas por momentos de exposição subaérea ou modificações no ambiente deposicional. Os depósitos eólicos e os tratos de sistema de baixa e alta acomodação são reconhecidos nas seqüências de alta frequência e substituem os tratos de sistemas tradicionais relativos as mudanças no nível do mar eustático. As seqüências desenvolvidas são segmentadas por aquitardes compostos por arenitos silicificados originados por processos diagenéticos. A presença de altos gravimétricos no substrato da bacia condiciona a geometria do SAU. A bacia hidrogeológica é assimétrica, em consequência de um eixo divisor do fluxo subterrâneo de direção aproximada N-S. Nela, é estabelecida uma evolução hidrogeoquímica segundo sistemas de fluxo local, intermediário e regional. A composição das águas subterrâneas é afetada por mudanças sistemáticas de espécies aniônicas de HCO_3 para Cl e catiônica entre Ca e Na. Esses subsistemas constituem-se de arenitos com diferentes resistividades e um substrato mais condutivo representado, em sua maioria, pelo Grupo Bambuí. A espessura saturada aumenta para oeste, alcançando mais de 500 m no extremo ocidental. Nas regiões meridionais e setentrionais, a denudação é efetiva e o SAU é descontínuo e de pequena espessura. Constitui-se de aquíferos livres com baixo potencial hidrogeológico. No contexto centro-oriental, as espessuras sedimentares são maiores e o SAU possui uma configuração do tipo aquífero-aquitarde-aquífero. No extremo ocidental ocorre um aumento progressivo da profundidade da superfície potenciométrica e a implantação de aquíferos livres com níveis potenciométricos profundos. As assinaturas isotópicas das águas superficiais e subterrâneas são similares, o que indica uma interconexão hidráulica entre os reservatórios. A recarga principal ocorre pela infiltração das águas meteóricas, momento onde a composição isotópica da água subterrânea assemelha-se à da precipitação. No entanto, existe uma modificação desta composição durante as estiagens, devido ao enriquecimento isotópico causado pela evaporação. Dessa forma, a medida que se aproxima a estação chuvosa, a coluna de ar atmosférico torna-se cada vez mais saturado em vapor de água, o que resulta em uma diminuição do efeito da evaporação no fracionamento isotópico. Em geral, os processos tectônicos, sedimentares, diagenéticos e geomórficos integrados contribuíram com o estabelecimento do SAU. Em síntese, as seqüências sedimentares foram desenvolvidas como reflexo intraplaca da fragmentação gonduânica e atestam a possibilidade de ocorrência de sistemas aquíferos expressivos no interior remoto continental sob as mesmas condições de evolução tectônica e climática.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Urucua; seqüências sedimentares; aquitardes; assinaturas isotópicas.

ABSTRACT

The Urucuia Aquifer System (UAS) consists of sandstones, conglomerates and siltstones sequences that integrate a set of interrelated aquifers of the Urucuia Group, Upper Cretaceous unit of Sanfranciscana Basin. This study presents in a holistic way the paleogeographic evolution and hydrogeology of the UAS, regarding the determination of the different hydrogeological behaviors depending on their geographical position in the basin. The UAS is located in the central-western region of Brazil. In geological terms, it is composed of nine lithofacies related to six facies associations which represent the deposition in dry eolian system and braided rivers. These systems record the changes in the tectonic and climatic conditions, and this is important in the generation of accommodation space and in the sediment supply. Five sedimentary sequences are identified based on the recognition of regional surfaces, characterized by moments of subaerial exposure or changes in depositional environment. The eolian deposits and low- and high-accommodation system tracts are recognized in high-frequency sequences and replace the traditional systems tracts related to the eustatic changes in the sea levels. The developed sequences are segmented by aquitards composed by silicified sandstones originated by diagenetic processes. The presence of high gravimetric in the substrate basin conditions the geometry of the UAS. The hydrogeological basin is asymmetrical, as a result of a divider axis of the groundwater flow, approximately in N-S direction. In this basin, it is established a hydrogeochemical evolution according to local, intermediate and regional flow systems. The composition of groundwater is affected by systematic changes of anionic species from HCO_3 to Cl and cationic between Ca and Na. These subsystems are made up of sandstones with different resistivity and a more conductive substrate mostly represented by the Bambuí Group. The saturated thickness increases westwards, reaching more than 500 meters at the western end. In the southern and northern regions, the denudation is effective and the UAS is discontinuous and very little thickness. It consists of unconfined aquifers with low hydrogeological potential. In the central-eastern region, the sediments have greater thickness and the UAS has a configuration of the aquifer-aquitard-aquifer type. At the extreme West, there is a progressive increase in depth of the potentiometric surface and the implementation of unconfined aquifers with deep potentiometric levels. The isotopic signatures of surface water and groundwater are similar, what indicates a hydraulic interconnection between the reservoirs. The main recharge occurs by infiltration of rainwater, where the isotopic composition of the groundwater resembles to the precipitation. However, there is a modification of this composition during drought due to isotopic enrichment caused by evaporation. Thus, as it approaches to rainy season, the atmospheric air column becomes increasingly saturated with water vapor, which results in a decrease of the evaporation effect in the isotopic fractionation. In general, the integrated tectonic, sedimentary, diagenetic and geomorphic processes contributed to the establishment of the UAS. In summary, the sedimentary sequences were developed as intraplate reflection of the Gondwanic fragmentation and attest the possibility of significant aquifer system in a remote intra-continental setting under the same conditions of climate and tectonic evolution.

Keywords: Urucuia Aquifer System; Sedimentary Sequences; Aquitardes; Isotopic Signatures.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	8
CAPÍTULO 2. ARTIGO 1: HIDROGEOLOGIA, ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS E DIAGÊNESE DO GRUPO URUCUIA (NEOCRETÁCEO DA BACIA SANFRANCISCANA), BRASIL: INFLUÊNCIAS NA CONCEPÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO.....	21
CAPÍTULO 3. ARTIGO 2: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA CENTRO-OCIDENTAL, BRASIL	66
CAPÍTULO 4. ARTIGO 3: CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E HIDRÁULICA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA MERIDIONAL COM BASE EM TESTES DE BOMBEAMENTO E LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS ELÉTRICOS	99
CAPÍTULO 5. ARTIGO 4: HYDROCHEMICAL AND STABLE ISOTOPIC DATA ($\delta^2\text{H}$-$\delta^{18}\text{O}$) IN THE CHARACTERIZATION OF HYDROLOGIC DYNAMICS OF THE SOUTHERN AQUIFER SYSTEM.....	122
CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	149
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DE CO-AUTORES	153
APÊNDICE B – TABELAS COM DADOS BRUTOS.....	156
B.1. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 1ª campanha de amostragem realizada entre 30/09/2005 e 05/10/2005	156
B.2. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 2ª campanha de amostragem realizada entre 03/12/2005 e 14/12/2005 e de águas de chuva entre os dias 11 e 12/12/2005	157
B.3. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 3ª campanha de amostragem realizada entre 16/05/2006 e 24/05/2006	158
B.4. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 4ª campanha de amostragem realizada entre 14/11/2006 e 29/11/2006	159
B.5. Dados das análises químicas utilizadas na confecção do artigo do Capítulo 1	160
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	161
ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES....	166

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1
2 O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) (Gaspar 2006; Gaspar e Campos 2007) representa um
3 dos mais importantes mananciais de água subterrânea do Brasil, distribuindo-se por seis estados
4 brasileiros (Bahia, Tocantins, Minas Gerais, Piauí, Maranhão e Goiás) com uma área de
5 aproximadamente 120.000 km² e espessura de sedimentos, ainda motivo de investigações, que
6 pode atingir valores superiores a 600 metros (Tschiedel, 2004; Amorim Júnior e Lima, 2007;
7 Lima e Santos, 2011; Gaspar et al., 2012; Kiang e Silva, 2015). Corresponde a uma bacia
8 hidrogeológica assimétrica, devido a presença de um eixo divisor longitudinal que separa o fluxo
9 subterrâneo para oeste em direção à bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia e para leste à
10 bacia hidrográfica do São Francisco (Nascimento 2003; Gaspar e Campos 2007).

11 Está localizado na região centro-ocidental do Brasil, no contexto geotectônico da Bacia
12 Sanfranciscana (i.e., depressão na qual se acumularam as coberturas sedimentares fanerozoicas
13 do Cráton do São Francisco) (Almeida, 1977; Sgarbi, 1989). Nela, o Grupo Urucuia representa a
14 sedimentação neocretácea de maior distribuição em área e importância regional. Essa unidade
15 litoestratigráfica distribui-se de forma contínua na região central e em direção às porções
16 setentrionais da bacia, onde chega a sobrepor os sedimentos da Bacia do Parnaíba. Já nas porções
17 meridionais da bacia, ocorre de forma descontínua e segmentada (Campos e Dardenne, 1997a,
18 1997b, 1999).

19 Superficialmente integra um sistema de correntes consequentes, extensas e rarefeitas da
20 margem esquerda do médio rio São Francisco (Barbosa, 2007). Apresenta um padrão de
21 drenagem semi-paralelo, orientados segundo a direção WSW-ENE, evidenciando um controle

22 estrutural regional, que constitui a expressão superficial do fluxo hidrodinâmico do SAU. Esses
23 rios esculpem uma ampla plataforma arenosa referida na literatura como “Chapadão do Urucuia”,
24 uma feição geomorfológica de topo plano e limitada por escarpas com formas ruineformes. A
25 presença de morros residuais adjacentes às escarpas regressivas do Grupo Urucuia demonstra que
26 a bacia era, provavelmente, mais extensa do que observado atualmente. Em geral, apresenta
27 altitudes variando suavemente de 900 a 1.000 metros acima do nível do mar, no extremo
28 ocidental e 600 a 700 metros nas porções orientais, onde o relevo apresenta-se em planos
29 suavemente inclinados para leste (Barbosa, 1990; Nascimento, 1991; Nascimento, 2003; Gaspar,
30 2006; Barbosa, 2009).

31 É um manancial estratégico e responsável pela perenidade das nascentes de vários
32 afluentes das bacias hidrográficas dos rios São Francisco, Tocantins e Parnaíba, durante o período
33 de estiagem, entre os meses de abril e outubro, sendo responsável por aproximadamente 90% de
34 sua descarga de base (Gaspar, 2006; Pimentel et al., 2000). Desse modo, estima-se que uma
35 possível utilização, em larga escala, das águas subterrâneas interfira diretamente no volume de
36 água que escoar superficialmente, causando modificações geo-ambientais significativas e talvez
37 irreversíveis (Aquino et al., 2003; Barbosa et al., 2014a, 2014b, 2014c).

38 Tradicionalmente o SAU era reconhecido como um reservatório de água subterrânea de
39 baixo potencial hidrogeológico, devido a captação inicial direta ocorrer a partir do bombeamento
40 dos cursos de água superficial. A partir da década de 1980, a região experimentou um acelerado
41 processo de expansão de atividades agroindustriais e crescimento urbano, se tornando, nos dias
42 atuais, um dos importantes polos para o desenvolvimento do país, destacando-se a implantação de
43 culturas irrigadas (e.g., café, soja, milho, arroz, algodão, frutas, etc) (Bonfim e Gomes, 2004).
44 Como efeito e resultado desse processo têm-se: (i) erradicação e degradação da vegetação natural

45 do cerrado; (ii) intensificação de processos erosivos (i.e., voçorocas); (iii) diminuição da vazão e
46 do curso perene dos rios; (iv) redução nas condições permo-porosas, da infiltração e da recarga
47 natural, devido ao manejo inadequado do solo; (v) depleção contínua do nível freático regional e
48 potenciométrico e; (vi) aumento progressivo no conhecimento acerca da potencialidade
49 hidrogeológica do SAU (Gaspar, 2006; Gaspar et al., 2007; Barbosa et al., 2014a, 2014b, 2014c).

50 Nesse contexto, a demanda por água para irrigação tem sido crescente a ponto de alguns
51 mananciais superficiais (e.g. rio das Fêmeas e rio Grande) estarem com a sua disponibilidade
52 hídrica para outorga esgotada, fato que tem levado os segmentos produtivos a intensificar a
53 exploração e uso das águas subterrâneas, tendo em vista a baixa densidade de drenagem
54 existente, através da perfuração de poços tubulares profundos com obtenção de altas vazões e
55 capacidades específicas (Schuster et al., 2002; Barbosa, 2007; Gaspar e Campos, 2007).

56 Nos dias atuais, embora regionalmente reconhecido como um excelente sistema aquífero,
57 em termos de reservas e produtividade dos poços, ainda são poucos os estudos geológicos e
58 hidrogeológicos sistemáticos e efetivos (e.g., elaboração de modelos geológicos que forneçam
59 subsídios às interpretações hidrogeológicas (Barbosa, 2012); zoneamento dos diferentes
60 comportamentos hidrodinâmicos a depender da posição da bacia hidrogeológica (Barbosa et al.,
61 2010); avaliação da configuração geométrica e hidráulica (Barbosa et al., 2014); determinação
62 dos sistemas de fluxo das águas subterrâneas, da dinâmica hidrológica e do ciclo hidrológico
63 local) de forma a dimensionar um regime de uso racional das suas águas e garantir o equilíbrio
64 dos ecossistemas de sua área de ocorrência (Barbosa, 2009).

65 Contudo, verifica-se que apesar do aumento do conhecimento técnico-científico-
66 acadêmico, os estudos realizados até o momento possuem, em sua maioria, enfoque local, sendo
67 desenvolvidos em áreas piloto de sub-bacias hidrográficas específicas (Lima, 2000; Pimentel et

68 al., 2000; Aquino et al., 2002; Nascimento, 2002; Pompeu e Rodrigues, 2002; Santos, 2002;
69 Schuster et al., 2002; Aquino et al., 2003; Nascimento, 2003; Nascimento et al., 2003; Schuster et
70 al., 2003; CPRM, 2008; Oliveira et al., 2006; Oliveira et al., 2008; Amorim e Lima, 2007;
71 Barbosa, 2007; Barbosa, 2009; Schuster et al., 2010; Lima e Santos, 2011; Martins e Cardoso,
72 2012; Gonçalves, 2013; Barbosa et al., 2014). Paralelamente, foram poucos os estudos
73 hidrogeológicos que envolvem toda a área de abrangência do SAU (Gaspar, 2006; Gaspar e
74 Campos, 2007; Gaspar et al., 2007; Gaspar et al., 2012; Barbosa et al., 2014a, 2014b, 2014c,
75 2014).

76 Por consequência, o escopo da tese é estudar de forma holística a hidrogeologia do
77 Sistema Aquífero Urucuia principalmente no que concerne a determinação dos diferentes
78 comportamentos hidrogeológicos a depender de sua posição geográfica na bacia. Para tanto, foi
79 necessário analisar, integrar e reinterpretar informações/dados sedimentológicos/estratigráficos,
80 geofísicos, hidrodinâmicos, hidrogeoquímicos e isotópicos, bem como utilizar-se de dados
81 inéditos.

82 A integração de informações possibilitará, entre outros: (i) realizar correlações
83 estratigráficas através da interpretação de perfis geofísicos de poços, levantamento expeditos de
84 campo e estudos de proveniência de sedimentos que auxiliarão na reconstrução paleogeográfica
85 da sedimentação do Grupo Urucuia e a elaboração do modelo deposicional; (ii) caracterizar a
86 geometria e a hidráulica do sistema através da interpretação dos dados existentes de
87 levantamentos geofísicos elétricos e perfilagens geofísicas; (iii) determinar os diferentes
88 comportamentos hidrogeológicos regionais através de dados de poços tubulares e da avaliação
89 dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, ou seja, a transmissividade (T), a condutividade
90 hidráulica (K) e o coeficiente de armazenamento (S), contribuindo para o entendimento dos

91 mecanismos que atuam na dinâmica de fluxo e de suas interconexões com a rede de drenagem
92 superficial e; (iv) identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes químicos das
93 águas superficiais e subterrâneas e análise de isótopos estáveis ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$), que possibilitará a
94 reconstrução do ciclo hidrológico local a partir da sua origem como precipitação, da recarga até a
95 ocorrência como sistema aquífero. Os resultados desta pesquisa deverão contribuir para o
96 aprimoramento das políticas de gestão e uso das águas no domínio hidrogeológico do SAU.

97 Adicionalmente, a tese dedicar-se-á na investigação de problemas pendentes, dentre eles:

98 (i) inexistência de um modelo deposicional regional para o Grupo Urucuia que sirva como base
99 para as interpretações hidrogeológicas. Algumas tentativas foram feitas (e.g., Oliveira, 1967;
100 Faria et al., 1986; Borges et al., 1992; Campos e Dardenne, 1997a; Campos e Dardenne, 1999;
101 Spigolon e Alvarenga, 2002), mas dispostos na forma de descrições pontuais ou regionais e
102 interpretações de fácies sedimentares, sem levar em consideração a paleogeografia, as diferenças
103 no padrão de sedimentação e a caracterização dos seus elementos arquiteturais nas porções
104 proximais e distais do Grupo Urucuia; (ii) a presença de níveis ou camadas silicificadas já
105 classicamente difundidos (i.e., extensão e posições estratigráficas) e sua importância no
106 condicionamento hidrogeológico do SAU (i.e., aquífero, sistema aquífero ou vários
107 comportamentos hidrogeológicos a depender do posicionamento na bacia); (iii) baseado no item
108 anterior, determinar a geometria e a dinâmica hidrológica do SAU; (iv) elaborar um modelo
109 hidrogeoquímico integrado, pois, os trabalhos anteriores (e.g., Lima, 2000; Nascimento, 2002;
110 Aquino et al., 2002; Aquino et al., 2003; Oliveira et al., 2006; Barbosa, 2007; Oliveira et al.,
111 2008) limitaram-se a apresentar dados hidroquímicos sem uma inter-relação com os diferentes
112 aquíferos existentes e; (v) caracterizar o ciclo hidrológico regional (i.e., precipitação, evaporação
113 na zona vadosa e capilar, condições de recarga, armazenamento, descarga) com base em dados

114 isotópicos (i.e., $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$). Os trabalhos desenvolvidos até então (e.g., Aquino et al., 2003;
115 Barbosa, 2007; Nascimento et al., 2003; Oliveira et al., 2006; Oliveira et al., 2008) restringiram-
116 se a caracterizar a interconexão entre reservatórios superficiais e subterrâneos.

117 O termo Sistema Aquífero, amplamente generalizado para os aquíferos brasileiros, será
118 adotado na presente tese em detrimento ao termo aquífero. O processo de designação e nomeação
119 de aquíferos e unidades de confinamento é subjetivo e pode levar a confusão se não devidamente
120 documentado. O termo aquífero será entendido como “uma unidade com status de grupo,
121 formação ou membro que contém material saturado com permeabilidade suficiente para produzir
122 e transmitir quantidades significativas de água para poços e nascentes” (Meinzer, 1923; Lohman
123 et al., 1972; Bates e Jackson, 1980). Já o conceito de sistema aquífero será compreendido como
124 “um corpo heterogêneo de materiais permeáveis e pouco permeáveis intercalados que funciona
125 regionalmente como uma unidade hidráulica; que compreende dois ou mais estratos permeáveis
126 (i.e., aquíferos) separados, pelo menos localmente, por aquitardes (i.e., unidade de confinamento)
127 que impedem o movimento da água subterrânea, mas não afetam expressivamente a continuidade
128 hidráulica regional do sistema” (Polland et al., 1972).

129 A hierarquia da designação de aquíferos e sistemas aquíferos podem não ser sempre
130 consistentes na prática. Devido a diferenças nas escalas de investigações e no nível de
131 conhecimento hidrogeológico, alguns aquíferos individuais podem ser combinados em um único
132 sistema aquífero o qual pode ser apenas uma parte de outro sistema aquífero ainda maior. Dessa
133 forma, o conhecimento detalhado das unidades estratigráficas e processos pós-deposicionais (e.g.,
134 dissolução, cimentação, deformação), das propriedades hidrodinâmicas (e.g., transmissividade,
135 condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento), análise de dados construtivos,

136 perfilagem geofísica de poços e levantamentos geofísicos de superfície são essenciais na
137 determinação dos limites do aquífero e na compreensão do sistema de fluxo.

138 A presente tese está estruturada em capítulos que foram confeccionados na forma de
139 quatro artigos, a saber: (i) Hidrogeologia, estratigrafia de sequências e diagênese do Grupo
140 Urucuia (neocretáceo da Bacia Sanfranciscana), Brasil: Influências na concepção do sistema
141 aquífero, em fase final de preparação; (ii) Modelo hidrogeológico conceitual do Sistema Aquífero
142 Urucuia Centro-Occidental, Brasil, submetido a Revista Águas Subterrâneas; (iii) Caracterização
143 geométrica e hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia Meridional com base em testes de
144 bombeamento e levantamentos geofísicos elétricos, submetido e aceito para publicação na
145 Revista Águas Subterrâneas e; (iv) Hydrochemical and stable isotopic data ($\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$) in the
146 characterization of hydrologic dynamics of the Southern Urucuia Aquifer System, Brazil,
147 submetido a Journal of South American Earth Sciences.

148

149 Referências

150

151 Almeida, F.F.M., 1977. O cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo:
152 SBG, 7(4), 349-364.

153 Amorim Junior, V., Lima, O.A.L., 2007. Avaliação hidrogeológica do Aquífero Urucuia na bacia
154 do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. Revista Brasileira de
155 Geofísica. 25(2), 117-129

156 Aquino, R.F., Nascimento, K.R.F., Rodrigues, Z.R., Vieira, C., Maia, P.H.P., Costa, A.B., 2003.

157 Caracterização hidrogeoquímica e isotópica das águas superficiais e subterrâneas do Oeste baiano

- 158 – bacia do rio das Fêmeas – Bahia. Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH), Salvador-BA.
159 20 p.
- 160 Aquino, R.F., Silva, F.F., Schuster, M.D.H., Batista, L.HG., Urasaki, F.Y.A., 2002. Aspectos
161 hidroquímicos e da qualidade da água superficial e subterrânea do Oeste Baiano – Sub-Baía do
162 Rio do Cachorro – Bahia. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. ABRH. Maceió-
163 AL. Anais em CD-ROM. Tema: Questões da Qualidade Ambiental. 18 p.
- 164 Barbosa, J.S.F., 1990. O Manganês do Oeste da Bahia. Geologia e Recursos Minerais do Estado
165 da Bahia. Textos Básicos, 8, 77-178.
- 166 Barbosa, N.S., 2007. Estudo Hidroquímico e Isotópico (δD e $\delta^{18}O$) do Aquífero Urucuia, nas
167 Bacias Hidrográficas dos Rios Formoso e Arrojado, Oeste do Estado da Bahia. Trabalho de
168 Conclusão de Curso, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 60 p.
- 169 Barbosa, N.S., 2007. Avaliação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Urucuia nas Bacias
170 Hidrográficas dos Rios Formoso e Arrojado – Oeste do Estado da Bahia. Trabalho de Conclusão
171 de Curso, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 119 p.
- 172 Barbosa, N.S., 2009. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia na Região das Bacias
173 Hidrográficas dos Rios Formoso e Arrojado, Oeste do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado,
174 Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 98 p.
- 175 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Barbosa, N.S., Mello, J.C., Santos, C.B. 2010. Os Diferentes
176 Comportamentos Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Urucuia na Região Oeste do Estado da
177 Bahia. In. Cong. Bras. Geol, 45, Anais, CD-ROM.
- 178 Barbosa, N.S. 2012. Modelo deposicional do Grupo Urucuia na região Oeste do Estado da Bahia
179 e suas implicações hidrogeológicas. In. Cong. Bras. Geol, 46, Anais, CD-ROM.

- 180 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Mello, J.C., Barbosa, N.S., 2014a. Sistema Aquífero Urucuia – O
181 Passado. In. Cong. Bras. Geol, 47, Anais, CD-ROM.
- 182 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Mello, J.C., Barbosa, N.S., 2014b. Sistema Aquífero Urucuia – O
183 Presente. In. Cong. Bras. Geol, 47, Anais, CD-ROM.
- 184 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Mello, J.C., Barbosa, N.S. 2014c. Sistema Aquífero Urucuia – O
185 Futuro. In. Cong. Bras. Geol, 47, Anais, CD-ROM.
- 186 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Santos, R.L.S., Mello, J.C., 2014. Caracterização hidro-
187 litorestratigráfica do Sistema Aquífero Urucuia com base em perfis geofísicos de poços. In.
188 Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XVIII, Belo Horizonte (MG), Anais, CD-ROM.
- 189 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Barbosa, N.S., Mello, J.C., Santos, C.B., Lima, O.A.L., 2014.
190 Caracterização geométrica e hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia Mericional com base em
191 testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos. Revista Águas Subterrâneas, 28(2), 41-52.
- 192 Bates, R.L., Jackson, J.A., eds., 1987, Glossary of geology (3d ed.): Alexandria, Va., American
193 Geological Institute, 788 p.
- 194 Bonfim, L.F.C., Gomes, R.A.A.D., 2004. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura: Idéias para
195 Discussão. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XX, Cuiabá (MT), Anais. 1 CD-
196 ROM.
- 197 Borges, M.S., Igreja, H.L.S., Costa, J.B.S., Hasui, Y., 1992. Faciologia e Tectônica da Formação
198 Urucuia na Região de Dianópolis, Sudeste do Estado do Tocantins. Geociências, São Paulo,
199 11(1), 7-18.
- 200 Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., 1997a. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana:
201 uma revisão. Revista Brasileira de Geociências, 27, 269-282.

- 202 Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., 1997b. Origem e evolução tectônica da bacia Sanfranciscana.
203 Revista Brasileira de Geociências, 27, 283-294.
- 204 Campos, J.E.G., Dardenne, M.A. 1999. Distribuição, estratigrafia e sistemas deposicionais do
205 Grupo Urucua – Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. Geociências, São Paulo, 18(2),
206 481-499.
- 207 CPRM, 2008. Comportamento das Bacias Hidrográficas da Região Semi-árida do Nordeste
208 Brasileiro. Hidrogeologia do Aquífero Urucua – Bacias dos Rios Formoso e Arrojado. Escala
209 1:100.000. CD-ROM.
- 210 Faria, A., Marini, O. J., Winge, M., Kuyumijian, R.M., Figueiredo, A.N., 1986. Geologia da
211 Região de São Domingos-GO. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXIV, Anais, v.2.
212 pp.861-869.
- 213 Gaspar, M.T.P., 2006. Sistema Aquífero Urucua: Caracterização Regional e Propostas de
214 Gestão. Tese de doutorado n° 76. IG-UnB. Brasília-DF. 158 p.
- 215 Gaspar, M.T.P., Campos, J.E.G., 2007. O Sistema Aquífero Urucua. Revista Brasileira de
216 Geociências, 37(4), 216-226.
- 217 Gaspar, M.T.P., Campos, J.E.G., Cadamuro, A.L.M., 2007. Condições de infiltração em solos na
218 região de recarga do sistema aquífero Urucua no oeste da Bahia sob diferentes condições de
219 usos. Revista Brasileira de Geociências, 37(3), 542-550.
- 220 Gaspar, M.T.P., Campos, J.E.G., Moraes, R.A.V de., 2012. Determinação das espessuras do
221 Sistema Aquífero Urucua a partir de estudo geofísico. Revista Brasileira de Geociências,
222 42(Suppl 1), 154-166.
- 223 Gonçalves, 2013. Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas na bacia do Rio Grande
224 (BA). Trabalho de conclusão de curso (Geologia) – Unesp – Rio Claro (SP). 56 p.

- 225 Kiang, G.H., Silva, F.P., 2015. Contribuição ao Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero
226 Urucuia. *Geociências*, 34(4), 872-882
- 227 Lima, O.A.L., 2000. Estudos geológicos e geofísicos do aquífero Urucuia na Bacia do Rio
228 Cachorro- Oeste do Estado da Bahia. Relatório técnico. Superintendência de Recursos Hídricos-
229 SRH/ Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia- CPGG/UFBA. 42 p.
- 230 Lima, O.A.L., Santos, E.S.M., 2011. Caracterização geológica e geofísica do Sistema Aquífero
231 Urucuia e de seu substrato nas bacias dos rios Arrojado e Formoso, Bahia. *Revista Brasileira de*
232 *Geofísica*, 29(4), 723-744
- 233 Lohman, S.W., and others, 1972. Definitions of selected groundwater Terms - Revisions and
234 conceptual refinements: U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1988, 9 p
- 235 Martins, L.A., Cardoso, A.C., 2012. O Aquífero Urucuia no Estado de Minas Gerais. In. XVII
236 Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Bonito (MS), Anais. 1 CD-ROM.
- 237 Meinzer, O.E., 1923. Outline of Ground-Water Hydrology with Definitions. U.S Geological
238 Survey Water-Supply Paper, 494, 71 p.
- 239 Nascimento, K.R.F. (coord.), 2002. Aspectos Hidrogeoquímicos e Qualidade das Águas
240 Subterrâneas e Superficiais da Sub-bacia do Rio das Fêmeas. Relatório Final.
241 ANA/GEF/PNUMA/OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). Salvador- BA. 21p.
- 242 Nascimento, K.R.F., (coord.), 2003. Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da Sub-
243 Bacia do Rio das Fêmeas- Bahia. Relatório Final. ANA/ GEF/ PNUMA/ OEA, Superintendência
244 de Recursos Hídricos (SRH). Salvador- BA. 208 p.
- 245 Nascimento, K.R.F., Costa, A. B., Zucchi, M. R., Matos, C. R. A., Azevedo, A. E. G., Pedreira,
246 C. B., 2003. Oxygen Isotopic composition of surface and ground-waters from Rio das Fêmeas

- 247 Sub-basin – Urucuia aquifer – BA, Brazil. In: IV South American Symposium on Isotopic
248 Geology. São Paulo- SP. pp. 457-460.
- 249 Nascimento, M.A.L.S., 1991. Geomorfologia do Estado de Goiás. In: Boletim Goiano de
250 Geografia. Goiânia- GO. UFG, 12(1), 1-22.
- 251 Oliveira, L.T., Luz, J.A.G., Campos, J.C.V., Leal, L.R.B., Lima, O.A., 2006. Caracterização
252 Hidroquímica Preliminar do Aquífero Urucuia nas Sub-bacias dos Rios Formoso e Arrojado. In:
253 XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais, pp.1-14.
- 254 Oliveira, L.T., Luz, J.A.G., Campos, J.C.V., Lima, O.A., Leal, L.R.B., 2008. Comportamento
255 hidrogeológico do Grupo Urucuia: Sub-bacia dos rios Formoso e Arrojado. In: XV Congresso
256 Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais, pp.1-15.
- 257 Oliveira, M.A.M., 1967. Contribuição a geologia da parte sul da bacia do São Francisco e áreas
258 adjacentes. Petrobrás, Relatório de exploração 1, Rio de Janeiro, RJ.
- 259 Pimentel, A.L., Aquino, R.F., Silva, R.C.A., Vieira, C.M.B., 2000. Estimativa da recarga do
260 aquífero Urucuia da sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de
261 hidrogramas. In: 1º Congresso sobre aproveitamento e gestão de recursos hídricos em países de
262 idioma português, Rio de Janeiro - RJ, 11 p.
- 263 Poland, J.F., Lofgren, B.E., Riley, F.S., 1972, Glossary of selected terms useful in studies of the
264 mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal: U.S. Geological
265 Survey, Water Supply Paper 2025, 9 p.
- 266 Pompeu, J., Rodrigues, Z.R.C., 2002. Estudo Hidrogeológico da Bacia do Rio das Fêmeas. In:
267 Simpósio de Água e Desenvolvimento Sustentável no Oeste Baiano, 1, Anais, CD-ROM.

- 268 Santos, J.P., 2002. Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Urucuia. Relatório
269 Final. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). Salvador- BA.
270 75 p.
- 271 Schuster, H.D.M., Silva, F.F., Teixeira, S.L., Batista, L.H.G., Freitas, W.A., 2002. Estudos
272 hidrogeológicos do aquífero Urucuia no Oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas
273 de mananciais subterrâneos. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis-
274 SC. 15 p.
- 275 Schuster, H.D.M., Silva, F.F., Araújo, H.D.B., 2003. Modelagem de Fluxo Subterrâneo com
276 vistas à definição de critérios para outorga de mananciais subterrâneos na região oeste do estado
277 da Bahia. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-Paraná. Livro de Resumos
278 pp. 643.
- 279 Schuster, H.D.M., Cruz, J.L.F., Silva, F.F., 2010. Modelagem do efeito de bombeamento na
280 depleção de rios. Simulações de um caso real no Oeste da Bahia. Revista Ambiente Mineral,
281 1:20-35
- 282 Sgarbi, G.N.C., 1989., Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia
283 Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro
284 (UFRJ). 324p.
- 285 Spigolon, A.L.D., Alvarenga, C.J.S., 2002. Fáceis e elementos arquiteturais resultantes de
286 mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia
287 Sanfranciscana. Revista Brasileira de Geociências, 32(4), 579-586.
- 288 Tschiedel, M. W., 2004. Aplicação de estudo geofísico como contribuição ao conhecimento da
289 tectônica da Sub-Bacia Urucuia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da
290 Universidade de Brasília, 76 p.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1: HIDROGEOLOGIA, ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS E DIAGÊNESE DO GRUPO URUCUIA (NEOCRETÁCIO DA BACIA SANFRANCISCANA), BRASIL: INFLUÊNCIAS NA CONCEPÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO

1 Resumo

2

3 O Grupo Urucuiá consiste de sequências de arenitos, conglomerados e siltitos depositados na
4 Bacia Sanfranciscana, uma bacia intracontinental na região Centro-Oriental da Plataforma
5 Sulamericana. Este estudo apresenta uma primeira abordagem de um modelo de evolução
6 tectono-sedimentar e as implicações hidrogeológicas na concepção do Sistema Aquífero Urucuiá
7 (SAU), um dos mais expressivos sistemas aquíferos do continente sul americano. A unidade é
8 composta de nove litofácies incorporados em seis associações de fácies que representam a
9 deposição em sistemas eólicos secos e fluviais entrelaçados. As variações das litofácies registram
10 mudanças nas condições climáticas da bacia de um ambiente seco para condições mais úmidas.
11 Nesse contexto, os eventos tectônicos tiveram um importante papel na geração de espaço de
12 acomodação e no suprimento sedimentar. Cinco sequências sedimentares foram identificadas
13 com base no reconhecimento de superfícies generalizadas e marcam períodos significativos de
14 exposição subaérea ou modificações no ambiente deposicional. Os depósitos eólicos e os tratos
15 de sistema de baixa e alta acomodação são reconhecidos nas sequências de alta frequência e
16 substituem os tratos de sistemas tradicionais relativos as mudanças no nível do mar eustático. As
17 sequências desenvolvidas são segmentadas por aquitardes representados por arenitos silicificados

18 e originados por processos diagenéticos. A presença de altos gravimétricos no substrato da bacia
19 condiciona a geometria do sistema aquífero. Nas regiões meridionais e setentrionais, a denudação
20 é efetiva e o sistema aquífero é descontínuo e de pequena espessura. Constitui-se de aquíferos
21 livres com baixo potencial hidrogeológico. A bacia hidrogeológica é assimétrica, em
22 consequência de um eixo divisor do fluxo subterrâneo de direção aproximada N-S. Nela, é
23 estabelecida um padrão de circulação da água subterrânea segundo sistemas de fluxo local,
24 intermediário e regional. No contexto centro-oriental, os sedimentos possuem maiores espessuras
25 e o SAU apresenta uma configuração do tipo aquífero-aquitarde-aquífero. No extremo ocidental
26 ocorre um aumento progressivo da profundidade da superfície potenciométrica e a implantação
27 de aquíferos livres com níveis potenciométricos profundos. Por conseguinte, os processos
28 tectônicos, sedimentares, diagenéticos e geomórficos integrados contribuíram com o
29 estabelecimento do SAU. Em síntese, as sequências sedimentares foram desenvolvidas como
30 reflexo intraplaca da fragmentação gonduânica e atestam a possibilidade de ocorrência de
31 sistemas aquíferos expressivos no interior remoto continental sob as mesmas condições de
32 evolução tectônica e climática.

33

34 Abstract

35

36 The Urucuia Group consists of sandstones, conglomerates and siltstone a sequences deposited in
37 the Sanfransicana basin, defined as intracontinental basin in the East-Central portion of the South
38 American Platform. This study presents a first approach to a model of tectonic-sedimentary
39 evolution and hydrogeological implications for the conception of the Urucuia Aquifer System
40 (UAS), one of the most expressive aquifer systems of the South American continent. This

41 lithostratigraphic unit is made up of nine lithofacies which are incorporated into six facies
42 associations which represent the deposition in dry eolian system and braided rivers. The
43 lithofacies variations record changes in climatic conditions of the basin, from dry environment to
44 wetter conditions. In this context, the tectonic events played an important role in the generation of
45 accommodation space and sediment supply. Five sedimentary sequences are identified based on
46 the recognition of generalized surfaces, they mark a significant periods of subareial exposures or
47 change in depositional environment. The eolian deposits and high- and low- accommodation
48 systems tracts are recognized in high-frequency sequences and replace the traditional systems
49 tracts related to the eustatic changes in the sea levels. The developed sequences are segmented by
50 aquitards composed by silicified sandstones originated by diagenetic processes. The presence of
51 high gravimetric in the substrate basin conditions the geometry of the aquifer system. In the
52 southern and northern regions, the denudation is effective and the aquifer system is discontinuous
53 and very little thickness. It consists of unconfined aquifers with low hydrogeological potential.
54 The hydrogeological basin is asymmetrical, as a result of divider axis of the groundwater flow,
55 approximate in N-S direction. In this basin, it is established a groundwater circulation pattern
56 according to local, intermediate and regional flow systems. In the central-eastern region, the
57 sediments have greater thickness and the UAS has a configuration of the aquifer-aquitard-aquifer
58 type. At the extreme West, there is a progressive increase in depth of the potentiometric surface
59 and the implementation of unconfined aquifer with deep potentiometric levels. From an
60 integrated perspective, the tectonic, sedimentary, diagenetic and geomorphic processes
61 contributed to the establishment of the UAS. In summary, the sedimentary sequences were
62 developed as intraplate reflection of the Gondwanic fragmentation and attest the possibility of

63 significant aquifer system in a remote intra-continental setting under the same conditions of
64 climate and tectonic evolution.

65

66 1. Introdução

67

68 Durante o cretáceo, a sedimentação sob condições intracratônicas se desenvolveu
69 amplamente no interior continental da Plataforma Sul-Americana, em episódios de grande
70 subsidência, com vários registros em bacias interiores (e.g. Amazonas, Paraná, Parnaíba e
71 Sanfranciscana) (Almeida et al., 2000; Borges et al., 1992). A distribuição das rochas nesses
72 ambientes está fortemente condicionada às feições estruturais do relevo que formam os limites
73 das bacias no seu âmbito geográfico (Petri, 1991).

74 Nas bacias intracratônicas foram depositadas espessas sequências de rochas sedimentares
75 paleozoicas e mesozoicas, algumas com intenso magmatismo básico e alcalino associado.
76 Atualmente correspondem a remanescentes de uma superfície deposicional muito mais extensa
77 condicionados por estruturas herdadas e reativadas do Ciclo Brasileiro/Pan Africano (Millani e
78 Tomaz Filho, 2000). Alguns desses depósitos ultrapassaram as fronteiras das bacias e sobrepõe
79 diretamente rochas pré-cambrianas e mais raramente paleozoicas (Petri e Campanha, 1981). Sua
80 evolução abrange uma sucessão de eventos tectônicos alternados com períodos de relativa
81 estabilidade que incluem: (i) extensão e compressão crustal associados à ruptura gondwânica; (ii)
82 subsidência térmica sobre grandes áreas; (iii) ajustes isostáticos e; (iv) atividade neotectônica no
83 Cenozoico (Klein, 1995).

84 A gênese dessas bacias, são em parte controladas pelos esforços intraplaca resultantes do
85 rifteamento precursor do Atlântico Sul, que criaram condições morfotectônicas e climáticas

86 necessárias à deposição e preservação de seqüências sedimentares (e.g. Grupo Urucuia,
87 neocretáceo da Bacia Sanfranciscana) (Chang et al., 1992; Sgarbi e Dardenne, 1996). O
88 arcabouço tectônico e a correlação das unidades litoestratigráficas da Bacia Sanfranciscana (BS)
89 ainda é controverso e grandes áreas ainda permanece sem estudos específicos (Petri e Campanha,
90 1981; Sgarbi, 2000). Apesar de estudos anteriores (Chang et al., 1992; Campos e Dardenne,
91 1997a, 1997b, 1999; Spigolon e Alvarenga, 2002), pouco se sabe a respeito da evolução
92 paleogeográfica da sedimentação do Grupo Urucuia, unidade neocretácea da BS, apesar de seu
93 importante papel hidrogeológico (e.g., Sistema Aquífero Urucuia) (Gaspar, 2006; Gaspar e
94 Campos 2007; Barbosa et al., 2014).

95 O presente trabalho objetiva a integração de dados faciológicos e litoestratigráficos na
96 definição da arquitetura deposicional do Grupo Urucuia, de forma a subsidiar um modelo de
97 evolução tectono-sedimentar que sirva como base para a caracterização do sistema aquífero.
98 Nesse contexto são contempladas as mudanças na taxa de sedimentação e no espaço de
99 acomodação dos sedimentos e as implicações hidrogeológicas resultantes, ocorridos em dois
100 períodos deposicionais, i.e., (i) sistema eólico seco e (ii) sistema fluvial-eólico.

101

102 2. Contexto geotectônico e estratigráfico

103

104 A BS (Sgarbi, 1989) corresponde a depressão na qual se acumularam as coberturas
105 sedimentares fanerozoicas sobre o Cráton do São Francisco (Almeida, 1977). Apresenta, uma
106 forma alongada de direção aproximada norte-sul (Campos e Dardenne, 1997b, 1999). É
107 compartimentada em duas sub-bacias: Abaeté a sul e Urucuia no centro-norte, segmentadas pelo
108 Alto do Paracatu. Limita-se a sul, com a Bacia do Paraná, pela Flexura de Goiânia/Soerguimento

109 do Alto Paranaíba. A norte, com a Bacia do Parnaíba, através do Arco do São Francisco. Os
110 limites ocidental e oriental são definidos pelas bordas externas dos thrust-and-fold belts Brasília e
111 Araçuaí/Espinhaço Setentrional, respectivamente (Fig. 1). A distância entre as margens atuais e
112 as faixas de dobramentos corresponde a mais de 200 km. Contudo, a presença de testemunhos
113 isolados das coberturas fanerozoicas demonstra que a bacia era provavelmente mais extensa do
114 que atualmente observado (Campos e Dardenne, 1997b).

115 O substrato da bacia é representado em sua maioria pela sedimentação marinha
116 plataformal em bacia foreland do Grupo Bambuí (Marshak e Alkimin, 1989), localmente por
117 rochas granito-gnáissicas arqueanas/paleoproterozoicas e, na porção setentrional, pela sucessão
118 paleozoica da Bacia do Parnaíba. A estratigrafia das unidades fanerozoicas (Fig. 1) é representada
119 por sedimentos glaciogênicos neopaleozoicos do Grupo Santa Fé, eocretáceos do Grupo Areado e
120 neocretáceos sincrônicos e interdigitados dos Grupos Mata da Corda e Urucuaia (Campos e
121 Dardenne, 1997a, 1997b).

122 A evolução geotectônica da bacia é marcada por cinco estágios: (i) o Paleozoico é
123 definido por uma fase de relativa estabilidade tectônica, atenuação dos esforços compressivos da
124 orogenia brasiliana e pequena subsidência térmica (i.e., lento resfriamento do núcleo cratônico).
125 Têm como resultado a geração de uma pequena depressão relativa entre dois orógenos em fase de
126 denudação (i.e., Faixa Brasília e Serra do Espinhaço Setentrional) e registro da glaciação
127 gonduânica na bacia, evidenciado pelos sedimentos do Grupo Santa Fé (Dardenne et al., 1990;
128 Campos, 1992; Campos e Dardenne, 1994; Campos e Dardenne, 1997a, 1997b); (ii) o
129 Neopaleozoico-Eomesozoico é sinalizado pelo término da glaciação neopaleozoica,
130 movimentação epirogênica positiva, intensa erosão dos sedimentos glaciogênicos outrora
131 depositados e ocorrência de fácies ressedimentadas (Campos e Dardenne, 1997b); (iii) o

132 Eocretáceo é correlacionado à fase extensional do oceano Atlântico Sul com reflexos e
133 distribuição dos esforços análogas às verificadas no interior remoto das placas sulamericana e
134 africana. Caracteriza o primeiro registro de subsidência mecânica responsável pela geração da
135 Sub-bacia Abaeté, com atuação simultânea de diversificados ambientes deposicionais (e.g.,
136 leques aluviais, fluvial entrelaçado, flúvio-deltaico, lacustre, campos de dunas) responsáveis pela
137 deposição dos sedimentos do Grupo Areado (Campos e Dardenne, 1997b); (iv) no Meso-
138 Neocretáceo ocorre a mudança da fase rifte para pós-rifte na margem continental, com inversão
139 do campo de tensão de extensivo para compressivo no interior das placas. Nesse contexto, a
140 resposta da tensão intraplaca é um soerguimento nas bordas e subsidência no centro da bacia e a
141 instalação da Sub-bacia Urucuia (Karner et al., 1983; Cloething, 1986; Karner, 1986; Chang et
142 al., 1992; Campos e Dardenne, 1997b); (v) o Neocretáceo representa a de fase margem passiva e
143 desenvolvimento de falhas transformantes (i.e., Zona de Fratura Vitória-Trindade) associadas ao
144 domínio oceânico com reflexo continental transcorrente. Nela ocorre a formação de pequenas
145 bacias transtrativas, afinamento crustal e magmatismo alcalino do Grupo Mata da Corda com
146 sedimentação epiclástica interdigitada e sincrônica do Grupo Urucuia em direção às porções
147 setentrionais da bacia. (Asmus, 1978; Gibson, 1995; Campos e Dardenne 1997b; Almeida, 2006;
148 Alves et al., 2006) e; (vi) no Terciário têm-se a reativação neotectônica em toda bacia,
149 estruturando o sistema de drenagem atual (Saadi et al., 1991; Campos e Dardenne, 1997b).

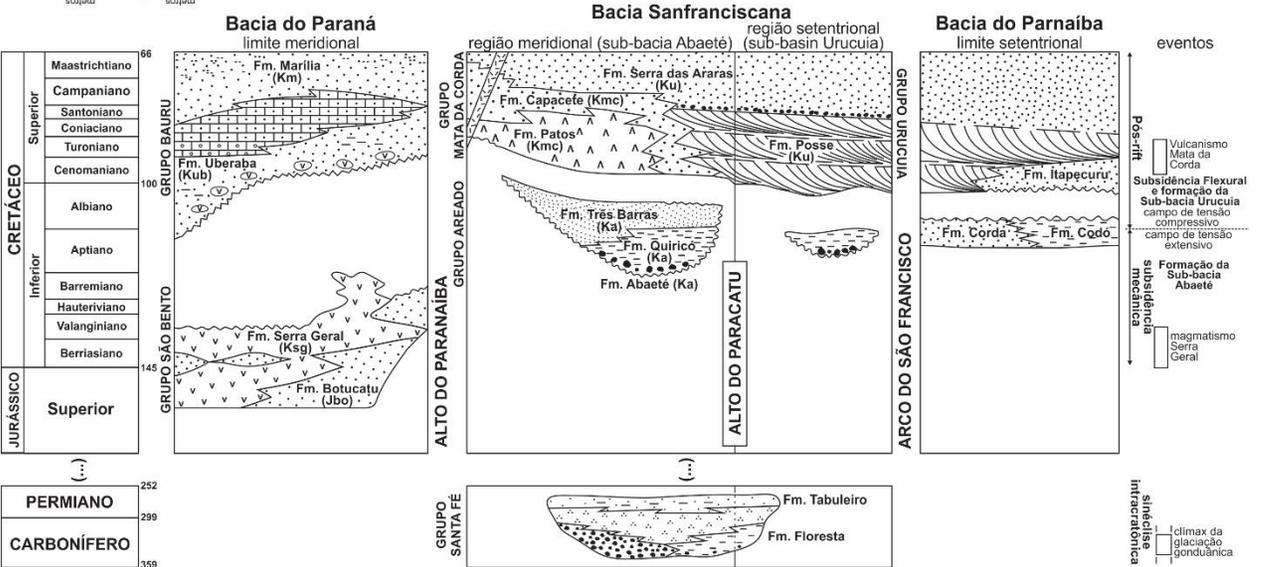
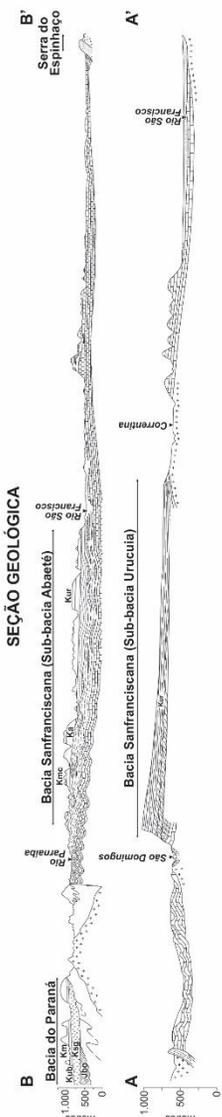
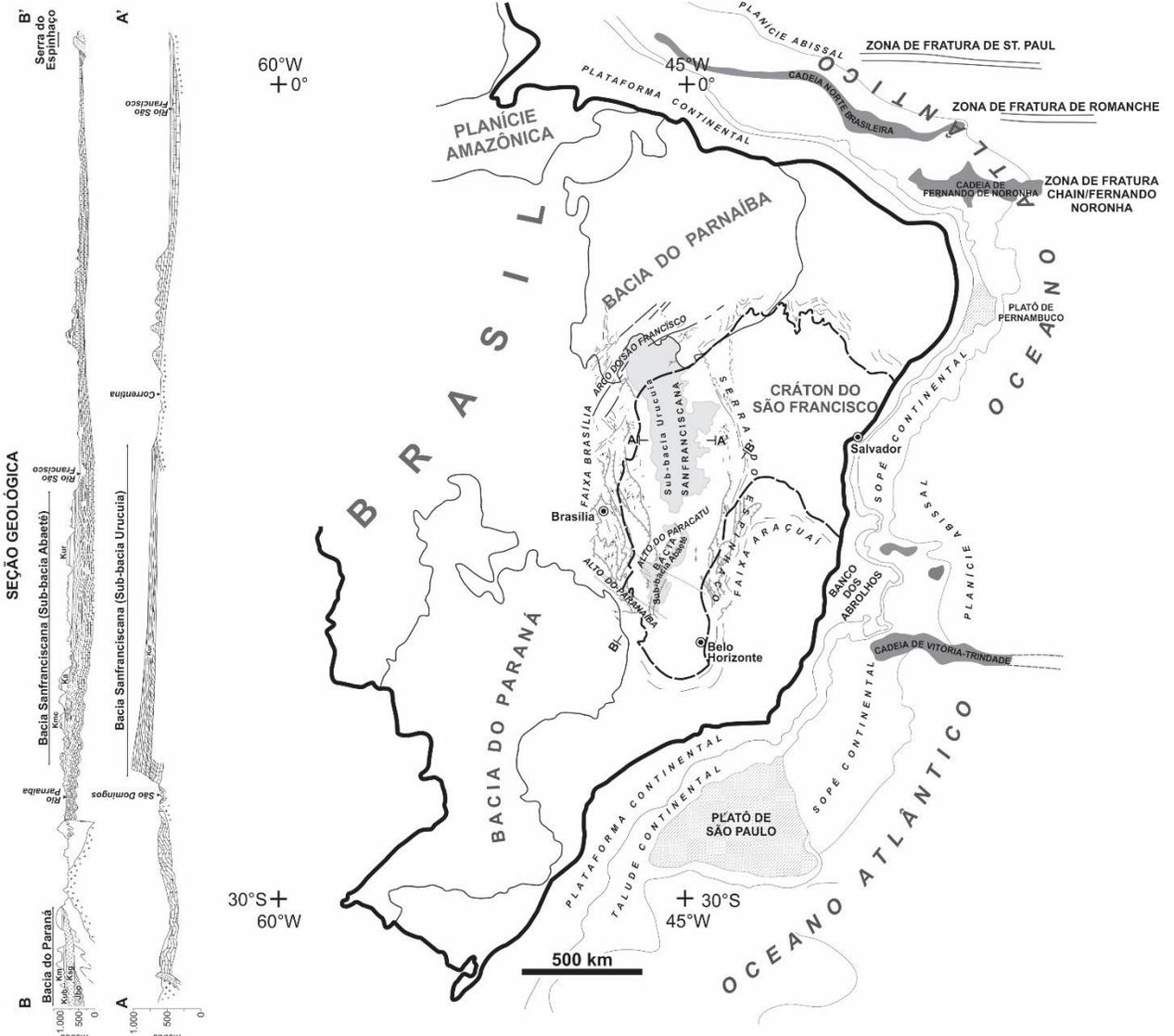
150

151

152

153

154



156 Fig. 1. Mapa de localização das bacias interiores Sanfranciscana e adjacentes (modificado de
157 Ponte e Asmus, 2004), seções geológicas e correlação estratigráfica (modificado de Campos e
158 Dardenne 1997a; Milani et al., 2007; Vaz et al., 2007).

159

160 3. Evolução paleogeográfica e a concepção do sistema aquífero

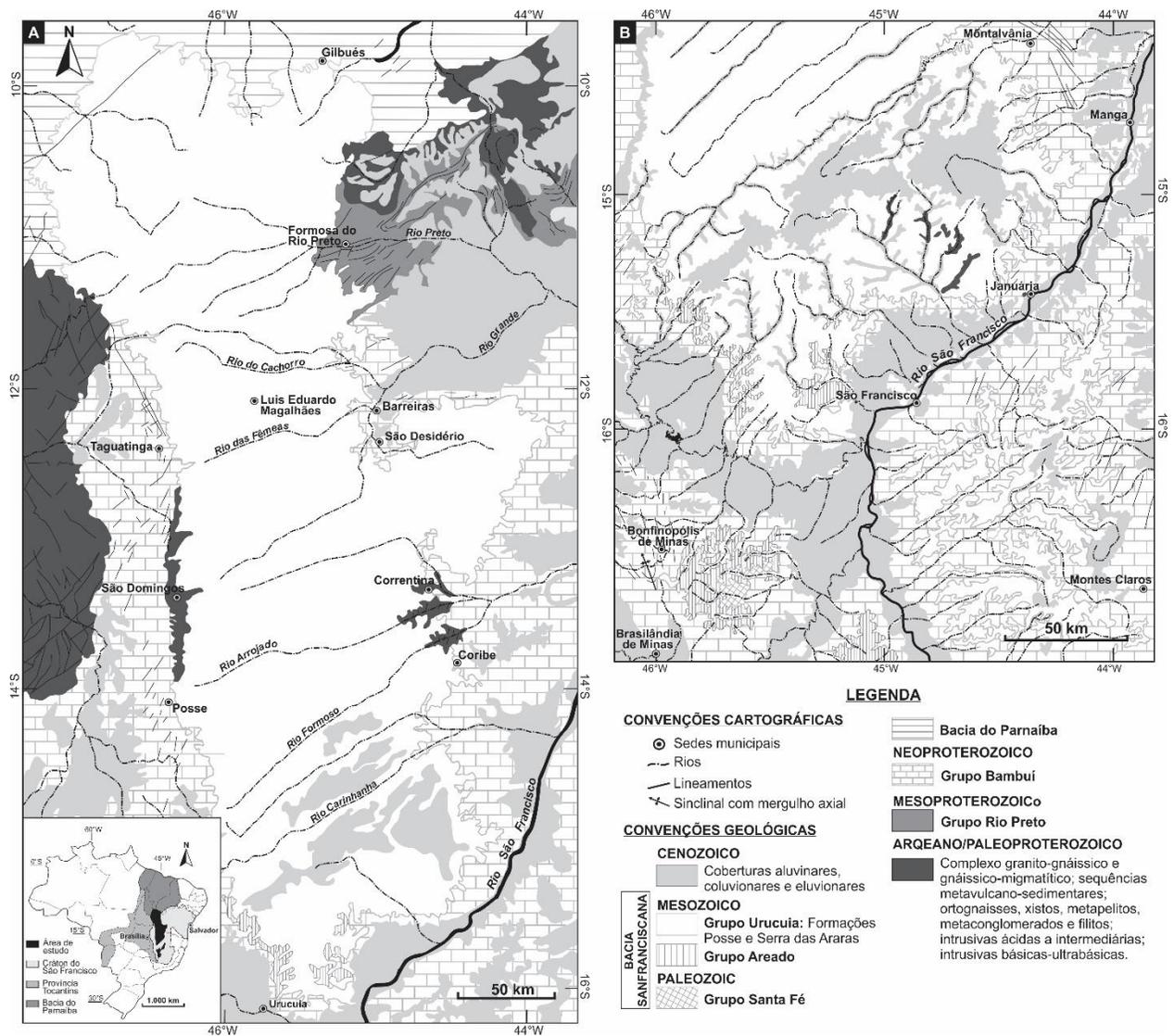
161

162 O Grupo Urucuia representa a sucessão de rochas de mais ampla distribuição em área (ca.
163 120.000 km²) na Sub-Bacia Urucuia, onde ocorre de forma contínua. Já as ocorrências na Sub-
164 bacia Abaeté (ca. 15.000 km²) são descontínuas e segmentadas (Fig. 2-A,B) (Campos e
165 Dardenne, 1997a). As espessuras, ainda motivo de muitas investigações (Amorim Júnior e Lima,
166 2007; Lima e Santos, 2011; Kiang e Silva, 2015), aumentam gradualmente em direção às regiões
167 setentrional e ocidental, onde chegam a alcançar até 600 metros (Gaspar et al., 2012).

168 Esta unidade assenta-se, na maior parte da bacia, diretamente sobre o substrato regional
169 representado pelo Grupo Bambuí. Localmente sobrepõe-se às rochas granito-gnáissicas
170 arqueanas e outras unidades fanerozoicas da bacia (e.g., Grupo Santa Fé e Areado). Na porção
171 setentrional, recobrem os sedimentos paleozoicos da bacia do Parnaíba. Já na meridional (i.e.,
172 Sub-bacia Abaeté), é parcialmente sincrônico ao vulcanismo do Grupo Mata da Corda (Campos e
173 Dardenne, 1997a) (Fig. 2A,B).

174 Duas unidades litoestratigráficas são identificadas: a inferior, Formação Posse e a
175 superior, Formação Serra das Araras (Campos e Dardenne, 1997a; Campos e Dardenne, 1999). A
176 evolução da sedimentação é subdividida em dois estágios deposicionais: (i) sistema eólico seco e
177 (ii) sistema fluvial entrelaçado.

178



179

180 Fig. 2. Mapa geológico das regiões setentrional (A) e meridional (B) da bacia Sanfranciscana.

181

182 3.1. Sistema eólico seco

183

184 A reconstrução paleogeográfica da sedimentação através de diagramas discriminatórios de
 185 proveniência (Dickinson et al., 1983) e estudos de paleocorrentes permite estabelecer orógenos
 186 recilados como a fonte principal dos sedimentos do Grupo Urucuia (i.e., Serra do Espinhaço

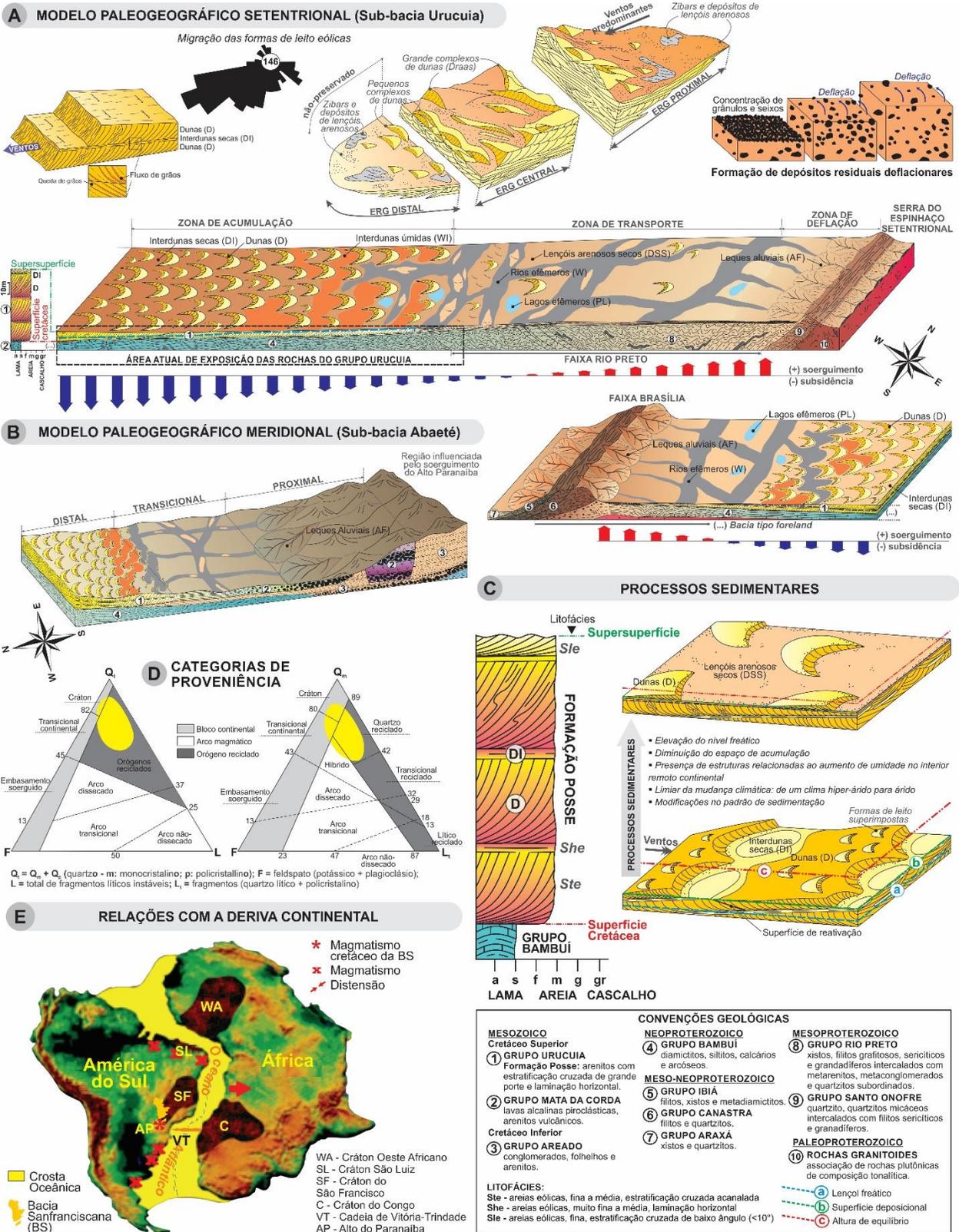
187 Setentrional) (Fig. 3A,D). Já nas porções meridionais (i.e., Sub-bacia Abaeté), a
188 contemporaneidade relativa com o magmatismo do Grupo Mata da Corda é relacionada ao
189 aumento progressivo (de sul para norte) na proporção de areia quartzosa nas rochas epiclásticas,
190 com o Alto do Paranaíba como área-fonte (Fig. 3B) (Campos e Dardenne, 1997a).

191 A formação da depressão onde se acumularam os sedimentos são reflexos da propagação
192 dos esforços originados na abertura do Oceano Atlântico, durante a inversão nos campos de
193 tensão no Albiano-Cenomaniano (i.e., distensivo-compressivo, mudança rifte-drifte). No interior
194 remoto foi o resultado de uma tectônica intraplaca flexural de pequena subsidência no centro e
195 soergimento nas bordas da bacia com pequena espessura sedimentar associada (Fig. 3A,B,E)
196 (Clothing, 1986; Karner, 1986; Chang et al., 1992; Campos e Dardenne, 1997a).

197 Antes, uma grande superfície erosiva (i.e., ciclo Gondwana) se instalou como resultado da
198 erosão desde o final do Paleozoico até o Neojurássico sobre a qual foram depositadas as
199 formações cretáceas (Fig. 4A) (Campos e Dardenne, 1994). Nessa superfície, a sedimentação
200 consistia provavelmente em sistemas de leques aluviais (wadi fans system), rios efêmeros
201 (braided), zibars, lençóis arenosos secos e campos de dunas (aeolian system) com migração das
202 formas de leito segundo um padrão preferencial de paleocorrentes de direção N240°-250°,
203 representados pela Formação Posse (Fig. 3A,B).

204 Nessa configuração, o desenvolvimento dos processos de sedimentação era favorecido
205 pelas condições tectônicas e climáticas existentes, pelo posicionamento da bacia em baixas
206 latitudes e no centro de grandes massas continentais (i.e., continente Gondwana), pela
207 disponibilidade de áreas-fontes adjacentes à bacia (i.e., Serra do Espinhaço Setentrional) e pelo
208 clima semi-árido (Campos e Dardenne, 1999).

209

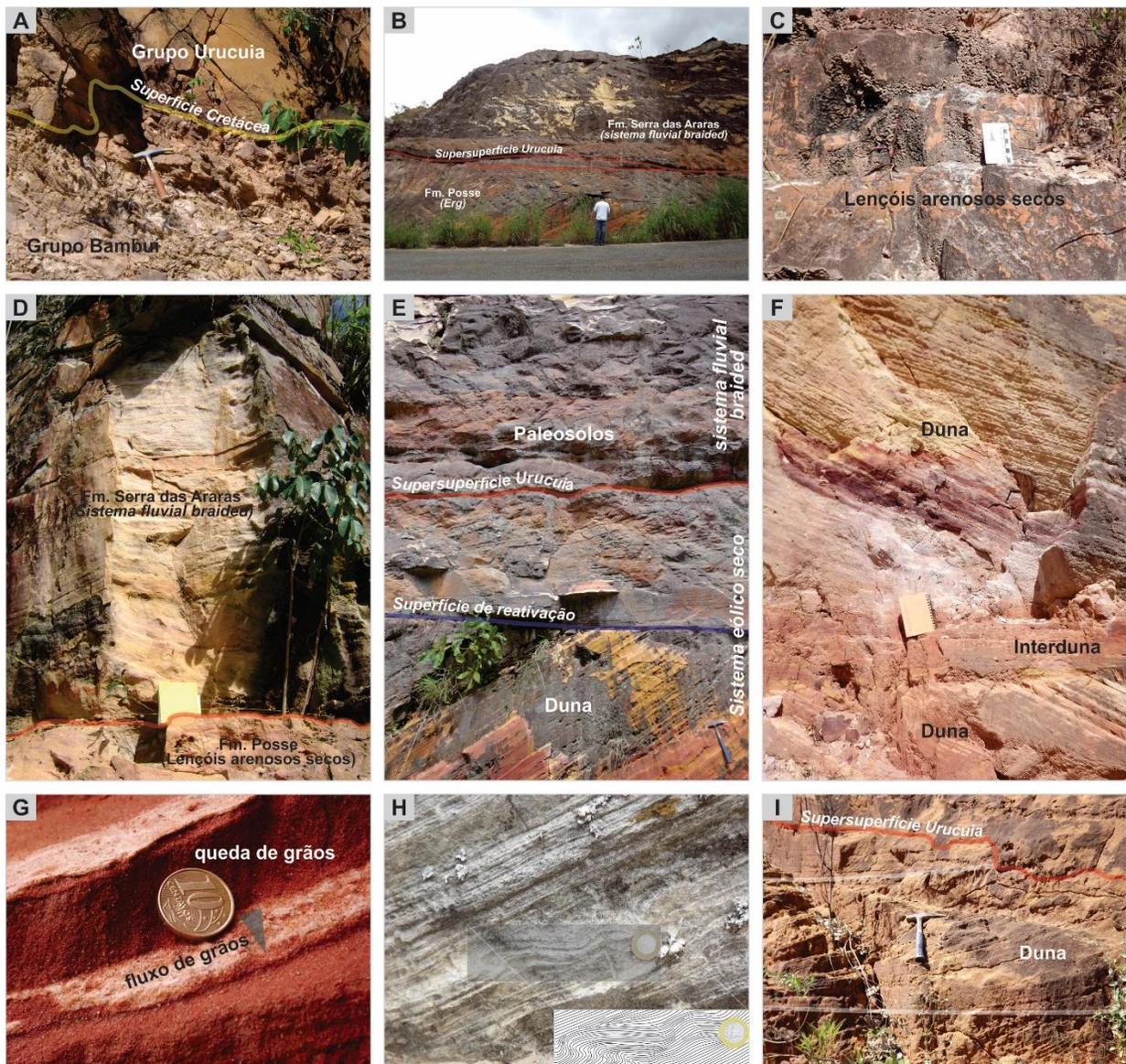


210

211 Fig. 3. Paleogeografia esquemática a configuração do ambiente deposicional (adaptado de Porter,

212 1986) da Formação Posse no contexto setentrional (Sub-bacia Urucuia) (A) e no contexto
 213 meridional (Sub-bacia Abaeté) (B), os processos sedimentares atuantes (C), as categorias de
 214 proveniência sedimentar (D) (após Dickinson e Suczer, 1979; Campos e Dardenne, 1999) e a
 215 relação com os processos de deriva continental (E) (Mizusaki e Thomaz Filho, 2004).

216



217

218 Fig. 04. Litologia, estratigrafia e interpretação dos ambientes deposicionais do sistema eólico

219 seco. (A) delimitação da superfície cretácea (Campos e Dardenne, 1994), uma superfície erosiva

220 que marca o contato entre o Grupo Urucuia (Neocreáceo) e o substrato regional do Grupo
221 Bambuí (Neoproterozoico). (B) Supersuperfície Urucuia, limite entre as Formações Posse
222 (Sistema eólico seco) e Serra das Araras (Sistema Fluvial Entrelaçado) em contexto distal,
223 sobreposto por depósitos de fluxo de detritos (litofácies Sm). (C) arenitos finos a médios com
224 laminação horizontal (litofácies She, Sle) em depósitos de lençóis arenosos secos. (D)
225 Supersuperfície Urucuia em contexto transicional com formas de leito arenosas associado a Fm.
226 Serra das Araras sobreposto aos lençóis arenosos secos relacionados a Fm. Posse. (E) Superfícies
227 de reativação dos depósitos eólicos resultado das modificações nas condições de fluxo e no
228 espaço de acumulação de sedimentos. (F) Sistema eólico seco caracterizado por depósitos de
229 dunas (litofácie Ste) e interdunas (litofácie She). (G) detalhe dos processos de fluxo e queda de
230 grãos na face frontal dos sets de estratificação cruzada de grande porte. (H) Estrutura
231 deformacional de pequeno porte relacionado às lâminas de fluxo de grãos em consequência de
232 uma maior contribuição aquosa na sedimentação. (I) evidência da diminuição do espaço de
233 acumulação dos sedimentos eólicos nos depósitos de dunas subjacentes à Supersuperfície
234 Urucuia e sobreposto por paleossolos.

235

236 Nos sistemas eólicos secos, o nível freático e a franja capilar se localizam abaixo da
237 superfície deposicional, com constante disponibilidade de areia incoesa para o transporte pelo
238 vento. Correspondem a lençóis arenosos secos e ergs nas porções transicionais e distais,
239 respectivamente. Nesse cenário, a escassez de água favorece a incoesão dos sedimentos, sendo
240 áreas favoráveis à erosão e redeposição, sem erosão completa dos depósitos eólicos (Kocurek e
241 Havholm, 1993).

242 Nas configurações de topo, o nível freático e a franja de capilaridade aproximam-se da
243 superfície deposicional no limiar de uma mudança climática (Spigolon e Alvarenga, 2002). O
244 resultado é uma perda de espaço de acumulação, menores espessuras dos sets de estratificação
245 cruzada e deformação dos depósitos de fluxo de grãos devido a uma maior contribuição aquosa
246 na sedimentação (Fig. 4B,D,E,H,I). Essas características determinam os fatores de estabilização
247 dos sistemas eólicos (Fig. 3C) (Kocurek e Havholm, 1993; Havholm et al., 1993; Havholm e
248 Kocurek, 1994).

249

250 3.1.1. Associação de litofácies e elementos arquiteturais

251

252 A partir da descrição sistemática de afloramentos foram identificadas as diferentes
253 associações de fácies segundo Miall (1977). A Formação Posse contém uma típica sucessão de
254 fácies eólicas depositados em zibars, lençóis arenosos secos (Fig. 4C,D) e campos de dunas (i.e.,
255 dunas e interdunas secas) (Fig. 4F), comuns nas porções orientais (i.e., transicional) e ocidentais
256 (i.e., distal) da bacia, respectivamente (Tabela 1; Fig. 3A,B,C).

257

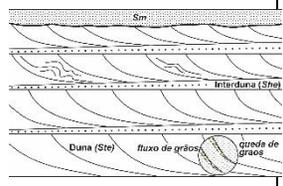
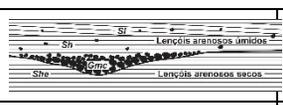
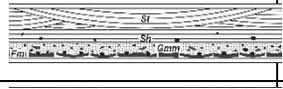
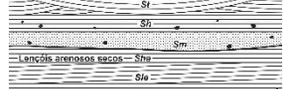
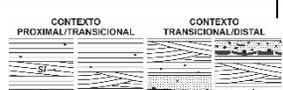
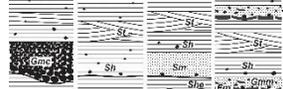
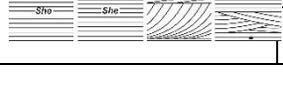
258

259

260

261

262 Tabela 1. Características das litofácies utilizadas na interpretação do paleoambiente deposicional do Grupo Urucua

Código de Fácies	Litofácies	Estruturas sedimentares	Processos sedimentares	Transporte	Interpretação	Limites	Geometria
SISTEMA EÓLICO SECO							
Ste	Arenitos finos a médios, muito bem selecionados	Estratificação cruzada de grande porte e estruturas deformacionais de pequeno porte	Fluxo e queda de grãos	Eólico e subaquoso de forma restrita, regime de fluxo inferior	Dunas eólicas (Draas). Diminuição das espessuras dos sets de estratificação cruzada nas configurações de topo. Perda de espaço de acumulação	No topo e na base por depósitos interdunas (She). No contato superior por fluxo de detritos arenosos (Sm). Superfícies de reativação	 <p>Formato tabular contínuo limitado no topo e na base por depósitos interdunas secas. Contexto distal</p>
She	Arenitos finos a médios, muito bem selecionados	Laminação horizontal	Fluxo de grãos	Eólico, regime de fluxo inferior	Interdunas secas. Depressões interdunas. Superfície de truncamento de 1ª ordem	Na base por depósitos de dunas (Ste)	 <p>Contexto transicional</p>
Sle, She	Arenitos finos a grossos, bem selecionados	Estratificação horizontal e cruzada de baixo ângulo. Raras estruturas de adesão. Estruturas de corte e preenchimento pontuais	Laminação de grãos, bimodalidade	Eólico, regime de fluxo transicional	Lençóis arenosos secos e Zibars dispostos em amplas planícies arenosas nas margens dos depósitos de campos de dunas (Ste e She)	No topo por uma superfície erosiva. Depósitos de fluxo de detritos (Sm), fácies canalizadas (Gmc). Por vezes, ocorrem depósitos subaquosos intercalados	 <p>Tabular e lateralmente extenso. Contexto transicional e distal de forma restrita</p>
SISTEMA FLUVIAL ENTRELAÇADO							
Gmc	Conglomerado clasto suportado, muito mal selecionado	Estrutura maciça. Imbricação de seixos.	Fluxo de detritos, alta coesão interna	Subaquoso, regime de fluxo superior	Sedimentação em alta energia de canais efêmeros rasos (wadis). Retrabalhamento das litofácies subjacentes (Sle e She)	Na base por lençóis arenosos secos e zibars (She e Sle). No topo por lençóis arenosos úmidos (Sh e Sl).	 <p>Em cunha. Base erosiva e côncava para cima. Contexto proximal a transicional</p>
Gmm	Conglomerado matriz suportado, mal selecionado	Estrutura maciça	Fluxo de detritos viscoso	Subaquoso, regime de fluxo superior	Descarga rápida em lençóis arenosos úmidos.	Na base por depósitos finos de planície de inundação (Fm) e no topo pela litofácies Sh. Retrabalhamento da fácies Fm	 <p>Tabular contínuo. Contexto transicional a distal</p>
Sm	Arenitos finos a médios com grânulos e seixos esparsos, moderadamente selecionado.	Estrutura maciça. Paleossolos. Ichnofósseis.	Fluxo de detritos	Subaquoso. Regime de fluxo superior	Descarga de sedimentos em inundações efêmeras de alta energia	Na base por depósitos eólicos (Ste, She, Sle) e no topo pela litofácies Sh. Retrabalhamento os arenitos eólicos	 <p>Tabular e lateralmente extenso. Base erosiva. Contexto transicional a distal</p>
Sh, Sl	Arenitos finos a grossos com seixos e grânulos esparsos, moderadamente selecionados	Laminação horizontal e estratificação cruzada de pequeno porte. Antidunas	Lineação de partição	Subaquoso. Regime de fluxo transicional a superior	Descarga de sedimentos em correntes tracionais. Preenchimento de suaves depressões. Lençóis arenosos úmidos	Na base por depósitos de fluxos gravitacionais (Sm, Gmm e Gmc) e no topo pela litofácies Sh.	 <p>Tabular. Contexto proximal a distal</p>
St	Arenitos finos a médios, bem selecionados	Estratificação cruzada acanalada de pequeno porte	Migração de dunas subaquosas de crista sinuosa	Subaquoso. Regime de fluxo inferior	Depósitos de dunas subaquáticas (formas de leito tridimensionais) em canais fluviais entrelaçados de alta energia.	Na base pelas litofácies Sh e Sl e no topo Sm, Gmm e Fm.	 <p>Lenticular. Contexto transicional a distal</p>
Fm	Siltitos argilosos	Gretas de contração	Decantação lenta da lama em suspensão.	Subaquoso. Regime de fluxo inferior	Deposição em amplas e rasas planícies de inundação e lagos efêmeros. Exposição subaérea	Na base pelas litofácies St e no topo por Gmm, Sh ou Sl.	 <p>Lenticular, contexto distal e raramente transicional</p>

263 3.1.1.1. Lençóis arenosos secos

264

265 É representado por depósitos tabulares de até 25 m de espessura. São quartzito-arenitos
266 amarelos, brancos e por vezes avermelhados, finos a grossos, bimodais e moderadamente
267 selecionados. Caracterizam-se pela predominância de laminação horizontal (She) e cruzada de
268 baixo ângulo (Sle), depositados em amplas planícies arenosas pelos ventos (Fig. 3A,B,C; Fig.
269 4C,D). Por vezes, grânulos e seixos estão dispostos na base dos foresets. Pontualmente ocorrem
270 estruturas de corte e preenchimento (<0,3 m) produzidos pelo retrabalhamento fluvial.
271 Ocasionalmente intercalam em alto ângulo os estratos cruzados dos depósitos de dunas eólicas.
272 Estruturas de adesão são raras e localmente observadas (Tabela 1). Dentre os fatores que
273 incentivam a formação dos lençóis arenosos (Kocurek e Nielson, 1986) estão, provavelmente, o
274 nível freático elevado e inundações periódicas por flutuações de descarga, ou uma combinação de
275 ambos. Esses depósitos geralmente se localizam na periferia dos campos de dunas (Fig. 3A).

276

277 3.1.1.1.1. Dunas e interdunas secas

278

279 É constituído por arenitos amarelo, rosa e avermelhados, muito finos, finos a médios, bem
280 selecionados, bimodais e maduros textural e mineralogicamente. Possuem estratos cruzados de
281 grande porte (Ste), com espessura dos cosets de até 20 m e sets individuais variáveis de 2 a 8 m,
282 geralmente truncados por planos horizontais, representados por estratificações horizontais (She) e
283 de baixo ângulo (Sle). Em geral, são do tipo tangencial, com mergulhos abruptos no topo (i.e, até
284 35°) e suaves na base (Fig. 4F). Normalmente são empacotados em camadas concordantes e
285 separadas por superfícies de reativação (Fig. 4E). Os foresets são compostos por depósitos de

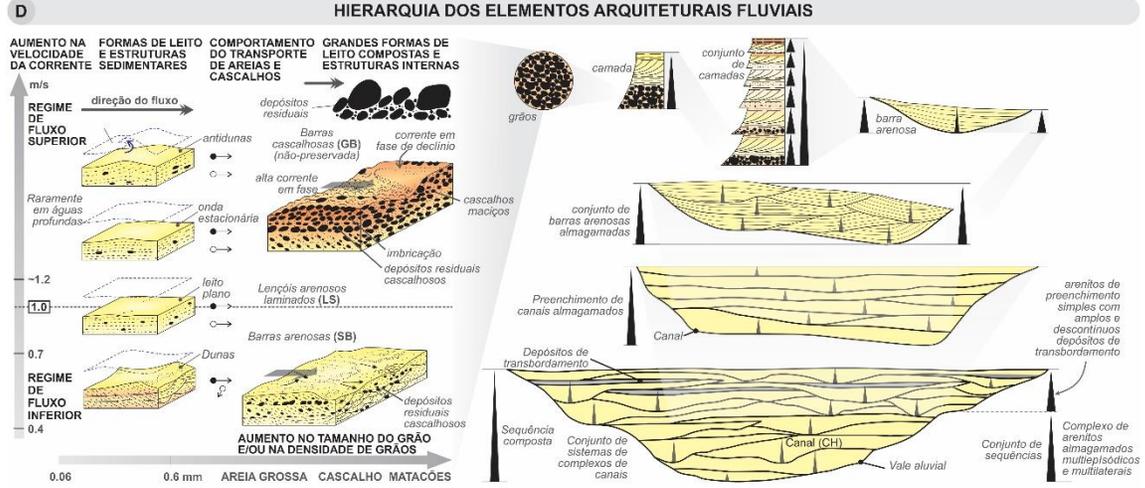
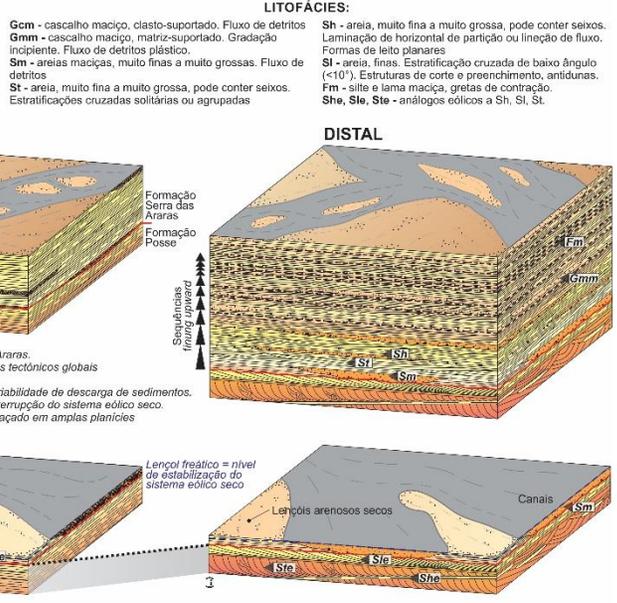
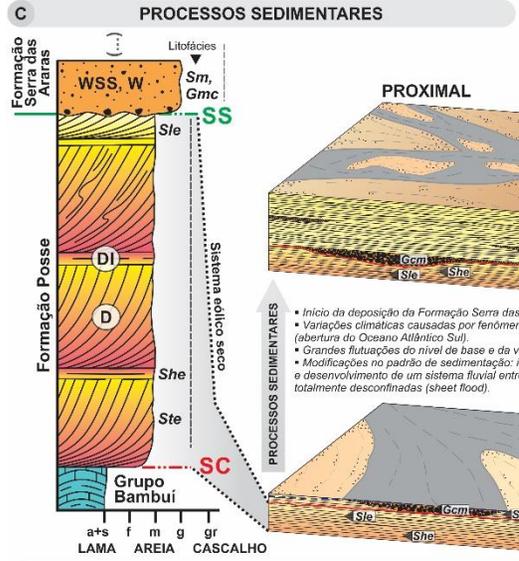
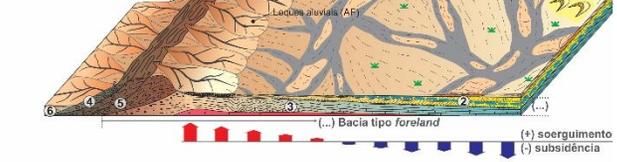
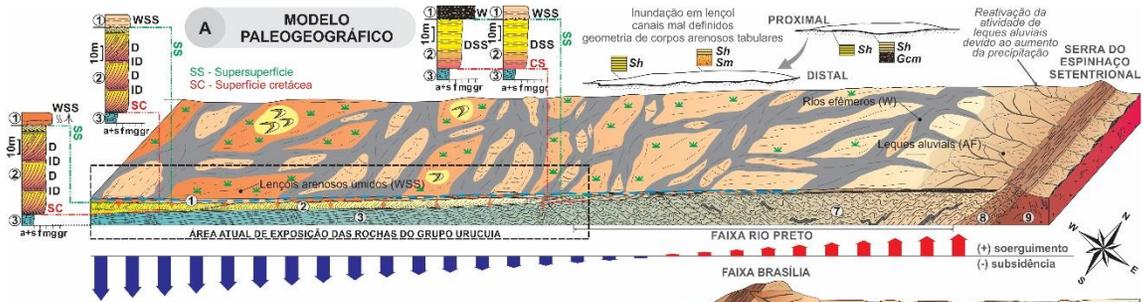
286 fluxo e queda de grãos. Os primeiros são lenticulares em corte transversal ao mergulho dos
287 estratos cruzados e em cunha em corte paralelo, apresentam espessuras milimétricas, arcabouço
288 aberto e gradação inversa devido a processos de pressão dispersiva. Já os últimos apresentam
289 lâminas contínuas e tabulares, arcabouço coeso e espessuras de até 2 cm. São depositados por
290 suspensão e originados pelas flutuações erráticas e instantâneas da velocidade do fluxo (Fig. 4G).
291 Nas configurações de topo, ocorrem estruturas deformacionais de pequeno porte na face frontal
292 das estratificações cruzadas em consequência de uma maior contribuição aquosa na sedimentação
293 (Fig. 4H). As associações de fácies representam feições diagnósticas de um ambiente desértico de
294 campo de dunas (i.e., um grande erg que se estendia até os limites com a Bacia do Parnaíba)
295 composto de sucessões de dunas e interdunas secas (Figs. 1, 2 e 3A,B,D). As dunas, de acordo
296 com a concentração estatística de dados de paleocorrentes, são consideradas como do tipo
297 barcana e localmente barcanóides (Campos e Dardenne, 1994, 1997a, 1999; Spigolon e
298 Alvarenga, 2002).

299

300 3.2. Sistema fluvial entrelaçado

301

302 A relação da sedimentação do Grupo Urucuia com os estágios de deriva continental (i.e.,
303 ruptura Gonduânica) intensifica-se com a entrada de umidade para o continente (i.e., monções
304 chuvosas) e a interrupção do sistema eólico seco (Spigolon e Alvarenga, 2002). O resultado foi a
305 modificação no padrão de sedimentação, caracterizado por uma superfície erosiva e deposição da
306 unidade superior (i.e., Formação Serra das Araras) disposto em um sistema de rios entrelaçados
307 desenvolvidos em amplas planícies, com alternância de processos subaquosos e retrabalhamento
308 por processos eólicos num clima semi-árido (Fig. 5A,B,C) (Campos e Dardenne, 1999).



CONVENÇÕES		CONVENÇÕES GEOLÓGICAS	
→	Nível freático	MESOZOICO	NEOPROTEROZOICO
SS	Bioturbação	Cretáceo Superior	GRUPO BAMBUI
▲	Marca de raízes	GRUPO URUCUIA	1 Formação Serra das Araras: arenitos, siltitos e conglomerados.
▲	Vegetação esparsa próximo às fontes de umidade	2 Formação Posse: arenitos com estratificações cruzadas de grande porte e laminação horizontal.	3 Formação Serra das Araras: arenitos, siltitos e conglomerados.
▲	Magnitude da infiltração mecânica de argila		4 Formação Posse: arenitos com estratificações cruzadas de grande porte e laminação horizontal.
			5 GRUPO CANASTRA: filitos e quartzitos.
			6 GRUPO ARAXÁ: xistos e quartzitos.
			7 GRUPO RIO PRETO: xistos, filitos grafitosos, sericiticos e granadiferos intercalados com metarenitos, metaconglomerados e quartzites subordinados.
			8 GRUPO SANTO ONOFRE: quartzito, quartzitos micáceos intercalados com filitos sericiticos e granadiferos.
			9 GRANITÓIDES: associação de rochas plutônicas de composição tonalítica.

310 Fig. 5. Evolução paleogeográfica esquemática da sedimentação da Formação Serra das Araras
311 (A), os principais eventos deposicionais (modificado de Stokes, 1968) (B), os processos
312 sedimentares atuantes (C) e hierarquia dos elementos arquiteturais (D) (adaptado de Einsele,
313 1992).

314

315 A maior contribuição aquosa é evidenciada por inundações efêmeras com variações
316 periódicas do nível de base. O escoamento é constituído por uma rede de canais rasos, mal
317 definidos e desconfinados. A base da sucessão representa complexos de corpos arenosos em
318 lençóis amalgamados multiepisódicos e multilaterais. Em direção ao topo dispõe-se como
319 depósitos arenosos de preenchimento simples intercalados com restritos depósitos de
320 transbordamento (Fig. 5D).

321

322 3.2.1. Associação de litofácies e elementos arquiteturais

323

324 A Formação Serra das Araras é constituída por ciclos de sedimentação superpostos
325 composto por sequências fining upward de conglomerados, arenitos e argilitos de até 3 m
326 (Barbosa et al., 2014). Os elementos arquiteturais são representados por canais, corpos arenosos
327 dispostos em lençóis de areia laminados, lentes, cunhas de formas de leito arenosas formados
328 provavelmente por rápidos episódios de inundação e grande flutuabilidade de descarga e
329 depósitos finos de planície de inundação (Tabela 1).

330

331 3.2.1.1. Canais

332

333 Os canais geralmente possuem bases côncavas e erosionais. É o único elemento
334 caracterizado por processos destrutivos e responsáveis pela erosão parcial e retrabalhamento das
335 formas de leito nas configurações de topo da sucessão. O preenchimento sedimentar é realizado
336 de forma multiepisódica, com cada episódio individual limitado por uma superfície erosiva.

337 Três litofácies são observadas: (i) Gcm (conglomerado maciço clasto-suportado), são
338 avermelhados e compostos de grânulos a calhaus de quartzo, silixitos, quartzitos e arenitos da
339 própria sequência, subangulares a subarredondados, numa matriz areno-argilosa. Apresentam
340 base erosiva e espessuras de até 2 m (Fig. 6A). Ocorrem predominantemente nas porções
341 proximais a transicionais. Representam a sedimentação subaquosa em regime de fluxo superior
342 de alta energia de canais efêmeros rasos (uedes); (ii) Gmm (conglomerado maciço matriz-
343 suportado), são ocre a amarelados, com seixos e grânulos esparsos, subangulosos a
344 subarredondados, numa matriz arenosa a areno-argilosa. Ocasionalmente é verificado
345 fragmentos de siltitos avermelhados como resultado do retrabalhamento da fácies Fm. Afloram
346 predominantemente em configurações transicionais a distais. Constitui uma camada delgada de
347 até 20 cm transportada por fluxo de detritos e; (iii) Sm (arenitos maciços), são ocre a rosados,
348 finos a médios, subangulosos a subarredondados com fragmentos líticos (de até 1 cm) esparsos e
349 imersos em uma matriz areno-argilosa. Possui base erosiva e espessuras de até 1 m (Fig. 6C,D,E).
350 Situam-se nos contextos transicionais a distais. Refletem provavelmente o retrabalhamento os
351 arenitos eólicos em inundações efêmeras e condições de regime de fluxo superior de alta energia.

352

353 3.2.1.2. Lençóis de areia laminados

354

355 São corpos com geometria em lençol formado por complexos amalgamados de estratos
356 plano paralelos (Sh) ou de baixo ângulo (Sl) depositados em regime de fluxo superior em
357 contexto de rápida descarga. Apresenta grânulos e seixos dispersos. A espessura individual varia
358 de 40 cm até 2 m. Dispõe-se de forma tabular e lateralmente extensa nas configurações proximais
359 a distais (Fig. 6A).

360

361 1.1.1.1. Formas de leito arenosas

362

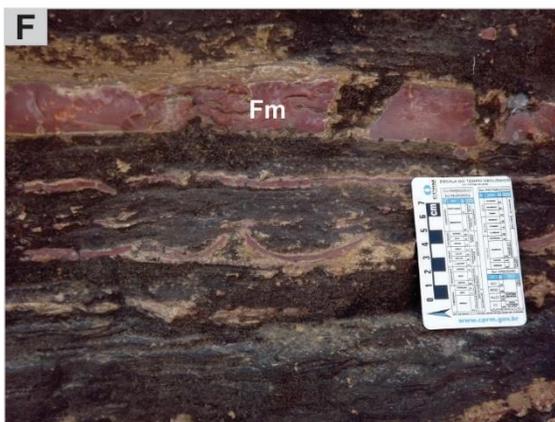
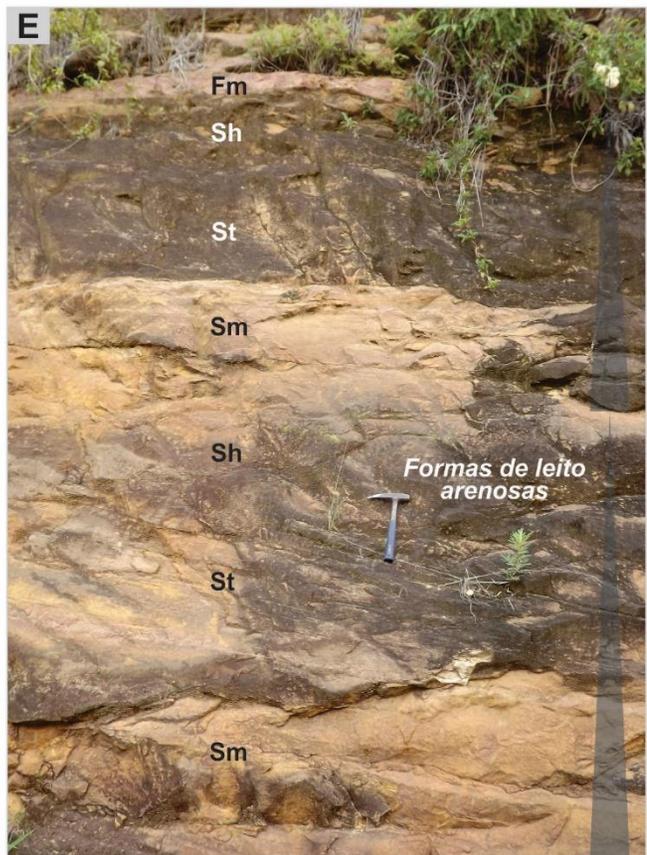
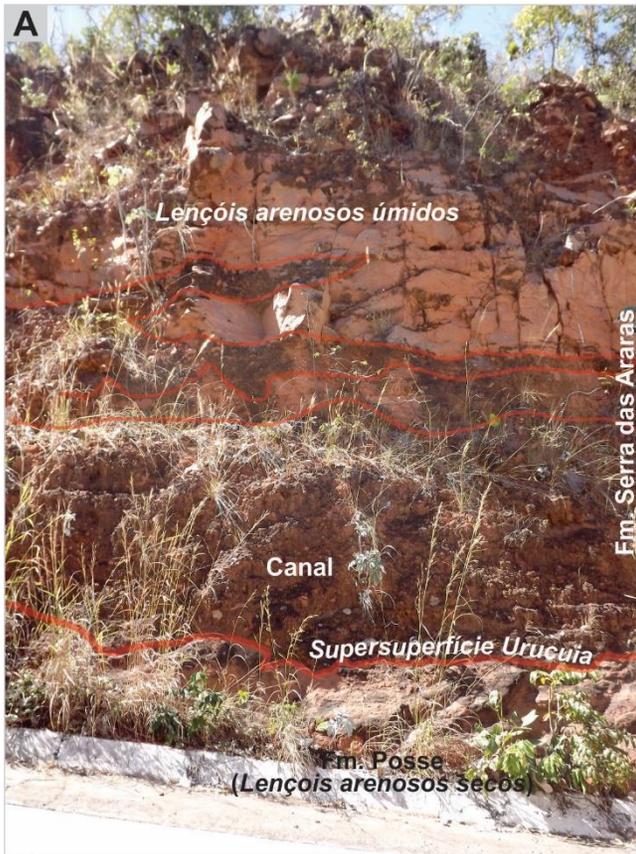
363 É comum no contexto transicional a distal e são representados pela combinação de dunas
364 (St), ondas de areia, barras transversais e linguóides e camada plana em regime de fluxo superior
365 (Sh) dispostos em sequências fining upward. Os ciclos possuem espessura de 1 a 3 m nos quais o
366 empilhamento das diferentes formas de leito indica alterações sucessivas no regime de fluxo. São
367 desenvolvidos em amplos canais desconfiados e mostram uma transição vertical de uma base
368 erosiva, para Sh, St e Fm, respectivamente (Fig. 6B,C,E).

369

370 1.1.1.2. Depósitos finos de planície de inundação

371

372 São siltitos argilosos avermelhados e maciços (Fm). Tipicamente ocorrem como camadas
373 delgadas (até 15 cm), segmentadas e lateralmente descontínuas nas configurações distais. São
374 frequentemente retrabalhados pela litofácies Gmm. A presença de gretas de contração indica
375 exposições subaéreas (Fig. 6E,F). São depositados em regime de fluxo inferior de baixa energia
376 associado a um transporte em suspensão em planícies de inundação e lagos efêmeros.



378 Fig. 06. Litologia, estratigrafia e interpretação dos ambientes deposicionais do sistema fluvial
379 entrelaçado. (A) Depósitos de canais (CH) (litofácies Gmm) de base côncava e erosional, cujo
380 limite inferior é marcado pela Supersuperfície Urucuia e sobreposto por corpos com geometria
381 em lençol (litofácies Sl e Sh). (B) formas de leito arenosas (SB) em contexto proximal
382 representado por uma sucessão de litofácies de camada plana em regime de fluxo superior (Sh) e
383 dunas (St) dispostos em sequências fining upward. (C) Depósitos de fluxo de detritos arenosos
384 associados a base da Fm. Serra das Araras (litofácies Sm) sobreposto por SB. (D) Paleossolo com
385 icnofósseis (*Coprinisphaera* cf. *C. ecuadoriensis*). (E) Ciclos de sedimentação fluvial
386 desenvolvidos em formas de leito arenosas. (F) Siltitos argilosos avermelhados e maciços (Fm)
387 com evidências de exposição subaérea (gretas de contração).

388

389 1.2. Processos pós-deposicionais

390

391 A evolução diagenética do Grupo Urucuia é simplificada em virtude da incipiente história
392 de soterramento da bacia e da pequena espessura sedimentar associada. Os sedimentos foram
393 submetidos, de uma forma geral, aos seguintes processos eo a mesodiagenéticos: (i) precipitação
394 de óxidos de ferro; (ii) infiltração mecânica de argilas detríticas, (iii) bioturbação e (iv)
395 silicificação (Campos e Dardenne, 1997a, 1999).

396 Associado aos sedimentos eólicos da Formação Posse ocorre uma película de hematita ao
397 redor dos grãos de quartzo detrítico, os quais com o soterramento, estabilizam-se. São
398 responsáveis pela cor dos arenitos e no estabelecimento de uma sucessão de red beds. A ausência
399 dessa feição é interpretada como uma remobilização por soluções meteóricas posteriores
400 (Campos e Dardenne, 1999; Spigolon e Alvarenga, 2002).

401 A infiltração mecânica de argilas conduz a formação de uma pseudomatriz nos arenitos.
402 Nas configurações proximais é verificado uma maior magnitude desse processo diagenético (Fig.
403 4A) que era favorecido pelos seguintes fatores: (i) elevadas condições de porosidade e
404 permeabilidade dos depósitos associados ao sistema eólico seco (i.e, dunas, interdunas e lençóis
405 arenosos); (ii) a existência de uma zona vadosa profunda; (iii) um regime esporádico de
406 precipitação; (iv) boas condições de drenagem e; (v) uma alta carga de sedimentos argilosos no
407 depósito sobrejacente (i.e, litofácies Gcm e Sm) (Campos e Dardenne, 1999).

408 A transição do sistema eólico para o sistema fluvial entrelaçado envolveu importantes
409 mudanças climáticas com variações periódicas do nível de base, depósitos de fluxo de detritos
410 (litofácies Sm) e condições ambientais de estabilidade e não-deposição propícios ao
411 desenvolvimento de paleossolos (Pierini e Mizusaki, 2007) e icnofósseis (*Coprinisphaera cf. C.*
412 *ecuadoriensis*) (Sauer, 1955) (Fig. 6D).

413 A silicificação é notada em várias posições estratigráficas e em níveis tabulares (de até 8
414 m) extensos e descontínuos. Ocorre devido às condições ambientais pretéritas que possibilitavam
415 a dissolução da sílica na zona vadosa: (i) baixa precipitação pluviométrica; (ii) pequena
416 circulação das águas conatas; (iii) baixo pH (<4) e; (iv) temperaturas elevadas (>40°C). Já as
417 condições de precipitação na zona saturada eram resultado da saturação das águas em sílica e das
418 rápidas modificações do nível freático que proporcionava bruscas diminuições no Eh e
419 temperatura (Smale, 1973; Williams e Crerar, 1985; Williams et al., 1985; Campos e Dardenne,
420 1999).

421

422 1.3.Estratigrafia de sequências

423

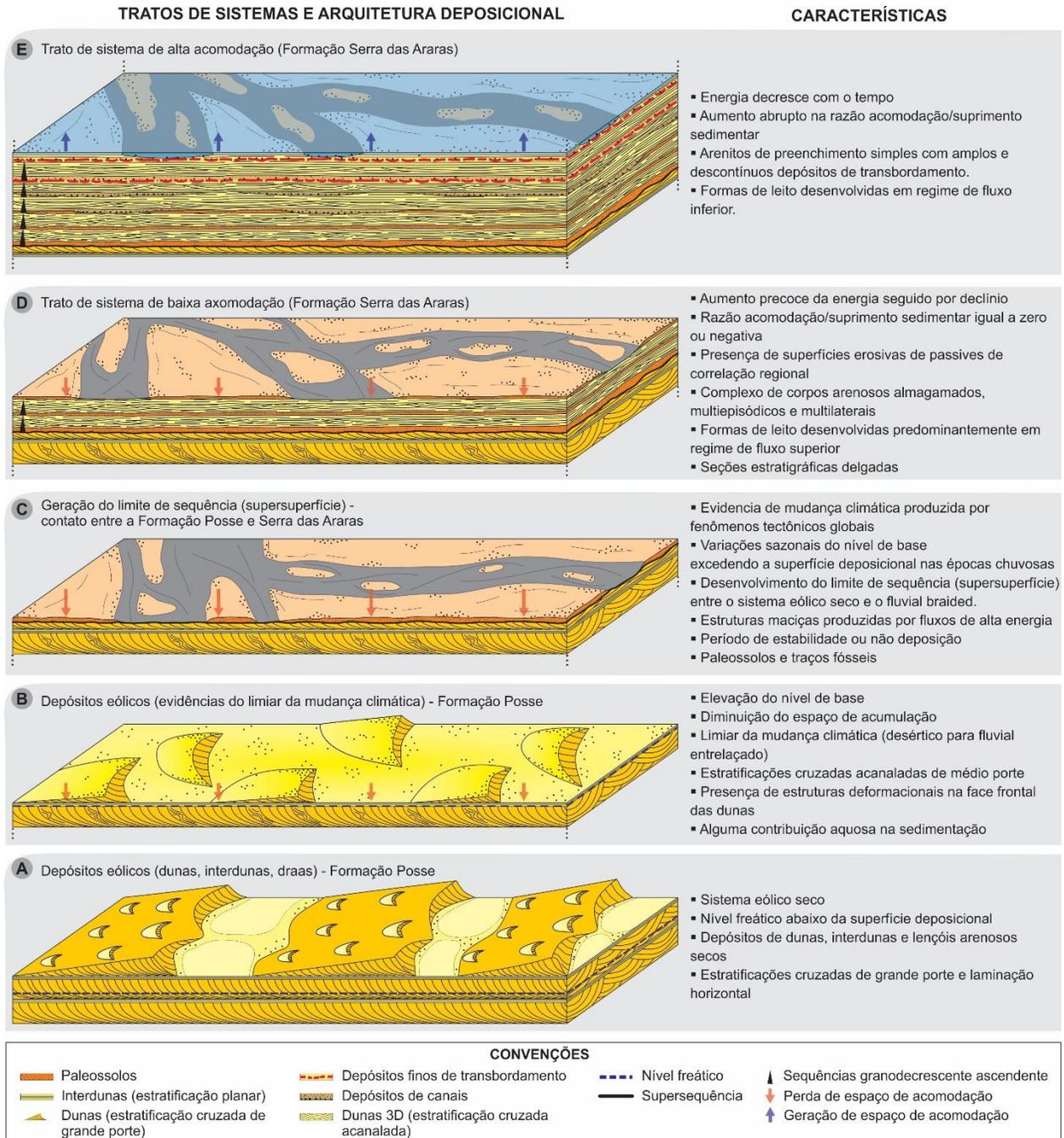
424 A Bacia Sanfranciscana abriga uma sequência continental neocretácea (e.g., Grupo
425 Urucuaia) que registra condições tectono-sedimentares e climáticas específicas. Nessa unidade foi
426 reconhecida associações de fácies eólica e fluvial, limitadas por discordâncias regionais que
427 registram variações abruptas no espaço de acomodação e aporte de sedimentos. Embora as
428 informações cronoestratigráficas sejam inexistentes para esse intervalo estratigráfico, as
429 superfícies discordantes e a arquitetura estratigráfica permitem relacioná-la como um produto da
430 evolução de um ciclo sedimentar de 3ª ordem, como resposta as modificações nas tensões
431 intraplaca (Cloething, 1988).

432 Nos sistemas eólicos secos, com o nível freático posicionado abaixo da superfície
433 deposicional, têm-se os lençóis arenosos e campos de dunas (Fig. 7A). Nas configurações de topo
434 da sucessão, a presença de estruturas deformacionais de pequeno porte na face frontal das dunas
435 sugere alguma contribuição aquosa na sedimentação (Fig. 7B). Nesse momento, modificações
436 gradativas no padrão de sedimentação no interior remoto continental estão relacionadas
437 provavelmente a variações climáticas provocados por fenômenos geotectônicos globais (i.e.,
438 abertura do oceano Atlântico Sul) (Sgarbi e Dardenne, 1996; Campos e Dardenne, 1999;
439 Spigolon e Alvarenga 2002).

440 A faciologia relativamente simples dos sistemas deposicionais eólicos torna pertinente
441 adotar as discontinuidades físicas e sua correlação com transformações globais consentâneo com
442 o modelo conceitual da estratigrafia de sequências (Talbot, 1985). Dessa forma, o limite entre o
443 sistema eólico seco (Formação Posse) e o sistema fluvial entrelaçado (Formação Serra das
444 Araras) representa uma supersuperfície (Spigolon e Alvarenga, 2002), como resultado de
445 interrupções e mudanças bruscas na deposição (Fig. 7C). Esta trunca os depósitos subjacentes

446 (i.e., dunas, draas e interdunas) e indica uma reestruturação tectônica e um controle alogênico da
 447 bacia.

448



449

450 Fig. 7. Modelo de evolução da arquitetura deposicional e dos tratos de sistemas do Grupo
451 Urucuaia. (A) depósitos eólicos, (B) limite da mudança climática e do padrão de sedimentação,
452 (C) geração do limite de sequência (supersuperfície), (D) trato de sistema de baixa acomodação e
453 (E) trato de sistema de alta acomodação.

454 As modificações nos padrões estratais dos depósitos possibilitam o reconhecimento dos
455 limites de sequências e das modificações nas taxas de geração de espaço de acomodação (Jervey,
456 1988; Muto e Steel, 2000; Catunenu, 2006; Huerta et al., 2011). Após o sistema eólico seco, a
457 bacia experimentou um balanço sedimentar neutro e o desenvolvimento de processos
458 pedogenéticos (i.e., paleossolos) sobre os depósitos eólicos. Nesse momento, a subsidência da
459 bacia e as flutuações do nível de base contribuíram com a preservação dos depósitos.

460 O sistema fluvial entrelaçado envolve ciclotemas fining-upward associados a oscilação
461 periódica do nível estratigráfico. Essas características definem ciclos de diminuição e aumento na
462 taxa de criação de espaço de acomodação, controlados pelos parâmetros clima, tectônica e
463 suprimento sedimentar (Blum e Törnqvist, 2000). A evolução de um trato de sistema de baixa
464 acomodação para um trato de sistema de alta acomodação é evidenciada pelas variações no
465 regime e carga de fluxo. As superfícies erosivas determinam o limite das sequências enquanto
466 que o limite dos tratos de sistemas interno à sequência é marcado por uma superfície de
467 expansão. A gênese das superfícies e dos tratos está associada a alterações na proporção entre a
468 acomodação (A) e o suprimento sedimentar (S) (Martinsen et al., 1999).

469 A origem do limite de sequência (i.e., base do sistema fluvial entrelaçado) está
470 relacionada a períodos de rebaixamento do nível estratigráfico, onde a razão A/S é zero ou
471 negativa. O resultado foi o desenvolvimento de superfícies erosivas passíveis de correlação
472 regional. Já quando a razão A/S é ligeiramente positiva, ocorre a retomada da sedimentação

473 fluvial caracterizada pelo trato de sistema de baixa acomodação dispostos em corpos arenosos de
474 canais amalgamados, multiepisódios e multilaterais (Fig. 7D). Nas configurações de topo, as
475 superfícies internas de expansão estão relacionadas a um aumento abrupto na razão A/S e na
476 mudança da arquitetura deposicional. Nesse contexto, ocorre o trato de sistema de alta
477 acomodação representados por depósitos arenosos de preenchimento simples com amplas e
478 descontínuas planícies de inundação (Fig. 7E). O rápido acréscimo na taxa de criação de espaço
479 de acomodação está vinculado a fatores tectônicos.

480 O desenvolvimento de sequências sedimentares similares às verificadas na Bacia
481 Sanfranciscana (e.g., Grupo Urucuia) ocorrem em depressões intracratônicas tipo sag na África
482 Central (e.g., Cuvette Congolaise ou Congo Basin). As unidades Grès Polymorphes Series
483 (Paleógeno) e Sables Ochres Series (Neógeno) são correlacionadas as Formações Posse e Serra
484 das Araras, formados por sedimentos eólicos e fluviais, respectivamente. Ambas áreas possuem,
485 provavelmente, uma evolução geotectônica e climática similar e diacrônica, como reflexo
486 intraplaca da fragmentação gonduânica (Chaves, 1991; Sgarbi, 2000; Giresse, 2005; Kadima et
487 al., 2011). Digno de nota, essas sequências atestam a possibilidade de ocorrência de sistemas
488 aquíferos expressivos no interior remoto continental.

489

490 1.4. A concepção do sistema aquífero

491

492 Com o término da sedimentação do Grupo Urucuia, a atual configuração do relevo (Fig.
493 8C), dispostos na forma de mesetas, foi estabelecido após o Paleógeno, com desenvolvimento de
494 depósitos de canga ferruginosa e posterior regressão das escarpas de erosão dissecados por vales
495 profundos durante o Neógeno (King, 1956). Os processos deposicionais, diagenéticos e

496 modeladores da paisagem, em conjunto, contribuíram com o estabelecimento do Sistema
497 Aquífero Urucuia (SAU) (Fig. 8A,B).

498 O SAU (Gaspar 2006; Gaspar e Campos, 2007) constitui uma associação de unidades
499 aquíferas que ocorrem no domínio da sequência das rochas siliciclásticas do Grupo Urucuia. É
500 um dos maiores aquíferos da América do Sul, com reservas hídricas permanentes e reguladoras
501 estimadas em 3.770 km³ e 30,78 km³/ano, respectivamente (Gaspar e Campos, 2007). Esse
502 sistema representa um manancial hídrico de extensão regional e estrategicamente importante pois
503 compreende a quase totalidade do escoamento de base dos rios (i.e., fácies Na-Ca-Cl a Na-Cl) em
504 sua área de ocorrência, além de contribuir com a recarga do sistema cárstico-fissural das regiões
505 limítrofes. Nesse sistema, a recarga da água subterrânea ocorre principalmente pela infiltração
506 direta da água da chuva (i.e., fácies Ca-Na-Mg-Cl-HCO₃) (Fig. 8B,C).

507 É uma bacia hidrogeológica assimétrica que apresenta diferentes comportamentos
508 hidrogeológicos ao longo de sua área (i.e. cerca de 120.000 km² em área) (Tabela 2). Essas
509 variações ocorrem em função da geometria, do posicionamento geográfico/geomorfológico, da
510 presença de níveis silicificados e fraturados e das variações nos parâmetros hidrodinâmicos e
511 hidrogeoquímicos (Fig. 8A,B,C,D). De uma maneira geral, o SAU apresenta águas com baixos
512 valores de sólidos totais dissolvidos, neutras a relativamente ácidas e uma evolução
513 hidrogeoquímica sutil.

514

515

516 Tabela 2. Principais características hidrogeológicas dos subsistemas aquíferos.

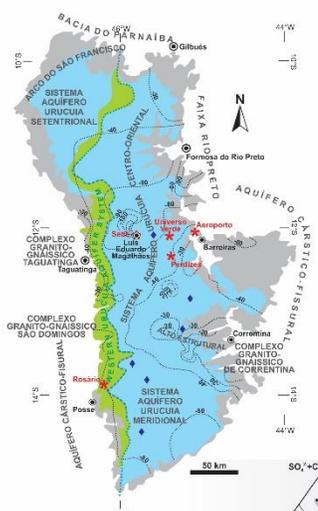
Tipo de aquífero	Localização	Espessura [m]	Vazão [m³/h]	Nível estático/ potenciométrico [m]	Capacidade específica (Q/s) [m³/h/m]	Parâmetros hidrodinâmicos			Raio de influência [m]
						Transmissividade (T) [m²/s]	Condutividade hidráulica (K) [m/s]	Coefficientes de armazenamento (S), Porosidade efetiva (S _v)	
Não-confinado	Onipresente	Variável (até 140 em direção às regiões ocidentais)	Variável até 30	Variável entre 20 e 80. Com uma média de 40	Até 3	10 ² a 10 ⁵	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁷	10 ⁻²	Até 300
Confinado	Restrito a região centro-oriental	Acima de 200	Acima de 100 (pode alcançar até 600)	Variável entre 2 a 60. Com uma média de 20	Acima de 8	10 ² a 10 ⁻³	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	10 ⁻³ a 10 ⁻⁵	Acima de 1.500
Não-confinado com níveis potenciométricos profundos	Restrito ao extremo ocidental. Localiza-se a oeste do divisor do fluxo subterrâneo de direção aproximada N-S	Acima de 200	Variável até 90	Variável. Geralmente acima de 100 (pode chegar até 200)	Alto. Entre 8,0 e 15,0	10 ² a 10 ⁻³	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	10 ⁻²	Até 450

continuação...

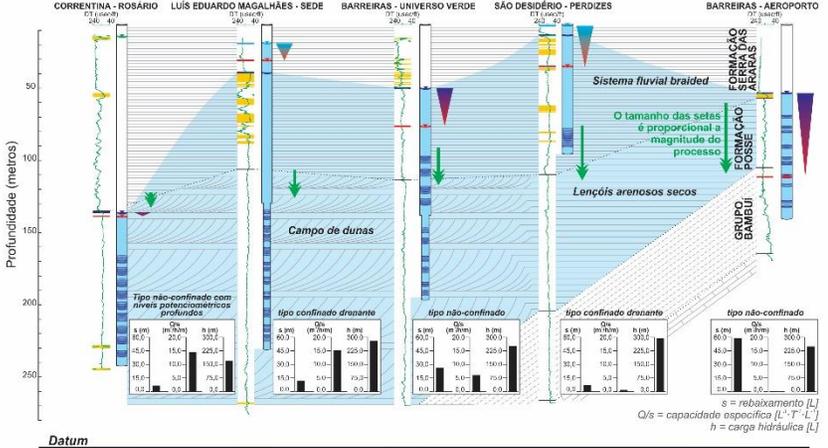
Hidroquímica	Sistema de fluxo da água subterrânea	Mecanismo de liberação da água	Limites hidrogeológicos	Recarga	Descarga	Potencial hidrogeológico	Usos
Evolução de fácies Ca-Na-HCO ₃ -Cl, Na-Cl-HCO ₃ para Na-Cl. Composição similar à da água meteórica de recarga. O movimento das águas subterrâneas é ativo com muito baixo TDS e pH ácido. A água é enriquecida com o HCO ₃ ao longo do trajeto na zona vadosa, derivada da dissociação de ácido carbônico	Local	Drenagem gravitativa dos poros	Inferior, arenitos silicificados e fraturados nas regiões centro-ocidental e a superfície cretácea nas porções setentrionais e meridionais e extremos ocidental e oriental.	Infiltração direta da água da chuva. Drenança ascendente do aquífero inferior na região centro-ocidental	Fluxo de base dos rios em sua área de ocorrência. Nascentes nas escarpas do limite físico oriental	Baixo a médio	Abastecimento doméstico e na aplicação e diluição de pesticidas em culturas irrigadas
Circulação da água menos ativa. Evolução de fácies Na-HCO ₃ para Na-Cl	Intermediário a regional	Compactação do aquífero e expansão da água	Superior, arenitos silicificados e fraturados. Inferior, superfície cretácea.	Infiltração direta da água da chuva nas porções ocidentais do SAU	Drenança para o aquífero livre sobrejacente.	Alto	Irrigação
As condições de descarga ocorrem sob altos gradientes hidráulicos, com uma rápida evolução de fácies Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl para Na-Cl	Local	Drenagem gravitativa dos poros	Inferior, superfície cretácea	No extremo ocidental por infiltração direta da água da chuva	Nascentes nas escarpas do limite físico ocidental	Alto	Abastecimento doméstico e na aplicação e diluição de pesticidas em culturas irrigadas

517

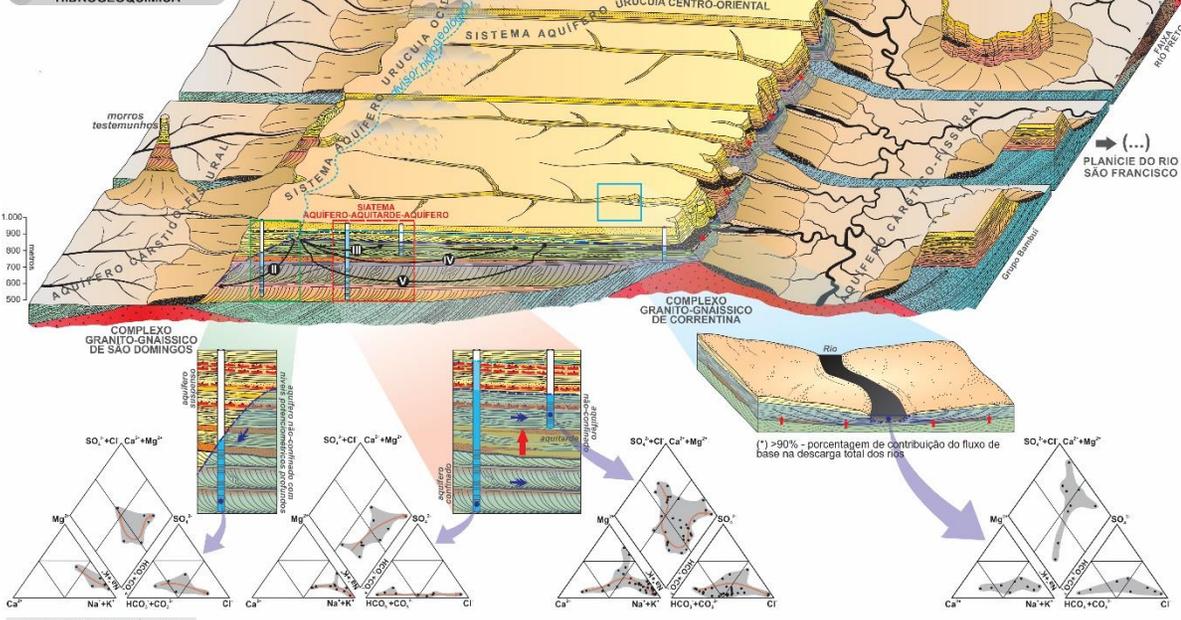
A MAPA DE DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS



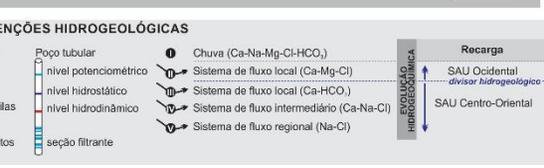
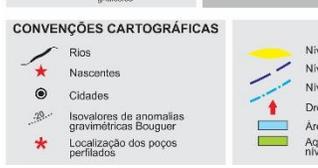
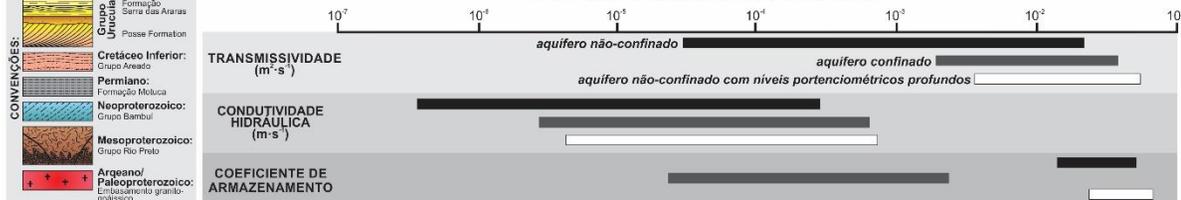
B MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL



C EVOLUÇÃO HIDROGEOQUÍMICA



D PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SISTEMA AQUÍFERO



519 Fig. 8. A concepção do sistema aquífero. (A) Mapa de domínios hidrogeológicos. (B) Modelo
520 hidrogeológico conceitual ilustrando que a importância da relação entre a posição dos níveis
521 silicificados e à da superfície freática regional na configuração de um sistema aquífero-aquitarde-
522 aquífero. (C) Relevo atual, sistemas de fluxo e a evolução hidrogeoquímica das águas. (D)
523 Propriedades hidráulicas dos subsistemas aquíferos

524

525 O SAU Centro-Oriental apresenta espessuras maiores que 300 metros e dispõe-se de
526 forma contínua (Fig. 8A). Nesse contexto, são observados dois tipos de aquíferos: o inferior, do
527 tipo confinado, em sistema de fluxo regional, segundo uma evolução de fácies Na-HCO₃ para
528 Na-Cl (Fig. 8C). Os parâmetros hidrodinâmicos indicam valores da ordem de 10⁻² a 10⁻³ m²/s, 10⁻⁴
529 a 10⁻⁶ m/s e 10⁻³ a 10⁻⁵ para a transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e coeficiente
530 de armazenamento (S), respectivamente (Fig. 8D). Em geral, apresentam altas capacidades
531 específicas (i.e., superiores a 15,0 m³/h/m) sendo utilizado principalmente para irrigação (Gaspar
532 e Campos, 2007; Barbosa et al., 2014) (Tabela 2). Já o superior, do tipo não-confinado, ocorre em
533 sistemas de fluxo local a intermediário com evolução de fácies Ca-Na-HCO₃-Cl, Na-Cl-HCO₃
534 para Na-Cl (Fig. 8C). Apresenta T variando de 10⁻² a 10⁻⁵ m²/s, K entre 10⁻⁴ a 10⁻⁷ m/s e S da
535 ordem de 10⁻² (Fig. 8D). Possui potencial hidrogeológico baixo a médio (i.e., capacidades
536 específicas menores que 3,0 m³/h/m) sendo utilizado predominantemente para abastecimento
537 doméstico e como insumo na diluição e aplicação de agrotóxicos nas lavouras (Gaspar e Campos,
538 2007; Barbosa et al., 2014) (Tabela 2). Esses subtipos representam em conjunto um sistema
539 aquífero-aquitarde-aquífero (Barbosa et al., 2014). Nessa configuração, os rebaixamentos
540 produzidos, após os ensaios de bombeamento dos poços, diminuem progressivamente em direção
541 à porção centro-ocidental do SAU, aliado a um aumento da capacidade específica dos poços, da

542 espessura saturada e da potencialidade hidrogeológica (Fig. 8B). Os níveis de arenitos
543 silicificados e fraturados têm a função de unidade de confinamento e, provavelmente, possibilita
544 uma drenança vertical ascendente entre os subsistemas aquíferos, devido as diferentes cargas
545 hidráulicas existentes (Fig. 8B).

546 Já o SAU Setentrional e Meridional ocorre de forma descontínua e segmentada. Essas
547 regiões constituem-se de aquíferos livres com espessura média de 100 metros e baixo potencial
548 hidrogeológico (i.e., capacidades específicas de até 5,0 m³/h/m). Já no SAU Ocidental verifica-se
549 a presença de um eixo divisor do fluxo subterrâneo de direção aproximada N-S. Nesse contexto, a
550 superfície potenciométrica apresenta um aumento progressivo na profundidade (Fig. 8A,B) que
551 resulta em aquíferos livres com níveis potenciométricos profundos (i.e., superiores a 100 metros)
552 (Fig. 8A,B,C) (Gaspar e Campos, 2007). Possui valores de T variando de 10⁻² a 10⁻³ m²/s, K entre
553 10⁻⁴ a 10⁻⁶ m/s e S da ordem de 10⁻² (Fig. 8D). Sua descarga sob elevados gradientes hidráulicos
554 determina um rápido sistema de fluxo com evolução de fácies Na-Mg-Ca-HCO₃-Cl para Na-Cl
555 (Tabela 2; Fig. 8C).

556 Dessa forma, foram processos importantes na definição do SAU: (i) a gênese e a evolução
557 paleogeográfica da bacia, com soerguimento e erosão generalizada nas bordas e um maior espaço
558 de acomodação no centro. Esse processo controla a geometria e a espessura sedimentar; (ii) as
559 variações nos regimes de fluxo e no padrão de sedimentação proporciona modificações nos
560 parâmetros hidrodinâmicos (TKS); (iii) os processos diagenéticos atuantes, especialmente a
561 intensa e persistente cimentação por sílica, que controla a ocorrência de subtipos de aquíferos e;
562 (iv) os processos de denudação que resultaram na conformação atual do relevo.

563

564 2. Conclusões

565

566 A unidade litoestratigráfica neocretácea da Bacia Sanfranciscana representada pelo Grupo
567 Uruçuaia contém nove litofácies que estão agrupados em seis associações de fácies relacionados a
568 lençóis arenosos secos e campos de dunas em sistemas eólicos secos e canais, lençóis de areia
569 laminados, formas de leito arenosas e depósitos finos de planície inundaçãõ em sistemas fluviais
570 entrelaçados. Uma interpretação das sequências estratigráficas foi proposta com base na
571 hierarquia relativa das superfícies regionais. Essas superfícies marcam exposições subaéreas
572 significativas ou modificações no ambiente deposicional e limitam cinco sequências compostas.
573 Os tratos de sistema de baixa e alta acomodação são reconhecidos nas sequências de alta
574 frequência e substituem os tratos de sistemas tradicionais relativos as mudanças no nível do mar
575 eustático. Nesse contexto, os eventos tectônicos atuantes na bacia tiveram um importante papel
576 na sedimentação, tanto na geração de espaço de acomodação como no suprimento sedimentar.

577 Um modelo de deposição com base na interpretação estratigráfica foi derivado para
578 explicar a evolução neocretácea da Bacia Sanfranciscana. A sequência mais antiga, relacionada a
579 Formação Posse, corresponde a sistemas de leques aluviais com remanescentes atuais de lençóis
580 arenosos secos e campos de dunas. Essas sequências foram depositadas sobre depressões
581 originadas após a mudança da fase rifte para margem passiva com inversão do campo de tensão
582 no interior remoto. Já a mais nova representa a primeira deposição generalizada na área e
583 compreende estratos depositados em amplas planícies fluviais entrelaçados que drenavam a partir
584 de orógenos reciclados em fase de denudação (i.e., Serra do Espinhaço Setentrional) no limite
585 oriental da bacia.

586 As sequências sedimentares desenvolvidas, com base na razão entre espaço de
587 acomodação e suprimento sedimentar, são segmentadas por aquitardes representados por arenitos

588 silicificados e originados por processos diagenéticos. A presença de altos gravimétricos no
589 substrato da bacia controla a geometria do sistema aquífero. Os processos de denudação atuantes
590 após o Paleógeno resultaram no desenvolvimento de aplainamentos desenvolvidos em
591 compartimentos intermontanos e de escarpas de regressão. Nas configurações meridionais e
592 setentrionais esse processo foi mais efetivo, resultando em um sistema descontínuo, de pequena
593 espessura (i.e., menores que 100 metros) e formado por aquíferos livres com baixo potencial
594 hidrogeológico. A região centro-oriental compreende o depocentro da Sub-bacia Urucua, onde
595 os sedimentos possuem maiores espessuras (i.e., acima de 350 metros). Em termos
596 hidrogeológicos apresenta uma configuração do tipo aquífero-aquitarde-aquífero (Barbosa et al.,
597 2014). Nela, os aquíferos superior e inferior, do tipo livre e confinado, respectivamente,
598 apresentam assinaturas hidrodinâmicas e hidroquímicas distintas. São limitados por aquitardes
599 constituídos por arenitos silicificados e fraturados, de geometria tabular e disposto em vários
600 níveis estratigráficos, os quais possibilitam, provavelmente, uma drenança vertical ascendente
601 entre os diferentes aquíferos e uma grande variação de fácies hidroquímicas.

602 Em linhas gerais compreende uma bacia hidrogeológica assimétrica devido a presença de
603 um eixo divisor do fluxo subterrâneo, de direção aproximada N-S, no extremo ocidental do SAU.
604 Nesse contexto, um aumento gradual da profundidade da superfície potenciométrica têm como
605 consequência o estabelecimento de aquíferos livres com níveis potenciométricos profundos (i.e.,
606 acima de 100 m). Nessa bacia hidrogeológica é estabelecida um padrão de sistemas de fluxo
607 local, com circulação ativa das águas subterrâneas e predomínio de fácies Ca-Na-Mg-Cl-HCO₃
608 baixos sólidos totais dissolvidos (STD) e composição próxima àquelas da água de chuva, sistema
609 intermediário com circulação menos ativa e aumento do Na⁺ em relação ao Ca²⁺ e o sistema
610 regional apresenta uma circulação lenta com fácies Na-Cl, maiores STD. No extremo ocidental, o

611 sistema de fluxo da água subterrânea sob condições de elevado gradiente hidráulico e revela uma
612 evolução de fácies Na-Mg-Ca-HCO₃-Cl para Na-Cl.

613 Em síntese, os processos tectônicos, sedimentares, diagenéticos e geomórficos integrados
614 contribuíram com o estabelecimento do SAU. Por consequência, a origem e evolução
615 paleogeográfica da bacia com soerguimento e erosão generalizada nas bordas e aumento
616 progressivo no espaço de acomodação no depocentro foi importante na configuração geométrica
617 e nas variações da espessura sedimentar. Os diferentes valores nos parâmetros hidrodinâmicos
618 (TKS) dos subsistemas aquíferos ocorrem como resultado das variações nos regimes de fluxo e
619 no padrão de sedimentação. Já os processos diagenéticos, especialmente a intensa silicificação
620 nos arenitos, controla a ocorrência de subtipos de aquíferos (e.g., sistema aquífero-aquitarde-
621 aquífero). Contudo, as sequências sedimentares desenvolvidas como reflexo intraplaca da
622 fragmentação gonduânica (e.g., Grupo Urucuia) atestam a possibilidade de ocorrência de
623 sistemas aquíferos expressivos no interior remoto continental sob as mesmas condições de
624 evolução tectônica e climática.

625

626 3. Referências bibliográficas

627

628 Almeida, F.F.M., 1977. O cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo:
629 SBG, v. 7, n. 4, p. 349-364.

630 Almeida, F.F.M., 2006. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica.

631 Terrae Didática. 2(1):3-18.

- 632 Almeida, F.F.M., Brito Neves, B.B., Carneiro, C.D. R., 2000. The Origin and Evolution of the
633 South American Platform. *Earth Science Reviews*, 50:77-111. doi:10.1016/S0012-
634 8252(99)00072-0.
- 635 Alves, E.C., Maia, M. Sichel, S.E., Campos, C.M.P., 2006. Zona de Fratura de Vitória-Trindade
636 no Oceano Atlântico Sudeste e suas Implicações Tectônicas. *Revista Brasileira de Geofísica*,
637 24(1): 117-127. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000100009>.
- 638 Amorim Junior, V., Lima, O.A.L., 2007. Avaliação hidrogeológica do Aquífero Urucuia na bacia
639 do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. *Revista Brasileira de*
640 *Geofísica*. 25(2): 117-129. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2007000200002>.
- 641 Asmus, H.E., 1978. Hipóteses sobre a origem dos sistemas de zonas de fratura oceânicas/
642 alinhamentos continentais que ocorrem nas regiões sudeste e sul do Brasil. In: Projeto REMAC,
643 n°4. Petrobrás. Rio de Janeiro. p. 39-75.
- 644 Barbosa, N.S., Leal, L.R.B., Barbosa, N.S., Mello, J.C., Santos, C.B., Lima O.A.L., 2014.
645 Caracterização geométrica e hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia Mericional com base em
646 testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos. *Revista Águas Subterrâneas*, 28(2): 41-52.
647 doi:10.14295/ras.v28i2.27787.
- 648 Blum, M.D., Törnqvist, T.E., 2000. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review
649 and look foward. *Sedimentology*, 47 (Suppl. 1), 2-48. doi: 10.1046/j.1365-3091.2000.00008.x
- 650 Borges, M.S., Igreja H.L.S., Costa J.B.S., Hasui Y., 1992. Faciologia e Tectônica da Formação
651 Urucuia na Região de Dianópolis, Sudeste do Estado do Tocantins. *Geociências*, São Paulo,
652 11(1): 7-18.
- 653 Campos, J.E.G., 1992. A Glaciação Permo-Carbonífera nas Regiões de Canabrava e Santa Fé de
654 Minas – MG. Dissertação de Mestrado, IG-UnB. Brasília-DF. 104p.

- 655 Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., 1994. A glaciação neopaleozóica na porção meridional da
656 Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(2):65-67.
- 657 Campos J.E.G., Dardenne M.A., 1997a. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana:
658 uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27: 269-282.
- 659 Campos J.E.G., Dardenne M.A., 1997b. Origem e evolução tectônica da bacia Sanfranciscana.
660 *Revista Brasileira de Geociências*, 27: 283-294.
- 661 Campos J.E.G., Dardenne M.A., 1999. Distribuição, estratigrafia e sistemas deposicionais do
662 Grupo Urucuia – Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. *Geociências*, São Paulo, 18(2):
663 481-499.
- 664 Catuneanu, O., 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*. Amsterdam, Elsevier, 375p.
- 665 Chang, H.K., Bender, A.A., Kowsmann, R.O., 1992. O papel das tensões intraplaca na evolução
666 de bacias sedimentares: exemplo da Formação Urucuia. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 37.
667 São Paulo, 1992. *Anais... São Paulo, SBG*. Vol. 2, 568-569.
- 668 Chaves, M.L.S.C., 1991. Sequências cretácicas e mineralizações diamantíferas no Brasil Central
669 e Africa Central Meridional. Considerações preliminares. São Paulo, *Geociências*, 10:231-245.
- 670 Cloething, S., 1986. Tectonics of passive margins: implications for the stratigraphic record.
671 *Geologic em Mijnbouuw*. 65:103-117.
- 672 Cloething, S., 1988. Intraplate stresses: a tectonic cause for third-order cycles in apparent sea
673 level?. In: *Sea-Level Changes: na Integrated Approach* (C. K. Wilgus et al., eds). *Spec. Publ.*
674 *Soc. Econ. Paleont. Miner, Tulsa*, 42, 19-29.

- 675 Dardenne, M.A., Gonzaga, G.M., Campos, J.E.G., 1990. Descoberta de pavimentos estriados de
676 origem glacial sobre os arcóseos da Formação Três Marias na região de Santa Fé de Minas, MG.
677 R.E.M., 4(4):65-66.
- 678 Dickinson, W.R., Suczer, C.A., 1979. Plate tectonics and sandstone composition. The American
679 Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63(12):2164-2182.
- 680 Dickinson, W.R., Beard, S., Brakenbridge, F., Erjavec, J., Ferguson, R., Inman, K., Knepp, R.,
681 Lindberg, P., Ryberg, P., 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in
682 relation to tectonic setting. Geological Society of America Bulletin 64, 233–235. doi:
683 10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2.
- 684 Einsele, G., 1992. Continental Sediments. In: Einsele, G., (ed), Sedimentary Basins. Evolution,
685 Facies, and Sediment Budget. Springer- Verlag Berlin, p. 19-92.
- 686 Gaspar M.T.P., 2006. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão.
687 Tese de doutorado n° 76. IG-UnB. Brasília-DF. 158p.
- 688 Gaspar M.T.P., Campos J.E.G., 2007. O Sistema Aquífero Urucuia. Revista Brasileira de
689 Geociências, 37(4): 216-226.
- 690 Gaspar M.T.P., Campos J.E.G., Moraes R.A.V de., 2012. Determinação das espessuras do
691 Sistema Aquífero Urucuia a partir de estudo geofísico. Revista Brasileira de Geociências,
692 42(Suppl 1): 154-166. <http://dx.doi.org/10.5327/Z0375-75362012000500013>.
- 693 Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P., Mitchell, J.G., 1995. The Late
694 Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume: Evidence from Large-volume, Mafic,
695 Potassic Magmatism in SE Brazil. Journal of Petrology. 36(1)189-229. doi:
696 10.1093/petrology/36.1.189.

- 697 Giresse, P., 2005. Mesozoic–Cenozoic history of the Congo Basin. *Journal of African Earth*
698 *Sciences* 43, 301–315. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.07.009.
- 699 Havholm, K.G., Blakey, R.C., Capps, M., Jones, L.S., King, D.D., Kocurek, G., 1993. Aeolian
700 genetic stratigraphy: an example from the Middle Jurassic Page Sandstone, Colorado Plateau. In:
701 *Aeolian Sediments Ancient and Modern* (ed. K. Pye), pp. 87-107. Special Publication n° 16,
702 International Association of Sedimentologists.
- 703 Havholm, K.G., Kocurek, G. 1994. Factors controlling aeolian sequence stratigraphy: clues from
704 super bounding surface features in the Middle Jurassic Page Sandstone. *Sedimentology*, 41(5):
705 913-934. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1994.tb01432.x.
- 706 Huerta, P., Armenteros, I., Silva, P.G., 2011. Large-scale architecture in non-marine basins: the
707 response to the interplay between accommodation space and sediment supply. *Sedimentology*,
708 58, 1716–1736. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2011.01231.
- 709 Jervey, M.T., 1988. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their
710 seismic expression. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St.C., Posamentier, H.W.,
711 Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), *Sea Level Changes — An Integrated Approach*. SEPM
712 Special Publication, vol. 42, pp. 47–69.
- 713 Kadima, E., Delvaux, D., Sebagenzi, S.N., Tackw, L., Kabeyaz, S.M., 2011. Structure and
714 geological history of the Congo Basin: an integrated interpretation of gravity, magnetic and
715 reflection seismic data. *Basin Research* 23, 499–527. doi: 10.1111/j.1365-2117.2011.00500.x.
- 716 Karner, G.D., 1986. Effects of lithospheric in-plane stress on sedimentary basin stratigraphy.
717 *Tectonics*, 5:573-588. DOI: 10.1029/TC005i004p00573.
- 718 Karner, G.D., Steckler, M.S., Thorne, J.A., 1983. Long-term-thermo-mechanical properties of the
719 continental lithosphere. *Nature*, 304:250-253. doi:10.1038/304250a0.

- 720 Kiang, G.H., Silva, F.P., 2015. Contribuição ao Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero
721 Urucuia. *Geociências*, 34(4):872-882
- 722 King, L.C., 1956. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*.
723 18(2):147-266.
- 724 Klein, G.V., 1995. Intracratonic Basins. In: Busby, C.J.; Ingersoll, R.V. (eds.). *Tectonics of*
725 *Sedimentary Basins*. Cambridge: Blackwell Science, p. 459-478.
- 726 Kocurek, G., Havholm, K.G., 1993. Eolian Sequence Stratigraphy – A Conceptual Framework.
727 In: *Siliciclastic Sequence Stratigraphy*. American Association Petroleum Geologists (Memoir
728 58), p. 393-409.
- 729 Kocurek, G., Nielson, J., 1986. Conditions favourable for the formation of warm climate aeolian
730 sand sheets. *Sedimentology*, 33(6): 795-816. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1986.tb00983.x.
- 731 Lima, O.A.L., Santos, E.S.M., 2011. Caracterização geológica e geofísica do Sistema Aquífero
732 Urucuia e de seu substrato nas bacias dos rios Arrojado e Formoso, Bahia. *Revista Brasileira de*
733 *Geofísica*, 29(4): 723-744. <http://dx.doi.org/10.1590/rbgf.v29i4.77>.
- 734 Marshak, S., Alkimin, F.F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São
735 Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8: 555-571. DOI:
736 10.1029/TC008i003p00555.
- 737 Martinsen, O.J., Ryseth, A., Hellandhansen, W., Fleshe, H., Torkildsen, G., Idill, S., 1999.
738 Stratigraphic Base Level and Fluvial Architecture: Ericson Sandstone (Campanian), Rocky
739 Springs Uplift, SW Wyoming, USA. *Sedimentology*, 46, 235-259.
- 740 Miall, A.D., 1977. A review of the braided river depositional environment. *Earth Sci. Revs.*, 13,
741 1-62. doi:10.1016/0012-8252(77)90055-1.

- 742 Milani, E.J., Melo, J.H.C., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B., 2007. Bacia do Paraná. B.
743 Geoci. Petrobrás, Rio de Janeiro, 15(2): 265-267.
- 744 Milani, E.J., Thomaz Filho, A., 2000. Sedimentary Basins of South America. In: Cordani, U.G.,
745 Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, A. (eds.). Tectonic Evolution of South America. Rio de
746 Janeiro, 31st. IGC, 389-449.
- 747 Mizusaki, A.M.P., Thomaz Filho, A., 2004. O Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. In:
748 Montesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B. Geologia do Continente
749 Sul-Americano – evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Ed. Becca, São
750 Paulo, pp. 281-291.
- 751 Muto, T., Steel, R.J., 2000. The accommodation concept in sequence stratigraphy: some
752 dimensional problems and possible redefinition. *Sedimentary Geology*, vol. 130: 1–10.
753 doi:10.1016/S0037-0738(99)00107-4.
- 754 Petri, S., 1991. Paleogeografia do Cretáceo do Brasil e considerações sobre o paleoclima.
755 *Geociências*, São Paulo, 10: 1-35.
- 756 Petri, S., Campanha, V.A., 1981. Brazilian Continental Cretaceous. *Earth Science Reviews*. 17:
757 69-85.
- 758 Pierini, C., Mizusaki, M.P., 2007. Significados Paleoambientais e Paleoclimáticos dos
759 Paleossolos: Uma Revisão. *Revista Pesquisas em Geociências*, 34 (1): 45-61.
- 760 Ponte, F.C., Asmus, H.E., 2004. As bacias marginais brasileiras: estágio atual dos
761 conhecimentos. B. Geoci. Petrobrás, Rio de Janeiro. 12(2): 385-420.
- 762 Porter, M. L., 1986. Sedimentary record of erg migration. *Geology* 14, 497–500. doi:
763 10.1130/0091-7613(1986)14<497:SROEM>2.0.CO;2.

- 764 Saadi, A., Hasui, Y., Magalhães, F.S., 1991. Informações sobre a neotectônica e morfogênese de
765 Minas Gerais. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 3. Boletim de Estudos Expandidos...
766 Rio Claro. SBG. P. 105-106.
- 767 Sauer, W., 1955, *Coprinisphaera ecuadoriensis*, un fósil singular del Pleistoceno: Boletín del
768 Instituto de Ciencias Naturales, v. 1, p. 123–132.
- 769 Sgarbi, G.N.C., Dardenne, M.A., 1996. Evolução climática do Gondwana nas regiões Centro-Sul
770 do Brasil e seus registros geológicos continentais durante o Mesozoico, enfatizando o Arco do
771 Alto Paranaíba, a borda NNE da Bacia do Paraná e a porção meridional da Bacia Sanfranciscana,
772 no Oeste do Estado de Minas Gerais. *Geonomos*, 4(1): 21-29.
- 773 Sgarbi, G.N.C., 1989. Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia
774 Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro
775 (UFRJ). 324p.
- 776 Sgarbi, G.N.C., 2000. The Cretaceous Sanfranciscan Basin, Eastern Plateau of Brazil. *Revista*
777 *Brasileira de Geociências*, 30(3): 450-452.
- 778 Smale, D., 1973. Silcretes and associated sílica diagenesis in South Africa and Australia. *Journal*
779 *of Sedimentary Petrology*, 43:1077-1089. DOI: 10.1306/74D728FB-2B21-11D7-
780 8648000102C1865D.
- 781 Spigolon A.L.D., Alvarenga C.J.S., 2002. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de
782 mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia
783 Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4): 579-586.
- 784 Stokes, W. L., 1968. Multiple truncation bedding planes – a feature of wind deposited sandstone
785 formations. *J. Sediment. Petrol.* 38, 510–515. DOI: 10.1306/74D719D3-2B21-11D7-
786 8648000102C1865D.

- 787 Talbot, M.R., 1985. Major bounding surfaces in aeolian sandstones – a climatic model.
788 *Sedimentology*, 32, 237-265. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1985.tb00508.x.
- 789 Vaz, P.T., Rezende, N.G.A.M., Filho, I.R.W., Travassos, W.A.S., 2007. Bacia do Parnaíba. B.
790 *Geoci. Petrobrás*, Rio de Janeiro, 15(2):253-263.
- 791 Williams, L.A., Crerar, D.A., Silica diagenesis. 1985. II – General mechanisms. *Journal of*
792 *Sedimentary Petrology*, 55: 312-321. doi: 10.1306/212F86B1-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- 793 Williams, L.A., Parks, G.A., Crerar, D.A., 1985. Silica diagenesis. I – Solubility controls. *Journal*
794 *of Sedimentary Petrology*, 55: 301-311. DOI: 10.1306/212F86AC-2B24-11D7-
795 8648000102C1865D

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA CENTRO-OCIDENTAL, BRASIL.

Resumo

O Sistema Aquífero Urucua (SAU) representa um conjunto de aquíferos inter-relacionados associados às rochas sedimentares do Grupo Urucua. Cinco perfis geofísicos de poços foram interpretados e subsidiaram a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual. Três eletrofácies são identificadas: (i) substrato regional do Grupo Bambuí; (ii) sistema eólico da Formação Posse e; (iii) sistema fluvial entrelaçado segmentados por níveis tabulares de arenitos maciços e silicificados da Formação Serra das Araras. No contexto hidrogeológico, a posição estratigráfica dos níveis de arenitos silicificados em relação àquelas do nível freático regional condiciona a ocorrência de aquíferos não-confinados quando disposto acima, e um sistema aquífero-aquitarde-aquífero quando abaixo. Nesse contexto, o aquífero confinado inferior apresenta cargas hidráulicas maiores do que as verificadas no livre sobrejacente. Os horizontes de arenitos silicificados funcionam como aquitardes e dispõem-se mais profundos e espessos na porção centro-ocidental. Adicionalmente, os valores da porosidade efetiva e coeficiente de armazenamento variam entre 10^{-2} a 10^{-1} e 10^{-4} . Já as transmissividades entre 10^{-4} a 10^{-6} e 10^{-3} m²/s para os subtipos não-confinado e confinado, respectivamente. No extremo ocidental, o SAU exhibe poços cujos níveis estáticos são profundos (acima de 100 m) como consequência de um divisor de água subterrânea na bacia hidrogeológica. Em geral, os rebaixamentos produzidos, após os ensaios de bombeamento dos poços, diminuem progressivamente em direção à porção centro-ocidental do SAU, aliado a um

aumento da capacidade específica dos poços, da espessura saturada e da potencialidade hidrogeológica.

Palavras-Chave: Sistema Aquífero Urucuia, perfis geofísicos de poços, modelo hidrogeológico conceitual.

Abstract

The Urucuia Aquifer System (UAS) is a set of interrelated aquifers associated with the sedimentary rocks of Urucuia Group. Five geophysical well logs were interpreted and supported the development of conceptual hydrogeologic model. Three electrofacies are identified: (i) regional substrate of Bambuí Group; (ii) eolian system of Posse Formation; (iii) braided fluvial system targeted by tabular levels of massive and silicified sandstones of Serra das Araras Formation. In the hydrogeological context, the stratigraphic position of the silicified sandstones levels in relation to the regional groundwater level leads to the occurrence of unconfined aquifers when it is disposed above, and an aquifer-aquitard-aquifer system when it is located below. In this context, the lower confined aquifer presents hydraulic heads greater than the ones in the overlying unconfined. Silicified sandstones horizons function as aquitards and have become more deep and thick in the central-western portion. Additionally, the effective porosity and storage coefficient values ranging from 10^{-2} to 10^{-1} and 10^{-4} , while the transmissivity between 10^{-6} and 10^{-4} to 10^{-3} m²/s for unconfined and confined subtypes, respectively. In the extreme west, the UAS displays wells whose static levels are deep (over 100 m), because of a groundwater divider the hydrogeological basin. In general, the drawdowns produced after the pumping test wells gradually decrease toward SAU western-central portion, combined with an increase of the specific capacity of the wells, the saturated thickness and hydrogeological potential.

Keywords: Urucuia Aquifer System, geophysical well logs, conceptual hydrogeologic model.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Urucuia corresponde a um conjunto de aquíferos inter-relacionados associados às rochas sedimentares do Grupo Urucuia (SAU) (GASPAR, 2006; GASPAR e CAMPOS, 2007). Representa um dos mais importantes mananciais de água subterrânea do Brasil, distribuindo-se por seis estados brasileiros (i.e., Bahia, Tocantins, Minas Gerais, Piauí, Maranhão e Goiás). Possui área de aproximadamente 120.000 km² e espessura de rochas sedimentares que pode atingir valores superiores a 600 m (GASPAR et al., 2012). É responsável por cerca de 90% da descarga de base dos rios da região oeste da Bahia (PIMENTEL et al., 2000). Seu fluxo de base mantém a perenidade e a alta vazão dos rios afluentes nas bacias hidrográficas dos rios São Francisco e Tocantins-Araguaia, durante o período de recessão das chuvas, entre os meses de abril e outubro (GASPAR, 2006).

O aumento na demanda de água para irrigação e atividades agroindustriais, nos últimos 30 anos, levou alguns mananciais superficiais (e.g., rio das Fêmeas, rio Grande) a uma situação crítica quanto a sua disponibilidade hídrica e o esgotamento da emissão de novas outorgas de captação de água. Este fato tem conduzido os segmentos produtivos a intensificar a exploração e uso das águas subterrâneas através da perfuração de poços tubulares profundos (SCHUSTER et al., 2002; GASPAR, 2006; BARBOSA et al., 2014). Atualmente, embora conhecido regionalmente como um excelente sistema aquífero tanto em relação às reservas quanto a produtividade dos poços, ainda inexistente no meio técnico/científico a proposição de um modelo conceitual que sirva como base para as interpretações hidrogeológicas. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo apresentar os

resultados de pesquisa que buscou elaborar um modelo hidrogeológico do SAU através de dados geológicos de campo, hidrogeológicos e de perfis geofísicos de poços.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

O Grupo Urucuia representa a unidade geológica neocretácea da Bacia Sanfranciscana (BS) (i.e., depressão intracontinental onde se acumularam as coberturas sedimentares fanerozoicas sobre o Cráton do São Francisco) (SGARBI, 1989). Possui maiores espessuras, distribuição em área e potencialidade hidrogeológica na porção centro-setentrional da BS, onde ocorre de forma contínua (Figura 1). Na porção meridional é segmentado e descontínuo (CAMPOS e DARDENNE, 1999). Em geral, apresenta relevo plano e suavemente inclinado para leste, na forma de extensas chapadas limitadas por escarpas nos extremos ocidentais e orientais. Os afloramentos, quando existentes, estão localizados nas quebras de relevo e nos cursos dos rios. A presença de testemunhos isolados demonstra que, provavelmente, sua área deposicional era mais extensa do que àquela atualmente observada. As espessuras sedimentares, ainda motivo de muitas investigações (e.g., LIMA, 2000; AMORIM JÚNIOR, 2003; BONFIM e GOMES, 2004; TSCHIEDEL, 2004; AMORIM JÚNIOR e LIMA, 2007; KIANG e SILVA, 2015), aumentam gradualmente de sul para o centro-norte.

A unidade, na maior parte da bacia, assenta-se diretamente sobre o substrato regional representado pelo Grupo Bambuí, podendo também recobrir localmente faixas granito-gnáissicas arqueanas e outras unidades sedimentares fanerozoicas da BS. Na porção setentrional, por sua vez, sobrepõe-se aos sedimentos paleozoicos da Bacia do Parnaíba (Figura 01). As diferenças nos tipos litológicos e no padrão de sedimentação possibilitam a distinção de duas unidades litoestratigráficas: a inferior, Formação Posse e a superior, Formação Serra das Araras (CAMPOS e DARDENNE, 1997; CAMPOS e DARDENNE, 1999).

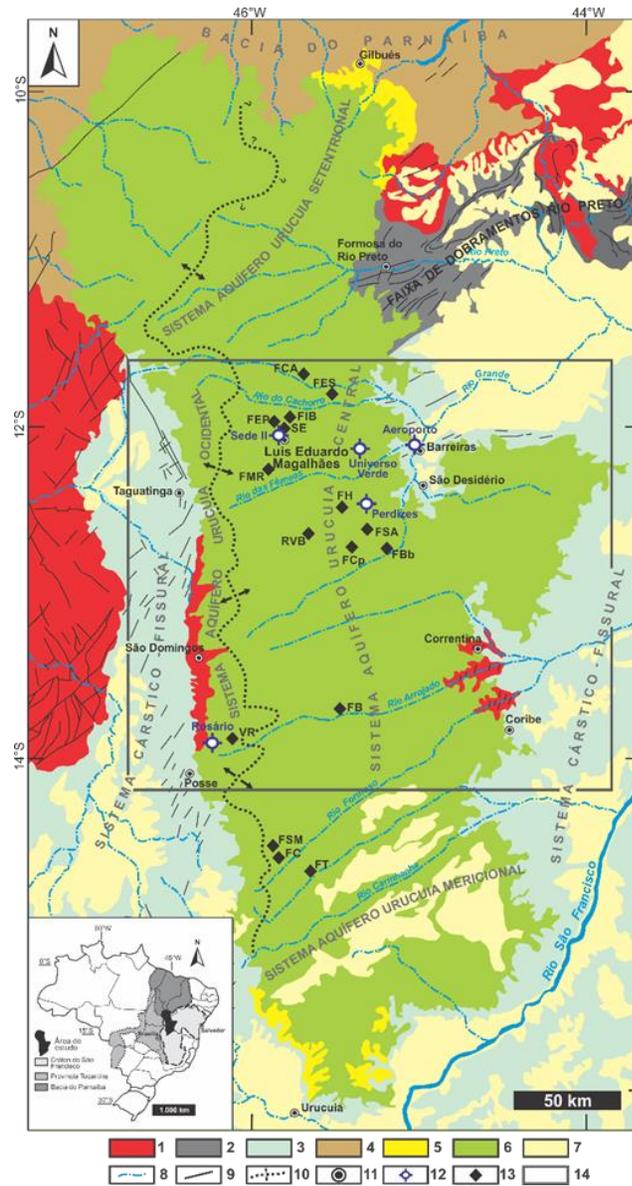


Figura 1. Mapa geológico destacando a área de abrangência dos poços onde foram realizados os principais testes de bombeamento e perfuração geofísica no Sistema Aquífero Urucua Centro-Ocidental e o substrato regional. 1 Embasamento arqueano; 2 - Grupo Rio Preto; 3 - Grupo Bambuí; 4 - Sedimentos paleozoicos da Bacia do Parnaíba; 5 - Grupo Areado; 6 - Grupo Urucua; 7 - Coberturas detrito-lateríticas; 8 - Rios; 9 - Lineamentos, 10 - Divisor de água subterrânea, 11 - Sedes Municipais, 12 - Poços perfilados; 13 - Poços com testes de bombeamento; 14 - Área de abrangência dos poços perfilados; FCA - Faz. Campo Aberto; FES - Faz. Espírito Santo; FEP - Faz. Poletto; FCp - Faz. Campinas; FSA - Faz. Sto. Antônio; FIB - Faz. Isís Basso; SE - Sede Embasa; FMR - Faz. Marechal Rondon; FH - Faz. Hirata; RVB - Roda Velha de Baixo; FBb - Faz. Bombarda; FB - Faz. Buriti; FC - Faz. COBA; FSM - Faz. São Miguel; FT - Faz. Trijunção; VR - Vila Rosário.

Figure 1. Geologic map highlighting the coverage area of the wells where the main pumping tests and geophysical loggings were performed in the Western-Central Urucua Aquifer System and regional substrate. 1 Archean Basement; 2 - Rio Preto Group; 3 - Bambuí Group; 4 - Paleozoic sediments of the Parnaíba Basin; 5 - Areado Group; 6 - Urucua Group; 7 - Detritus-lateritic covers; 8 - Rivers; 9 - Lineaments; 10 - Groundwater divider; 11 - Municipal seats; 12 - Wells logs; 13 - Wells with pumping tests; 14 - Coverage area of the wells loggings; FCA - Campo Aberto Farm; FES - Espírito Santo Farm; FEP - Poletto Farm; FCp - Campinas Farm; FSA - Sto. Antônio Farm; FIB - Isís Basso Farm; SE - Sede Embasa; FMR - Marechal Rondon Farm; FH - Hirata Farm; RVB - Roda Velha de Baixo; FBb - Bombarda Farm; FB - Buriti Farm; FC - COBA Farm; FSM - São Miguel Farm; FT - Trijunção Farm; VR - Vila Rosário.

2.1. Formação Posse

A Formação Posse é constituída por arenitos de cores amarela, rosa e avermelhadas, muito finos, finos a médios, bem selecionados e maduros textural e mineralogicamente. É comum a presença de uma fina película de óxidos/hidróxidos de ferro em torno dos grãos de quartzo detríticos (i.e., red beds). Apresenta estratificações cruzadas tangenciais de grande porte, com espessura dos sets de aproximadamente 20 m, geralmente truncados por planos horizontais, representados por estratificações horizontais e de baixo ângulo. As estruturas sedimentares, aliadas à maturidade textural, representam feições diagnósticas de um ambiente desértico de campo de dunas (i.e., um grande erg que se estendia até além dos limites com a Bacia do Parnaíba) composto de sucessões de dunas e interdunas, no qual o nível freático encontrava-se abaixo da superfície deposicional (i.e., sistema eólico seco) (BARBOSA et al., 2011; CAMPOS e DARDENNE, 1994; CAMPOS e DARDENNE, 1997; CAMPOS e DARDENNE, 1999; SPIGOLON e ALVARENGA, 2002).

A transição entre as unidades é caracterizada por uma superfície que separa o sistema eólico (Formação Posse) do sistema fluvial-eólico (Formação Serra das Araras), marcando o início de períodos mais úmidos, implicando em uma imediata flutuação do nível de base (SPIGOLON e ALVARENGA, 2002).

2.2. Formação Serra das Araras

A Formação Serra das Araras é constituída por ciclos de sedimentação superpostos composto por conglomerados, arenitos e argilitos, intercalados em bancos plano-paralelos, com espessuras variando de 50 cm a 2 m. As sequências com padrão textural de granodecrescência ascendente são

formadas na base por níveis conglomeráticos avermelhados, com seixos de quartzo, quartzitos, arenitos da própria sequência e feldspatos caolinizados. Representam canais temporários preenchidos por fluxos de detritos com alta descarga de sedimentos em regime de fluxo superior de alta energia (SPIGOLON e ALVARENGA, 2002). Durante a sedimentação, um processo de infiltração mecânica das argilas ocorre nos sedimentos eólicos subjacentes (CAMPOS e DARDENNE, 1999). Em seguida, ocorrem arenitos vermelhos com níveis amarelados, polimodais, regionalmente com horizontes silicificados, onde, em direção ao topo da sucessão, as estratificações cruzadas acanaladas de pequeno porte são sobrepostas por laminações plano-paralelas. Evidências de silicificação nos arenitos são verificadas em várias posições estratigráficas e em níveis tabulares (de até 8 m) extensos e descontínuos (CAMPOS e DARDENNE, 1999). Na porção superior ocorrem horizontes pelíticos avermelhados de até 20 cm de espessura, compactos e brechados com gretas de contração, representando um transporte predominantemente suspensivo desenvolvido em amplas e rasas planícies de inundação. Não se descarta a possibilidade de associações de lagos rasos intermitentes com os depósitos fluviais. O conjunto dessas litofácies representam modificações no regime de fluxo em ambientes fluviais entrelaçados desenvolvidos em amplas planícies com uma grande variação de descarga provavelmente em fácies de wadi fans (BORGES et al., 1992; CAMPOS e DARDENNE, 1997; CAMPOS e DARDENNE, 1999; SPIGOLON e ALVARENGA, 2002).

2.3. Hidrogeologia

O SAU é representado por um conjunto de aquíferos intergranulares dispostos na forma de um extenso tabuleiro com uma área efetiva de aproximadamente 76.000 km² (GASPAR e CAMPOS,

2007). Em geral, apresenta maiores espessuras saturadas e potencialidade hídrica nas porções centro-ocidental (AMORIM JR e LIMA, 2007; GASPAR et al., 2012; BARBOSA et al., 2014).

É uma bacia hidrogeológica assimétrica devido à presença, no extremo ocidental, de um divisor do fluxo subterrâneo de direção aproximada norte-sul (Figura 1). Essa feição proporciona uma rápida depleção da superfície potenciométrica e recarga das nascentes situadas nas quebras de relevo que as limitam. Seu posicionamento aproximado foi demarcado com base nas informações de levantamentos geofísicos elétricos (LIMA, 2000; AMORIM JUNIOR, 2003; AMORIM JUNIOR e LIMA, 2007; LIMA e SANTOS, 2011; BARBOSA et al., 2014) e dados de nível estático dos poços cadastrados na região. A oeste do eixo divisor, os níveis potenciométricos são mais profundos (atingem cerca de 180 m) (GASPAR e CAMPOS, 2007, BARBOSA et al., 2014). Nessa bacia hidrogeológica, o mecanismo de recarga da água subterrânea ocorre predominantemente devido a infiltração das águas das chuvas, onde as alturas pluviométricas médias apresentam os maiores valores (isoietas normalmente superiores a 1.000 mm por ano) (GASPAR e CAMPOS, 2007).

Os parâmetros hidrodinâmicos obtidos através de ensaios de bombeamento realizados em diferentes sub-bacias hidrográficas revelam dois conjuntos de resultados: (i) altos valores de transmissividade (T), entre 10^{-2} a 10^{-3} m²/s, condutividade hidráulica (K) da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} m/s e coeficiente de armazenamento da ordem de 10^{-3} a 10^{-5} para o aquífero confinado (Tabela 1) (SANTOS, 2002; SCHUSTER et al., 2002; SCHUSTER et al., 2003; GASPAR, 2006; POMPEU e RODRIGUES, 2002; BARBOSA, 2009; CAMPOS et al., 2010). Nesse tipo aquífero, as elevadas vazões de exploração associados a pequenos rebaixamentos observados nos poços resulta no desenvolvimento de extensos raios de influência (acima de 2.500 m), acarretando em interferências entre os poços e desses com os cursos de águas superficiais nas épocas de estresse hídrico (meses

de maio a outubro) (BARBOSA et al., 2014) e (ii) menores valores de T, entre 10^{-2} a 10^{-5} m²/s), K de 10^{-4} a 10^{-7} m/s e porosidade efetiva (S_y) da ordem de 10^{-2} para aquífero livre (SANTOS, 2002; GASPAR, 2006; BARBOSA, 2009; CAMPOS et al., 2010) (Tabela 1). Em geral, seu fluxo de base mantém a perenidade da rede de drenagem, que contribui efetivamente na regularização da vazão do médio rio São Francisco no período de recessão as chuvas (GASPAR e CAMPOS, 2007).

Tabela 1. Síntese dos parâmetros hidrodinâmicos regionais do Sistema Aquífero Urucuaia.
Table 1. Summary of regional hydrodynamic parameters of the Urucuaia Aquifer System.

Poço	Prof. (m)	Q (m ³ /h)	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	S/S _y	Método	Aquífero	Ref.
Faz. Poletto	287,00	439,00	8,82	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	Cooper & Jacob (1946)	Confinado	Santos (2002)
			15,73	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$			
		-	-	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Recup. (s x t')		
		-	-	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	-	Recup. (s _{res} x t'/t)		
Faz. Campo Aberto	-	580,00	-	$1,6 \cdot 10^{-2}$	-	$3,1 \cdot 10^{-4}$	Hantush (1956)	Schuster et al., (2003)	
-	-	-	$2,1 \cdot 10^{-2}$	-	$5,4 \cdot 10^{-4}$				
Sede	-	250,00	6,35	$2,7 \cdot 10^{-2}$	-	$1,7 \cdot 10^{-3}$	Theis (1935)	Schuster et al., (2002)	
Sede II	-	175,00	15,20	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$			
Faz. Espírito Santo	196,00	510,00	9,78	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Cooper & Jacob (1946)	Gaspar (2006)	
Faz. Iris Basso	280,00	420,00	-	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	-			
Faz. Campinas	-	250,00	70,40	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	Hantush (1956)	Santos (2002)	
-	-		99,20	$1,5 \cdot 10^{-2}$	-	$1,9 \cdot 10^{-4}$			
Faz. Marechal Rondon	-	410,00	17,20	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Theis (1935)	Pompeu & Rodrigues (2002)	
Faz. Hirata	258,00	456,00	10,97	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$			
Faz. COBA	270,00	399,00	-	$7,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	Theis (1935)	Gaspar (2006)	
Faz. Bombarda	279,00	497,00	-	$1,7 \cdot 10^{-2}$	-	$4,5 \cdot 10^{-3}$			
		520,00	-	$2,2 \cdot 10^{-2}$	-	$7,6 \cdot 10^{-3}$	Neuman (1975)	Campos et al., (2010)	
Faz. Trijunção	60,00	10,00	0,46	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	-			
	40,00	13,20	2,70	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	-			
	40,00	6,40	-	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	-			
	40,00	11,80	-	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	-			
Roda Velha de Baixo	62,00	9,00	-	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	NÃO-confinado	Santos (2002)	
Faz. Sto. Antônio	80,00	41,00	-	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$			
Faz. São Miguel	-	6,00	-	$3,9 \cdot 10^{-2}$	-	$1,4 \cdot 10^{-2}$			
Faz. Buriti	100,00	10,80	3,03	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$			
CERB – Vila do Rosário	242,00	80,00	13,10	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	-		Gaspar (2006)	

Prof. = profundidade; Q = vazão de bombeamento; Q/s = capacidade específica; T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; S = coeficiente de armazenamento; S_y = porosidade efetiva; Ref = Referências.

A hidrogeologia do SAU ainda é objeto de muitos questionamentos e investigações quanto a sua espessura, tipos de aquíferos existentes e suas inter-relações. Várias ideias foram propostas tendo como suporte os valores de parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir de dados de testes de bombeamento em diferentes sub-bacias hidrográficas: (i) aquífero inferior do tipo drenante ou semi-confinado, o qual recebe um fluxo vertical (ou drenança) do aquífero superior do tipo arenito fraturado e não-confinado (SCHUSTER, 2002; SCHUSTER et al., 2002); (ii) aquífero livre com drenança retardada (NASCIMENTO, 2003; LUZ et al., 2009; CAMPOS et al., 2010); (iii) presença de sub-tipos de aquíferos (i.e., livre, confinado, livre profundo e suspenso) devido a modificações no padrão de sedimentação do Grupo Urucua (GASPAR, 2006; GASPAR e CAMPOS, 2007); (iv) sistema livre desenvolvido nos intervalos arenosos superiores e condições locais de confinamento, nos mesmos arenitos, controlado por intervalos arenosos muito silicificados (OLIVEIRA et al., 2008; LIMA e SANTOS, 2011); (v) aquífero livre superior com dupla porosidade (granular e fissural) e um semi-confinado inferior de porosidade granular, sem nenhum aquitarde entre eles (RODRIGUES et al., 2009); (vi) sistema aquífero-aquitarde-aquífero representado por um aquífero inferior do tipo confinado, um aquitarde formado por níveis de arenitos silicificados e fraturados e um aquífero superior do tipo livre, não sendo descartada a hipótese de ocorrência de drenança a partir dos arenitos silicificados (BARBOSA, 2007; BARBOSA, 2009; BARBOSA et al., 2014); (vii) diferentes comportamentos hidrogeológicos a depender da posição na bacia (BARBOSA et al., 2010) e; (viii) um dos mais expressivos aquíferos de natureza livre do Brasil (KIANG e SILVA, 2015).

3. MÉTODOS

Os estudos hidrogeológicos foram desenvolvidos segundo uma sequência metodológica que se inicia por etapas de levantamento bibliográfico, aquisição de dados hidrogeológicos, reconhecimento de campo e interpretação de perfis geofísicos de poços e de ensaios de bombeamento e elaboração do modelo hidrogeológico conceitual. Neste trabalho foram utilizados dados secundários de poços da CERB (Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia) (i.e., Barreiras-Aeroporto, Barreiras-Universo Verde, Luís Eduardo Magalhães-Sede, Correntina-Rosário) e da SRH-BA (Secretaria de Recursos Hídricos do Estado da Bahia) (i.e., São Desidério-Perdizes).

A interpretação dos perfis geofísicos objetiva a determinação das eletrofácies, que auxiliam na definição dos contatos, na interpretação litológica e na correlação poço a poço. Todos os poços foram perfilados e processados pela HIDROLOG Serviços de Perfilagem e as curvas produzidas pelo software HYDROLOGTM com dados de profundidade, raios gama (GR), potencial espontâneo (SP), sônico (DT) e indução (DIR) e normal curta (SN) através de um arquivo digital em formato LAS (Log ASCII Standard) e normatizadas em padrão API (American Petroleum Institute).

A distinção entre ambientes e de processos sedimentares é realizada pela observação do formato da curva do perfil RG. Na ausência de condições favoráveis, é necessário o uso da resistividade profunda (DIR) e do potencial espontâneo (SP). Eventualmente, pode-se utilizar a curva SN, embora não seja aconselhável por sofrer fortes influências ambientais (e.g., lama e/ou invasão do filtrado).

Quantitativamente, os perfis de resistividade investigam volumes radiais distintos de rocha, ou seja, a DIR analisa a zona virgem e a SN, a zona lavada. Qualitativamente, a integração dessas informações possibilita a identificação de camadas impermeáveis (e.g., folhelhos) com baixos

valores DIR e SN, ausência de invasão e eventual superposição entre as curvas. Já em camadas permoporosas ocorre uma separação devido ao processo de invasão de fluidos de perfuração (i.e., presença de água da formação e filtrado). O SP é pouco confiável e utilizado, devido a incorporação de potenciais telúricos ou originados próximos à superfície. Já os dados DT são importantes na determinação de processos de cimentação, compactação dos sedimentos e da profundidade do nível freático. Na prática, o ideal, é uma interpretação baseada na conjunção da maior quantidade possível de curvas (NERY e BARROS, 2000).

Ressalta-se a dificuldade de estabelecimento dos contatos entre as unidades geológicas com a interpretação dos perfis, devido a presença de uma sucessão predominantemente de arenitos e a relativa ausência de contraste entre os diferentes parâmetros analisados, sendo que esses foram inferidos e auxiliados com dados estratigráficos de campo. Em contrapartida, a caracterização hidrogeológica mostrou-se favorável por meio da identificação das zonas de arenitos silicificados nos perfis DT e sua relação com a posição do nível freático no estabelecimento dos diferentes subtipos aquíferos do SAU.

Os dados de ensaios de bombeamento foram obtidos do banco de dados da CERB. Foram realizados com duração de 24 horas em poços parcialmente penetrantes (exceto àquele do poço Barreiras-Aeroporto), com posterior recuperação do nível dinâmico. Em todos os testes, as condições de regime estacionário foram alcançadas.

A interpretação dos dados foi realizada utilizando os métodos de Hantush e Jacob (1955) para aquíferos confinados drenantes e Neuman (1975) para aquíferos livres, com o objetivo de determinar os parâmetros hidrodinâmicos (i.e., condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento/ porosidade efetiva de forma a caracterizar as condições hidrogeológicas das diferentes unidades aquíferas do SAU associados a evolução temporal dos

rebaixamentos produzidos. Já as cargas hidráulicas (i.e., altura de elevação do nível da água de um poço em relação a um datum arbitrário) foram determinadas a partir dos dados hidrogeológicos dos poços supracitados (Tabela 2), sendo importante na interpretação do fluxo das águas subterrâneas e na quantificação das propriedades dos aquíferos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cinco perfis geofísicos foram interpretados, a saber: (i) Barreiras-Aeroporto, profundidade total de 169,30 m; (ii) Barreiras-Universo Verde Agronegócios Ltda, profundidade de 270,3 m; (iii) São Desidério-Perdizes, profundidade de 267,8 m; (iv) Luís Eduardo Magalhães-Sede (Poço 3), profundidade de 279,5 m e; (v) Correntina-Rosário, profundidade de 244,3 metros (Tabela 2; Figura 3).

Tabela 1. Dados hidrogeológicos dos poços perfilados.

Table 1. hydrogeological data of wells logs.

<i>Poço</i>		<i>Prof. (m)</i>	<i>Q (m³/h)</i>	<i>NE (m)</i>	<i>ND (m)</i>	<i>s (m)</i>	<i>Q/s (m³/h/m)</i>
Município	Localidade						
Barreiras	Aeroporto	169,30	5,73	52,00	111,67	59,67	0,1
São Desidério	Perdizes	267,80	20,00	7,00	35,00	28,00	0,71
Barreiras	Universo Verde	270,30	158,40	50,07	76,24	26,17	6,05
Luís Eduardo Magalhães	Sede	279,50	175,70	19,14	30,71	11,57	15,19
Correntina	Rosário	244,30	87,98	132,31	138,40	6,09	14,45

Continuação:

<i>Poço</i>		<i>h (m)</i>	<i>Parâmetros hidrodinâmicos</i>			<i>Tipo de aquífero</i>
Município	Localidade		<i>T (m²/s)</i>	<i>S</i>	<i>Método</i>	
Barreiras	Aeroporto	248,00	4,33x10 ⁻⁶	2,80x10 ⁻²	Neuman	Não-confinado
São Desidério	Perdizes	293,00	-	-	Hantush e Jacob	Confinado
Barreiras	Universo Verde	249,93	2,67x10 ⁻⁴	1,70x10 ⁻¹	Neuman	Não-confinado
Luís Eduardo Magalhães	Sede	280,86	3,17x10 ⁻³	1,80x10 ⁻⁴	Hantush e Jacob	Confinado
Correntina	Rosário	167,69	1,90x10 ⁻⁶	2,50x10 ⁻²	Neuman	Não-confinado

Prof. = profundidade; Q = vazão de bombeamento; NE = nível estático; ND = nível dinâmico; s = rebaixamento; Q/s = capacidade específica; h = carga hidráulica; T = transmissividade; S = coeficiente de armazenamento.

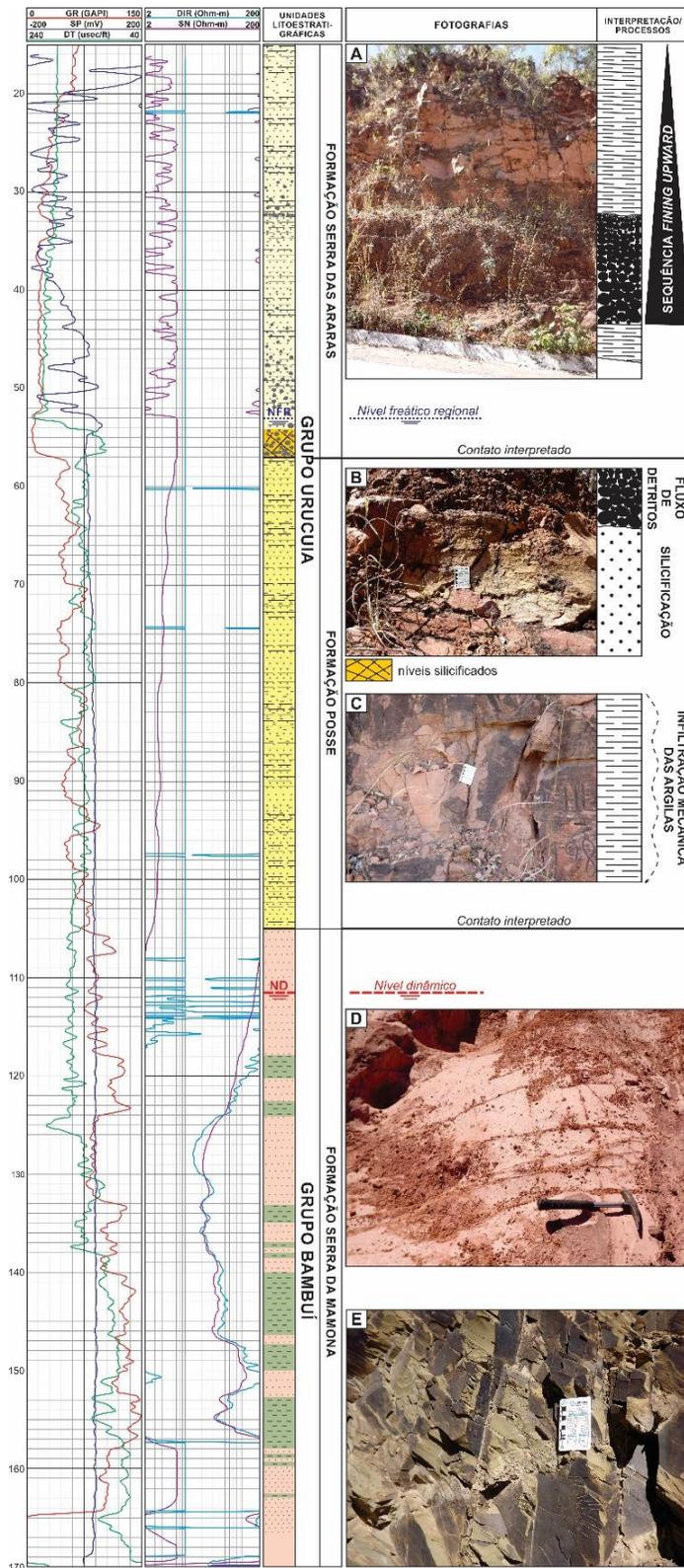


Figura 2. Perfil geofísico do poço Barreiras-Aeroporto e interpretação hidrogeológica com fotografias das unidades estratigráficas aflorantes (A-E) na Serra da Bandeira (estrada de acesso ao aeroporto de Barreiras-BA).

Figure 2. Barreiras-Aeroporto well log and hydrogeological interpretation with photos of outcropping stratigraphic units (A-E) in Bandeira Ridge (access road to Barreiras-BA airport).

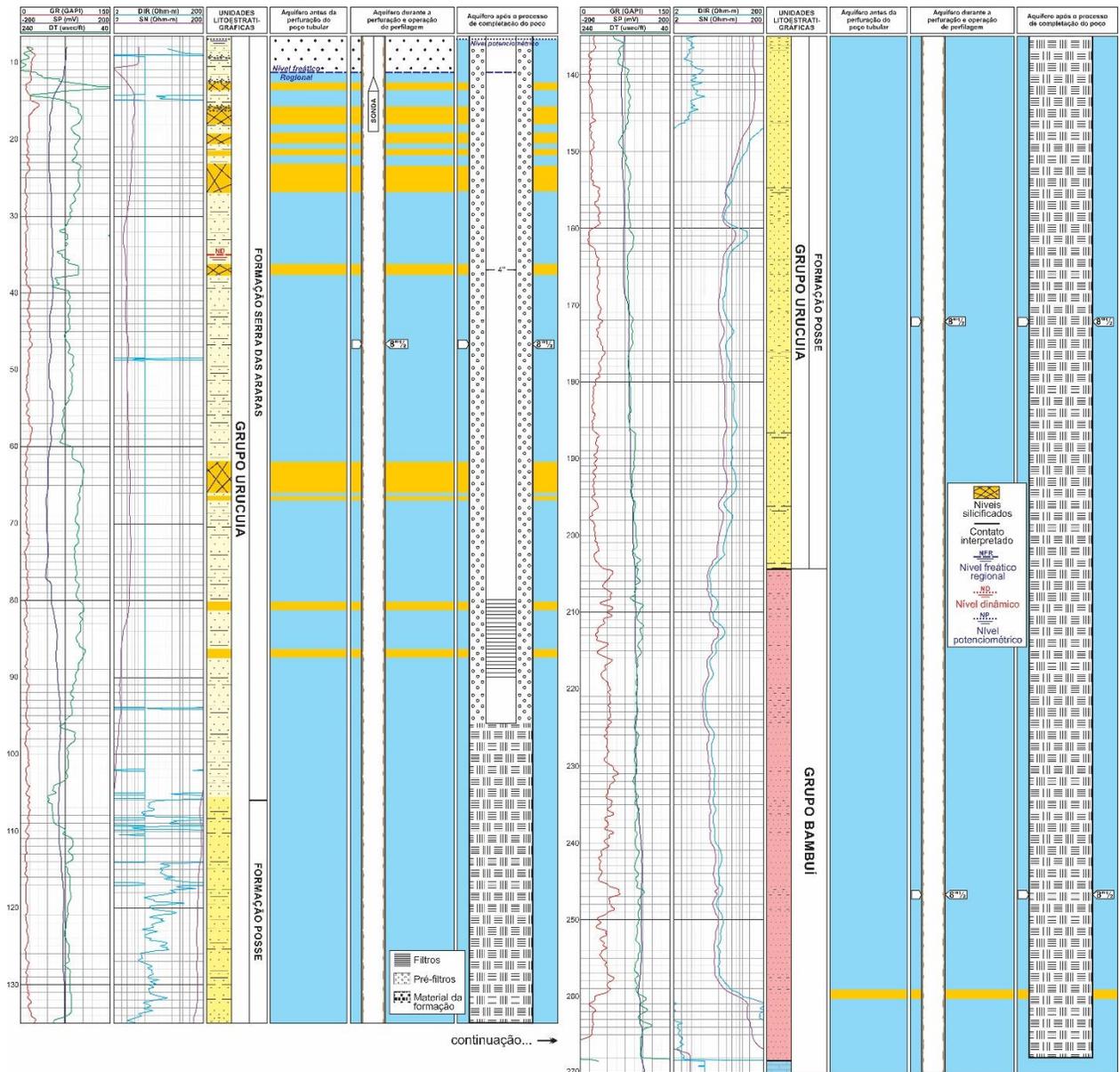


Figura 3. Perfil geofísico do poço São Desidério-Perdizes ilustrando o comportamento hidrogeológico do sistema aquífero antes da perfuração, durante a operação de perfuração e após a completção e desenvolvimento do poço (modificado de Nascimento, 2003).

Figure 3. São Desidério-Perdizes well log illustrating hydrogeological behavior of the aquifer system before drilling, during the logging operation and after the completion and well development (modified from Nascimento, 2003).

4.1. Perfil Barreiras-Aeroporto

Localiza-se no extremo oriental da área (Figura 1). A interpretação geofísica (Figura 2) mostra a presença de três eletrofácies (Figura 2). A inferior corresponde ao substrato regional composto de

metassiltitos com metarcóseos intercalados e ardósias do Grupo Bambuí, representado por um aumento da argilosidade e do grau de compactação em profundidade (Figura 2-D,E). A intermediária, ou Formação Posse, é interpretada como depósitos de lençóis arenosos secos, constituídos por arenitos com laminação horizontal, correlacionável com os depósitos de campos de dunas situados no limite ocidental. Já a superior é constituída predominantemente por arenitos com laminações horizontais e conglomerados limitados por camadas maciças e silicificadas representada pela Formação Serra das Araras.

As camadas de arenitos silicificados e fraturados são restritas e apresentam uma deflexão acentuada no perfil DT, alcançando valores de 100 e 110 $\mu\text{seg/pé}$. Já o nível freático é registrado pela variação abrupta do DT de 230 $\mu\text{seg/pé}$ a 180 $\mu\text{seg/pé}$, na profundidade de 53,4 m. O perfil GR, associado a investigações estratigráficas de campo, mostra arenitos com laminação horizontal interpretados como depósitos de lençóis arenosos (Figura 2-C) entre as profundidades de 57 a 105 m. Nesse horizonte, é verificado um aumento da argilosidade, com dados GR entre 40 e 95 unidades API, interpretado como um processo diagenético de infiltração mecânica das argilas.

Em direção ao topo, têm-se ciclos de gredocrescência ascendente de sedimentação fluviais compostos de conglomerados, arenitos com estratificações cruzadas de pequeno porte e laminações horizontais (Figura 2-A,B). Os níveis pelíticos são restritos. O contato inferido apresenta uma profundidade de 105 m para a superfície que limita os grupos Urucuia e Bambuí. Destaca-se que a unidade inferior do Grupo Urucuia, representada pela Formação Posse, se presente, mostra uma feição diferente das observadas nas porções ocidentais da bacia e descrita em trabalhos anteriores (CAMPOS e DARDENNE, 1997; CAMPOS e DARDENNE, 1999; SPIGOLON e ALVARENGA, 2002) (Figura 2-A,B,C,D). A presença restrita de depósitos de alta maturidade

mineralógica e textural indica tratar-se da sedimentação transicional do sistema wadi fans do Grupo Urucuia.

4.2. Perfil São Desidério-Perdizes

Está localizada no distrito de Perdizes, à cerca de 30 km da sede municipal de São Desidério-BA (Figura 1). A interpretação geofísica mostra a presença de três eletrofácies (Figura 3). A inferior compõe o substrato regional representado pelo Grupo Bambuí, caracterizado por um aumento da argilosidade em profundidade. A intermediária e superior é caracterizada pelo Grupo Urucuia, subdividido nas formações Posse e Serra das Araras, com espessuras interpretadas de 72 m e 133 m, respectivamente. A eletrofície intermediária apresenta uma maior argilosidade devido ao processo de infiltração mecânica de argilas nos arenitos. Já na superior, as camadas silicificadas dispõem-se na forma de níveis distribuídos em várias posições estratigráficas e apresenta como característica uma deflexão acentuada no perfil DT, alcançando valores acima de 110 $\mu\text{seg/pé}$. O nível freático interpretado é indicado pela variação abrupta do DT de 240 $\mu\text{seg/pé}$ a 190 $\mu\text{seg/pé}$, na profundidade de 12,0 m. Já o nível potenciométrico medido no poço ocorre na profundidade de 7,0 m (Tabela 2).

4.3. Perfil Barreiras-Universo Verde Agronegócios

Situa-se a aproximadamente 40 km à oeste do poço Barreiras-Aeroporto (Figura 1). Apresenta duas eletrofácies, constituídas por arenitos e níveis silicificados intercalados em várias posições estratigráficas, representados pelas formações Posse e Serra das Araras (Figura 4). O nível freático

é registrado pela variação abrupta do DT de 240 $\mu\text{seg/pé}$ a 80 $\mu\text{seg/pé}$, na profundidade de 50,0 m. A unidade superior, ou Formação Serra das Araras, é caracterizada por um padrão serrilhado no perfil DT, com os maiores valores, de 80 a 130 $\mu\text{seg/pé}$, interpretado como níveis de arenitos silicificados. O contato com a unidade inferior, representado pela Formação Posse é revelado por modificações no padrão do perfil DT na profundidade de 114 m. Em geral, ambas as formações possuem um padrão GR uniforme, representando pacotes arenosos limpos.

4.4. Perfil Luís Eduardo Magalhães–Sede II (Poço 3)

Localiza-se na porção central da área, na sede do município de Luís Eduardo Magalhães-BA (Figura 1). A interpretação, ilustrada na Figura 5, mostra a presença de duas eletrofácies. A superior, representada pela Formação Serra das Araras, constituída predominantemente por arenitos limitados por espessas camadas de arenitos silicificados. Esses últimos apresentam uma deflexão acentuada no perfil DT, alcançando valores de 85 a 100 $\mu\text{seg/pé}$. Já o nível freático é registrado pela variação abrupta do DT de 150 $\mu\text{seg/pé}$ a 85 $\mu\text{seg/pé}$, na profundidade de 38,7 m. Enquanto que o nível potenciométrico, medido no poço, ocorre na profundidade de 7,0 m (Tabela 2). A unidade relacionada à Formação Posse apresenta uma maior uniformidade nos sedimentos, caracterizado por um padrão regular no perfil DT e GR. O contato inferido entre as unidades é de 106 m, marcado por modificações no padrão do perfil DT, de serrilhado a regular, respectivamente.

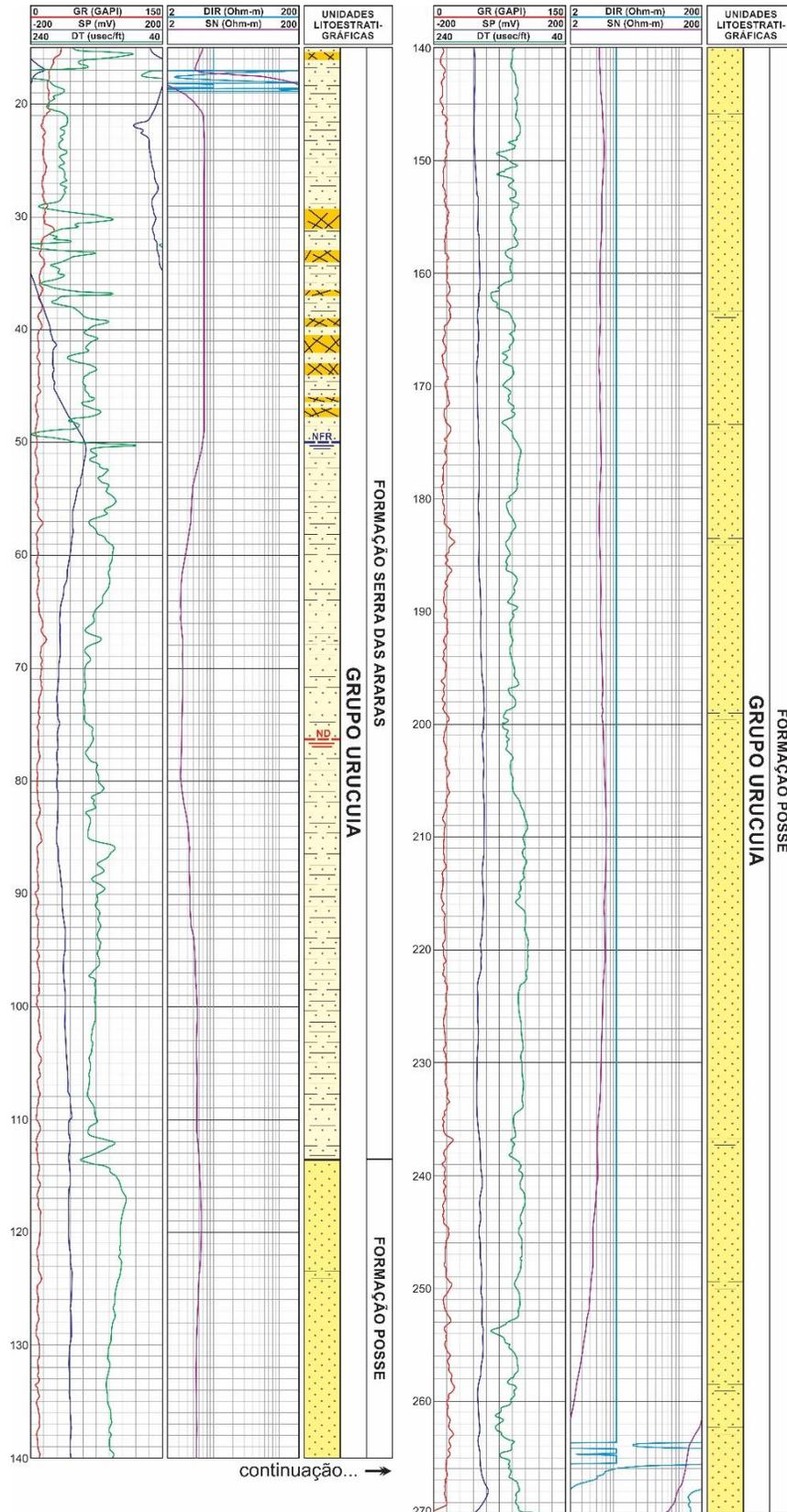


Figura 4. Interpretação hidrogeológica do perfil geofísico do poço Barreiras-Universo Verde Agronegócios
Figure 4. Hydrogeological interpretation of Barreiras- Universo Verde Agronegócios well log.

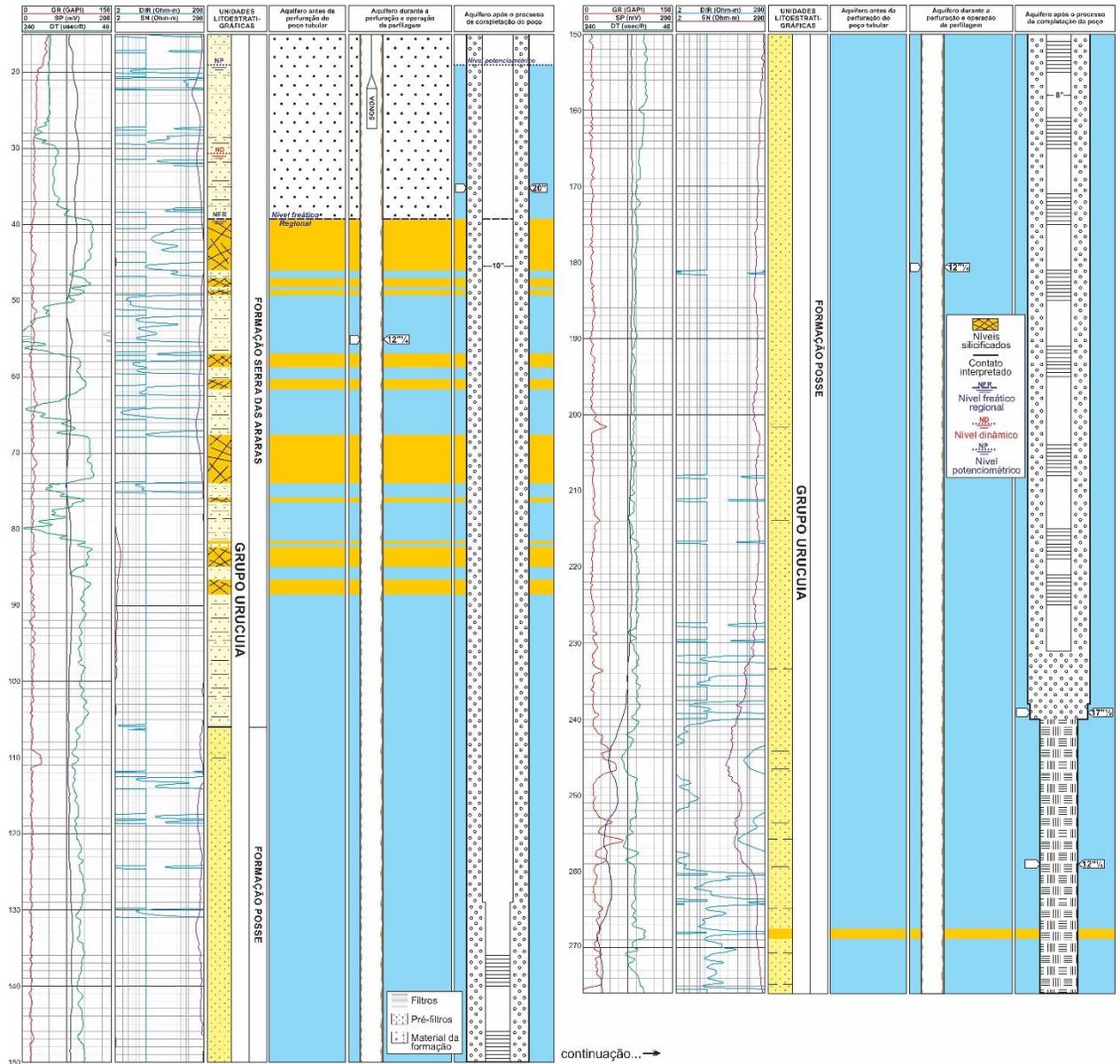


Figura 5. Perfil geofísico do poço Luís Eduardo Magalhães-Sede (Poço 3) mostrando o comportamento hidrogeológico do sistema aquífero antes da perfuração, durante a operação de perfilagem e após a conclusão e desenvolvimento do poço.

Figure 5. Luís Eduardo Magalhaes-Sede (Well 3) well log showing the hydrogeological behavior of the aquifer system before drilling, during the logging operation and after completion and well development.

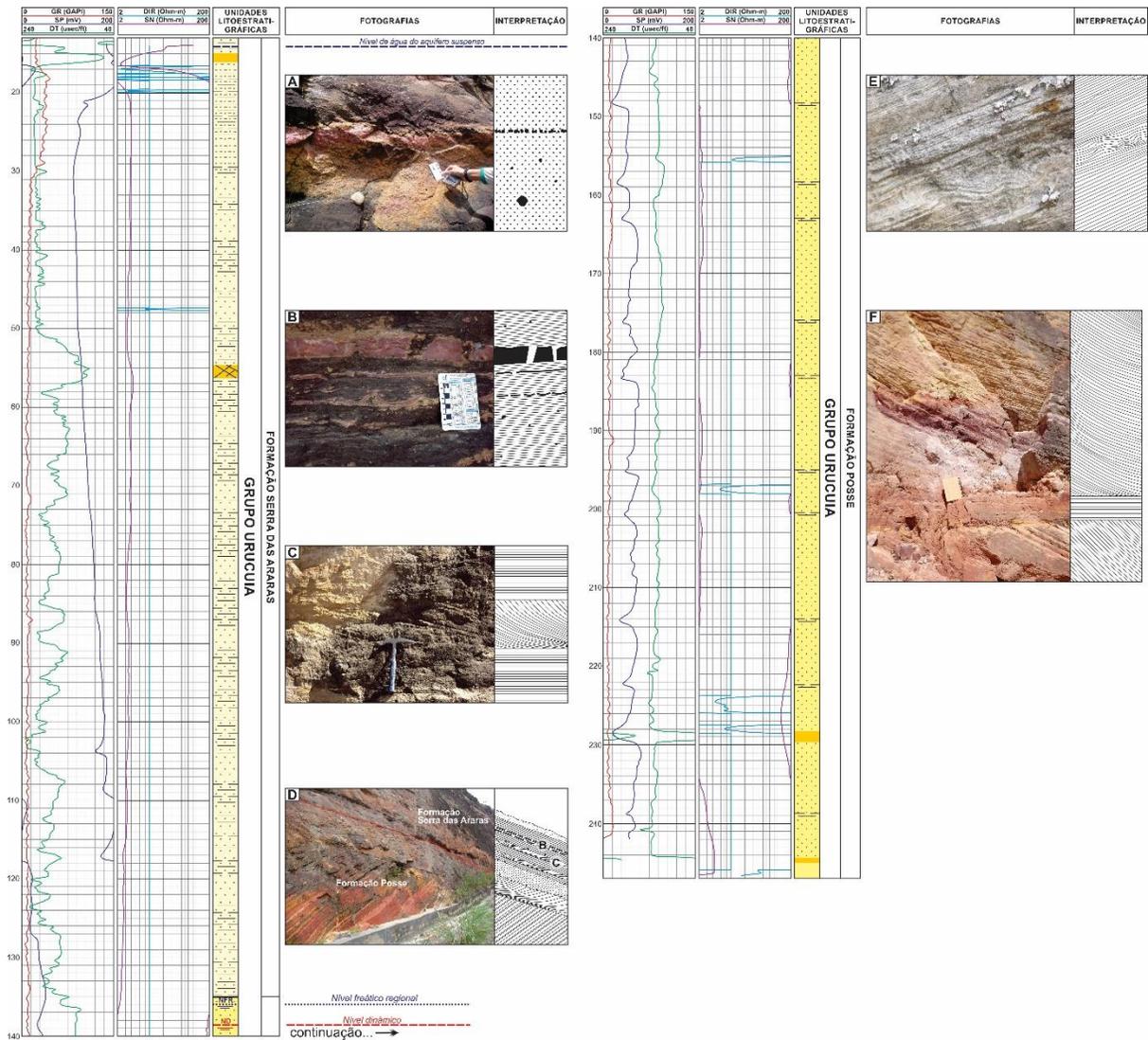


Figura 6. Perfil geofísico do poço Correntina-Rosário e interpretação hidrogeológica com as fotografias das unidades estratigráficas aflorantes (A-F) na Serra da Geral de Goiás (rodovia GO-362 de acesso à cidade de São Domingos-GO).

Figure 6. Correntina-Rosário well log and hydrogeological interpretation with photographs of the outcropping stratigraphic units (A-F) in the Serra Geral de Goiás (GO-362 highway to the city of São Domingos-GO).

4.5. Perfil Correntina-Rosário

Está situado no extremo ocidental da área, no distrito de Rosário, município de Correntina-BA (Figura 1). A interpretação (Figura 6A-F), revela a presença de duas eletrofácies. A unidade superior, representada pela Formação Serra das Araras, é constituída de padrões DT serrilhados

com níveis restritos de arenitos silicificados e caracterizados por valores DT entre 60 e 80 $\mu\text{seg/pé}$. A presença desses níveis na zona de aeração possibilitou a identificação de um aquífero suspenso. Já aqueles desenvolvidos na unidade inferior, ou Formação Posse, dispõem-se de forma regular. O nível freático é indicado pela variação abrupta do DT de 135 $\mu\text{seg/pé}$ a 110 $\mu\text{seg/pé}$, na profundidade de 136 m. O contato inferido entre as unidades geológicas é de 135 m, marcado por modificações no padrão do perfil DT. Representa a sedimentação distal do Grupo Urucuia, expressa por litofácies de arenitos com estratificações cruzadas de grande porte em escala métrica limitadas por estratificações horizontais e de baixo ângulo, o qual corresponde em conjunto a sucessões de dunas e interdunas (Figura 6-D). O contato entre as unidades marca o início de períodos mais úmidos, sendo constituídos por depósitos de fluxo de detritos arenosos (Figura 6-D), separando o sistema eólico (Formação Posse) do sistema fluvial-eólico (Formação Serra das Araras) (Figura 6-A,B,C).

4.6. Modelo hidrogeológico conceitual

A interpretação dos perfis geofísicos possibilitou a caracterização das unidades litoestratigráficas, dos contatos litológicos inferidos e da hidrogeologia do SAU Centro-Occidental. A Figura 7 ilustra um modelo hidrogeológico conceitual idealizado após a integração dos perfis geofísicos e demonstra que o SAU apresenta modificações no seu comportamento hidrogeológico/hidrodinâmico a depender da sua posição na bacia. Nela, as espessuras sedimentares e saturadas aumentam progressivamente em direção às porções ocidentais, exceto no extremo ocidental, onde ocorre um divisor na bacia hidrogeológica. Já as espessuras dos níveis de arenitos silicificados aumentam em direção à porção central. Nesse pacote sedimentar, a presença

e posição estratiográfica dos níveis de arenitos silicificados e a relação desses com a posição do nível freático regional condicionam o comportamento hidrogeológico do SAU, em um sistema tipo aquífero-aquitarde-aquífero (BARBOSA et al., 2014) (Figuras 7 e 8). Esse sistema é representado por um aquífero superior do tipo livre, níveis de arenitos silicificados e fraturados caracterizado como uma unidade de confinamento e um aquífero inferior do tipo confinado.

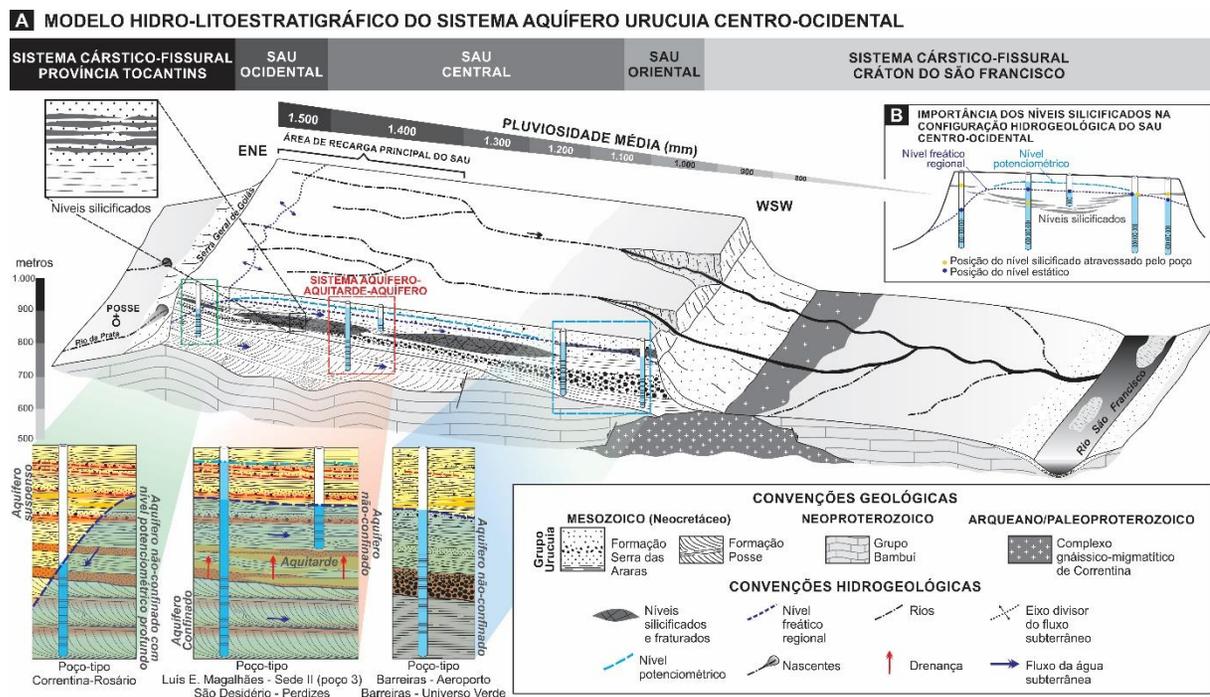


Figura 7. Modelo hidrogeológico conceitual do Sistema Aquífero Urucuiá, com base na interpretação dos perfis geofísicos (A), enfatizando a importância dos níveis silicificados na configuração hidrogeológica (B) (modificado de Barbosa et al., 2014).

Figure 7. Conceptual hydrogeologic model for the Urucuiá Aquifer System, based on the interpretation of geophysical logs (A), emphasizing the importance of silicified levels hydrogeological behavior (B) (modificado from Barbosa et al., 2014).

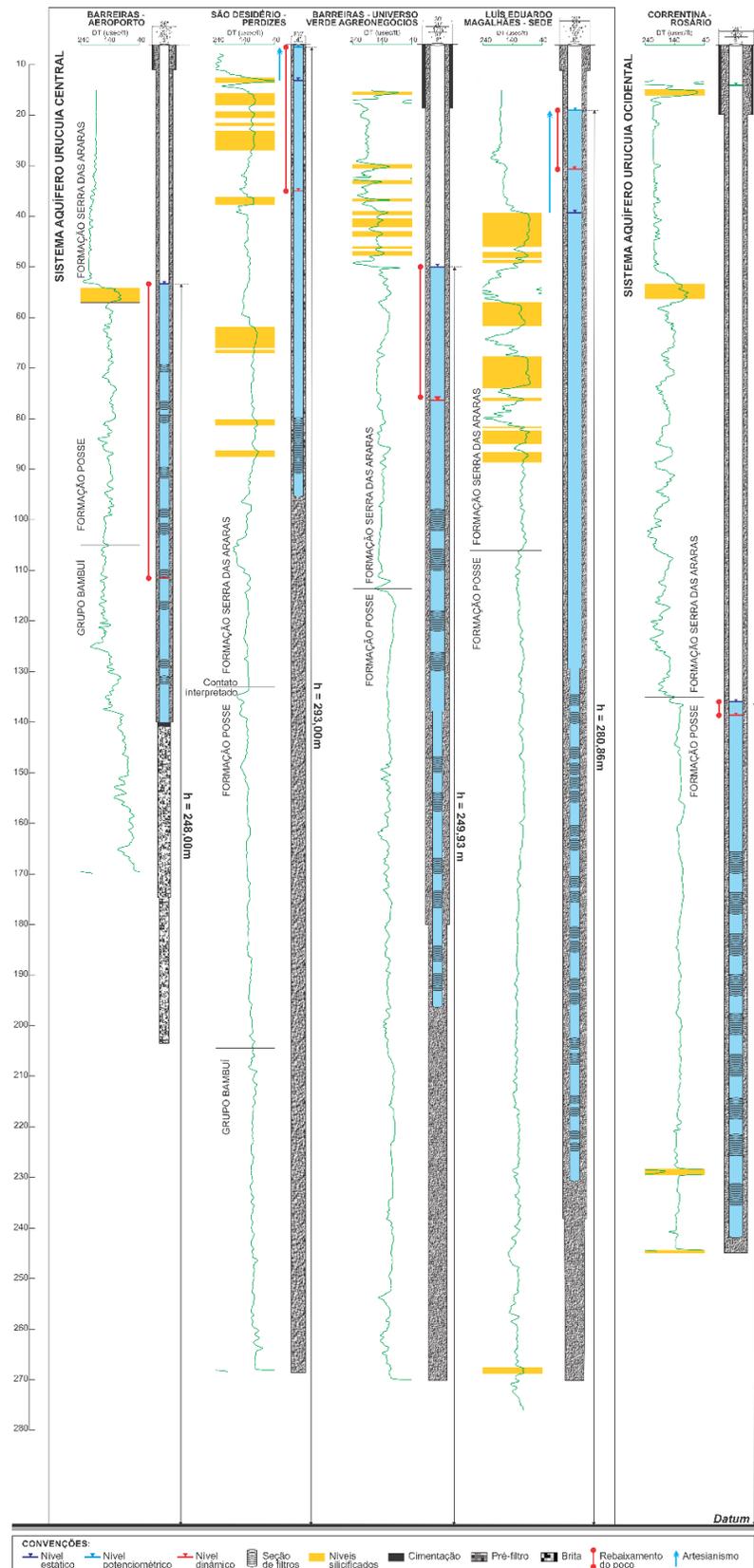


Figura 8. Correlação hidrogeológica dos poços perfilados destacando o perfil construtivo e as cargas hidráulicas totais.
Figure 8. Hydrogeological correlation of wells logs highlighting the constructive profile and total hydraulic heads.

Em síntese, quando os níveis de arenitos silicificados posicionam-se acima do nível freático regional o aquífero têm um comportamento não-confinado, conforme verificado nos perfis Barreiras-Aeroporto, Barreiras-Universo Verde (Figuras 2 e 4). Consiste em um aquífero onipresente na área estudada e, por vezes, sobrepõe-se as demais unidades aquíferas. Possui transmissividade variável, com valores de $4,33 \cdot 10^{-6}$ a $2,67 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Já as porosidades efetivas são elevadas, com valores de $2,82 \cdot 10^{-2}$ e $1,70 \cdot 10^{-1}$, respectivamente (Tabela 2). Comumente é explorado para o abastecimento das sedes das fazendas e na diluição de agrotóxicos nas lavouras (Gaspar e Campos, 2007).

No perfil Correntina-Rosário, o aquífero não-confinado possui nível freático profundo (i.e., 132,32 m). Nesse subtipo, têm-se um aumento progressivo da superfície potenciométrica em profundidade, responsável pela presença de um eixo de inflexão do fluxo subterrâneo de direção aproximada N-S, caracterizado por menores valores de carga hidráulica (i.e., 167,69 m) e pela recarga do Sistema Cárstico-Fissural adjacente (Tabela 2; Figura 2). Nesse perfil, a presença de níveis de arenitos silicificados na zona de aeração possibilita a ocorrência de aquíferos suspensos de distribuição local (Figuras 6 e 7). Compreende o SAU Ocidental e apresenta valores de transmissividade da ordem de $1,90 \cdot 10^{-6}$ m²/s e porosidade efetiva de $2,50 \cdot 10^{-2}$. Os valores dos coeficientes de transmissividade observados nos poços que atravessam os aquíferos não confinados (i.e., Barreiras-Aeroporto, Barreiras-Universo Verde e Correntina-Rosário) tendem a diminuir em direção às regiões extremo ocidental e oriental que limitam a bacia hidrogeológica, em função principalmente da redução da espessura saturada (Figura 7).

Já quando os níveis de arenitos silicificados posicionam-se abaixo do nível freático regional, o aquífero se apresenta como um sistema aquífero-aquitarda-aquífero (Barbosa et al., 2014). Nessa configuração, os níveis de arenitos silicificados dispõem-se fraturados e representam uma unidade

de confinamento do SAU, conforme verificado nos perfis de Luís Eduardo Magalhães-Sede (poço 3) e São Desidério-Perdizes. Neles, o nível freático interpretado foi de aproximadamente 39,0 e 12,0 m, enquanto que o nível potenciométrico medido nos poços apresentaram 19,14 e 7,0 m de profundidade, respectivamente. Em geral, exibem cargas hidráulicas maiores (i.e., 280,86 e 293,00 m) em relação ao aquífero não confinado sobrejacente (i.e., 248,00 e 249,93 m) (Tabela 2; Figura 8). A diferença nos valores das cargas hidráulicas verificadas nos poços pode, provavelmente, ser relacionada a existência de uma drenança vertical entre os aquíferos sobrepostos. Em geral, possui alta transmissividade, com valores da ordem de $3,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, e coeficiente de armazenamento, da ordem de $1,81 \cdot 10^{-4}$ (Tabela 2). Comumente é explorado por intermédio de poços tubulares profundos utilizados em projetos de irrigação em pivôs centrais.

As magnitudes dos rebaixamentos produzidos nos poços, após os ensaios de bombeamento, diminuem progressivamente no sentido da porção centro-ocidental, com valores de 59,67; 28,00; 26,17; 11,57 e 6,09, respectivamente, associado a uma tendência de aumento na vazão de exploração e na potencialidade hídrica dos poços, fato corroborado pelos valores de capacidades específicas de 14,4; 15,2; 6,1; 0,71 e 0,1 m³/h/m para os poços Correntina-Rosário, Luís Eduardo Magalhães-Sede (Poço 3), Barreiras-Universo Verde Agronegócios, São Desidério-Perdizes e Barreiras-Aeroporto, respectivamente (Tabela 2, Figura 8).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da interpretação de perfis geofísicos e ensaios de bombeamento dos poços demonstram que o SAU apresenta diferentes comportamentos hidrogeológicos em função da

presença de níveis de arenitos silicificados, das variações dos parâmetros hidrodinâmicos das unidades aquíferas e do posicionamento geomorfológico e geográfico na sua área de abrangência. As características dos diferentes subtipos aquíferos são modificadas de acordo com a posição estratigráfica dos níveis de arenitos silicificados em relação às do nível freático regional. No subtipo não-confinado, os níveis de arenitos silicificados estão posicionados acima do nível freático, conforme verificado nos poços Barreiras-Aeroporto, Barreiras-Universo Verde Agronegócios e Correntina-Rosário. Esse último, localizado no extremo ocidental, possui nível estático profundo, fruto de um divisor de água subterrânea na bacia hidrogeológica. Adicionalmente possuem porosidades efetivas elevadas (i.e., entre 10^{-2} a 10^{-1}) e valores variáveis de transmissividade (i.e., da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} m²/s), com os menores valores observados nos extremos limítrofes da área estudada devido provavelmente a diminuição da espessura saturada. Já no subtipo confinado, os níveis espessos de arenitos silicificados posicionam-se abaixo do nível freático e compõe um sistema aquífero-aquitarde-aquífero, a exemplo dos poços São Desidério-Perdizes e Luís Eduardo Magalhães-Sede (poço 3). Neles, ocorre uma elevação do nível d'água (i.e., artesianismo) de aproximadamente 5,0 e 20,0 m, respectivamente. Complementarmente, possui alta transmissividade (da ordem de 10^{-3} m²/s) e baixo coeficiente de armazenamento (em torno de 10^{-4}). Em geral, apresenta cargas hidráulicas maiores do que as verificadas no subtipo livre sobrejacente. Destaca-se que, apesar desse tipo de aquífero ocorrer em situações e posições espaciais específicas na bacia (e.g., SAU Centro-Occidental), a distribuição espacial e estratigráfica dos níveis de arenitos silicificados ainda não estão regionalmente caracterizados. Via de regra, a magnitude dos rebaixamentos produzidos nos ensaios de bombeamento dos poços, diminuem progressivamente em direção à porção centro-occidental do SAU, aliado a um aumento da capacidade específica dos poços, da espessura saturada e da potencialidade hidrogeológica.

No modelo hidrogeológico proposto, a configuração dos diferentes subtipos aquíferos ocorre em função das variações litológicas, da estrutura hidrogeológica e dos parâmetros hidrodinâmicos do SAU. Em síntese, esse sistema é representado por um aquífero superior do tipo livre e onipresente na área de estudo; níveis de arenitos silicificados e fraturados caracterizado como uma unidade de confinamento e; um aquífero inferior do tipo confinado. Na interpretação dos perfis, a disposição em profundidade da unidade de confinamento nem sempre corresponde ao limite das unidades litoestratigráficas formais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CERB (Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia) e a HIDROLOG Serviços de Perfilagem pela disponibilização e autorização de uso dos perfis geofísicos de poços.

REFERÊNCIAS

AMORIM JUNIOR, V. **Avaliação hidrogeológica do aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando IP-Resistividade**. Salvador, Bahia, 2003. 82p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.

AMORIM JUNIOR, V.; LIMA, O.A.L. Avaliação hidrogeológica do Aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. **Revista Brasileira de Geofísica**. 25(2): 117-129, 2007.

BARBOSA, N.S. **Avaliação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Urucuia nas Bacias Hidrográficas dos Rios Formoso e Arrojado – Oeste do Estado da Bahia**. Salvador, Bahia,

2007. 119p. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.

BARBOSA, N.S. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia nas bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado**. Salvador, Bahia, 2009. 98p. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências-Universidade Federal da Bahia.

BARBOSA, N.S.; LEAL, L.R.B.; BARBOSA, N.S.; MELLO, J.C.; SANTOS, C.B. Os Diferentes Comportamentos Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Urucuia na Região Oeste do Estado da Bahia. In: CONG. BRAS. GEOL, 45, **Anais**, CD-ROM. Belém-PA. 2010.

BARBOSA, N.S.; GUIMARÃES, R.P.; NASCIMENTO, D.S.; BARBOSA, N.S. Geoarquitetura deposicional e correlação estratigráfica dos arenitos eólicos do Grupo Urucuia, Oeste da Bahia e Nordeste de Goiás. In: XXIV SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 2011, **Anais...** Aracajú-SE, 2011. p. 260.

BARBOSA, N.S.; LEAL, L.R.B.; BARBOSA, N.S.; MELLO, J.C.; SANTOS, C.B.; LIMA, O.A.L. Caracterização Geométrica e Hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia Meridional com base em Testes de Bombeamento e Levantamentos Geofísicos Elétricos. **Revista Águas Subterrâneas**. 28(2): 41-52, 2014.

BONFIM, L.F.C.; GOMES, R.A.A.D. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura: Idéias para Discussão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XX, Cuiabá (MT), **Anais**. 1 CD-ROM. 2004. 8 pp.

BORGES, M.S.; IGREJA, H.L.S.; COSTA, J.B.S.; HASUI, Y. Faciologia e Tectônica da Formação Urucuia na Região de Dianópolis, Sudeste do Estado do Tocantins. **Geociências**, São Paulo, 11(1): 7-18. 1992.

- CAMPOS, J.C.V.; BRIZ, E.M.; LUZ, J.A.G. Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Urucuia – Fazenda Bombarda. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVI, São Luís (MA), **Anais**, 2010, p.1-17.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. A carta estratigráfica da bacia Sanfranciscana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Balneário Camboriú (SC), **Anais**, 1994, p.50-51.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, 27: 269-282. 1997.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Distribuição, estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Urucuia – Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. **Geociências**, São Paulo, 18(2): 481-499. 1999.
- GASPAR, M.T.P. **Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão**. Brasília-DF. 2006. 158p. Tese de doutorado n° 76. IG-UnB.
- GASPAR, M.T.P.; CAMPOS, J.E.G. O Sistema Aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, 37(4): 216-226, 2007.
- GASPAR, M.T.P.; CAMPOS, J.E.G.; MORAES, R.A.V de. Determinação das espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a partir de estudo geofísico. **Revista Brasileira de Geociências**, 42 (Supl 1): 154-166. 2012.
- HANTUSH, M.S.; JACOB, C.E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. **Trans. Amer. Geophys. Union**. 36: 95-100. 1955.
- KIANG, C.H; SILVA, F.P. Contribuição ao arcabouço geológico do Sistema Aquífero Urucuia. **Geociências**, 34(4): 872-882. 2015.

LIMA, O.A.L. Estudos geológicos e geofísicos do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio Cachorro-Oeste do Estado da Bahia. **Relatório técnico**. Salvador-BA. 2000. Superintendência de Recursos Hídricos- SRH/ Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia-CPGG/UFBA. 42p.

LIMA, O.A.L.; SANTOS, E.S.M. Caracterização geológica e geofísica do Sistema Aquífero Urucuia e de seu substrato nas bacias dos rios Arrojado e Formoso, Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**. 29(4): 723-744. 2011.

LUZ, J.A.G.; COSTA, A.T.; CAMPOS, J.C.V. Avaliação sobre as condições atuais de exploração dos poços e dinâmica de fluxo do aquífero Urucuia. **Relatório Final**. Barreiras-BA. 2009. Universidade Federal da Bahia – UFBA. 89p.

MARTINS, L.A; CARDOSO, A.C. O Aquífero Urucuia no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVII, 2012, Bonito-MS, **Anais**, 4 pp.

NASCIMENTO, K.R.F., (coord.). Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Fêmeas- Bahia. **Relatório Final**. Salvador- BA. 2003. ANA/ GEF/ PNUMA/ OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). 208 pp.

NERY, G.G.; BARROS, S.B.R. O uso dos perfis geofísicos na definição de ambientes deposicionais. In: 1ST JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER. 2000, Fortaleza (CE), **Anais**, 16 pp.

NEUMAN, S.P. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. **Water Resources Res.** 11: 329-342. 1975.

OLIVEIRA, L.T.; LUZ, J.A.G.; CAMPOS, J.C.V.; LIMA, O.A.; LEAL, L.R.B. Comportamento hidrogeológico do Grupo Urucuia: Sub-bacia dos rios Formoso e Arrojado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15. Natal (RN), 2008, **Anais**, p.1-15.

PIMENTEL, A.L.; AQUINO, R.F.; SILVA, R.C.A.; VIEIRA, C.M.B. Estimativa da recarga do aquífero Urucuia da sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. In: 1º CONGRESSO SOBRE APROVEITAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM PAÍSES DE IDIOMA PORTUGUÊS, Rio de Janeiro – RJ, 2000, **Anais...**, 11 pp.

RODRIGUES, Z.R.C.; MAIA, P.H.P.; LIMA, C.E.S.; ARAÚJO, V.M.; CRUZ, L.V.M. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Urucuia e seu Rebatimento para a Gestão da Água na Região Oeste do Estado da Bahia. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 1, 2009, São Paulo-SP, **Anais**, p.1-14.

SCHUSTER, H.D.M. Modelagem de Fluxo Subterrâneo com Vistas à Definição de Parâmetros para Outorga de Mananciais Subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio de Cachorro Oeste do Estado da Bahia. **Relatório Final**. Campina Grande-PB: 2002. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. 113 pp.

SCHUSTER, H.D.M.; SILVA, F.F.; TEIXEIRA, S.L.; BATISTA, L.H.G.; FREITAS, W.A. Estudos hidrogeológicos do aquífero Urucuia no Oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, Florianópolis-SC, 2002, **Anais**. 15 pp.

SGARBI, G.N.C. **Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro-RJ, 1989. 324p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SPIGOLON A.L.D.; ALVARENGA C.J.S. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, 32(4): 579-586. 2002.

TSCHIEDEL M.W. **Aplicação de estudo geofísico como contribuição ao conhecimento da tectônica da Sub-Bacia Urucuia**. Brasília-DF, 2004. 76p. Dissertação de Mestrado n° 185. IG-UnB.

CAPÍTULO 4

**ARTIGO 3: CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E
HIDRÁULICA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA
MERIDIONAL COM BASE EM TESTES DE AQUÍFERO E
LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS ELÉTRICOS**

Resumo

Levantamentos geofísicos executados através de 65 sondagens elétricas verticais integrados a testes de aquífero deram suporte a uma modelagem hidrodinâmica e estruturação regional do Sistema Aquífero Urucuia Meridional, nas bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado. O aquífero forma-se predominantemente por camadas de arenitos com diferentes resistividades, apresentando em sua porção inferior níveis mais condutivos, representados pelas litologias do Grupo Bambuí. A espessura saturada aumenta de leste para oeste, alcançando mais de 500 m na borda da Serra Geral. O fluxo da água subterrânea é de oeste para leste, exceto no extremo oeste onde ocorre um divisor de água subterrânea na bacia hidrogeológica. Os parâmetros hidrodinâmicos revelam dois tipos de aquíferos: o inferior do tipo confinado, representado pela Formação Posse, com alto potencial hidrogeológico e vazões maiores que 300 m³/h, utilizado predominantemente para irrigação. Possui transmissividade (T) variando de 10⁻¹ a 10⁻³ m²/s, condutividade hidráulica (K) entre 10⁻⁴ a 10⁻⁶ m/s e coeficiente de armazenamento (S) da ordem de 10⁻⁴. Já o superior, do tipo não-confinado, é representado pela Formação Serra das Araras, com potencial hidrogeológico variando de baixo a médio e vazões menores que 15 m³/h, utilizado predominantemente para abastecimento doméstico. Apresenta T variando de 10⁻⁴ a 10⁻⁵ m²/s, K entre 10⁻⁶ a 10⁻⁷ m/s e S da ordem de 10⁻² a 10⁻³. Seu fluxo de base mantém a perenidade da rede de drenagem durante a recessão das chuvas. Os níveis

silicificados e fraturados da Formação Serra das Araras comportam-se como uma camada semipermeável, confinando o sistema aquífero em profundidade.

Palavras-chave: sondagens elétricas verticais, testes de aquífero, modelagem hidrodinâmica, parâmetros hidrodinâmicos, níveis silicificados.

Abstract

Geophysical surveys obtained through 65 vertical electrical soundings integrated to the results of aquifer tests supported a hydrodynamic modeling and regional structuring of the Southern Urucua Aquifer System in Formoso and Arrojado watersheds. The aquifer is formed predominantly by sandstone layers with different resistivity, with more conductive levels in its lower portion, what is represented by Bambuí Group lithologies. The saturated thickness increases from east to west, reaching more than 500 m in Serra Geral border. The groundwater flows from west to east, except in the far west where there is a groundwater divisor in the hydrogeological basin. The hydrodynamic parameters reveal two kinds of aquifers: a lower one, classified as confined type and represented by Posse Formation, with high hydrogeological potential and flows higher than 300 m³/h, utilized predominantly for irrigation. Its transmissivity (T) varies from 10⁻¹ to 10⁻³ m²/s, its hydraulic conductivity (K) between 10⁻⁴ to 10⁻⁶ m/s, and storage coefficient (S) of the order of 10⁻⁴. The superior one is classified as a non-confined type, and it is represented by Serra das Araras Formation with a hydrogeological potential varying from low to medium and flows lower than 15 m³/h, mainly utilized for domestic supplying. It displays T varying from 10⁻⁴ to 10⁻⁵ m²/s, K between 10⁻⁶ to 10⁻⁷ m/s, and S of the order of 10⁻² to 10⁻³. Its base flow maintains the drainage network perennality in the rainfall recession. The silicified and fractured levels of Serra das Araras Formation behave as a semipermeable layer confining the aquifer system in depth.

Keywords: vertical electrical sounding, aquifer tests, hydrodynamic modeling, hydrodynamic parameters, silicified levels.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) (GASPAR 2006) representa um dos mais importantes mananciais de água subterrânea do Brasil, distribuindo-se por seis estados brasileiros (Bahia, Tocantins, Minas Gerais, Piauí, Maranhão e Goiás), com área de aproximadamente 120.000 km². A espessura do pacote sedimentar pode atingir valores máximos acima de 600 m (GASPAR et al., 2012). Este sistema é responsável pela perenidade de vários afluentes nas bacias hidrográficas dos rios São Francisco e Tocantins, durante todo o período de estiagem, entre os meses de abril e outubro, sendo responsável por cerca de 90% da descarga de base dos rios da região oeste da Bahia (PIMENTEL et al., 2000). Desse modo, estima-se que uma possível utilização, em larga escala, das águas subterrâneas do SAU interfira diretamente no volume de água que esco superficialmente nos rios das bacias hidrográficas supracitadas, causando modificações geo-ambientais significativas (AQUINO et al., 2003).

Nos últimos 30 anos, a região oeste do estado da Bahia vem experimentando um acelerado processo de expansão de atividades agroindustriais e crescimento urbano, se tornando um dos importantes polos para o desenvolvimento do país, destacando-se a implantação de culturas irrigadas (*e.g.* café, milho, arroz, algodão, frutas, etc). Dessa forma, a demanda por água para irrigação tem sido crescente a ponto de alguns mananciais superficiais (*e.g.* rio das Fêmeas, rio Grande) estarem, desde o ano de 2003, com a sua disponibilidade hídrica para outorga esgotada, fato que tem levado

os segmentos produtivos a intensificar a exploração e uso das águas subterrâneas através da perfuração de poços profundos (SCHUSTER et al., 2002).

Este trabalho tem como objetivo a caracterização geométrica e hidráulica do segmento meridional do SAU, contribuindo para o entendimento dos mecanismos que atuam na dinâmica de fluxo do aquífero e de suas interconexões com a rede de drenagem superficial nas bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado, a partir da determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, ou seja, a transmissividade (T), a condutividade hidráulica (K) e o coeficiente de armazenamento (S) e de levantamentos geofísicos elétricos. Os resultados desta pesquisa deverão contribuir para o aprimoramento das políticas de gestão e uso das águas na região oeste da Bahia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos de campo envolveram a obtenção de informações e dados sobre o SAU, levantamentos geofísicos elétricos e realização de testes de aquífero em poços tubulares existentes. Após o cadastramento e nivelamento topográfico dos poços selecionados para compor uma rede de monitoramento com auxílio de um GPS geodésico, foram executadas medidas da profundidade do nível freático em 34 poços selecionados em períodos chuvosos e de estiagem.

Os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos através da realização de testes de aquífero em poços parcialmente penetrantes e pré-selecionados nas fazendas COBA (Companhia do Oeste da Bahia) e Buriti, localizados nas bacias hidrográficas do rio Formoso e Arrojado, respectivamente. O teste na fazenda COBA teve duração de 24 horas, com bombeamento do poço PT-33 (232 m de profundidade) e acompanhamento do rebaixamento e pressão atmosférica no piezômetro PO-33 (70 m de profundidade), situado a 22 m do poço PT-33 e posterior recuperação do nível dinâmico

com duração de 24 horas. Já o teste na fazenda Buriti envolveu 21 horas de bombeamento do poço PT-127 (100 m de profundidade), com observação da evolução dos rebaixamentos dos níveis d'água e da pressão atmosférica no piezômetro PO-127 (70 m de profundidade), situado a uma distância de 22 m do poço PT-127 e recuperação do nível dinâmico com duração de 3 horas (Figura 1). Na prática, a impossibilidade de interrompimento do abastecimento de água na fazenda Buriti por um período de tempo necessário para que o poço PT-127 (em regime de operação) e o PO-127 voltassem a uma condição de equilíbrio, dificultou as operações em campo.

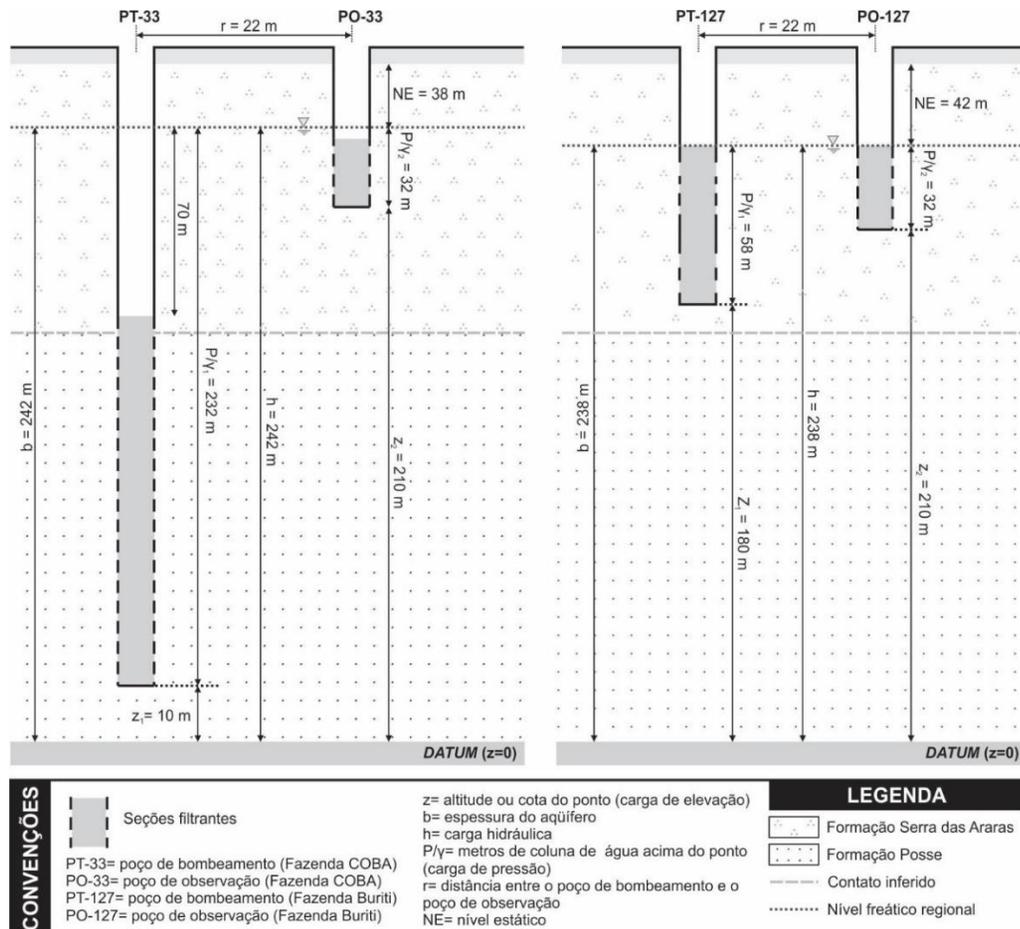


Figura 1 - Configuração dos poços utilizados nos testes de aquíferos realizados nas fazendas COBA e Buriti, ilustrando os parâmetros de penetração em relação à espessura do aquífero.

Figure 1 - Well configuration used in aquifer tests in COBA and Buriti farms illustrating the penetration parameters in relation to aquifer thickness.

A vazão de bombeamento registrada pelo método de ultrassom no teste da fazenda COBA foi de 399 m³/h, enquanto na fazenda Buriti foi de 10,8 m³/h obtida pelo método volumétrico. A evolução dos rebaixamentos dos níveis d'água e da pressão atmosférica foi registrada através do uso de sensores eletrônicos instalados nos poços de bombeamento e piezômetros. O tratamento dos dados dos testes de aquífero foi realizado através do *software AquiferTest 4.0* da *Waterloo Hydrogeologic Inc.*, utilizando os métodos de Theis (1935) e Neuman (1975), para aquíferos confinado e livre, respectivamente.

Os levantamentos geofísicos foram executados através de 65 sondagens elétricas verticais (SEV) de resistividade, executadas com o arranjo de eletrodos *Schlumberger* expandidos até um espaçamento AB/2 máximo de 1.000 m, utilizando os sistemas SYSCAL R-2 e SYSCAL-PRO, da *Iris Instruments*. Os dados obtidos foram invertidos utilizando-se modelos unidimensionais através dos *softwares* RES1D da *Geotomo Softwares*, para compor os modelos estruturais iniciais a serem submetidos à inversão e RESIST 1.0 para efetuar a inversão não-linear por mínimos quadrados (LIMA 2007; KOEFOED 1979; VOZOFF 1958).

3. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

O SAU (GASPAR 2006, GASPAR & CAMPOS 2007) constitui uma associação de unidades aquíferas que ocorrem no domínio da sequência das rochas siliciclásticas do Grupo Urucua, formadas a partir de sedimentação neocretácea em ambientes eólico e fluvial, associados às coberturas fanerozoicas do Cráton do São Francisco denominada de bacia intracontinental Sanfranciscana (SGARBI 1989). Duas unidades hidro-litoestratigráficas principais são reconhecidas, basal e superior denominadas de Formação Posse e Serra das Araras,

respectivamente, depositadas, na área de estudo, sobre o sistema cárstico-fissural, representado pelas sequências de rochas pelítico-carbonáticas neoproterozoicas do Grupo Bambuí e terrenos granito-gnáissicos de idade Arqueno/Paleoproterozoica do complexo gnáissico-migmatítico de Correntina (CAMPOS & DARDENNE 1997a, b) (Figura 2). O contato entre as Formações Posse e Serra das Araras é abrupto, através de uma superfície erosiva, considerada por Spigolon & Alvarenga (2002) como uma megassuperfície dentro do ambiente deposicional do Grupo Urucuia. A Fm. Posse é constituída essencialmente por arenitos róseos a avermelhados, granulometria fina a média, grãos subarredondados a arredondados, boa esfericidade e bem selecionados, com estratificações cruzadas de grande porte. Normalmente, são friáveis e localmente silicificados nas porções do topo, próximo ao contato com a Fm. Serra das Araras. Apresenta espessura aflorante de até 120 m, na região de Posse-GO. Já a Fm. Serra das Araras é constituída por ciclos de sedimentação superpostos e composta por conglomerados, arenitos e siltitos, intercalados em bancos plano-paralelos, com espessuras de até 2 m. Na base da sequência, os níveis conglomeráticos (de até 50cm) são avermelhados, com seixos de quartzo, quartzitos, arenitos da própria sequência e feldspatos caolinizados. Os arenitos predominam, sendo polimodais, silicificados, vermelhos e com níveis amarelados. Na base destes, estratificações cruzadas acanaladas de pequeno porte são observadas, modificando-se em direção ao topo para estratos plano-paralelos. Na porção superior ocorrem horizontes pelíticos avermelhados de até 50 cm, que se dispõem brechados e com gretas de ressecamento. Essa unidade, normalmente, dispõe-se com intensa cimentação por sílica e óxido de ferro. Apresenta espessuras totais variáveis, podendo alcançar até 150 m (BORGES et al., 1992; CAMPOS & DARDENNE 1997a; CAMPOS & DARDENNE 1999; SPIGOLON & ALVARENGA 2002).

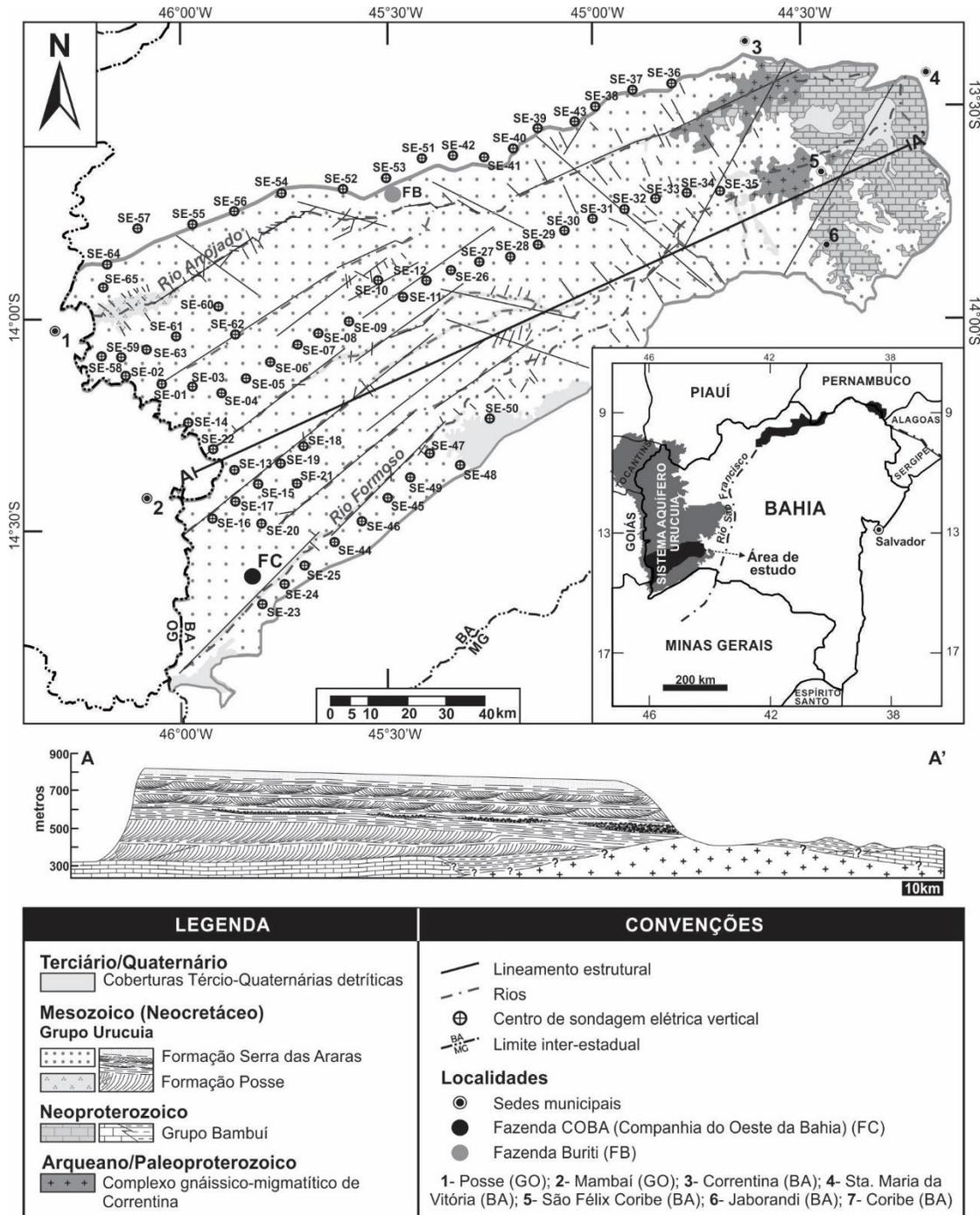


Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo, destacando a localização dos centros de sondagens elétricas verticais e poços onde foram realizados os testes de aquífero.

Figure 2 - Geological map of the studied area highlighting the location of centers of vertical electrical sounding and wells where the aquifer tests were performed.

A geometria e arranjo lito-estrutural das unidades aquíferas, os levantamentos gravimétricos e eletromagnéticos regionais e as investigações de resistividade e polarização elétrica induzida

indicam variações de espessura desde alguns metros, podendo atingir valores da ordem de 600 m no depocentro da bacia (AMORIM JR. & LIMA 2007; BONFIM & GOMES 2004, GASPAR et al., 2012; TSCHIEDEL 2004). A presença de zonas silicificadas e fraturadas, seu posicionamento geográfico e espacial e as variações hidrodinâmicas das unidades aquíferas, possibilitam a diferenciação do SAU em quatro subtipos aquíferos, denominados: livre regional, confinado, livre com níveis estáticos profundos e suspenso local (GASPAR & CAMPOS 2007). No SAU meridional são reconhecidos os subtipos livre regional e confinado, associados às formações Serra das Araras e Posse, respectivamente, além do livre com níveis estáticos profundos posicionados no extremo oeste da área. Os aquíferos suspensos apresentam distribuição local, em função da presença de níveis silicificados rasos e de limitada extensão que retardam a drenagem vertical da água.

Os testes de aquífero realizados em diferentes posições geográficas do SAU, nos dois principais tipos de aquíferos, revelam altos valores de transmissividade (10^{-2} - 10^{-3} m²/s) e coeficiente de armazenamento da ordem de 10^{-4} para o aquífero confinado (NASCIMENTO 2003; SCHUSTER et al., 2002; SCHUSTER et al., 2003; GASPAR & CAMPOS 2007), com obtenção de grandes vazões, pequenos rebaixamentos observados nos poços e raios de influência extensos (acima de 2.500 m), acarretando em interferências entre os poços e desses com os cursos de águas superficiais nas épocas de estresse hídrico (meses de maio a outubro). Já o sistema livre regional apresenta menores valores de transmissividade (10^{-4} - 10^{-5} m²/s) e coeficiente de armazenamento entre 10^{-2} e 10^{-3} (Tabela 1). Dessa forma, as variações observadas na transmissividade ocorrem provavelmente devido a modificações na espessura saturada e/ou mudanças na condutividade hidráulica do aquífero.

Tabela 1 - Sumário dos parâmetros hidrodinâmicos regionais em sub-bacias hidrográficas do Sistema Aquífero Urucuia.

Table 1 - Summary of regional hydrodynamic parameters in Urucuia Aquifer System watersheds.

Localização	Unidade Aquífera	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	S*	Método	Ref.
Bacia rio do Cachorro	Fm. Posse	-	1,6 x 10 ⁻²	1,0 x 10 ⁻⁴	2,6 x 10 ⁻⁴	Cooper/Jacob	1
		-	1,6 x 10 ⁻²	1,1 x 10 ⁻⁴	1,5 x 10 ⁻⁴	Cooper/Jacob (Recup.)	
Bacia rio de Janeiro		-	1,6 x 10 ⁻²	-	2,7 x 10 ⁻⁴	-	2
		-	2,0 x 10 ⁻²		2,6 x 10 ⁻⁴		
Bacia rio das Fêmeas		-	1,5 x 10 ⁻²	6,7 x 10 ⁻⁵	7,5 x 10 ⁻⁴	Neuman	3
		-	1,7 x 10 ⁻²	6,9 x 10 ⁻⁵	3,0 x 10 ⁻⁴		
		-	1,7 x 10 ⁻²	4,4 x 10 ⁻⁴	5,9 x 10 ⁻⁴		
Bacias rio de Janeiro e rio das Fêmeas		9,71	8,9 x 10 ⁻³	2,5 x 10 ⁻⁵	1,0 x 10 ⁻⁴	Cooper/Jacob	4
		12,35	2,5 x 10 ⁻²	6,4 x 10 ⁻⁵	1,4 x 10 ⁻⁴		
		15,18	1,9 x 10 ⁻²	3,8 x 10 ⁻⁵	1,8 x 10 ⁻⁴		
Bacia rio Formoso	Fm. Serra das Araras	0,46	4,9 x 10 ⁻⁵	2,5 x 10 ⁻⁷	-	Neuman	5
		2,70	2,8 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻⁶	-		
		-	8,0 x 10 ⁻⁵	4,0 x 10 ⁻⁷	-		
		-	1,6 x 10 ⁻⁴	7,9 x 10 ⁻⁷	-		

Fonte: 1- Schuster et al., 2002; 2- Schuster et al., 2003; 3- Nascimento 2003, 4- Gaspar & Campos (2007), 5- Gaspar (2006). *Coeficiente de armazenamento específico (S_s) no caso do aquífero confinado da Fm. Posse e porosidade efetiva (S_y) no caso do aquífero livre regional da Fm. Serra das Araras. Q/s, capacidade específica; T, transmissividade; K, condutividade hidráulica; S, coeficiente de armazenamento; Recup, Recuperação; Ref, Referência.

A análise do mapa de fluxo de água subterrânea mostra três importantes aspectos: (i) as principais drenagens da região, dispõe-se num padrão paralelo de direção SSW-NNE, são rios consequentes e perenes cujas descargas de base constituem em grande parte ao volume de água restituído pelo SAU; (ii) o fluxo das águas subterrâneas ocorre preferencialmente de SSW para NNE e; (iii) uma compartimentação do SAU por meio de um divisor de água subterrânea, de direção aproximada N-S, dividindo o escoamento subterrâneo a leste em direção à bacia do rio São Francisco e a oeste em direção à bacia do rio Tocantins (Figura 3).

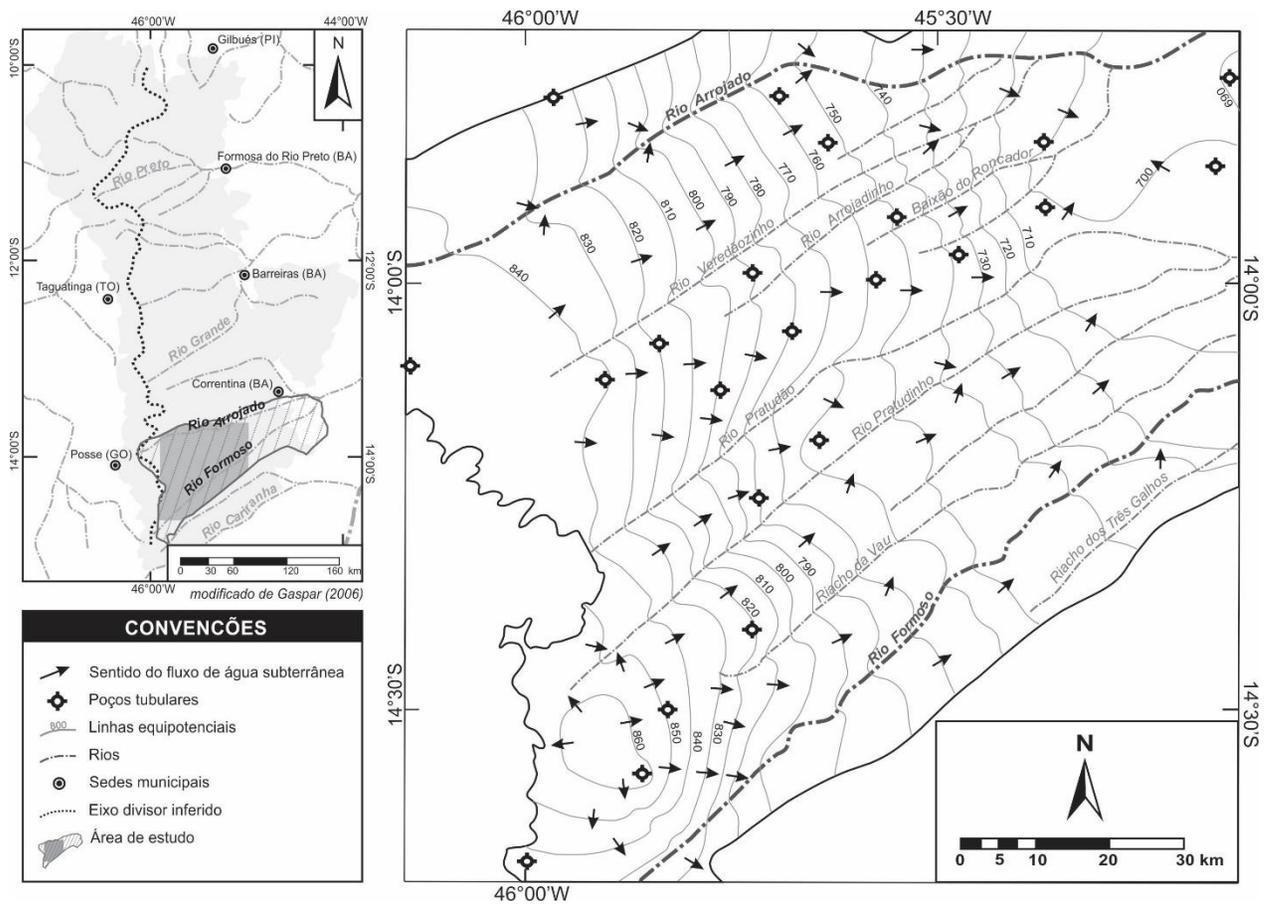


Figura 3 - Mapa potenciométrico e de fluxo de água subterrânea no segmento oeste das bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado.

Figure 3 – Potentiometric and groundwater flow map in Formoso and Arrojado watersheds western segment.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização geofísica

O conhecimento da profundidade e espessura das unidades geológicas é de grande importância nos estudos que envolvem a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual e compõem, em geral, sua dimensão vertical (ANDERSON & WOESSNER 1992). Esses parâmetros podem ser obtidos de maneira direta através dos perfis geológicos de poços, que nem sempre apresentam essas

informações com o grau de precisão exigido para os estudos hidrogeológicos e, de modo indireto, utilizando-se de métodos geofísicos, cuja aplicação depende do conhecimento da geologia local.

Na área estudada, os poços possuem uma distribuição irregular, suas profundidades em geral, não atravessam toda a espessura do aquífero e a maioria dos dados de perfis litológicos não é confiável.

Dessa forma, foram realizadas SEV's de resistividade em 65 pontos selecionados, de forma a complementar as informações dos perfis de poços ou produzir dados onde inexistem poços. A maioria das SEV's localiza-se ao longo das rodovias principais e secundárias, numa configuração espacial suficiente para representar os resultados em termos de quatro seções geoeletricas (Figura 4). As sondagens SE-23 e SE-53 foram utilizadas para estimar as espessuras do sistema aquífero nas vizinhanças dos poços onde foram realizados os testes de aquífero nas fazendas COBA e Buriti, respectivamente, de forma a reduzir a ambiguidade da interpretação geoeletrica final.

As SEV's efetuadas apresentam comportamento regular e suave, compatível com modelos estratificados de camadas sub-horizontais. Todavia, algumas curvas apresentaram fortes deslocamentos de ramos quando da mudança dos eletrodos de potencial M e N, devido a variações laterais na resistência de contato com os solos subsaturados em água, necessitando, para tanto, um processamento de redução, de maneira a deslocar numericamente os ramos afetados por valores constantes.

Curvas geoeletricas teóricas foram ajustadas às medidas de resistividades aparentes até alcançarem erros quadráticos médios inferiores a 2%. Durante o processo de inversão a profundidade do nível freático foi fixada e as resistividades e profundidades das camadas foram obtidas (LIMA 2007).

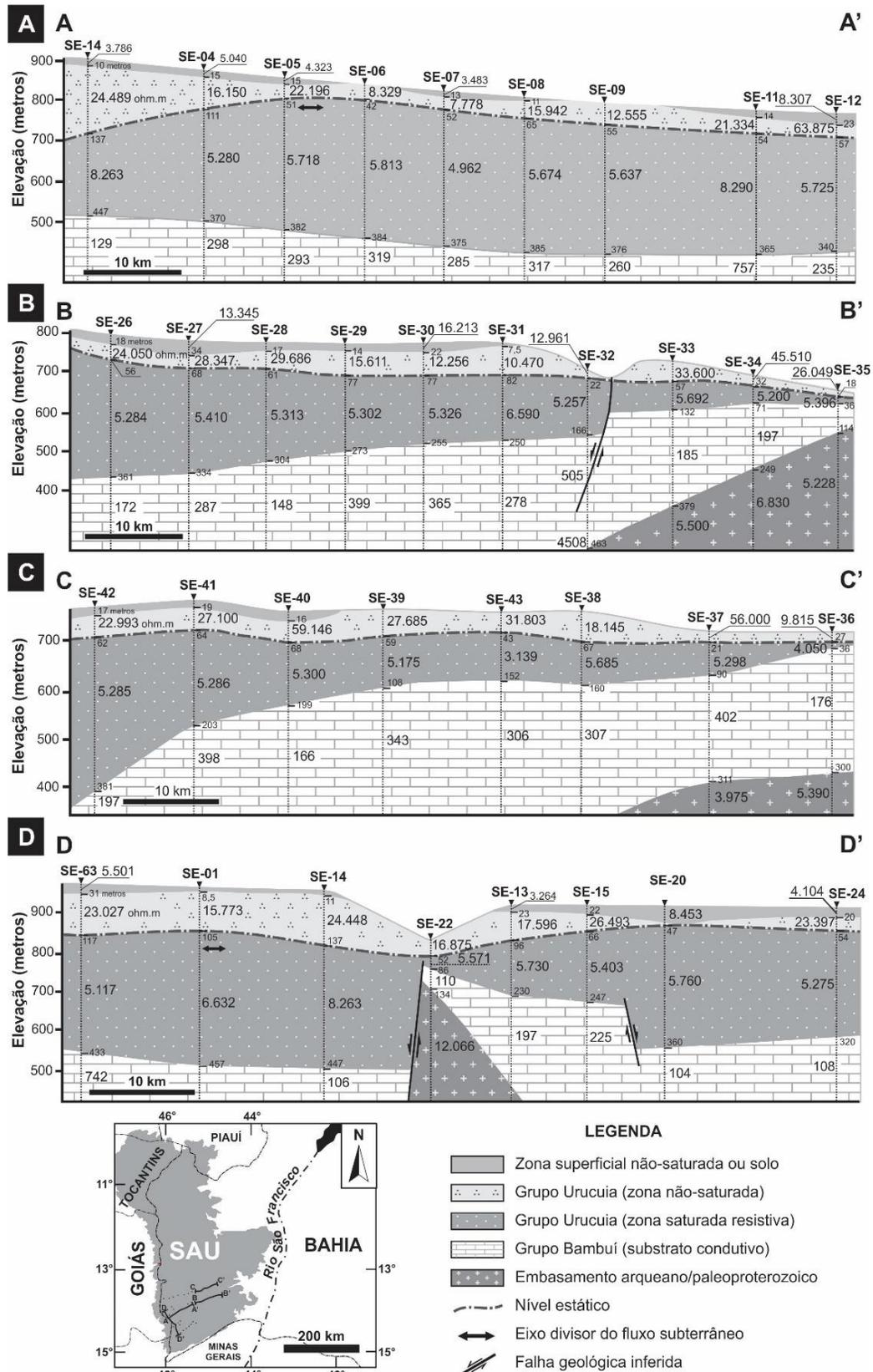


Figura 4 - Seções geoeletricas construídas com base nas sondagens elétricas indicadas (reinterpretado de Lima 2007).
Figure 4 - Geoelectrical sections constructed based on indicated electrical soundings (reinterpreted from Lima 2007).

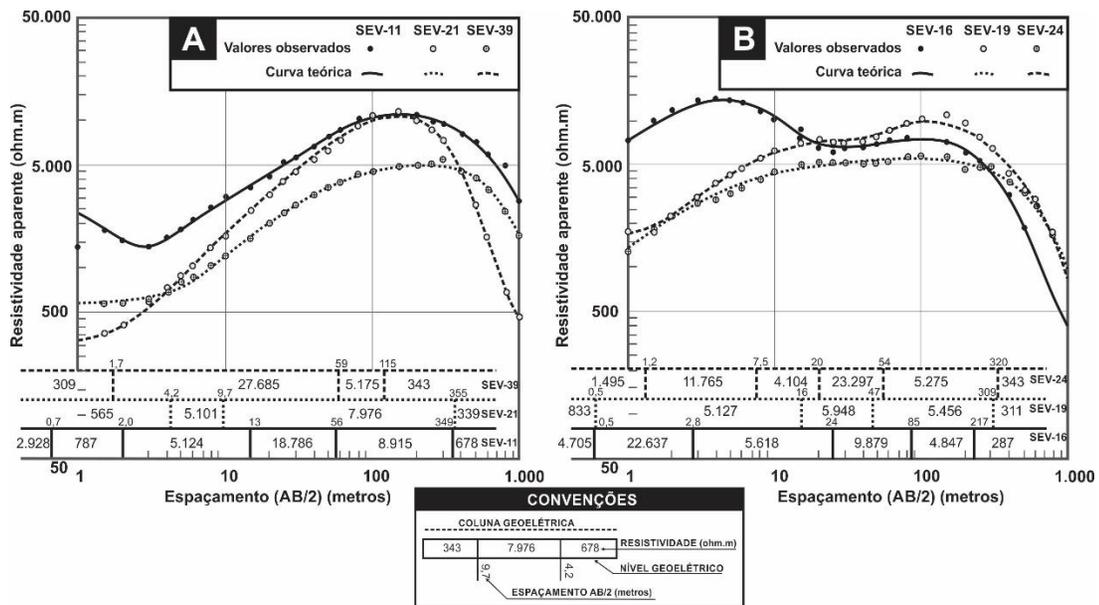


Figura 5 - Curvas geoeletricas representativas da área estudada exemplificando os procedimentos de ajuste e interpretação dos dados: A) (SE-11, SE-21, SE-39) e B) (SE-16, SE-19, SE-24) (modificado de Lima 2007).

Figure 5 - Geoelectrical curves representative of the studied area exemplifying the adjustment procedures and interpretation of data: A) (SE-11, SE-21, SE-39) and B) (SE-16, SE-19, SE-24) (modified from Lima 2007).

A maioria das curvas de resistividade apresenta uma forma de dupla de colinas com uma depressão central, refletindo as variações litológicas do Grupo Urucua (Figura 5). Este padrão é corroborado por trabalhos anteriores realizados na porção central do SAU, nas bacias hidrográficas do rio das Fêmeas e do Cachorro (*e.g.* AMORIM JÚNIOR & LIMA 2007, LIMA 2000). Os altos valores de resistividade encontrados indicam tratar-se predominantemente de arenitos com as colinas correspondendo a pacotes arenosos mais limpos, representado provavelmente pela zona não-saturada e níveis silicificados, respectivamente. A depressão central se deve a uma redução na resistividade do aquífero, associada a intercalações argilosas ou variações locais de porosidade no aquífero livre da Fm. Serra das Araras. Quase todas sondagens apresentam ramos terminais descendentes indicando a existência de um substrato regional mais condutor, suportando os pacotes arenosos.

Seções geoeletricas foram construídas a partir dos dados de resistividade, equidistantes em média de 8 km. Ilustram a representação da estrutura geológica do aquífero (Figura 4). As seções

longitudinais A-A' e B-B' combinadas foram confeccionadas a partir dos resultados obtidos de 9 e 10 sondagens elétricas, respectivamente, orientadas segundo a direção WSW-ENE (Figura 4-A,B). Essas, em conjunto, mostram que a espessura do SAU varia de mais de 500 m nas vizinhanças da escarpa da Serra Geral de Goiás, a pouco mais de 100 m no extremo leste do perfil.

Como substrato do SAU meridional, têm-se unidades condutoras, representadas pela sequência pelítica-carbonática do Grupo Bambuí. Já na porção extremo oriental (Figura 4-B,C), repousam sobre litologias mais resistivas, interpretado como o embasamento granito-gnáissico Arqueano-Paleoproterozoico do Complexo gnáissico-migmatítico de Correntina. Uma expressão da estrutura transversal (Figura 4-D) caracteriza provavelmente um hemi-gráben, com o pacote arenoso apresentando maiores espessuras no extremo oeste da sub-bacia e a presença de duas falhas com deslocamentos diferenciais estimados em 100 a 300 m, ao longo do qual o substrato do Grupo Urucua encontra-se soerguido.

Em todas as seções, observa-se que o nível freático varia de menos de 20 m nas proximidades dos vales, a mais de 180 m próximo a Serra Geral de Goiás, apresentando uma estreita relação com a topografia e revela a presença de um divisor do fluxo subterrâneo, separando o escoamento a leste em direção à bacia do rio São Francisco e a oeste em direção à bacia do rio Tocantins (Figura 4).

4.2. Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos

Os testes de aquífero surgiram principalmente da necessidade de se obter certas propriedades hidráulicas que avaliassem a disponibilidade de água subterrânea para os múltiplos usos. Dentre os principais métodos de interpretação úteis na determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do SAU meridional, se destacam aqueles para aquíferos confinados não-drenante em regime transitório,

desenvolvido por Theis (1935) e Cooper & Jacob (1946), além do método de Neuman (1975), desenvolvido para avaliação de aquíferos livres.

Na Figura 6 são apresentados os diagramas interpretativos dos testes de aquífero com base nos métodos de Theis (1935) e Neuman (1975), respectivamente. Os principais resultados obtidos revelam valores elevados de transmissividade (T), variando de 10^{-1} a 10^{-2} m²/s, condutividade hidráulica (K), da ordem de 10^{-4} m/s e coeficiente de armazenamento (S), variando entre 10^{-4} e 10^{-5} para a unidade inferior associado a Fm. Posse. Valores de T da ordem de 10^{-4} m²/s, K em torno de 10^{-6} m/s e S da ordem de 10^{-2} para a unidade superior, representado pela Fm. Serra das Araras (Tabela 2). O valor de S igual a $7,8 \times 10^{-6}$ não apresenta significado hidrogeológico, pois, tendo a recuperação do nível dinâmico, durante o teste, ocorrido num intervalo de 2 horas, a liberação da água nos primeiros instantes de bombeamento está associada à compactação do aquífero e expansão da água, comportamento semelhante a um aquífero confinado (Tabela 2).

Tabela 2 - Sumário dos parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Urucuia, obtidos dos testes de aquífero realizados nas fazendas COBA* e Buriti**

Table 2 - Summary of Aquifer Urucuia System hydrodynamic parameters obtained from aquifer tests conducted in COBA* and Buriti** farms.

Localização	Unidade Aquífera	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	S _s	Método
Bacia do Rio Formoso*	Aquífero Confinado (Fm. Posse)	-	$7,6 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	<i>Theis</i>
		-	$2,2 \times 10^{-1}$	$9,5 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-5}$	<i>Theis (recup.)</i>
Bacia do Rio Arrojado**	Aquífero Livre (Fm. Serra das Araras)	0,65	$5,2 \times 10^{-4}$	$9,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-2}$	<i>Neuman</i>
		0,65	$8,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$7,8 \times 10^{-6}$	<i>Neuman (recup.)</i>

Onde: Q/s, capacidade específica; T, transmissividade; K, condutividade hidráulica; S_s, coeficiente de armazenamento específico; Recup, recuperação.

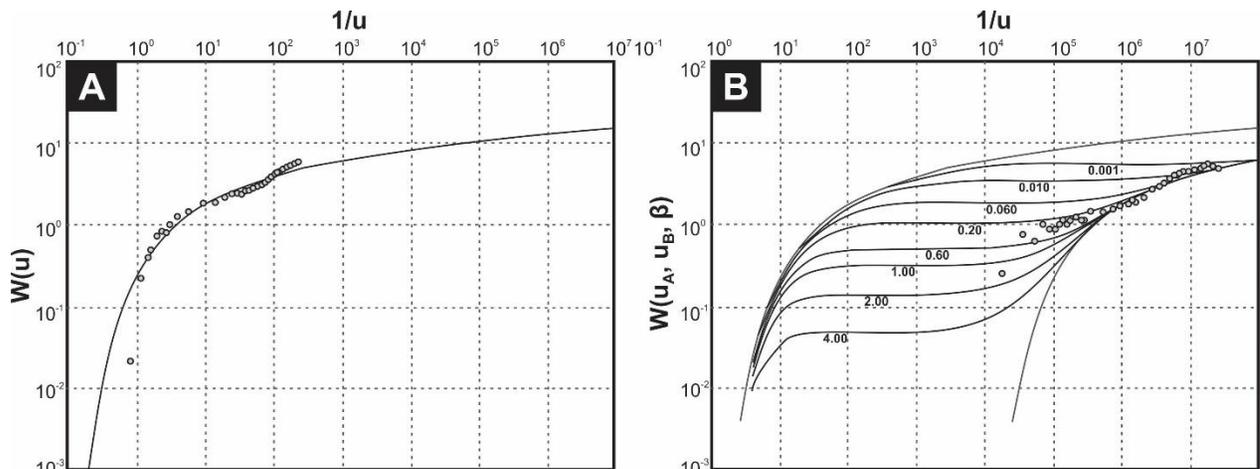


Figura 6 - Testes de aquífero realizados na fazenda COBA (A), interpretado pelo método de Theis (1935), e na fazenda Buriti (B), interpretado pelo método de Neuman (1975).

Figure 6 - Aquifer tests in the COBA farm (A), interpreted by the Theis method (1935), and Buriti farm (B), interpreted by Neuman method (1975).

Os parâmetros hidrogeológicos regionais (Tabela 1) (Schuster et al., 2002; Schuster et al., 2003; Nascimento 2003; Gaspar & Campos 2007; Gaspar 2006) indicam que os arenitos no domínio do SAU apresentam dois tipos de porosidade, representando diferentes unidades aquíferas, a saber: (i) aquíferos com porosidade primária intergranular associado aos arenitos finos, homogêneos, avermelhados e friáveis da Fm. Posse e às sequências de conglomerados, arenitos e siltitos da Fm Serra das Araras, compartimentados por (ii) aquitarde com porosidade por fratura, representado pelos níveis de arenitos silicificados impermeáveis e fraturados da Fm. Serra das Araras, de espessura variável e responsáveis pelo retardamento da drenagem vertical da água de recarga e confinamento do SAU em profundidade (Figura 7).

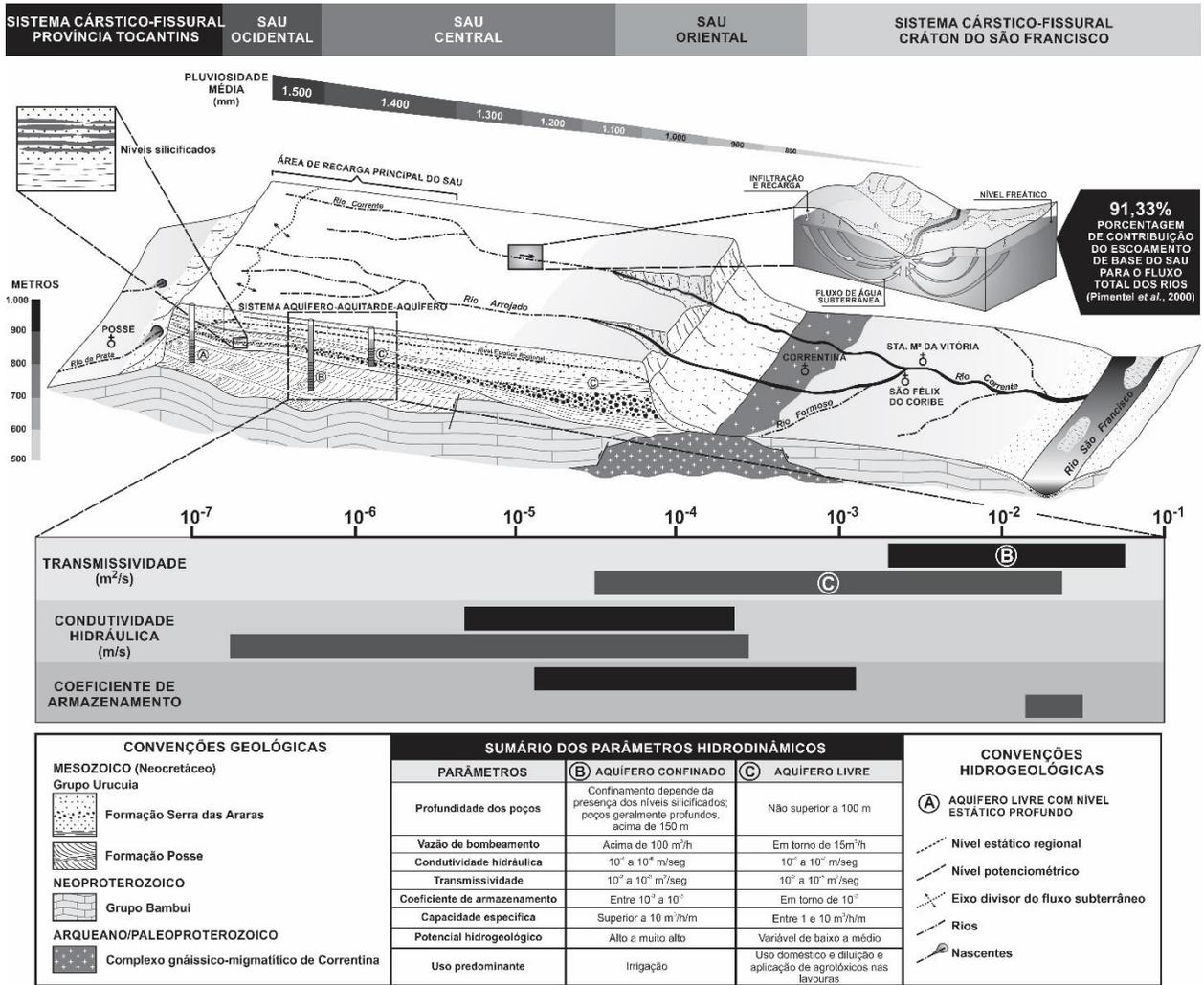


Figura 7 - Representação esquemática da hidrodinâmica associada aos aspectos geológicos/geofísicos da área estudada.

Figure 7 - Schematic representation of the hydrodynamics associated with geological/geophysical aspects of the studied area.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado, os testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos revelam que o SAU meridional comporta-se como um sistema aquífero-aquitarde-aquífero, representado pela Fm. Serra das Araras, níveis silicificados fraturados e Fm. Posse, respectivamente. A presença de subtipos de aquíferos se deve às variações hidrodinâmicas e litológicas do Grupo Urucuia.

Do ponto de vista geométrico, os dados geotécnicos permitem caracterizar a estrutura regional do SAU, expressa na forma de um hemi-gráben, composto predominantemente por arenitos, com espessuras variando de mais de 500 m no extremo oeste e diminuindo progressivamente à medida que alcança a porção oriental. Os níveis estáticos variam de menos de 20 m nas proximidades dos vales a mais de 180 metros próximo ao limite físico da Serra Geral de Goiás. Neste último, os poços apresentam níveis estáticos profundos, fruto de um divisor de águas subterrâneas, que tem o seu fluxo de base contribuindo para a alimentação dos rios do sistema cárstico-cristalino da bacia do rio Tocantins, a oeste, e da bacia do rio São Francisco, a leste.

Os resultados dos levantamentos de campo, perfis lito-estratigráficos dos poços e o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos T, K e S indicam a existência de duas unidades aquíferas principais no SAU meridional: uma inferior, do tipo confinado, representado pela Fm. Posse, onde a compactação do aquífero e a descompressão da água são os principais mecanismos de liberação da água subterrânea, que ocorre devido à diminuição da pressão hidrostática devido ao bombeamento. Esta unidade apresenta poços produtores utilizados em projetos de irrigação em pivôs centrais, com vazões de exploração acima de 300 m³/h, pequenos rebaixamentos observados nos poços, raios de influência extensos (acima de 2.500 m) e alto potencial hidrogeológico.

A presença dos níveis silicificados, fraturados e impermeáveis limita e confina a unidade inferior e, provavelmente, possibilita uma drenança ascendente para a unidade aquífera superior, do tipo livre, representado pela Fm. Serra das Araras, onde a água é liberada predominantemente pela drenagem gravitativa dos poros, com uma pequena participação da compactação do aquífero e descompressão da água nos instantes iniciais de bombeamento. É responsável pela perenidade e elevada vazão específica da rede de drenagem nos momentos de estresse hídrico. A água extraída

dessa unidade é utilizada principalmente para uso doméstico e na diluição e aplicação de agrotóxicos nas lavouras, através de poços com vazões de exploração em torno de 15 m³/h.

6. REFERÊNCIAS

AMORIM JÚNIOR V.; LIMA, O.A.L. Avaliação hidrogeológica do aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. **Revista Brasileira de Geofísica**. 25(2): 117-129. 2007.

ANDERSON M.P.; WOESSNER W.W. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic Press, New York, 381p. 1992.

AQUINO R.F.; NASCIMENTO K.R.F.; RODRIGUES, Z.R.; VIEIRA C.; MAIA P.H.P.; COSTA A.B. **Caracterização hidrogeoquímica e isotópica das águas superficiais e subterrâneas do Oeste baiano – bacia do rio das Fêmeas – Bahia**. Relatório Técnico. Salvador-BA: 2003. Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH), 20 p.

BONFIM L.F.C.; GOMES R.A.A. D. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura: Idéias para Discussão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XX, 2004, Cuiabá (MT), **Anais**. 1 CD-ROM.

BORGES M.S.; IGREJA H.L.S.; COSTA J.B.S.; HASUI Y. Faciologia e Tectônica da Formação Urucuia na Região de Dianópolis, Sudeste do Estado do Tocantins. **Geociências**, São Paulo, 11(1): 7-18. 1992.

CAMPOS J.E.G.; DARDENNE M.A. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, 27: 269-282. 1997a.

CAMPOS J.E.G.; DARDENNE M.A. Origem e evolução tectônica da bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, 27: 283-294. 1997b.

CAMPOS J.E.G.; DARDENNE M.A. Distribuição, estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Urucua – Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. **Geociências**, São Paulo, 18(2): 481-499. 1999.

COOPER H.H.; JACOB C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. **Transactions**, American Geophysical Union. 27: 526-534. 1946.

GASPAR M.T.P. **Sistema Aquífero Urucua: Caracterização Regional e Propostas de Gestão**. Brasília-DF. 2006. 158p. Tese de doutorado n° 76. IG-UnB.

GASPAR M.T.P.; CAMPOS J.E.G. O Sistema Aquífero Urucua. **Revista Brasileira de Geociências**, 37(4): 216-226. 2007.

GASPAR M.T.P.; CAMPOS J.E.G.; MORAES R.A.V de. Determinação das espessuras do Sistema Aquífero Urucua a partir de estudo geofísico. **Revista Brasileira de Geociências**, 42 (Suppl 1): 154-166. 2012.

KOEFOD O. **Resistivity Sounding Measurements: Geosounding Principles**. Methods in Geochemistry and Geophysics. Elsevier, Amsterdam, 276p. 1979.

LIMA O.A.L. Estudos geológicos e geofísicos do Aquífero Urucua na Bacia do Rio Cachorro - Oeste do Estado da Bahia. **Relatório técnico**. Salvador-BA: 2000. Superintendência de Recursos Hídricos- SRH/ Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia-CPGG/UFBA. 42p.

LIMA O.A.L. Levantamentos Geofísicos no Aquífero Urucua: Sub-bacias dos Rios Formoso e Arrojado, Bahia. **Relatório técnico**. Salvador-BA: 2007. Universidade Federal da Bahia/ Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia- CPGG/UFBA. 37p.

NASCIMENTO K.R.F. (coord.). Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas- Bahia. **Relatório Final**. Salvador- BA: 2003. ANA/ GEF/PNUMA/OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). 208p.

NEUMAN S.P. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifer considering delayed gravity response. **Water Resources Research**, 11:329-342. 1975.

PIMENTEL A.L.; AQUINO R.F.; SILVA R.C.A.; VIEIRA C.M.B. **Estimativa da recarga do aquífero Urucuia da sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas**. In: 1º CONGRESSO SOBRE APROVEITAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM PAÍSES DE IDIOMA PORTUGUÊS, 2000, Rio de Janeiro - RJ, 11p.

SCHUSTER H.D.M.; SILVA F.F.; TEIXEIRA S.L.; BATISTA L.H.G.; FREITAS W.A. **Estudos hidrogeológicos do aquífero Urucuia no Oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2002, Florianópolis-SC. 15p.

SCHUSTER H.D.M.; SILVA F.F.; ARAÚJO H.D.B. Modelagem do fluxo subterrâneo com vistas a definição dos parâmetros para outorga de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do rio do Cachorro – Oeste do Estado da Bahia. **Relatório Parcial** nº1. UFPB. Campina Grande-PB: 2003. 13p.

SGARBI G.N.C. **Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro (RJ). 1989. 324p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SPIGOLON A.L.D.; ALVARENGA C.J.S. de. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, 32(4): 579-586. 2002.

THEIS C.V. The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using groundwater storage. **Transactions**, American Geophysical Union. 16: 519-524. 1935.

TSCHIEDEL M.W. **Aplicação de estudo geofísico como contribuição ao conhecimento da tectônica da Sub-Bacia Urucuia**. Brasília-DF, 2004. 76p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

VOZOFF K. Numerical resistivity analysis: Horizontal Layers. **Geophysics** 23: 536-556. 1958.

CAPÍTULO 5**ARTIGO 4: HYDROCHEMICAL AND STABLE ISOTOPIC
DATA ($\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$) IN THE CHARACTERIZATION OF
HYDROLOGIC DYNAMICS OF THE SOUTHERN AQUIFER
SYSTEM, BRAZIL**

1 Abstract

2

3 The integration of hydrogeochemical and isotopic data ($\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$) allowed the reconstruction of
4 the hydrological dynamics of Urucuia Aquifer System in its Southern portion. This system is a
5 combination of aquifers that are responsible for the perennity of the rivers during the rainy
6 recession. In this study, water samples were collected from three sources: rainfall, rivers and
7 pumping wells. The hydrogeochemical data lead to subdivide the aquifers in three main types:
8 regional unconfined, confined, and unconfined with deep static level. The occurrence of silicified
9 and fractured levels represents a mixing and interfaced zone, allowing a leakage between aquifers
10 and a great variability of hydrogeochemical facies. The hydrogeochemical evolution occurs by
11 local, intermediate and regional flow systems. The buildup of dissolved solids is the major
12 controlling mechanism of the groundwater composition represented by the systematic changes of
13 anion species from HCO_3 to SO_4 to Cl , and cationic exchange between Ca and Na . The discharge
14 occurs through the baseflow of rivers, which have hybrid composition between regional
15 unconfined and confined aquifer from Na-Ca-Cl to Na-Cl . The analysis of stable isotopes shows
16 that the surface water and groundwater are located in the same range of values, what indicates a
17 connection between the reservoirs. During the rainy season, the groundwater isotopic

18 composition becomes similar to the precipitation isotopic composition, with the main recharge
19 occurring mostly by direct infiltration of rainwater. However, there is a modification of this
20 composition in the dry season due to strong isotopic enrichment caused by the evaporation
21 process. The seasonal variation in the isotopic composition represents a continuous cycle. In
22 other words, as the rainy season approaches, the atmospheric air column becomes increasingly
23 saturated with water vapour, what results in a considerably diminishment of evaporation.

24

25 Keywords: Southern Urucuia Aquifer System, hydrogeochemical facies, hydrogeochemical
26 evolution, stable isotopes.

27

28 1. Introduction

29

30 The Urucuia Aquifer System (UAS) (Gaspar, 2006) is the most important hydrogeologic unit in
31 Sanfransiscana basin. It is responsible for the perennality of the rivers throughout the dry season,
32 which occurs from April to October. This region has shown, over the years, an increasing water
33 demand for socio-economic development, factor that affects the volume of water flowing on the
34 surface, resulting in significant geoenvironmental change. The most relevant impact is the
35 depletion of grantable capability of surface water sources (Aquino et al., 2003). Thus, some
36 production segments are turning to the drilling of deep wells, requiring the generation of new
37 technical and scientific knowledge for the rational use of each source, in order to establish a
38 balance between surface and groundwater systems.

39 In recent decades, the hydrochemical aspect and the quality of the water in the UAS have
40 received the attention of some researchers (e.g., Aquino et al., 2002; 2003). However, there are

41 few studies related to the application of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) (e.g., Nascimento et al.,
42 2003). The range of this paper lies on this last issue, with the objective of outlining an UAS
43 characterization, focusing the hydrological dynamics in its southern portion – Formoso and
44 Arrojado river basins – through the identification and quantification of the major chemical
45 constituents, properties of rainwater, surface water and groundwater, and analysis of stable
46 isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$). These applications allow the reconstruction of the local hydrological
47 cycle from its origin as precipitation, passing through the recharge process and reaching its
48 occurrence in the aquifer, ending in the groundwater discharge.

49

50 2. Sampling and analytical methods

51

52 Hydrochemical and isotopic analyses ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) were obtained through secondary data
53 (CPRM, 2007), in the shallow groundwater wells, over four campaigns: two of them were
54 performed in groundwater with a low flow condition in the months of September/October 2005,
55 and May 2006. The other two analyses in December 2005 and November 2006, when the
56 groundwater presented a high flow condition.

57 The samples were collected from 39 wells and at 7 different points of the river in the UAS region.

58 Additionally, we collected two samples of regional rainfall. The sampling procedure in wells

59 consisted of purging the water well in consistent flows with its ability to recovery, allowing the

60 removal of stagnant water and the collection of a representative sample. Water samples for

61 chemical analyses were stored in polyethylene plastic bottles of 1.000 ml acidified with nitric

62 acid (for cations), and amber glass bottles of 1.000 ml acidified with sulfuric acid to the analyses

63 of the compounds of the nitrogenated series and phosphate. All samples were refrigerated.

64 Measurement of temperature, pH, conductivity, and dissolved oxygen took place in the field.
65 Geochemical analyzes were performed using the atomic absorption spectrometry (ASTM) at the
66 Institute of Geosciences of the Federal University of Bahia (UFBa), and the methodology
67 followed the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005).
68 In collection and storage of samples for determination of stable isotopes, amber glass bottles of
69 50 ml were used and the measurement $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$. These data were obtained using a mass
70 spectrometer (MAT Delta Plus model, Termo Finnigan), an automatic reactor (H-Device Thermo
71 Quest Finnigan) specific for the D/H ratio analyses, and automatic preparation system of online
72 samples (Gas Bench II Finnigan) specific to the analysis of $\delta^{18}\text{O}$, in the Nuclear Physics
73 Laboratory of the Institute of Physics (UFBa). The method CO_2 balance determined oxygen
74 isotope ratios, with an accuracy of $\pm 0.1\text{‰}$ (Epstein and Mayeda, 1953). Hydrogen isotope ratios
75 were determined by the method of reduction of Cr (Brand et al., 2000), with accuracy of 1‰ . The
76 $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values were reported in the delta notation, in part per thousand, and were
77 normalized using the international standard Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW).

78

79 3. Geomorphological and climatic characteristics

80

81 The rivers located in the studied area are part of a system of consequent stream from the left
82 margin of São Francisco river that sculpt a wide sandy platform by which the literature refers to
83 as "Chapadão Urucuia". The altitude values varies smoothly from 900 to 1000 meters in the state
84 of Goiás and from 600 to 700 meters in the state of Bahia, where the relief gentle slopes to east
85 (Nascimento, 1991).

86 This extensive plateau develops an accelerated process of mechanized agriculture with continued
87 irrigation, and extensive livestock activity, what results in the almost complete replacement of
88 natural vegetation in some locations. These factors have led to an intensive exploitation of water
89 which is collected either directly in the courses of the rivers, or it is extracted from the
90 underground storage via deep wells. In summary, agricultural development seems somehow to be
91 responsible for significant geoenvironmental changes, resulting in reducing the extent of
92 perennial flow of rivers and a sharp fall in the average flow (Pimentel et al., 2000).

93 In spite of its amplitude, the drainage network is rarefied and formed by rivers that have a semi-
94 parallel orientated drainage pattern along WSW-ENE direction, showing a regional structural
95 control, which is the surface expression of the hydrodynamic flow of the UAS (Fig. 1). Most
96 rivers are perennial and fed by the baseflow. They form broad floodplains with wide lowlands,
97 sometimes receiving contributions of short pluvial channels. In interfluve area, it is developed a
98 plain relief that sometimes is gently wavy, presenting very low slopes (i.e., between 0 and 8°) in
99 the direction W-E, with the highest altitudes in the western portion forming the drainage divide
100 between São Francisco and Tocantins rivers watersheds. In general, the interfluves have sandy
101 surface formations that facilitate the infiltration of rainwater. Currently, the most active
102 morphogenetic process is the runoff, with relocation and transportation of sand towards the lower
103 lands.

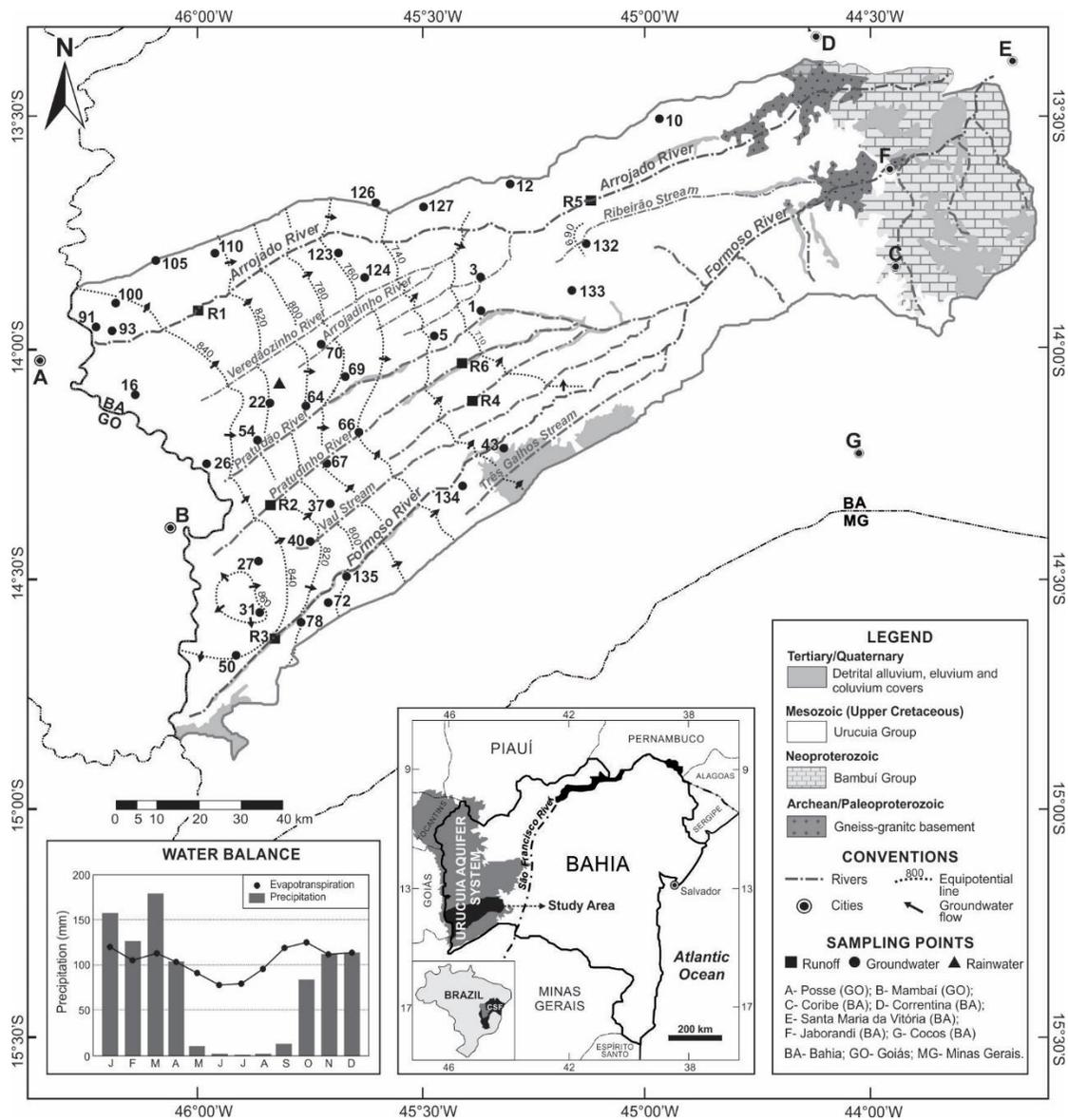
104

105

106

107

108



109

110 Fig. 1. Geologic map of the Formoso and Arrojado rivers watersheds highlighting the sampling

111 points of runoff, groundwater and rainwater, potentiometry and the groundwater flow (water

112 balance for Gatos rainfall station between 1945-1974).

113

114 The climate is Aw type according to Köppen (1948) (i.e., A - megathermal climate: average

115 temperature of the coldest month above 18°C, w - summer rain: less rainy month with

116 precipitation below 60 mm). The precipitation regime comprises isohyetal ranges between 800

117 and 1,500 mm, and the level of precipitation varies increasingly towards E-W. The average
118 annual temperature for the studied area is 23.2°C. The average maximum temperature is 32°, and
119 18°C the average minimum temperature. The relative humidity has a monthly average ranging
120 varying from 45% in August to 79% in December, with an average annual rate of 68%. The rainy
121 season occurs between early October and April, with November to January being the wettest
122 quarter (51% of total precipitation) linked to atmospheric currents of continental nature. From
123 May to September, it gets practically dry (4% of the total precipitation), but the rivers remain
124 perennial due to exudation of UAS (Gaspar, 2006).

125

126 4. Geologic and hydrogeologic setting

127

128 The studied area is located in Formoso and Arrojado rivers watersheds, in Sanfranciscana Basin
129 (Sgarbi, 1989, 2000), and São Francisco Craton (CSF). Both areas compose and integrate the
130 southern portion of the UAS (Gaspar, 2006; Gaspar and Campos, 2007), which is an association
131 of aquifers that occur in Urucuia Group domain. It is the main geological unit in this area
132 represented by a set of siliciclastic rocks of Upper Cretaceous age, deposited in a wide
133 intracontinental basin. In general, it is overlapped by the pelitic-carbonate sequence of Bambui
134 Group, and Archean-Paleoproterozoic granite-gneiss rocks in the eastern portion. Urucuia Group
135 is divided in two units: the basal unit called Posse Formation and the upper one, named Serra das
136 Araras Formation (Fig. 1) (Campos and Dardenne, 1997).

137 Posse Formation (Campos, 1996) consists of fine to medium eolian sandstone. It is pinkish to
138 reddish, friable and usually bimodal. It presents large-sized cross-stratification, and secondarily,
139 plan-parallel, what is characteristic of a desertic environment of dune fields.

140 Serra das Araras Formation consists of sequences of conglomerates, sandstones, and mudstones,
141 which have cementation of silica and iron oxides as an intense and common process. Each
142 individual sequence has its base formed by conglomeratic levels (up to 50cm) which are reddish,
143 with quartz, quartzites, and sandstones pebbles (formed by the reworking of the sequence itself),
144 and kaolinized feldspars. The mid-sequence is formed by silicified polymodal sandstones, reddish
145 with yellow levels, presenting a through cross-stratification and plan-parallel strata. At the top,
146 the pelitic horizon is reddish and its thickness is up to 50 cm. It is brecciated, and presents
147 desiccation cracks. The sequences represent superimposed sedimentation cycles in river
148 environments developed in wide plains with large range of discharge, probably wadi fans facies
149 (Borges et al., 1992; Campos and Dardenne, 1997a, 1999).

150 The contact of Posse and Serra das Araras Formations is abrupt, presenting an erosive surface
151 considered as a megasurface associated with climate change in Urucuia Group depositional
152 environment (Spigolon and Alvarenga, 2002).

153 Regarding the UAS, many questions are still under discussion, mainly related to geometry, depth
154 to the basement, potential, and water availability. Other important issue is the interference the
155 wells exert among themselves, and the interference exerted among the wells and the surface
156 waters due to produced pumping rates (Amorim Júnior and Lima, 2007; Barbosa et al., 2014;
157 Bonfim and Gomes, 2004; Nascimento, 2003; Pimentel, et al., 2000; Schuster et al., 2002).

158 In the current knowledge stage, the region UAS is considered uniform and homogeneous (Gaspar
159 and Campos, 2007; Schuster et al, 2010). Eodiagenetic processes and changes in sedimentation
160 pattern along its extent give the system important hydrodynamic changes and, consequently, the
161 differentiation of regional unconfined, perched, unconfined with deep water table, and confined
162 aquifers (Gaspar and Campos, 2007).

163 In the studied area, the regional unconfined and confined aquifer types are associated with Posse
164 and Serra das Araras formations, respectively. The main results of pumping tests conducted in
165 different geographical positions of the UAS reveal high transmissivity values (around 10^{-2} m²/s),
166 and storativity of 10^{-4} order for the confined aquifer. It were observed large flow rates (up to 200
167 m³/h) and small drawdowns in the wells with extensive radius of influence (above 2,500 meters),
168 resulting in interferences among the wells themselves, and between the wells and the surface
169 waters in periods of water stress (from May to October). The regional unconfined aquifer has
170 values of transmissivity ranging from 10^{-4} to 10^{-5} m²/s, and storativity of 10^{-2} order (Barbosa,
171 2009; Barbosa et al., 2014; Gaspar and Campos, 2007; Nascimento, 2003; Schuster et al., 2002).
172 The groundwater flow occurs preferably from SSW to NNE, with a compartmentalization of the
173 aquifer by a groundwater divide at the western end, approximately N-S direction, what separates
174 the groundwater flow to east toward the São Francisco River Basin and to west toward the
175 Tocantins River basin. This configuration shows an example of asymmetry between
176 hydrogeological and hydrographic basins (Arraes and Campos 2007, 2010; Barbosa et al., 2014).

177

178 5. Results and discussion

179

180 5.1. Hydrochemical characteristics

181

182 The statistical summary of the physico-chemical analysis of groundwater and surface water
183 (Table 1) shows a variation in the pH of 4.4 to 7.4, what indicates that the UAS waters varies
184 from neutral to slightly acidic. The low electric conductivity (EC) and total dissolved solids
185 (TDS) confirm that its poorly mineralized condition. Most of the samples presents values below

186 the limits of detection of the analytical method. The suitability of the surface water and
 187 groundwater for irrigation purposes assessed by the sodium adsorption ratio (SAR) parameter
 188 (Richards, 1954) results in low values – between 0.02 and 7.16 –, what characterizes a low risk of
 189 salinization (Table 1).

190

191 Table 1. Statistical summary of the physico-chemical analysis of groundwater and surface water
 192 of the Arrojado and Formoso rivers watersheds.

Item	Groundwater (*)				Surface water (*)				(**)	(***)
	Mean	Min	Max	S.D	Mean	Min	Max	S.D		
pH	5.73	4.37	7.40	0.71	5.13	4.20	6.56	0.51	4.01 – 7.68	6.50 – 8.50
TDS	15.34	<4.00	135.00	24.00	5.29	<4.00	12.00	2.03	4.00 – 164.00	1,000
EC	19.38	3.60	234.00	33.56	5.90	<4.00	13.00	2.56	2.40 – 124.00	-
Ca ²⁺	1.80	<0.10	41.00	5.61	0.44	<0.10	4.78	1.00	0,02 – 3,71	-
Mg ²⁺	0.17	<0.02	3.20	0.41	0.71	0.03	13.20	2.86	0.001-1.100	-
Na ⁺	0.33	<0.10	6.60	0.65	0.40	0.11	2.39	0.50	0.009 – 2.400	200
K ⁺	0.28	<0.10	1.20	0.15	0.48	<0.10	4.74	0.98	0.002 – 2.400	-
Fe	0.66	<0.05	7.28	1.13	0.12	<0.05	0.25	0.05	0.014 – 6.420	0.3
HCO ₃ ⁻	8.26	<1.00	122.00	16.26	2.07	2.80	<1.00	0.68	0.36 – 5.27	500
Cl ⁻	3.48	<2.00	20.00	2.77	2.91	<2.00	11.00	2.07	0.07 – 2.99	250
NO ₃ ⁻	0.35	<0.20	4.37	0.48	0.33	<0.20	1.60	0.36	0.012 – 0.139	10
SO ₄ ²⁻	1.91	<1.00	9.30	0.80	1.80	1.10	<2.00	0.37	0.024 – 4.22	250
SAR	0.75	0.02	7.16	0.95	0.91	0.43	5.93	1.06	0.043 – 0.915	(****)

193 (*) Sampling campaigns, 1st - 30/09/2005 to 05/10/2005; 2nd - 03 to 14/12/2005; 3rd - 16 to 24/05/2006;
 194 4th - 14 to 29/11/2006; (**) Bibliographic reference value, Aquino et al., 2002; Aquino et al., 2003; (***)
 195 Environmental quality standards - Decree 2914/2011 of the Ministry of Health and World Health
 196 Organization and the US Environmental Protection Agency (EPA); (****) SAR <10 = Low risk of salinization;
 197 10 <SAR <18 = average risk; SAR > 26 = high risk.
 198

199 Most of the ions presents values within the potability limit according to the ordinance 2914/2011-

200 MS (Brasil, 2011), with the exception of the iron ions with average values above 0.3 mg/L.

201 Before the UAS groundwater conditions characterized by abundant CO₂, low pH, and lack of

202 dissolved oxygen, iron appears in the form of dissolved ferrous bicarbonate. The possibility of

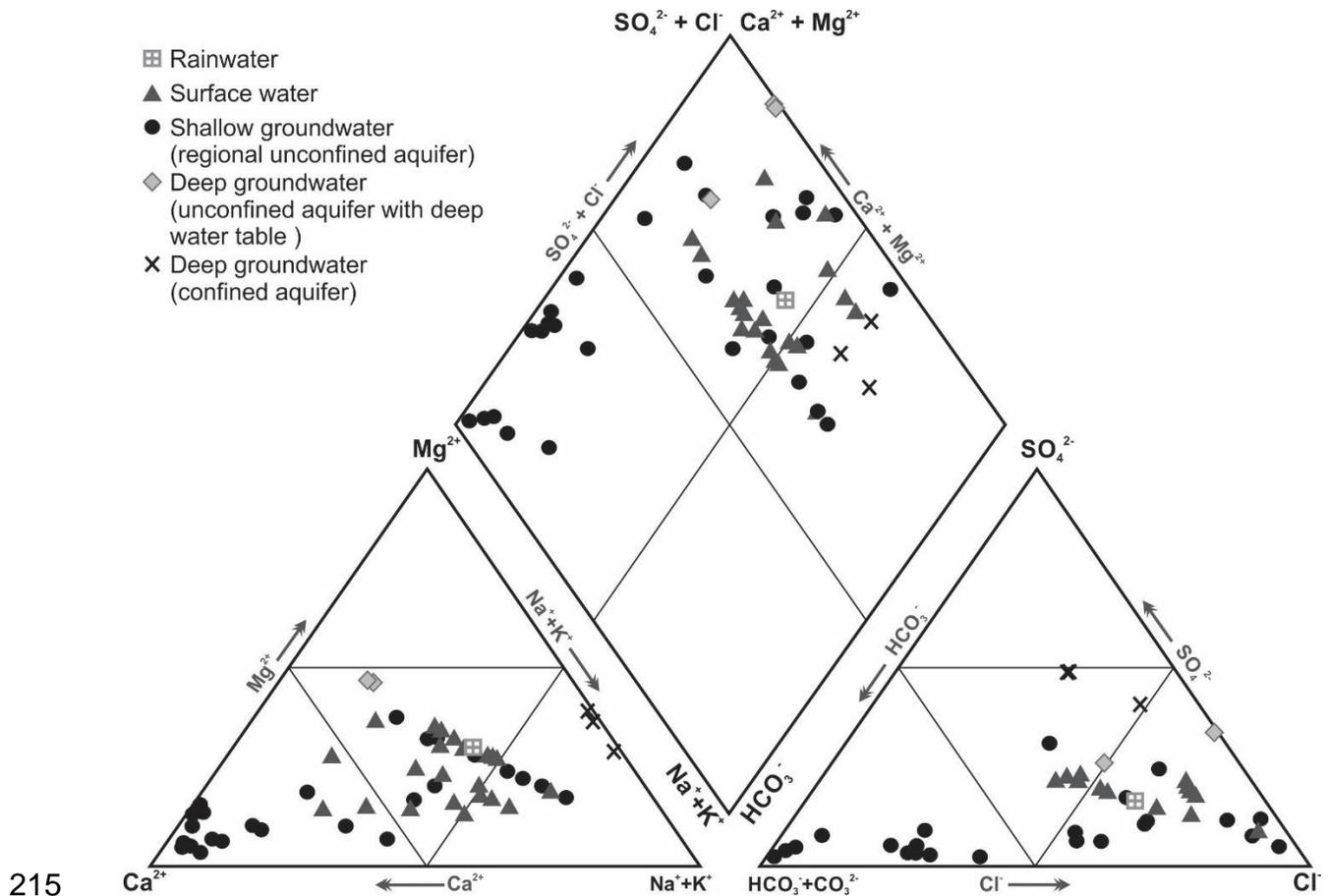
203 constructive problems of the wells (i.e., unproven, since the information about the constructive

204 profiles are scarce, and sometimes unreliable), and the presence of ferruginous crusts (i.e., which

205 marks the water level fluctuations, a result from the change climate during the sedimentation of

206 Urucuia Group) are probably among the main causes of anomalous values.

207 Piper (1944) hydrochemical diagram allows the interpretation of data through the characterization
 208 of water related to its dominant ions expressed as total percentage of cations and anions (Fig. 2).
 209 The analytical values of the major elements characterizes the UAS as a set of interrelated
 210 aquifers, and establishes the hydrogeochemical evolution of their natural waters. Samples of
 211 shallow groundwater, surface water, and rainwater were interpreted. Additionally, bibliographic
 212 reference data about deep groundwater were incorporated (e.g., Aquino et al., 2002, 2003;
 213 Nascimento, 2003).
 214



216 Fig. 2. Graph of the classification of shallow and deep groundwater, superficial water and rainwater
 217 through the Piper (1944) diagrams.

218 The analysis generated the identification of three hydrochemical facies: Ca-Cl, Ca-HCO₃, and
219 Na-Cl, corresponding to 52%, 21%, and 27% of the samples, respectively. The hydrochemical
220 results (Fig. 2) show the existence of aquifer units related to the southern UAS, i.e., regional
221 unconfined aquifer, confined aquifer, and unconfined aquifer with deep static level.

222

223 5.2. Rainwater and surface water

224

225 The infiltration of rainwater in large areas of the flat relief is primarily responsible for the
226 recharge of the UAS, and the morphology of the relief has a paramount importance for the
227 replenishment of the UAS. Chemically, the recharge waters have a composition of mixed type
228 Na-Mg-Ca-Cl-HCO₃. The rainfall heights have isohyets typically higher than 1,000 mm per year.
229 However, the expansion of agricultural areas and soil compaction caused by soil management
230 currently disserve the recharge process (Gaspar and Campos, 2007). In general, the neutralization
231 of rainwater acidity can be linked to human activities in the region, such as liming.

232 The main rivers have a composition of Na-Cl and mixed Na-Ca-Cl type. The analysis of the
233 diamond diagram (Fig. 2) shows that it represents an intermediate composition between deep and
234 shallow groundwater.

235

236 5.3. Regional unconfined aquifer

237

238 The regional unconfined aquifer shows a wide spatial distribution and a variable water table. The
239 average value for the regional water table is of 39 m, obtained by electrical geophysical methods
240 (e.g., Lima and Santos, 2011; Barbosa, 2009; Barbosa et al., 2014) and wells data. It is usually

241 exploited through wells under 100 meters deep, commonly located in the headquarters of farms
242 where groundwater is used primarily for domestic supply and as input for dilution and application
243 of pesticides on crops (Gaspar, 2006).

244 It displays a great variety of hydrochemical facies (i.e., Ca-HCO₃, Ca-Na-Cl and Cl-Na), whose
245 evolution occurs in local and regional flow systems (Fig. 2). The baseflow of this aquifer
246 contributes effectively for the maintenance of the perennial and the specific high flow of rivers.

247

248 5.4. Confined aquifer

249

250 Confined aquifers occur in depth, underlying the regional unconfined aquifer. It is common in the
251 western portions of the studied area, where the artesian head conditions is controlled by
252 persistent fractured silicified levels and in different stratigraphic levels. In general, these levels
253 work as aquitardes, allowing a vertical leakage between regional unconfined and confined
254 underlying aquifers, or even as aquifuge, establishing perched aquifers when positioned above
255 the regional water table.

256 The potentiometric levels are variable and has an average depth of 20 m in the central portion of
257 the basin. It has a high hydrogeological potential with average specific capacity of 12 m³/h/m.

258 The deep wells are used in irrigation projects through center pivots, with flow rates of
259 exploitation above 300 m³/h, small drawdown, and long rays of influence (above 2,500 m)
260 (Barbosa et al., 2014). The water has a great residence time.

261 Hydrochemical well data extracted of this type of aquifer were obtained from Aquino et al.

262 (2002). The composition is of Na-Cl and mixed Na-SO₄-Cl (Fig. 2). Surface waters have hybrid

263 composition between this type and the regional unconfined aquifer, which together contribute
264 effectively with their base flow.

265

266 5.5. Unconfined aquifer with deep static level

267

268 Unconfined aquifer with deep static level is distributed in the western end of the UAS, and it has
269 a groundwater flow divider axis, with the direction N-S, approximately, as longitudinal limit. The
270 potentiometric surface has a progressive increase in depth towards the western portions, reaching
271 more than 200 m. deep.

272 The unconfined condition is characterized by the absence of silicified levels and/or position of
273 these levels above the regional water table. The discharge occurs under conditions of high
274 hydraulic gradient, and determines a relatively rapid flow system. It consists of water mixed Ca-
275 Mg-Cl (Fig. 2), which feed the rivers of karst-crystalline system of Tocantins river watershed
276 (Gaspar, 2006).

277

278 5.6. Hydrogeochemistry evolution model

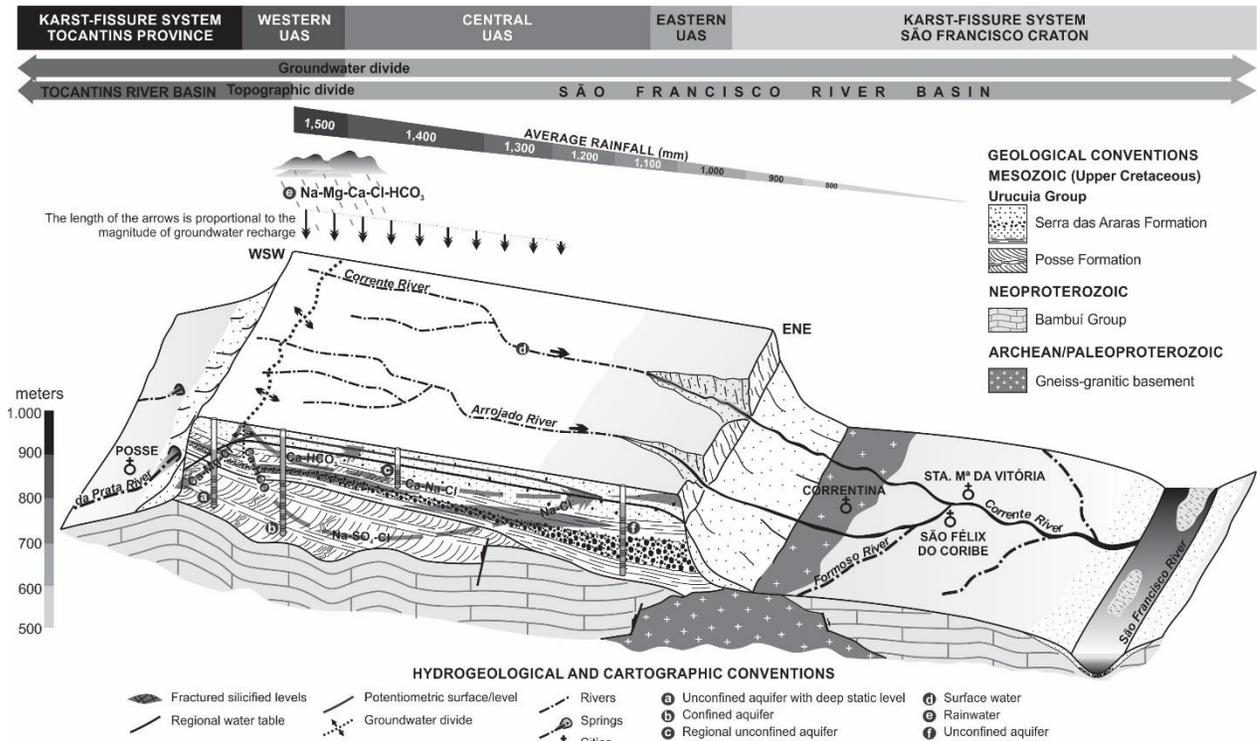
279

280 The evolution of the chemical composition of the waters in southern UAS can be determined by
281 the hydrochemical facies commonly found in the recharge, in groundwater flow systems path,
282 and in the baseflow or discharge (Ingebritsen et al., 2006).

283 The recharge occurs at the western end of the studied area, and it is due to rainwater infiltration.
284 In early stages, the water is characterized by a mixed composition of Na-Mg-Ca-Cl-HCO₃. From
285 this recharge, there is the occurrence of local, intermediate, and regional flow systems (Fig. 3).

286

287



288

289 Fig. 3. Schematic representation of the hydrogeochemical evolution model of the southern UAS
290 (adapted of Barbosa et al., 2014).

291

292 The local flow system implies that the groundwater show a rapid movement and do not undergo
293 pronounced interactions with the substrate. Facies Ca-HCO₃ are predominant, and it represents
294 the first major chemical transformation of infiltration water. The movement of groundwater is
295 active with very low TDS and acid pH. The water is enriched with the ion HCO₃ along the path
296 in the vadose zone, derived from the dissociation of carbonic acid in the soil.

297 In the intermediate flow system, the circulation is less active than the local system. The main
298 change is between HCO₃ to Cl anions and Ca to Na cations. It is an evolution of Ca-HCO₃, Ca-
299 Na-Cl, Na-Ca-Cl, and Na-Cl facies, respectively. The clay mechanical infiltration process

300 widespread in depth during the deposition of sediments from Serra das Araras Formation. This
301 process enabled the ion exchange between Ca and Na.

302 In deep and unconfined section of UAS water moves slowly and it has a longer residence time
303 and higher TDS. Probably, a mixture of water occurs in order to produce Na-SO₄-Cl and Na-Cl
304 facies, what characterizes the regional flow system.

305 At the western end, limited by the groundwater divide, there is a progressive increase in the depth
306 of the potentiometric surface (Gaspar and Campos, 2007). The discharge conditions occur under
307 high hydraulic gradient, featuring a rapid change from Ca-HCO₃ to Ca-Mg-Cl facies.

308 Either part or all of this classic sequence of hydrochemical change can be a mean for the
309 identification of each aquifer type. The silicified and fractured sandstones levels is probably
310 responsible for a vertical leakage between regional unconfined and confined aquifer, featuring an
311 interface and mixing zone, what explains the great compositional variability of the UAS waters
312 (Fig. 3).

313 Surface water, the main zone of discharge, is composed of Ca-Na-Cl and Cl-Na facies. It largely
314 represents the water volume refunded by the baseflow of the UAS in local, intermediate and
315 regional flow systems.

316 The hydrogeochemical evolution of southern UAS follows the model proposed by Chebotarev
317 (1955). The buildup of dissolved solids represents the major controlling mechanism of the
318 groundwater composition, and the dominant anion species changes systematically from HCO₃ to
319 SO₄ to Cl. As to cations, there is a cationic exchange that occurs between Ca and Na.

320

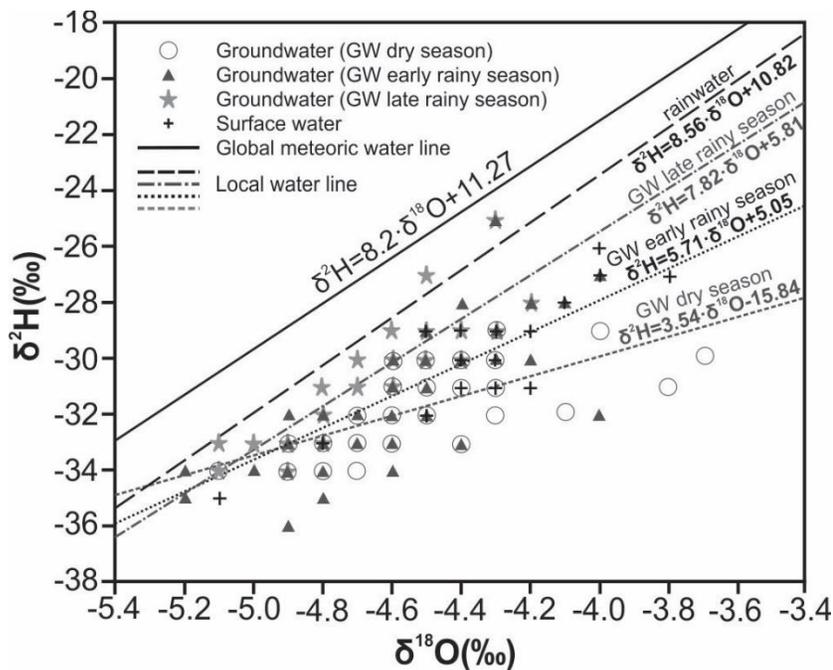
321 5.7. Isotope characteristics

322

323 Stable isotopes in water (^{18}O and ^2H), affected by meteorological processes, provide a
 324 characteristic "fingerprint" of their origin, and represent a key feature for the investigation of the
 325 groundwater origin. In general, the air masses leave its origins as steam, and moves towards high-
 326 latitude regions or continents. In this trajectory, they cool down and lose their water vapor
 327 content in the form of precipitation.

328 In the studied area, the rainfall is progressively depleted in heavy isotopes, with strong seasonal
 329 differences (Fig. 4). The global meteoric water line (GMWL) is an average of many local
 330 meteoric water line (LMWL) controlled by characteristic climatic factors, including the source of
 331 the vapor masses, secondary evaporation during the rains, and seasonality of precipitation (Craig,
 332 1961). These local factors affect both the deuterium excess (d) and the line slope (Table 2).

333



334

335 Fig. 4. $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ relationship graphs for rainwater, groundwater at the dry, rainy season and surface
 336 water. Equation of global meteoric water line extracted Rozanski et al., 1993.

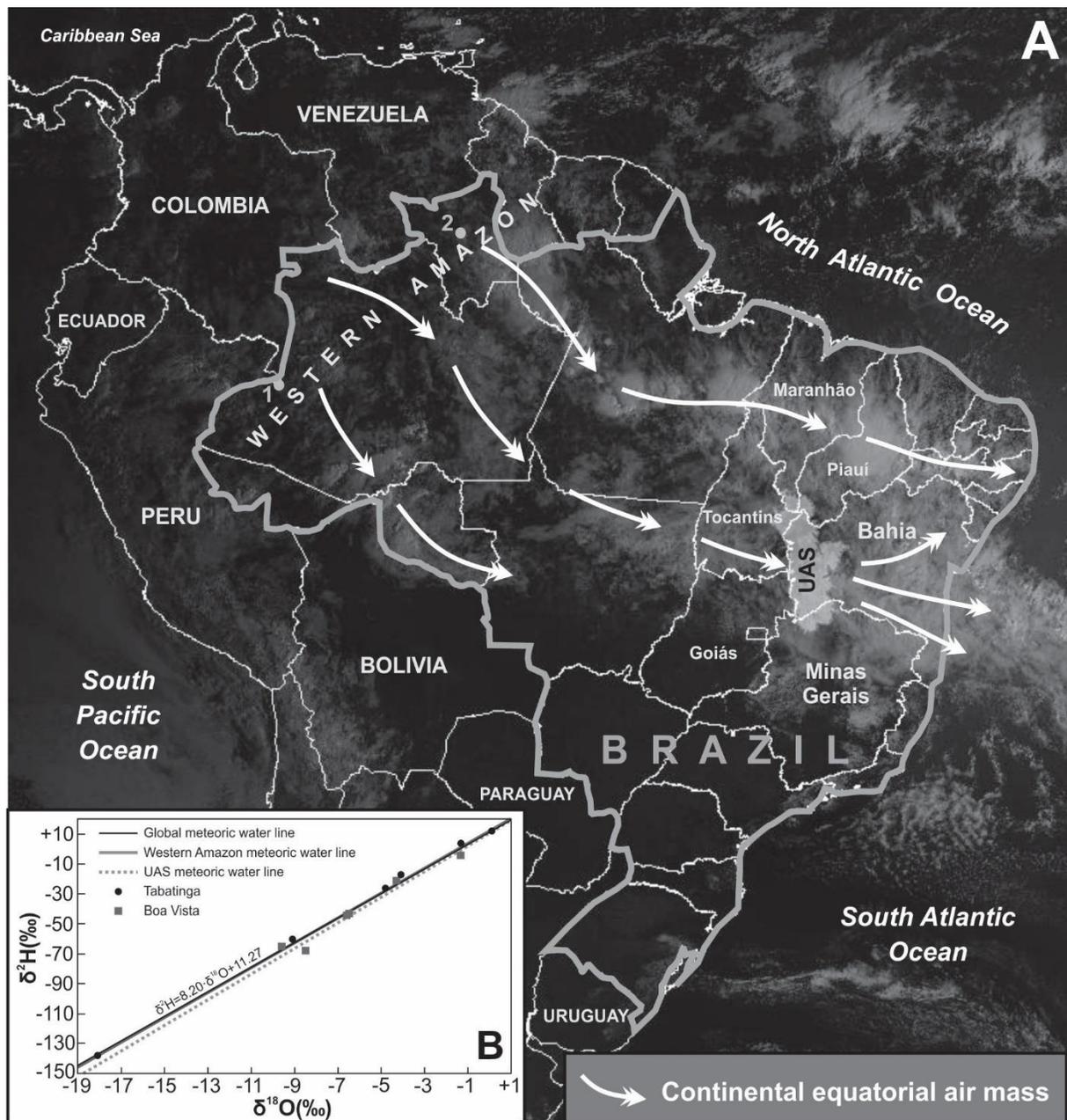
337

338 Table 2. $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotope data and deuterium excess (d) of surface water, groundwater and
 339 rainwater (*) of southern UAS.

SAMPLE	1 ^a CAMPAIGN			2 ^a CAMPAIGN			3 ^a CAMPAIGN			4 ^a CAMPAIGN			
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)										
SURFACE WATER	R1	-4.2	-29	4.3	-4.1	-28	5.2	-4.3	-29	5.2	-	-	-
	R2	-4.2	-31	3.2	-4.0	-26	6.3	-4.0	-27	4.9	-3.8	-27	3.3
	R3	-4.3	-30	4.2	-5.6	-38	7.1	-4.4	-31	4.6	-4.4	-30	5.0
	R4	-4.3	-31	3.6	-4.8	-33	5.2	-4.4	-30	5.3	-4.4	-30	4.8
	R5	-4.3	-30	4.2	-5.1	-35	6.1	-4.4	-29	5.4	-4.3	-30	4.8
	R6	-	-	-	-	-	-	-4.5	-29	6.9	-4.5	-32	3.5
	R7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.4	-30	5.5
GROUNDWATER	01	-4.8	-34	4.2	-	-	-	-	-	-	-4.6	-31	6.3
	03	-4.7	-34	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	05	-4.4	-31	3.7	-4.3	-29	6.1	-	-	-	-4.2	-28	5.3
	10	-4.4	-33	2.9	-4.7	-32	5.5	-4.7	-30	8.0	-4.7	-32	6.2
	12	-4.2	-29	4.4	-4.5	-30	6.2	-4.5	-27	8.9	-4.4	-30	5.5
	16	-4.3	-30	4.7	-4.0	-27	5.8	-4.3	-25	9.0	-4.3	-25	10.2
	22	-4.5	-31	4.9	-4.7	-33	5.2	-4.5	-30	6.3	-4.5	-31	4.8
	26	-4.5	-32	3.7	-4.6	-30	6.5	-	-	-	-4.6	-33	4.5
	27	-4.6	-32	4.4	-4.6	-31	6.1	-4.6	-31	5.4	-4.6	-31	5.9
	31	-4.2	-31	2.4	-4.5	-32	4.5	-4.6	-29	7.5	-4.6	-32	5.3
	37	-4.9	-33	5.8	-5.0	-34	5.9	-5.1	-33	8.0	-5.2	-35	6.4
	40	-4.7	-33	5.3	-4.7	-32	5.7	-	-	-	-4.8	-32	6.4
	50	-4.7	-32	5.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	54	-4.5	-31	5.0	-4.7	-32	5.3	-4.8	-31	6.8	-4.7	-32	5.6
	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.4	-30	4.7
	64	-4.5	-31	5.1	-4.6	-32	4.7	-	-	-	-4.6	-31	5.6
	66	-5.1	-34	6.5	-5.2	-34	7.9	-5.1	-34	7.2	-5.2	-35	6.6
	67	-4.9	-33	6.0	-	-	-	-4.9	-33	6.0	-4.7	-32	5.4
	69	-4.9	-34	5.9	-4.9	-33	6.4	-4.8	-32	6.0	-4.6	-32	5.2
	70	-3.7	-30	-0.8	-4.5	-29	7.2	-	-	-	-4.6	-31	5.8
	72	-4.8	-33	5.6	-4.8	-34	4.6	-4.8	-32	6.4	-4.8	-33	5.9
	78	-4.7	-33	5.3	-4.6	-31	5.6	-4.7	-31	6.3	-4.5	-31	5.4
	88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.4	-30	4.8
	91	-4.0	-29	3.6	-4.3	-30	4.7	-4.6	-30	7.2	-	-	-
	93	-4.3	-32	2.5	-4.6	-33	4.0	-4.6	-29	7.8	-4.6	-31	5.8
	100	-3.8	-31	-0.8	-4.5	-30	6.2	-4.5	-29	7.0	-4.6	-31	6.4
	105	-4.2	-29	4.9	-4.1	-28	4.7	-4.2	-28	6.4	-4.2	-30	4.0
110	-4.3	-31	3.8	-4.6	-32	5.0	-4.6	-29	7.7	-4.7	-32	5.9	
123	-4.1	-32	0.4	-4.8	-32	7.0	-4.8	-33	5.9	-4.8	-25	13.3	
124	-4.5	-32	3.9	-	-	-	-4.6	-30	7.3	-4.6	-34	3.2	
126	-4.4	-30	5.6	-4.5	-29	7.2	-4.4	-29	6.6	-4.5	-32	4.6	
127	-	-	-	-4.4	-28	7.4	-4.3	-29	5.2	-4.4	-33	2.8	
129	-4.2	-30	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
132	-4.5	-30	5.7	-	-	-	-4.4	-30	5.6	-4.5	-31	5.4	
133	-4.6	-33	4.3	-4.6	-31	5.4	-4.8	-33	4.7	-4.8	-35	2.7	
134	-4.9	-33	6.0	-4.9	-32	7.1	-	-	-	-4.9	-36	3.5	
135	-4.9	-33	5.8	-4.9	-32	7.1	-5.0	-33	6.7	-4.9	-34	4.9	
*	CH-01	-	-	-	-3.6	-20	8.7	-	-	-	-	-	-
	CH-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.1	1.4	9.8	

341 The isotopic composition of the rainwater (Tab. 2; Fig. 4) shows a very close behavior to
 342 GMWL, representing the influence of Continental Equatorial humid air masses. It is originated in
 343 the western Amazon, and advances towards Brazil, reaching the UAS and causing the so-called
 344 "summer rains" (Fig. 5).

345



346

347 Fig. 5. Dynamics of air masses in the atmosphere of South America. (A) Satellite image of the
348 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) in November 2014 period and (B) isotopic graphics
349 (^2H versus ^{18}O) and local meteoric water line for rainwater in the Western Amazon after Honório
350 (2007) and for the southern UAS after Barbosa (2009). Equation of global meteoric water line
351 extracted Rozanski et al., 1993.

352

353 The recharge of the UAS corresponds to approximately 20% of the average rainfall (Pimentel et
354 al., 2000); the other 80% is lost as runoff, evaporation, and transpiration by vegetation. While
355 processes of runoff and transpiration have a small participation in the isotopic composition of the
356 groundwater, the evaporation implies a systematic enrichment of the isotopic content. Due to the
357 process of evaporation, most groundwater samples we have collected present different isotopic
358 values of the precipitation water (Fig. 4).

359 The surface water and groundwater have isotopic compositions that lie practically in the same
360 range of values (Tab. 2; Fig. 4), what indicates the existence of a connection between the
361 reservoirs, so that more than 90% of the UAS baseflow contributes to the total flow of rivers in
362 the rainy recession (Pimentel et al., 2000).

363 The isotopic signatures of groundwater during the rainy season (Fig. 4) tend to approach the
364 GMWL. During this period, the soil profiles probably have a small evaporation, indicating that
365 the groundwater recharge occurs predominantly by direct infiltration of rainfall. Evaporation and
366 fractionation occur secondarily, in the vadose zone by capillarity effects. In this case, macropores
367 and preferential flow channels in the unsaturated zone allow the rapid movement of the water into
368 the water table.

369 In the dry season (Fig. 4), the isotopic composition of the surface water and the groundwater is
370 significantly modified by local rainfall, probably caused by strong enrichment due to evaporation
371 process, what shifts the local water line to a slope lower than 8 (eight). Thus, as it approaches the
372 rainy season, the atmospheric air column becomes increasingly saturated and the effect of
373 evaporation is significantly reduced (Figs. 4 and 5).

374

375 6. Conclusions

376

377 In this study, we analyzed the hydrochemistry and the signature of stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$)
378 in the surface waters, groundwater, as well as the precipitation events within the western UAS.
379 The groundwater recharge occurs mainly between November and February by direct infiltration
380 of rainwater. It presents mixed hydrochemical composition of Na-Mg-Ca-Cl- HCO_3 , and an
381 isotopic composition very close to the GMWL. During this period, the UAS shows a higher water
382 table, what favours the renewal of its waters.

383 In dry periods, from May to October, the UAS presents lower water table. The isotopic
384 compositions of surface water and groundwater are modified if compared to the rainfall, due to
385 strong enrichment caused by the evaporation process. During this period, the drought induces
386 high pumping rates of deep wells. The seasonal variation of the isotopic composition represents a
387 continuous cycle. In other words, as it approaches the rainy season, the atmospheric air column
388 becomes increasingly saturated, and the effect of evaporation decreases considerably.

389 From the recharge, the groundwater evolves according to local, intermediate, and regional flow
390 systems. The local flow system has an active circulation, low TDS, and consists of Ca- HCO_3
391 facies. In the intermediate flow system water evolves into Ca-Na- HCO_3 facies to Na-Cl. In

392 relation to the previous one, there is an increase in TDS, and a less active circulation. Both are
393 found in the shallow groundwater of regional unconfined aquifer. The regional flow system
394 occurs in deep groundwaters with a slow movement, and an increased residence time. It has
395 higher TDS, Na-SO₄-Cl facies, with the dominance of Na-Cl, what is a typical feature of the
396 lower confined aquifer. At the western end, the unconfined aquifer with deep static level (Ca-Mg-
397 Cl facies) is limited by a groundwater divide, with a progressive increase in depth of
398 potentiometric surface in a relatively fast flow system. In this context, the groundwater
399 discharges under conditions of high hydraulic gradient.

400 The discharge occurs through the baseflow of rivers with a hybrid composition from mixed Na-
401 Ca-Cl to Na-Cl, what indicates that the river is fed by both the regional unconfined aquifer and
402 the confined aquifer. The chemical and isotopic compositions of surface water and groundwater
403 have small differences, what indicates the existence of a connection between the reservoirs. The
404 occurrence of silicified fractured levels determines the existence of the different types of aquifers
405 in UAS, and it probably represents a mixing and interfaced zone, where a leakage process
406 between the aquifers and the great variability of hydrogeochemical facies may take place.

407

408 Acknowledgements

409 N. S. Barbosa acknowledge the financial support of Centro de Aperfeiçoamento de Pessoal de
410 Nível Superior (CAPES; Master's grant). The authors are grateful to the Companhia de Pesquisa
411 de Recursos Minerais and Financiadora de Estudos e Projetos for providing continued support for
412 research, CTHIDRO (Grant n°01.04.0623.00 – CPRM/FINEP).

413

414 7. References

415

416 American Public Health Association (APHA), 1995. Standard methods for the examination of
417 water and wastewater. Washington D.C.

418 Amorim Júnior, V., Lima, O.A.L., 2007. Avaliação hidrogeológica do aquífero Urucuia na bacia
419 do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. Revista Brasileira de
420 Geofísica. 25(2), 117-129. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2007000200002>

421 Aquino, R.F., Nascimento, K.R.F., Rodrigues, Z.R., Vieira, C., Maia, P.H.P., Costa, A.B., 2003.
422 Caracterização hidrogeoquímica e isotópica das águas superficiais e subterrâneas do Oeste baiano
423 – bacia do rio das Fêmeas – Bahia, in: ABRH, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,
424 Curitiba-PR, 20p.

425 Aquino, R.F., Silva, F.F., Schuster, M.D.H., Batista, L.H.G., Urasaki, F.Y.A., 2002. Aspectos
426 hidroquímicos e da qualidade da água superficial e subterrânea do oeste baiano – sub-bacia do
427 Rio do Cachorro – Bahia, in: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Maceió-
428 AL. 18p.

429 Arraes, T.M., Campos, J.E.G., 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de
430 bacias hidrogeológicas. Revista Brasileira de Geociências, 31(1), 81-89.

431 Arraes, T.M., Campos, J.E.G., 2010. Aplicação de ensaio de traçador e dados de potenciometria
432 como ferramentas para a delimitação de bacias hidrogeológicas. Geociências, 29(4): 623-631.

433 Barbosa, N.S., 2009. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia na região das Dissertação de
434 Mestrado bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado, oeste do Estado da Bahia., Instituto
435 de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA. 98p.

436 Barbosa, N.S., Bastos Leal, L.R., Barbosa, N.S., Mello, J.C., Santos, C.B., Lima, O.A.L., 2014.
437 Caracterização geométrica e hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia meridional com base em

- 438 testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos. *Águas Subterrâneas* 28(2), 41-52.
439 <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v28i2.27787>
- 440 Bonfim, L.F.C., Gomes, R.A.A.D., 2004. Aquífero Urucuia – geometria e espessura: ideias para
441 discussão, in: XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá-MT. 8p.
- 442 Borges, M.S., Igreja, H.L.S., Costa, J.B.S., Hasui, Y., 1992. Faciologia e tectônica da formação
443 Urucuia na região de Dianópolis, sudeste do Estado do Tocantins. *Geociências*, São Paulo, 11(1),
444 7-18.
- 445 Brand, W.A., Avak, H., Seedorf, R., Hofmann, D., Conradi, T., 2000. New methods for fully
446 automated isotope ratio determination from hydrogen at the natural abundance level. *Geoph.*
447 *Prosp.* 28, 967-976. doi: 10.1080/10256019608036319
- 448 Brasil., 2011. Ministério da Saúde. Portaria MS n.º 2914 de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe
449 sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e
450 seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União, Brasília/DF*, 14 Dez. 2011, Seção 1, pp. 39–
451 46.
- 452 Campos, J.E.G., 1996. Estratigrafia, sedimentação, evolução tectônica e geologia do diamante da
453 porção centro-norte da bacia Sanfranciscana. Tese de doutorado n° 12. IG-UnB. Brasília-DF.
454 204p.
- 455 Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., 1997. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana:
456 uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27, 269-282.
- 457 Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., 1999. Distribuição, estratigrafia e sistemas deposicionais do
458 Grupo Urucuia – Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. *Geociências*, São Paulo, 18(2),
459 481-499.

- 460 Chebotarev, I.I., 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochimica et*
461 *Cosmochimica Acta* 8, 22-40. doi:10.1016/0016-7037(55)90015-6
- 462 CPRM, 2007. Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste
463 Brasileiro. Hidrogeologia do Aquífero Urucuia: Bacias hidrográficas dos rios Arrojado e
464 Formoso – Meta D – Caracterização Hidroquímica e de Vulnerabilidade.
465 CPRM/FINEP/CTHidro, 30 p.
- 466 Craig, H. C., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703. DOI:
467 10.1126/science.133.3465.1702
- 468 Epstein, S., Mayeda, T. K., 1953. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural waters. *Geochimica et*
469 *Cosmochimica Acta*, 4, 213.
- 470 Gaspar, M.T.P., 2006. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de
471 Gestão. Tese de doutorado n° 76. IG-UnB. Brasília-DF, 158p.
- 472 Gaspar, M.T.P., Campos J.E.G., 2007. O Sistema Aquífero Urucuia. *Revista Brasileira de*
473 *Geociências*, 37 (4): 216-226.
- 474 Ingebritsen, S.E., Sanford, W.E., Neuzil, C.E., 2006. *Groundwater in Geologic Processes*, second
475 ed. Cambridge University Press. New York.
- 476 Köppen, W., 1948. *Climatologia: com um estúdio de los climas de la Tierra*. F. de Cultura.
477 México. 478p.
- 478 Lima, O.A.L., Santos, E.S.M., 2011. Caracterização geológica e geofísica do Sistema Aquífero
479 Urucuia e de seu substrato nas bacias dos rios Arrojado e Formoso, Bahia. *Revista Brasileira de*
480 *Geofísica*, 29 (4): 723-744. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/rbgf.v29i4.77>

- 481 Nascimento, K.R.F., 2003. Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio
482 das Fêmeas-Bahia. Relatório final, ANA/ GEF/ PNUMA/ OEA, Superintendência de Recursos
483 Hídricos (SRH), Salvador- BA. 208p.
- 484 Nascimento, K.R.F., Costa, A.B., Zucchi, M.R., Matos, C.R.A., Azevedo, A.E.G., Pedreira, C.B.,
485 2003. Oxygen Isotopic composition of surface and ground-waters from rio das Fêmeas sub-basin
486 – Urucuia aquifer – BA, Brazil, in: IV South American Symposium on Isotopic Geology, São
487 Paulo- SP, pp. 457-460.
- 488 Nascimento, M.A.L.S., 1991. Geomorfologia do Estado de Goiás, in: Boletim Goiano de
489 Geografia. Goiânia-GO. UFG, 12 (1), 1-22.
- 490 Pimentel, A.L., Aquino, R.F., Silva, R.C.A., Vieira, C.M.B., 2000. Estimativa da recarga do
491 aquífero Urucuia da sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de
492 hidrogramas, in: I Congresso sobre aproveitamento e gestão de recursos hídricos em países de
493 idioma português, Rio de Janeiro – RJ. 11p.
- 494 Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis.
495 Transactions, American Geophysical Union, 25: 914-23. DOI: 10.1029/TR025i006p00914
- 496 Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. U. S. Department of
497 Agriculture Agricultural Handbook 60. 166p.
- 498 Rozanski, K.; Araguás-Araguás, L.; Gonfiantinni, R., 1993. Isotopic patterns in modern global
499 precipitation, in: Continental Isotopic Indicators of Climate, American Geophysical Union
500 Monograph.
- 501 Schuster, H.D.M., Silva, F.F., Teixeira, S.L., Batista, L.H.G., Freitas, W.A., 2002. Estudos
502 hidrogeológicos do aquífero Urucuia no oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas

- 503 de mananciais subterrâneos, in: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis-
504 SC. 15p.
- 505 Schuster, H.D.M., Cruz, J.L.F., Silva F.F., 2010. Modelagem do efeito de bombeamento na
506 depleção de rios. Simulações de um caso real no oeste da Bahia. Revista Ambiente Mineral, 1,
507 20-35.
- 508 Sgarbi, G.N.C., 1989. Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia
509 Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro
510 (UFRJ). 324p.
- 511 Sgarbi, G.N.C., 2000. The cretaceous Sanfranciscan basin, eastern plateau of Brazil. Revista
512 Brasileira de Geociências, 30 (3), 450-452.
- 513 Spigolon, A.L.D., Alvarenga, C.J.S. de., 2002. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de
514 mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia
515 Sanfranciscana. Revista Brasileira de Geociências, 32(4), 579-58

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sedimentação do Grupo Urucuia durante o Cretáceo Superior ocorreu sob condições intracratônicas com área-fonte relacionada aos altos estruturais que limitava geograficamente a bacia. A origem da depressão onde se acumularam os sedimentos, são em parte controlados pelos esforços intraplaca resultante da fragmentação gonduanica, com reflexos morfotectônicos e climáticos no interior remoto continental. A mudança da fase rifte para pós-rifte na margem continental, resultou em inversão do campo de tensão (e.g., distensivo para compressivo) no interior das placas com soerguimento nas bordas da bacia e subsidência no centro. Nesse contexto, o Grupo Urucuia foi depositado sobre a superfície cretácea num sistema de leques aluviais inativos, rios efêmeros, zibars, lençóis arenosos secos e campos de dunas, representados pela Formação Posse. Nessa unidade, três litofácies foram identificadas relacionados aos depósitos atualmente preservados de lençóis arenosos, dunas e interdunas.

Após o estabelecimento definitivo da margem passiva, a relação da sedimentação com os estágios de deriva continental é intensificada com a entrada de umidade no interior remoto, modificação do padrão de sedimentação, interrupção do sistema eólico seco, desenvolvimento de uma superfície erosiva (i.e., Supersuperfície Urucuia) sobre a qual foi depositada a Formação Serra das Araras em um sistema de rios entrelaçados. Nesse momento, condições ambientais de estabilidade e não-deposição foram propícias ao desenvolvimento de paleossolos. Nessa unidade são identificados seis litofácies, caracterizados por depósitos de canais, lençóis de areia laminados, formas de leito arenosas e depósitos de transbordamento.

Cinco seqüências sedimentares foram propostas com base na hierarquia relativa das superfícies estratigráficas regionais que marcam exposições subaéreas significativas ou modificações no ambiente deposicional. As associações de fácies eólicas e fluviais registram variações abruptas no espaço de acomodação e aporte de sedimentos. Os depósitos eólicos (e.g., dunas, interdunas, draas) e os tratos de sistema de baixa e alta acomodação são reconhecidos nas seqüências de alta frequência e substituem os tratos de sistemas tradicionais relativos as mudanças no nível do mar eustático.

Durante a gênese da bacia, a presença de altos gravimétricos no substrato condiciona a geometria do sistema aquífero. Após, os processos de denudação atuantes resultaram no desenvolvimento de aplainamentos desenvolvidos em compartimentos intermontanos e de escarpas de regressão. Nas configurações meridionais e setentrionais o processo erosivo foi mais efetivo, resultando em um sistema descontínuo, segmentado e de pequena espessura (i.e., menores que 100 metros), constituído por aquíferos livres com baixo potencial hidrogeológico. Já na região centro-oriental, que compreende o depocentro da Sub-bacia Urucua, os sedimentos possuem maiores espessuras (i.e., acima de 350 metros). Em termos hidrogeológicos apresenta uma configuração do tipo aquífero-aquitarde-aquífero (Barbosa et al., 2014). Nela, os aquíferos superior e inferior, do tipo livre e confinado, respectivamente, apresentam assinaturas hidrodinâmicas e hidroquímicas distintas. Nesse contexto, as seqüências sedimentares desenvolvidas são segmentadas por aquitardes representados por arenitos silicificados originados por processos diagenéticos. Os arenitos silicificados são de geometria tabular, dispostos em vários níveis estratigráficos e possibilita, provavelmente, uma drenança vertical ascendente entre os diferentes aquíferos e uma grande variação de fácies hidroquímicas.

Em linhas gerais compreende uma bacia hidrogeológica assimétrica devido a presença de um eixo divisor do fluxo subterrâneo, de direção aproximada N-S, no extremo ocidental do SAU. Nesse cenário, um aumento gradual da profundidade da superfície potenciométrica têm como consequência o estabelecimento de aquíferos livres com níveis potenciométricos profundos (i.e., acima de 100 m). Nessa bacia hidrogeológica, a partir da recarga pela infiltração das águas de chuva, de composição Na-Mg-Ca-Cl-HCO₃ é estabelecido um padrão de sistemas de fluxo local, com circulação ativa das águas subterrâneas e predomínio de fácies Ca-HCO₃ baixos sólidos totais dissolvidos (STD) e composição mais próxima àquelas da água de chuva; um sistema intermediário com circulação menos ativa e aumento do Na⁺ em relação ao Ca²⁺ e; um sistema regional que apresenta uma circulação lenta, com fácies Na-Cl, maiores STD. No extremo ocidental, o sistema de fluxo da água subterrânea sob condições de elevado gradiente hidráulico e revela uma evolução de fácies Na-Mg-Ca-Cl-HCO₃ para Na-Cl. Em geral, a neutralização da acidez da chuva pode estar ligada às ações antrópicas na região, como a calagem.

Durante os períodos chuvosos, a composição isotópica da água subterrânea tende a se aproximar da composição das águas meteóricas, momento em que ocorre a renovação das águas do SAU.

Em contrapartida, nos períodos de estiagens, a composição das águas subterrâneas é constantemente modificada das verificadas nas águas meteóricas, devido ao forte enriquecimento isotópico causado pelo processo de evaporação. Durante este período, as condições de estresse hídrico induz altas taxas de bombeamento nos poços profundos utilizados para irrigação. Dessa forma, as variações sazonais na composição isotópica representam um ciclo contínuo. Em outras palavras, a medida que se aproxima do período chuvoso, a coluna de ar atmosférico torna-se cada vez mais saturado e o efeito da evaporação diminui consideravelmente.

Em síntese, os processos tectônicos, sedimentares, diagenéticos e geomórficos integrados contribuíram com o estabelecimento do SAU. Por consequência, a origem e evolução paleogeográfica da bacia com soerguimento e erosão generalizada nas bordas e aumento progressivo no espaço de acomodação no depocentro foi importante na configuração geométrica e nas variações da espessura sedimentar. Adicionalmente, os diferentes valores nos parâmetros hidrodinâmicos (TKS) dos subsistemas aquíferos ocorrem como resultado das variações no padrão de sedimentação. Já os processos diagenéticos, especialmente a intensa silicificação nos arenitos, controla a ocorrência de subtipos de aquíferos (e.g., sistema aquífero-aquitarde-aquífero). Contudo, as sequências sedimentares desenvolvidas como reflexo intraplaca da fragmentação gonduânica (e.g., Grupo Urucuia) atestam a possibilidade de ocorrência de sistemas aquíferos expressivos no interior remoto continental sob as mesmas condições de evolução tectônica e climática.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES

Artigo 1 - Hydrogeology, sequence stratigraphy and diagenesis in the Urucuia Group (Upper Cretaceous of Sanfranciscan Basin), Brazil: Influences in the design of the aquifer system

Artigo em fase final de preparação e ainda não submetido.

Artigo 2 – Modelo Hidrogeológico Conceitual do Sistema Aquífero Urucuia Centro-Ocidental, Brasil

Artigo submetido em fase de avaliação.

Autores: Natanael da Silva Barbosa, Luiz Rogério Bastos Leal, José de Castro Mello, Marco Antônio Lima Peixinho, Cristovaldo Bispo dos Santos, Rafael Lima dos Santos Santos

José de Castro Mello – Geólogo da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia. Possui experiência na área de Hidrogeologia, exploração de águas subterrâneas e perfilagem geofísica de poços. Contribuiu efetivamente na interpretação dos dados obtidos.

Marco Antônio Lima Peixinho – Gerente do Departamento de Hidrogeologia da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia. Possui experiência na área de Hidrogeologia e Geofísica Aplicada. Colaborou na obtenção e autorização no uso dos dados dos perfis geofísicos dos poços.

Cristovaldo Bispo dos Santos – Professor adjunto do Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Possui experiência nas áreas de Geociências com ênfase em Hidrogeologia e Recursos Hídricos. Colaborou na obtenção e autorização no uso dos dados dos perfis geofísicos dos poços.

Rafael Lima dos Santos Santos – Geólogo recém-formado, trabalhou com os perfis na determinação de parâmetros petrofísicos na elaboração da monografia de Trabalho de Conclusão de Curso sob orientação de Natanael da Silva Barbosa, contribuindo nas etapas de campo e na interpretação dos perfis.

Artigo 3 – Caracterização Geométrica e Hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia Meridional com base em Testes de Aquífero e Levantamentos Geofísicos Elétricos

Artigo aceito para publicação em 27/07/2014.

Autores: Natanael da Silva Barbosa, Luiz Rogério Bastos Leal, Natali da Silva Barbosa, José de Castro Mello, Cristovaldo Bispo dos Santos, Olivar Antônio Lima de Lima

Natali da Silva Barbosa - Geóloga. Professora adjunta do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Possui experiência na área de geocronologia, isótopos e geoquímica. Realizou seu trabalho de graduação no Sistema Aquífero Urucuia, tratando principalmente dos dados hidroquímicos e isotópicos. Projeto de Mestrado na área de interesse. Participou da obtenção dos dados em campo e na revisão do texto.

José de Castro Mello – Geólogo da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia. Possui experiência na área de Hidrogeologia, exploração de águas subterrâneas e perfilagem geofísica de poços. Contribuiu efetivamente na interpretação dos dados, na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos e na revisão do texto.

Cristovaldo Bispo dos Santos – Professor adjunto do Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Possui experiência nas áreas de Geociências com ênfase em Hidrogeologia e Recursos Hídricos. Participou da interpretação dos dados e da revisão do texto.

Olivar Antônio Lima de Lima – Professor Titular aposentado da Universidade Federal da Bahia. Pesquisador do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia. Possui experiência na área de Geociências, com ênfase em Geofísica Aplicada. Participou da Rede Cooperativa de Pesquisa no Projeto CTHIDRO Convênio nº 01.04.062300 – CPRM/FINEP onde realizou os levantamentos geofísicos elétricos no âmbito do Aquífero Urucua.

Artigo 4 – Hydrochemical and stable isotopic data ($\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$) in the characterization of hydrologic dynamics of the Southern Urucua Aquifer System, Brazil

Artigo submetido em fase de avaliação.

Autores: Natanael da Silva Barbosaa, Luiz Rogério Bastos Leal, Natali da Silva Barbosa, Maria do Rosário Zucchi

Natali da Silva Barbosa - Geóloga. Professora adjunta do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Possui experiência na área de geocronologia, isótopos e geoquímica. Realizou seu trabalho de graduação no Sistema Aquífero Urucua, tratando principalmente dos dados hidroquímicos e isotópicos. Projeto de Mestrado na área de interesse. Participou da obtenção dos dados em campo e na revisão do texto.

Maria do Rosário Zucchi – Física, Professora associada do Instituto de Física Nuclear da Universidade Federal da Bahia com experiência em geofísica nuclear e isótopos ambientais. Contribuiu com a obtenção dos dados isotópicos e na interpretação dos resultados isot.

APÊNDICE B – TABELAS COM DADOS BRUTOS

Dados das análises químicas utilizadas na confecção do artigo do Capítulo 4.

B.1. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 1ª campanha de amostragem realizada entre 30/09/2005 e 05/10/2005.

Amostra	* **	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	CE µS/cm
R1	Água Superficial	0,21	<0,30	<0,1	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,7
R2		0,15	<0,30	<0,1	<0,10	<2,0	2,8	<2,0	<4,0
R3		0,36	<0,30	0,30	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,2
R4		0,26	<0,30	0,16	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
R5		0,48	<0,30	0,27	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,9
PT01	Água Subterrânea	0,29	<0,30	<0,10	<0,10	3,1	5,5	<2,0	14
PT03		0,36	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	8,6
PT05		0,28	<0,30	12	0,71	11	44	<2,0	74
PT10		0,36	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,7
PT12		0,44	<0,30	0,75	<0,10	<2,0	5,2	<2,0	9,6
PT16		0,26	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
PT22		0,25	<0,30	8,4	0,23	6,4	29	<2,0	50
PT26		0,26	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	3,9	<2,0	6,9
PT27		0,22	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,5
PT31		1,3	1,2	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	13
PT37		0,28	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,2
PT40		0,57	<0,30	0,12	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
PT50		0,26	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,7
PT54		0,20	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	6,6
PT64		1,5	<0,30	0,17	<0,10	<2,0	7,2	<2,0	12
PT66		0,31	<0,30	2,6	<0,10	3,3	9,9	<2,0	19
PT67		0,34	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	6,3	<2,0	13
PT69		2,9	<0,30	0,78	<0,10	<2,0	3,3	<2,0	8,2
PT70		0,48	<0,30	0,90	<0,10	<2,0	3,9	<2,0	9,0
PT72		0,29	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	6,0
PT78		0,22	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,2
PT91		0,39	<0,30	2,1	0,14	2,2	9,9	<2,0	18
PT93		0,21	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,2
PT100		0,65	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	3,9	<2,0	7,2
PT105		0,32	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
PT110	0,26	<0,30	0,14	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,1	
PT123	6,6	0,56	1,6	<0,10	2,6	<2,5	<2,0	13	
PT124	0,38	<0,30	12	1,0	9,0	45	<2,0	80	
PT126	0,45	<0,30	1,0	<0,10	<2,0	3,5	<2,0	9,6	
PT129	0,41	<0,30	0,80	<0,10	<2,0	3,0	<2,0	8,0	
PT132	0,67	<0,30	0,10	<0,10	<2,0	3,1	<2,0	8,2	
PT133	0,47	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	3,0	<2,0	5,4	
PT134	0,31	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	9,0	
PT135	0,30	<0,30	0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,3	

* Parâmetro analisado; ** Unidade de medida

B.2. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 2ª campanha de amostragem realizada entre 03/12/2005 e 14/12/2005 e de águas de chuva entre os dias 11 e 12/12/2005.

Amostra	* **	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	CE µS/cm
R1	Água Superficial	0,13	<0,30	<0,10	<0,10	2,2	<2,5	<2,0	6,5
R2		0,30	<0,30	0,13	<0,10	2,7	<2,5	<2,0	7,3
R3		0,18	0,32	0,27	<0,10	<2,0	2,2	<2,0	5,6
R4		0,23	<0,30	0,18	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,2
R5		0,37	0,40	0,32	<0,10	2,9	<2,5	<2,0	11
SH01	Água de chuva	0,18	<0,30	<0,10	<0,10	3,8	<2,5	<2,0	4,0
PT03	Água Subterrânea	0,21	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,0
PT05		0,13	<0,30	15	1,5	<2,0	57	<2,0	130
PT10		1,2	<0,30	0,10	<0,10	2,9	4,3	<2,0	8,0
PT12		0,29	<0,30	0,70	<0,10	4,8	6,6	<2,0	18
PT16		0,20	<0,30	<0,10	<0,10	2,3	<2,5	<2,0	4,5
PT22		0,41	1,2	8,8	0,29	<2,0	36	<2,0	78
PT26		0,13	<0,30	<0,10	<0,10	3,1	3,9	<2,0	11
PT27		0,38	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4
PT31		<0,10	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	3,6
PT37		0,14	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	5,2
PT40		0,23	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	4,0
PT54		0,21	<0,30	<0,10	<0,10	2,6	<2,5	<2,0	4,7
PT64		0,11	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	9,3	<2,0	16
PT66		0,44	<0,30	8,0	0,15	<2,0	39	<2,0	71
PT69		0,10	<0,30	0,30	<0,10	<2,0	4,2	<2,0	6,1
PT70		0,24	<0,30	1,3	<0,10	3,4	5,8	9,3	12
PT72		0,15	<0,30	<0,10	<0,10	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
PT78		0,11	<0,30	<0,10	<0,10	2,6	<2,5	<2,0	4,1
PT91		0,52	<0,10	0,20	<0,30	3,1	3,1	<2,0	11
PT93		<0,10	<0,10	<0,10	<0,30	2,9	2,7	<2,0	8,3
PT100		<0,10	<0,10	0,14	<0,30	2,7	2,8	<2,0	7,8
PT105		<0,10	<0,10	0,25	<0,30	4,6	<2,5	<2,0	11
PT110		<0,10	<0,10	0,35	<0,30	2,4	3,1	<2,0	7,2
PT123	4,2	<0,10	0,16	<0,30	<2,0	22	<2,0	36	
PT126	1,1	<0,10	0,28	<0,30	4,8	5,9	<2,0	16	
PT127	0,52	<0,10	0,23	<0,30	2,9	2,8	<2,0	11	
PT132	<0,10	<0,10	0,29	<0,30	2,9	2,8	<2,0	9,7	
PT133	<0,10	<0,10	0,36	<0,30	2,9	2,4	<2,0	7,0	
PT134	<0,10	<0,10	0,19	<0,30	<2,0	<2,5	<2,0	6,5	
PT135	0,11	<0,10	0,25	0,37	<2,0	<2,5	<2,0	7,6	

* Parâmetro analisado; ** Unidade de medida;

B.3. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 3ª campanha de amostragem realizada entre 16/05/2006 e 24/05/2006.

Amostra	*	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CE
	**	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm
R1	Água Superficial	0,18	0,11	<0,10	0,03	3,5	<1,0	1,1	5,5
R5		0,18	0,22	0,21	0,05	3,9	1,1	1,2	7,9
R6		0,16	0,19	0,40	0,06	5,7	2,0	1,2	10
R2		0,32	<0,10	0,16	0,05	3,3	<1,0	1,1	5,2
R4		0,17	<0,10	0,18	0,03	11	<1,0	1,2	13
10	Água Subterrânea	0,17	<0,10	<0,10	<0,02	3,7	<1,0	<1,0	6,4
12		0,51	0,22	0,75	0,04	9,7	12	1,1	28
16		0,15	<0,10	<0,10	<0,02	3,8	<1,0	<1,0	6,3
22		0,14	<0,10	6,7	0,38	13	34	<1,0	68
54		0,12	<0,10	<0,10	<0,02	4,8	<1,0	<1,0	9,1
69		0,14	<0,10	1,5	0,05	5,7	3,6	1,1	12
72		0,17	<0,10	<0,10	<0,02	11	<1,0	<1,0	16
78		0,12	<0,10	<0,10	0,02	7,9	<1,0	1,3	12
91		0,20	<0,10	0,36	0,03	4,0	1,7	2,1	8,3
93		0,14	<0,10	<0,10	<0,02	9,5	4,4	1,5	17
100		<0,10	<0,10	<0,10	<0,02	8,4	9,0	1,1	20
110		0,21	<0,10	<0,10	0,05	3,6	2,6	1,3	6,7
123		0,13	0,31	3,52	0,04	8,8	11	1,6	22
124		0,22	0,39	41	3,2	20	122	4,6	234
126		0,22	<0,10	1,0	0,06	5,4	3,5	1,0	11
127		0,38	<0,10	0,38	0,08	4,3	2,7	<1,0	9,0
132		0,24	<0,10	<0,10	<0,02	11	13	<1,0	31
133		0,10	<0,10	<0,10	<0,02	6,2	5,1	<1,0	12
135		0,12	<0,10	0,10	0,03	6,4	<1,0	<1,0	10
A		0,14	<0,10	<0,10	<0,02	3,0	1,6	<1,0	6,1
E	0,12	<0,10	<0,10	<0,02	7,3	<1,0	<1,0	21,4	
R3	0,10	0,10	0,24	0,03	3,4	<1,0	1,4	8,5	
27	<0,10	<0,10	<0,10	<0,02	3,2	<1,0	<1,0	7,0	
31	0,16	<0,10	<0,10	0,04	3,6	<1,0	1,2	7,4	
37	<0,10	<0,10	<0,10	<0,02	3,6	<1,0	<1,0	7,7	
66	0,34	<0,10	6,5	0,14	7,8	36	1,5	84	
67	<0,10	<0,10	0,42	0,02	7,5	10	1,4	21	
105	0,24	<0,10	<0,10	0,03	2,9	<1,0	<1,0	5,5	

* Parâmetro analisado; ** Unidade de medida

B.4. Dados das análises químicas das águas superficiais e subterrâneas durante a 4ª campanha de amostragem realizada entre 14/11/2006 e 29/11/2006.

Amostra	* **	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	CE µS/cm
R2	Água Superficial	2,39	4,74	4,78	13,20	<2,0	<2,5	<2,0	4,4
R3		0,12	<0,1	0,33	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	4,4
R4		0,11	<0,1	0,19	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
R5		0,78	<0,1	0,52	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
R6		0,27	<0,1	0,28	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,2
R7		0,92	<0,1	0,24	0,14	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
PT1A		Água Subterrânea	0,71	<0,1	0,19	<0,1	2,74	2,74	2,37
PTE	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	2,36	<2,5	<2,0	8,4
PT5	<0,1		<0,1	19,68	1,00	3,22	3,22	<2,0	116,2
PT10	0,39		<0,1	<0,1	<0,1	2,27	<2,5	<2,0	4,6
PT12	0,19		<0,1	0,66	<0,1	2,55	2,55	<2,0	32,1
PT16	0,00		<0,1	0,13	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,5
PT22	<0,1		<0,1	7,52	0,14	2,08	<2,5	<2,0	34,4
PT26	0,18		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	43,7
PT27	0,10		<0,1	0,22	<0,1	2,27	2,27	<2,0	4,9
PT31	0,45		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,3
PT37	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,2
PT40	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,5
PT54	0,161		<0,1	0,13	<0,1	2,08	<2,5	<2,0	6,4
PT56	<0,1		<0,1	0,15	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	43,1
PT64	0,11		<0,1	0,19	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	7,4
PT67	<0,1		<0,1	1,05	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	6,7
PT69	<0,1		<0,1	0,94	<0,1	2,27	<2,5	<2,0	8,4
PT70	<0,1		<0,1	0,47	<0,1	2,08	<2,5	<2,0	7,8
PT72	<0,1		<0,1	0,14	<0,1	2,55	2,55	<2,0	6,2
PT78	0,11		<0,1	0,46	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,1
PT88	<0,1		<0,1	0,15	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	<4,0
PT93	<0,1		<0,1	0,14	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	4,4
PT100	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	6,5
PT105	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	4,2
PT110	0,12		<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	5,1
PT123	<0,1		<0,1	1,88	<0,1	2,55	2,55	<2,0	26,9
PT124	<0,1		<0,1	36,12	2,88	3,69	3,69	2,57	197,0
PT126	0,12	<0,1	0,15	<0,1	2,65	2,65	<2,0	7,1	
PT127	0,17	<0,1	0,90	<0,1	2,74	2,74	<2,0	7,8	
PT132	0,29	<0,1	<0,1	<0,1	2,08	<2,5	<2,0	7,1	
PT133	0,22	<0,1	<0,1	<0,1	2,27	<2,5	<2,0	4,9	
PT134	0,41	<0,1	<0,1	<0,1	2,74	2,74	<2,0	8,8	
PT135	0,49	<0,1	<0,1	<0,1	<2,0	<2,5	<2,0	6,1	

* Parâmetro analisado; ** Unidade de medida

B.5. Dados das análises químicas utilizadas na confecção do artigo do Capítulo 1.

Amostra	* **	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	CE μS/cm
SUP01	Água superficial	0,45	0,30	0,15	<0,10	0,35	2,30	<0,10	8,00
SUP02		0,38	0,20	<0,10	<0,10	0,15	2,30	<0,10	5,00
SUP03		0,25	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	<2,00	<0,10	15,00
SUP04		0,59	0,27	0,36	<0,10	1,98	<2,00	<0,10	3,00
SUP05		0,09	<0,001	0,09	0,02	<0,50	<5,00	<0,50	-
SUP06		0,08	<0,001	0,01	0,01	0,51	<5,00	<0,50	-
SUP07		0,08	<0,001	0,12	0,02	<0,50	<5,00	<0,50	-
SUP08		0,05	0,02	0,16	0,02	0,66	<5,00	<0,50	-
SUP09		0,38	<0,001	0,25	0,02	<0,50	<5,00	<0,50	-
CH01	Água de chuva	0,13	0,11	0,93	0,10	<0,50	<5,00	<0,50	-
SAU01	Água subterrânea	8,15	0,74	0,33	0,20	2,16	5,90	<0,10	36,00
SAU02		2,50	0,50	<0,10	<0,10	2,43	<2,00	0,10	22,00
SAU03		0,40	<0,10	<0,10	<0,10	0,22	<2,00	<0,10	6,00
SAU04		0,60	0,27	0,36	0,10	1,98	<2,00	<0,10	14,00
SAU05		0,64	0,15	0,66	0,15	1,55	<2,00	<0,10	13,00
SAU07		0,33	0,12	<0,10	<0,10	0,39	<2,00	<0,10	7,00
SAU10		0,41	<0,10	<0,10	<0,10	1,22	<2,00	<0,10	16,00
SAU11		0,27	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<2,00	<0,10	4,00
SAU12		0,44	1,99	0,93	0,20	0,30	5,00	<0,10	-
SAU15		0,68	0,27	<0,10	<0,10	1,41	<2,00	<0,10	14,00
SAU17		<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,10	<2,00	<0,10	6,00
SAU18		0,78	<0,10	<0,10	<0,10	0,51	<2,00	<0,10	5,00
SAU19		0,20	<0,10	<0,10	<0,10	0,10	<2,00	<0,10	8,00
SAU22		0,17	0,10	<0,001	0,06	<0,50	<5,00	<0,50	-
SAU27		0,63	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	<2,00	<0,10	7,00
SAU28		0,98	7,95	0,30	0,48	4,51	-	<0,50	-
SAU29		0,20	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	<2,00	<0,10	6,00
SAU30		0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,10	<2,00	<0,10	5,00
SAU32		0,20	<0,10	0,10	<0,10	0,92	<2,00	<0,10	6,00
SAU33		0,27	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	<2,00	<0,10	8,00
SAU34		0,18	<0,001	0,04	0,03	<0,50	<5,00	<0,50	-
SAU36		0,69	<0,10	<0,10	<0,10	0,48	<2,00	<0,10	5,00
SAU38		0,20	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	<2,00	<0,10	5,00
SAU40		0,44	0,15	<0,10	<0,10	0,30	<2,00	<0,10	8,00
SAU41		0,24	<0,10	<0,10	<0,10	0,10	<2,00	<0,10	6,00
SAU43		0,20	<0,10	<0,10	<0,10	0,10	<2,00	<0,10	5,00
SAU44		0,46	1,00	0,10	<0,10	0,80	<2,00	<0,10	16,00
SAU45		0,20	<0,10	<0,10	<0,10	0,10	<2,00	<0,10	7,00
SAU47		0,14	<0,001	0,45	0,02	<0,50	<5,00	<0,50	-
SAU49		0,65	<0,001	0,03	0,03	1,15	<5,00	<0,50	-
SAU50		0,94	0,05	0,05	0,03	0,61	<5,00	<0,50	-
SAU52		0,23	<0,001	<0,001	0,02	0,89	<5,00	<0,50	-
SAU54		0,73	0,47	0,01	0,03	1,05	<5,00	<0,50	-
SAU56	1,77	14,50	0,18	0,27	16,80	<5,00	<0,50	-	
SAU57	0,14	<0,001	0,002	0,02	1,01	<5,00	<0,50	-	
SAU58	0,35	<0,001	<0,001	0,02	0,53	<5,00	<0,50	-	
SAU59	0,05	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU60	0,11	<0,001	0,30	0,02	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU61	0,09	<0,001	<0,001	0,07	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU62	0,19	0,17	0,17	0,04	0,77	<5,00	<0,50	-	
SAU63	0,07	<0,001	<0,001	0,08	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU65	0,17	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU66	0,15	<0,001	<0,001	0,02	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU67	0,08	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU69	0,40	<0,001	<0,001	0,02	0,64	<5,00	<0,50	-	
SAU78	0,05	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU81	0,18	0,22	0,36	0,03	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU83	0,02	0,53	0,05	0,02	1,84	<5,00	<0,50	-	
SAU85	0,09	<0,001	<0,001	0,01	1,32	<5,00	1,23	-	
SAU87	0,05	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU88	0,06	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	
SAU91	0,10	<0,001	<0,001	0,01	<0,50	<5,00	<0,50	-	

* Parâmetro analisado; ** Unidade de medida

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Orientações para Preparação do Artigo:

O trabalho submetido para avaliação preliminar deverá ser digitado em programa Word for Windows ou compatível, fonte Arial, tamanho 12, espaçamento duplo, em papel A4, margens de 2,5 cm, sem numeração de páginas e ter, no máximo, 30 páginas, já incluindo figuras e tabelas. Serão aceitos trabalhos em Português, Espanhol e Inglês e serão publicados no idioma em que foi redigido originalmente. Os artigos deverão, obrigatoriamente, apresentar resumo em Português e Inglês. Além disso, caso o idioma escolhido não seja o Português, o título deverá obrigatoriamente ser apresentado secundariamente nesse idioma, sendo mantido o título original no idioma do artigo. O título do trabalho, com no máximo 140 toques, deverá aparecer na primeira página do trabalho.

Antecedendo o texto serão apresentados dois resumos em Português e Inglês. Para trabalhos redigidos em Espanhol, o segundo resumo será em Português e o terceiro em Inglês. O resumo deverá ser redigido em parágrafo único, variando entre 1.000 a 1.500 toques, apresentando de forma breve e objetiva a justificativa do trabalho, os métodos utilizados, os resultados e as conclusões. Após o resumo, incluir obrigatoriamente uma lista de até cinco palavras-chave que expressem o assunto do trabalho.

O texto deverá ser redigido de forma impessoal, objetiva, clara, precisa e coerente.

O título do trabalho, bem como os das tabelas e figuras deverão ser apresentados no idioma do trabalho e em Inglês. As abreviaturas deverão ser identificadas, por extenso, na primeira vez que

aparecem no texto. As unidades das grandezas numéricas deverão obedecer aos padrões do Sistema Internacional de Unidades (SI).

As tabelas serão numeradas sequencialmente e inseridas no final do texto. O título deve ser claro e conciso e colocado no topo da tabela. Outras informações relativas à tabela (origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da tabela, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal.

A tabela terá largura equivalente a uma coluna (7,5 cm) ou duas colunas (15 cm).

As figuras (mapas, fotos, perfis, esboços, gráficos, diagramas, etc.), devem ser numeradas sequencialmente e inseridas ao final do texto. O título deve ser claro e conciso e colocado na base da figura. Outras informações relativas à figura (legenda, origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da figura, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal.

As figuras devem ser preparadas em alta resolução (maiores que 1Mb). Para uma boa legibilidade, os símbolos e caracteres de texto das figuras devem ter tamanho mínimo de 1 mm, mesmo após a redução da figura.

As citações mencionadas no texto devem ser indicadas pelo sistema Autor-Data, obedecendo a norma ABNT NBR 10.520 (agosto/2002), ou a que estiver vigente. Abaixo seguem exemplos de citações:

- Na sentença: sobrenomes dos autores em letras minúsculas, seguidos pelo ano entre parênteses.
- Artigos até 2 autores: Conforme Anderson e Woessner (1992), o conjunto de equações algébricas resulta...
- Artigos com 3 ou mais autores: Segundo Zalán et al., (1987), a Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica desenvolvida...

- Várias obras do mesmo autor: a) do mesmo ano: Custódio (1983a), condiciona os indicadores geoquímicos da temperatura de aquíferos à... Para Custódio (1983b), o uso das fontes termais com fins terapêuticos... b) de anos diferentes: Para Rebouças (1976, 1979, 2002), a importância da água subterrânea pode ser auferida...

- No fim da frase: sobrenomes dos autores em letras maiúsculas, seguidos pelo ano, ambos entre parênteses... proximidades das zonas de ocorrência dessas fontes (ALFARO e WALLACE, 1994).

SIGLAS

- Entidade Coletiva: citar o nome da entidade por extenso, seguida da sigla. Nas subseqüentes, usar apenas a sigla. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2002)...

OUTROS DOCUMENTOS

- Órgãos Públicos: De acordo com dados apresentados pelo Ministério do Meio Ambiente... (BRASIL, 2004)... políticas da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA (PARANÁ, 2003).

- Leis, decretos, etc.: a) ...de acordo com o Artigo 2º da Lei 9.605 (BRASIL, 1998); b) ...conforme determina o Artigo 1º da Portaria DAAE 717/96 (SÃO PAULO, 1996).

As referências bibliográficas citadas no texto deverão ser listadas no final do trabalho, em ordem alfabética, obedecendo à norma ABNT NBR 6023-08 (agosto/2002) ou a que estiver vigente.

LIVROS

CASTANY, G. Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Barcelona: Omega, 1975.

PARTES OU CAPÍTULOS DE LIVROS

CUSTÓDIO, E. Principios básicos de química y radioquímica de las aguas subterráneas. In:

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrologia subterránea. Barcelona: Omega, 1983a.

PERIÓDICOS

SHUSTER, E. T.; WHITE, W. B. Source areas and climatic effects in carbonate groundwaters determined by saturation indices and carbon dioxide pressures. *Water Resources Research*. Washington (DC), v. 8, n. 4, p. 1067-1073, 1972.

PUBLICAÇÕES SERIADAS

HEM, J. D. Study and interpretation of the characteristics of natural waters. 2., *Geological Survey Water-Supply Paper*, Washington (DC), n. 1473, p. 1-334, 1970.

TESES E DISSERTAÇÕES

OLIVEIRA, E. Ethanol flushing of gasoline residuals - microscale and field scale experiments. Waterloo, Ontário, Canadá, 1997. 291 p. Tese (Doutoramento em Hidrogeologia). Universidade de Waterloo.

CONGRESSOS

ANDRÉ, H.; RICHER, C.; DOUILLET, G. Les jaugeages par la méthode de dilution en 1970. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN HYDROMETRY, 1970, Koblenz. Proceedings...* Koblenz : Unesco/WMO/IAHS, 1970, v. 1, p. 239-250.

RELATÓRIOS

Geologia Ambiental Ltda - GEA. Projeto PROSAM/PEB-07 - Relatório Final. Curitiba: 1998. Companhia de Saneamento do Paraná. Projeto Concluído. Áreas: Fervida e Botiatuva.

LEIS

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. *Diário Oficial da União, Brasília*, v. 59, p. 266-270, 26 mar. 2004, Seção 1.

ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES

PREPARAÇÃO

Uso de software Word

Os manuscritos devem ser preparados com linhas numeradas, com margens amplas e espaço duplo em todo artigo, ou seja, também para resumos e referências. Cada página do manuscrito, incluindo a página do título, referências, tabelas, etc, devem ser numeradas. Evite o uso excessivo de itálico para enfatizar partes do texto.

O texto deve estar no formato de coluna única. Mantenha o layout do texto o mais simples possível. A maioria dos códigos de formatação vai ser removido e substituído no processamento do artigo. Em particular, não use as opções do processador de texto para justificar o texto ou para hifenizar as palavras.

No entanto, não usar negrito, itálico, subscripto, sobrescrito etc. Não incorporar equações ou tabelas produzidas graficamente, mas prepará-los usando as opções do processador de texto. Ao preparar tabelas, se você estiver usando uma grade de tabela, utilize apenas uma grade para cada tabela individual e não uma grade para cada linha. Se nenhuma grade for utilizada, use tabulação e não espaços, para alinhar colunas. Não importe os dados (tabelas e figuras) no arquivo de texto, em vez disso, indique as suas localizações aproximadas diretamente no texto eletrônico e no manuscrito.

ESTRUTURA DO ARTIGO

Subdivisões – Seções numeradas

Divida o seu artigo em seções bem definidas e numeradas. Subseções devem ser numeradas 1.1 (em seguida, 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (o resumo não está incluído na secção de numeração).

Qualquer subseção deve ser fornecida um título breve. Cada título deve aparecer em uma linha separada.

Palavras-chave

Imediatamente após o resumo, fornecer um máximo de 6 palavras-chave. Evitar termos gerais e plurais e diversos conceitos (evitar, por exemplo, 'e', 'de').

Abreviações

Definir abreviações que não são padrões em uma nota de rodapé na primeira página do artigo.

Essas abreviaturas que são inevitáveis no resumo devem ser definidas na sua primeira menção, bem como em nota de rodapé. Garantir a consistência das abreviaturas ao longo do artigo.

Referências

A responsabilidade pela exatidão das citações bibliográficas encontra-se inteiramente com os autores.

Citação no texto

Certifique-se que todas as referências citadas no texto também está presente na lista de referências (e vice-versa).

Formatação da referência

Não há exigências rígidas sobre referência de formatação na submissão. As referências podem ser em qualquer estilo ou formato, desde que o modelo é consistente. Se for caso disso, o autor (s) nome (s), título da revista / título do livro, título do capítulo / título do artigo, ano de publicação, número do volume / capítulo de livro e a paginação deve estar presente. Uso de DOI é altamente incentivado. O estilo de referência utilizado pela revista será aplicado ao artigo aceito pela

Elsevier na fase de prova. Note-se que os dados em falta serão destacados na fase de prova para o autor para corrigir.

Estilo de referência:

Texto: Todas as citações no texto devem referir-se a:

1. autor único: o nome do autor (sem iniciais, a menos que haja ambiguidades) e do ano de publicação;
2. Dois autores: ambos os nomes dos autores e o ano de publicação;
3. Três ou mais autores: nome do primeiro autor seguido de "et al." e o ano de publicação.

Citações podem ser feitas diretamente (ou entre parênteses). Grupos de referências devem ser listadas primeiro em ordem alfabética, em seguida, em ordem cronológica. Para Notas que contenham mais de uma citação, as referências devem ser separadas por um ponto e vírgula.

Exemplos: "como demonstrado (Allan, 1996a, 1996b, 1999; Allan and Jones, 1995).

Kramer et al. (2000) mostraram recentemente "

Lista: As referências devem ser organizadas em ordem alfabética primeiro e depois mais ordenados cronologicamente, se necessário. Mais de uma referência do mesmo autor (es), no mesmo ano, devem ser identificados pelas letras "a", "b", "c", etc., colocados após o ano de publicação.

Exemplos:

Referência a uma publicação da revista:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2000. The art of writing a scientific article. J. Sci. Commun. 163, 51–59.

Referência a um livro:

Strunk Jr., W., White, E.B., 1979. The Elements of Style, third ed. Macmillan, New York.

Referência a um capítulo em um livro editado:

Mettam, G.R., Adams, L.B., 1999. How to prepare an electronic version of your article, in: Jones, B.S., Smith, R.Z. (Eds.), Introduction to the Electronic Age. E-Publishing Inc., New York, pp. 281–304.