

Influencia de los factores geológicos e hidrogeológicos en las altas concentraciones naturales de fluoruro en las aguas subterráneas del Grupo Bambuí (Neoproterozoico), norte del estado de Minas Gerais, Brasil

M. Iglesias Martínez⁽¹⁾, L. N. M. Velásquez⁽²⁾, L. M. Fantinel⁽²⁾, A. Uhlein⁽²⁾, S. Melo da Silva⁽³⁾ y P. C. H. Rodrigues⁽⁴⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de proyectos de Almería. C/ Real 115, 3º-A 04002 Almería
marioiglesiasmartinez@yahoo.es

(2) Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil) – Profesor(a).
IGC Av. Pres. Antônio Carlos 6.627 Pampulha 31.270-901 Belo Horizonte, Brasil
menegase@yahoo.com.br, luciafantinel@gmail.com, auhlein@uai.com.br

(3) Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil) – Doctorando.
IGC Av. Pres. Antônio Carlos 6.627 Pampulha 31.270-901 Belo Horizonte, Brasil
smelos@click21.com.br

(4) Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (Brasil) – Investigador
Av. Pres. Antônio Carlos, 6.627 – Pampulha 31.270-901 Belo Horizonte, Brasil
pchr@cdtm.br

RESUMEN

En la región semiárida y semihúmeda del norte del estado de Minas Gerais (sureste de Brasil), la captación de parte significativa del agua de abastecimiento se realiza por medio de sondeos profundos. En varias localidades las concentraciones de fluoruro son superiores al límite de potabilidad de 1,5 mg/L causando problemas en el abastecimiento público y en la salud de los habitantes. Han sido detectadas epidemias de fluorosis dental desde la década de 1990 y su causa se ha asociado al consumo de estas aguas. Estudios previos apuntan a las mineralizaciones de fluorita en las rocas carbonáticas del Grupo Bambuí como principal mineral fuente del fluoruro en las aguas subterráneas. Sin embargo, no se había identificado la contribución específica de cada unidad hidroestratigráfica. El presente trabajo presenta el resultado de los estudios estratigráficos y de análisis hidroquímico de 144 sondeos y de la influencia de las facies carbonáticas en las concentraciones de fluoruro, las cuales están relacionadas a las mineralizaciones de fluorita (control litoestratigráfico) y a la profundidad de circulación de las aguas subterráneas (control geoquímico), diferenciando, de forma inédita, tres unidades hidroestratigráficas. El análisis de correlación de los parámetros hidrogeoquímicos de los sondeos (F, Mg²⁺, SO₄²⁻ y conductividad eléctrica) corrobora la diferenciación de esas tres unidades. La probabilidad de concentraciones elevadas de fluoruro, en función de las unidades hidroestratigráficas, expresada en orden decreciente, parece ser: nivel superior de la Formación Sete Lagoas; Formación Lagoa do Jacaré; y los niveles inferior y medio de la Formación Sete Lagoas.

Palabras clave: acuífero carbonático, fluorita, fluorosis, fluoruro, Grupo Bambuí

Influence of geological and hydrogeological factors on the high natural fluoride concentrations in groundwaters in Bambuí Group (Neoproterozoic), northern of Minas Gerais state, Brazil

ABSTRACT

In the northern semi-arid and semi-humid region of Minas Gerais State, in the southeast Brazil, substantial part of the water supplying is produced by means of deep wells. In several localities the fluoride concentrations are higher than 1.5 mg/L, maximum acceptable limit for drinking water, endangering the public supply and the public health. Epidemics of dental fluorosis have been detected since the decade of 1990. The cause of this problem has been associated to the consumption of local drinking water. Current studies indicate the occurrences of fluorite in the limestones of the Bambuí Group as the main mineral-source for the fluoride content in the groundwater, however without identifying the specific contribution of each hydrostratigraphic unit. This work shows the results of stratigraphic studies and hydro-

chemical analysis of 144 deep wells and the influence of the carbonatic facies in the fluoride concentrations of the water. Fluoride concentrations are related to fluorite occurrences/mineralizations (lithostratigraphic control) and to circulation depth of groundwater (geochemical control), newly distinguishing three hydrostratigraphic units. The correlation analysis of hydrogeochemic parameters (F , Mg^{2+} , SO_4^{2-} and electric conductivity) corroborates these grouping into three units. The probability of the contamination by fluoride, as a function of the hidrostratigraphic units, in decreasing order, seems to be: top level of the Sete Lagoas Formation; Lagoa do Jacaré Formation; and botton and middle levels of the Sete Lagoas Formation.

Key words: Bambuí Group, carbonate aquífer, fluoride, fluorite, fluorosis

Introducción

La región de estudio, localizada en la cuenca media del río São Francisco, se sitúa en el extremo norte del estado de Minas Gerais (sureste de Brasil), con una extensión aproximada de 38.000 km², incluyendo 25 términos municipales. Está contenida en el polígono delimitado por los meridianos 43°19'00''W - 45°48'10''W y por los paralelos 14°14'17''S - 16°39'36''S (Figura 1).

El área se caracteriza por la complejidad de problemas sociales, económicos y ambientales. Generalmente esos problemas aparecen interconectados, especialmente en lo referente a la necesidad de un desarrollo regional sostenible. La zona de estudio se encuentra dentro de la denominada área de incidencia de sequía según SINIMA (2008), y se caracteriza por un elevado déficit hídrico, con precipitación pluvial media de 1.090 mm/año, comprendida entre 876 a 1.438 mm/año, evapotranspiración real de 812 a

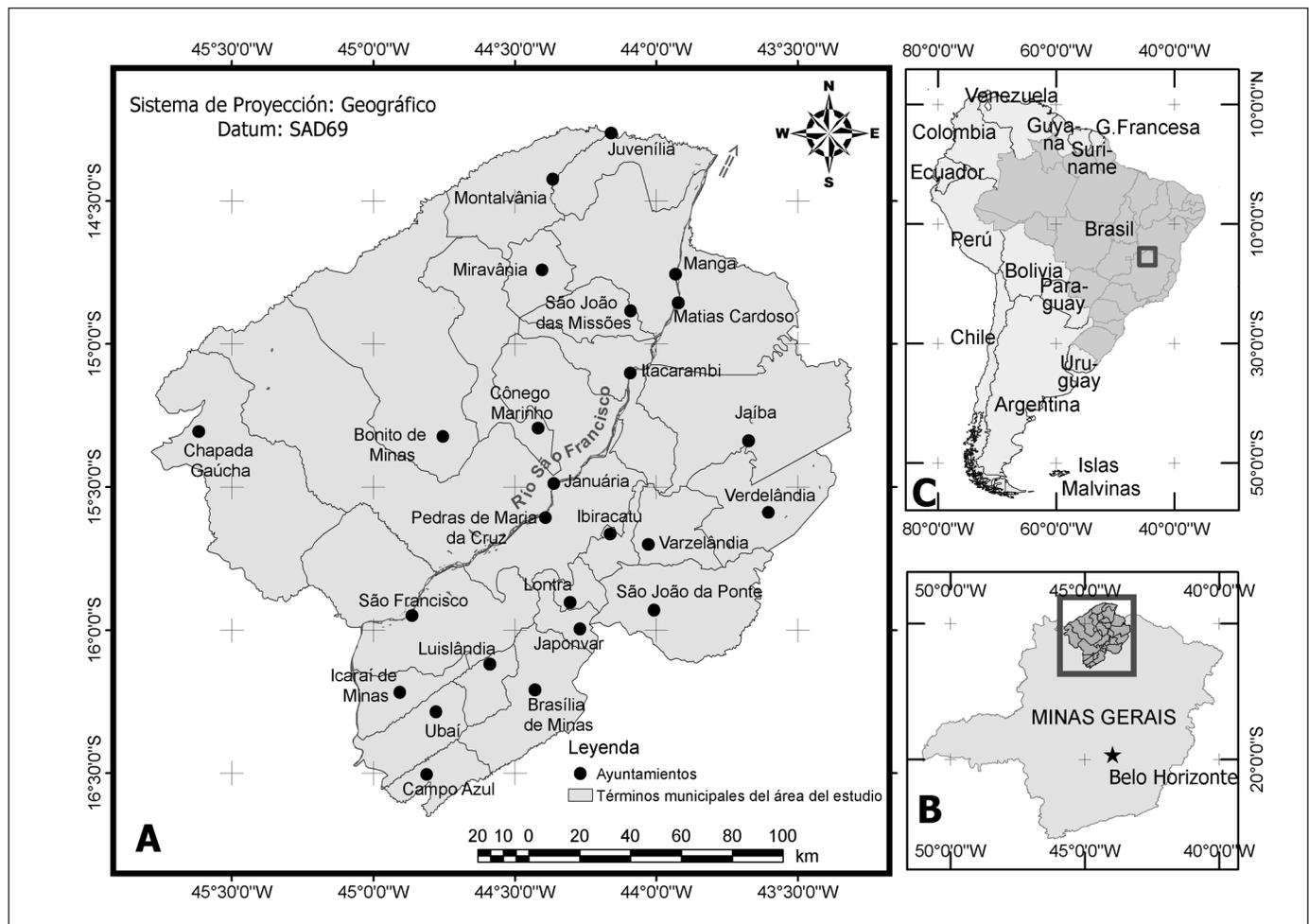


Figura 1. Localización del área de estudio: (A) detalle del área de estudio; (B) mapa regional y (C) mapa continental
 Figure 1. Study location: (A) study area detail; (B) regional map and (C) continental map

835 mm/año (Patrus *et al.*, 2001; Fundação João Pinheiro, 2006) y por una distribución irregular de lluvias, normalmente concentrada en cuatro meses del año (noviembre, diciembre, enero y febrero), que van seguidos de largos períodos de estiaje.

Aunque existe una baja disponibilidad hídrica superficial en gran parte del año, hay una elevada potencialidad de recursos hídricos subterráneos, originados por la infiltración directa del agua de lluvia en el sistema geológico cárstico-fisurado de relieve aplanado. La potabilidad de esas aguas queda en muchas ocasiones comprometida debido a las elevadas concentraciones de fluoruro, que alcanzan, en algunos lugares, hasta 11 mg/L. Velásquez *et al.* (2003 y 2007a), identificaron diez municipios donde los sondeos de abastecimiento público contenían concentraciones excesivas de fluoruro. Por esa razón, desde el final de la década de 1990, cuando comenzaron a ser diagnosticados casos de fluorosis dental, la utilización para abastecimiento humano del agua de muchos sondeos ha sido interrumpida, lo que agrava aún más las condiciones socio-económicas y de calidad de vida de las poblaciones locales.

Con el objetivo de presentar algunas soluciones mitigadoras que puedan orientar las políticas públicas locales, se están desarrollando estudios científicos integrados en la región. Simultáneamente a la investigación geológica e hidrogeológica, se realizó un amplio inventario epidemiológico para la fluorosis dental en el área por Velásquez *et al.* (2003 y 2007a), mostrando un elevado grado de prevalencia de esta enfermedad entre las poblaciones afectadas, con porcentajes mayores del 90% en las localidades en las que fue consumida agua subterránea con concentraciones de fluoruro superiores a 1,5 mg/L.

Las concentraciones de fluorita en los carbonatos del área estudiada indicaron un origen geológico para las anomalías de fluoruro en las aguas subterráneas (Velásquez *et al.* 2003, 2007a e Iglesias, 2007) y los resultados epidemiológicos (Velásquez *et al.* 2003 y 2007a) mostraron que la causa de la endemia es debida a la ingestión de las aguas fluoruradas. Estos estudios apuntaron hacia las unidades carbonáticas y siliciclásticas-carbonáticas del Grupo Bambuí como probable fuente del problema.

El flúor es un elemento que existe de manera natural en pequeñas cantidades en las aguas naturales (0,1 a 2,0 mg/L). Es producto de la alteración de minerales en los cuales es el elemento principal o secundario, tales como: fluorita (CaF_2), principal mineral de flúor, apatito ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{F},\text{OH},\text{Cl})_2$), criolita ($3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$), topacio ($(\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F},\text{OH})_2$), micas y minerales de la arcilla, entre otros. En las aguas subterráneas, que están más influenciadas por la composi-

ción del sustrato, los compuestos de flúor están presentes generalmente en cantidades mayores que en las superficiales. El aumento de la concentración natural del fluoruro en el agua subterránea depende, en general, de factores geológicos, de los tiempos de residencia y de factores climáticos.

En pequeñas cantidades, el flúor es beneficioso para la salud humana, principalmente en niños, promoviendo el endurecimiento de la matriz mineral de los dientes y esqueleto y se ha mostrado como el agente químico más eficiente en la prevención de la caries dental (ASTDR, 2001). Aún así, por encima de ciertas concentraciones pasa a ser perjudicial, causando enfermedades como la fluorosis dental y esquelética, que se caracteriza por el oscurecimiento de los dientes y por la pérdida de resistencia de los dientes y huesos (*op cit*).

Los contenidos máximos de fluoruro permitidos en aguas de abastecimiento son establecidos en función de la edad del consumidor y de la cantidad de agua ingerida diariamente. En los países tropicales, donde la ingestión diaria de agua es superior, se aconseja mayor rigor en el control de esos contenidos. Según la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2004), la concentración máxima de fluoruro recomendada (valor también adoptado en Brasil) depende directamente de la temperatura máxima diaria del aire. En el área de estudio esa temperatura es superior a 26,4°C, lo que resulta en concentraciones máximas recomendadas de 0,8 mg/L.

Objetivos

Este estudio tiene como objetivo identificar las causas de las concentraciones anómalas de fluoruro en las aguas subterráneas en el área ocupada por las unidades siliciclásticas-carbonáticas del Grupo Bambuí, en la región norte del estado de Minas Gerais, definiendo la contribución de sus respectivas unidades hidroestratigráficas y destacando aquellas que ofrecen un mayor riesgo de contaminación y consecuentes endemias asociadas.

Contexto geológico

La depresión del río São Francisco, en la región norte del estado de Minas Gerais, presenta una sucesión sedimentaria y metasedimentaria de bajo grado metamórfico, constituida por coberteras neoproterozoicas (Grupo Bambuí) y fanerozoicas (Grupo Urucuaia y depósitos terciario-cuaternarios) de la cuenca intracratónica del São Francisco. El basamento, constituido

por gneises con enclaves máficos, aflora solamente en algunos puntos localizados en las proximidades de las ciudades de Januária y Bonito de Minas (Figura 3).

El Grupo Bambuí (700-600 Ma) constituye una asociación de litofacies siliciclásticas y carbonáticas, formadas por la acumulación de sedimentos de plataforma depositados sobre un mar epicontinental. Regionalmente, se identificaron las diferentes formaciones de este grupo, teniendo como base la estratigrafía propuesta por Costa y Branco (1961) (Figura 2).

En el área de estudio, el Grupo Bambuí está representado por dos sucesiones principales: la basal,

marina, compuesta, de la base hacia el techo, por las formaciones Sete Lagoas (carbonática), Serra de Santa Helena (siliciclástica-carbonática), Lagoa do Jacaré (carbonático-siliciclástica) y Serra da Saudade (siliciclástica), las cuales componen el Subgrupo Paraopeba; la sucesión superior, marino-continental, está representada por la Formación Três Marias, predominantemente arenosa (Figura 3).

La Formación Sete Lagoas, aunque sedimentológicamente puede ser individualizada en siete litofacies (Abreu-Lima, 1997; Nobre-Lopes, 2002), para los fines de este trabajo fue subdividida en dos niveles: (1)

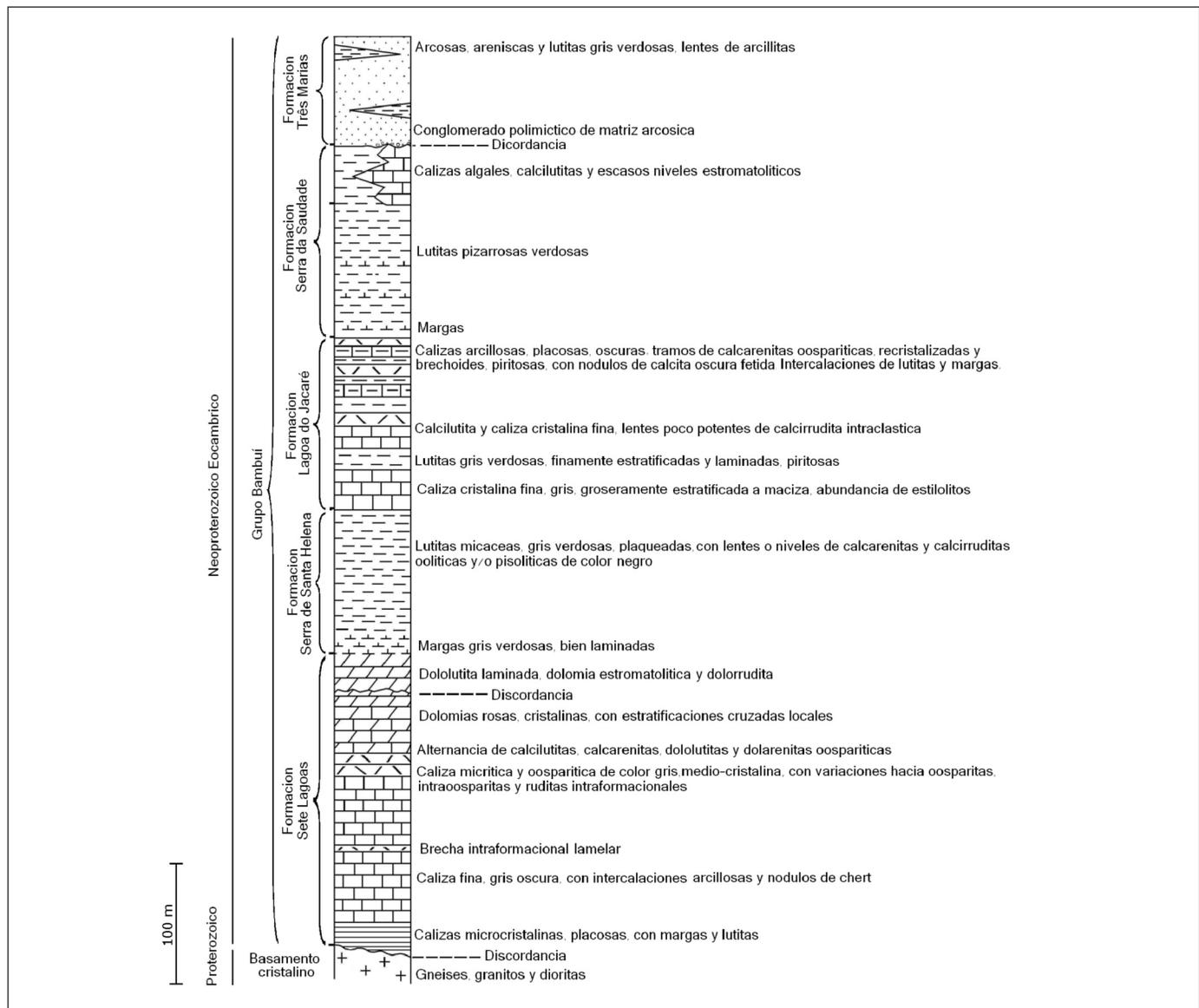


Figura 2. Columna estratigráfica sintética de la zona de estudio (Iglesias, 2007)

Figure 2. Synthetic stratigraphic column of the area (Iglesias, 2007)

nivel basal-medio, constituido por calizas oscuras, finamente cristalinas, bien estratificadas, con horizontes ricos en nódulos de *chert* y brechas intraformacionales y (2) nivel superior, caracterizado por litofacies dolomíticas - calcarenitas dolomíticas oolíticas, en ocasiones intraclásticas; dolomías rosadas, fuertemente brechificadas, localmente oolíticas o estromatolíticas y dolomías sublitográficas.

Es en el miembro superior, predominantemente dolomítico, donde se encuentran hospedadas la práctica totalidad de las mineralizaciones explotadas de fluorita en los municipios de Januária, Itacarambi y Montalvânia (Cassedanne, 1972; Baptista y Meneguesso, 1976; Borges *et al.*, 2002, Nobre-Lopes, 2002). De manera general, la fluorita se presenta asociada a mineralizaciones plumbo-zincíferas (Pb-Zn-V-Ag), siguiendo un excelente control estratigráfico. La fluorita aparece principalmente como venas rellenando fisuras y fracturas en las calcarenitas y dolomías rosadas, o diseminada en las dolomías sublitográficas. La mayor parte de las mineralizaciones están orientadas según las direcciones NW-SE y NE-SW, relacionadas con estructuras tectónicas regionales (Baptista y Meneguesso, 1976), siendo más productivas aquellas que se sitúan en zonas de mayor fracturación. Un origen hidrotermal para esas mineralizaciones ha sido admitido por la mayoría de los autores (Nobre-Lopes, 2002; Borges y Coelho, 2002; Borges y Coelho, 2002).

El nivel basal-medio de la Formación Sete Lagoas aflora en el margen izquierdo del río São Francisco, en la región comprendida entre las ciudades de Januária e Itacarambi. En ese horizonte no se hallaron mineralizaciones significativas de fluorita. El techo del nivel se ha preservado solamente en la cumbre de algunas sierras (Mãe Joana y Cardoso de Minas, en Itacarambi), en transición hacia las metapelitas de la Formación Serra de Santa Helena. En esas sierras, el espesor total de la Formación Sete Lagoas alcanza localmente 200 m (Figura 4).

El espesor de la Formación Sete Lagoas es muy variable como consecuencia de una notable subsidencia diferencial (Iglesias, 2007), de manera que, mientras en la región de Januária-Itacarambi, la potencia total de la formación no alcanza los 100 metros, en la región de Lontra, al sur y en la región de Montalvânia, al este, puede superar los 400 metros, según resultados obtenidos por sondeos de la DNPM (*Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*) (1980) (Figura 4). El adelgazamiento de la Formación Sete Lagoas en la región de Januária-Itacarambi es atribuido a la presencia de un alto estructural del basamento gnéisico denominado Alto de Januária (Figura 5).

La Formación Serra de Santa Helena constituye una sucesión sedimentaria predominantemente lutítica, compuesta por lutitas y margas de colores verdosos (rojizas cuando están alteradas) e intercalaciones métricas de calizas, no habiendo sido encontradas en ellas mineralizaciones macroscópicas de fluorita.

La Formación Lagoa do Jacaré constituye la unidad con mayor superficie de afloramientos entre las formaciones del Grupo Bambuí en el área de estudio. Representa una secuencia carbonático-siliciclástica, compuesta por calizas negras a grises (calcarenitas y calcilutitas), localmente oolíticas y pisolíticas, brechas intraclásticas, margas e intercalaciones de lutitas de color verdoso. Microscópicamente, las calizas muestran una intensa diagénesis, lo que a veces conlleva la pérdida de las texturas deposicionales. Los principales eventos diagenéticos identificados son estilolitización por compactación, dolomitización por sustitución y/o cementación, silicificación y neomorfismo generalizado (Iglesias y Uhlein, 2009).

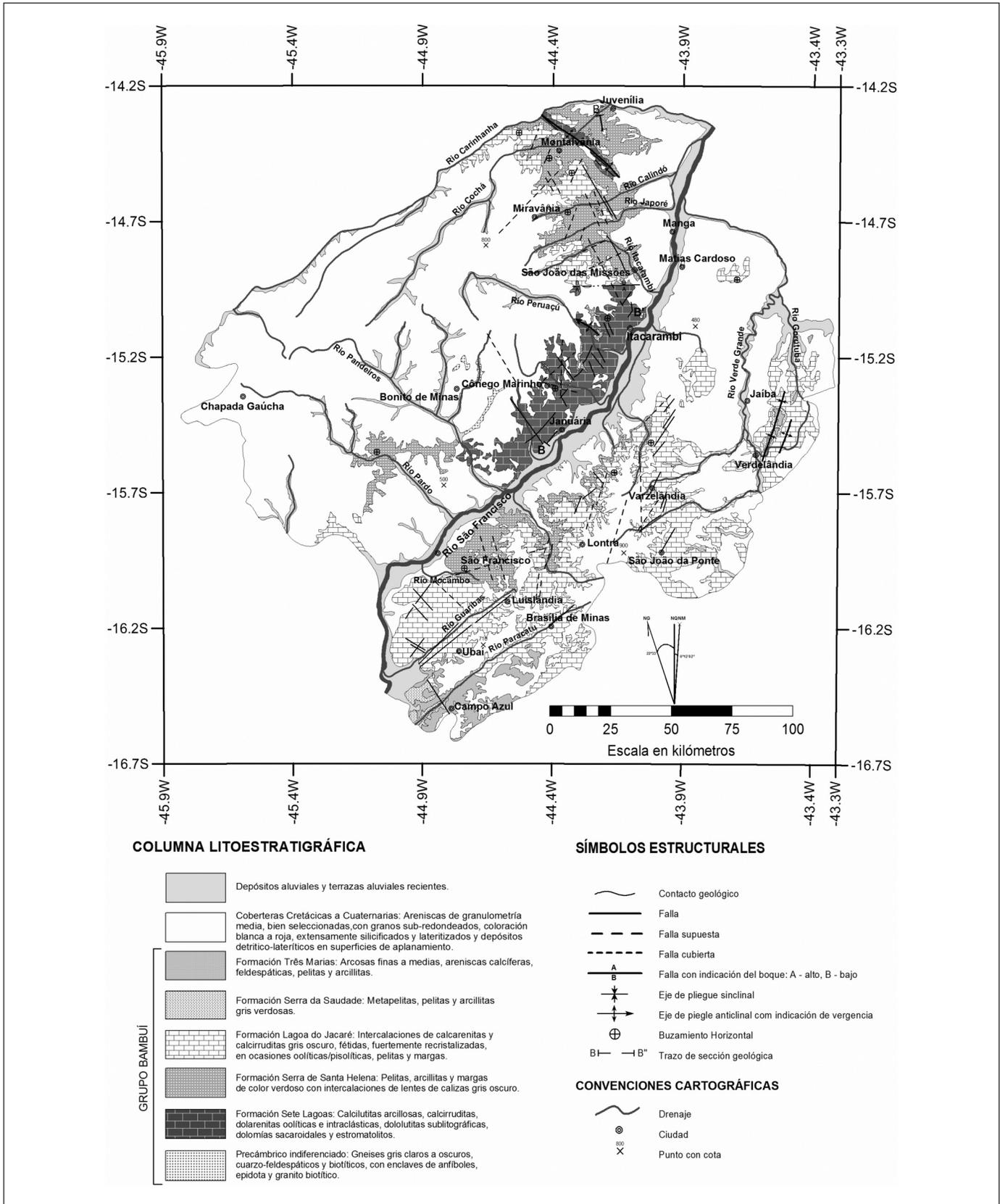
En trabajos de campo, se identificaron mineralizaciones de fluorita en facies carbonáticas de las formaciones Sete Lagoas y Lagoa do Jacaré, como cristales macro y microscópicos diseminados, preferentemente en venas de calcita blanca recristalizada en fracturas subparalelas a la estratificación (Velásquez *et al.* 2003; Iglesias, 2007).

Los cristales de fluorita presentan dimensiones milimétricas a centimétricas (de 0,5 a 2 cm de arista) y muestran coloración rosa a violeta. Más raramente, se encuentran diminutos cristales de fluorita diseminados en el cemento de las calcarenitas de esas formaciones (Velásquez *et al.*, 2003).

En contacto discordante con las formaciones inferiores, pudiendo situarse sobre cualquiera de ellas, el Grupo Uruçuia (Cretácico) está constituido predominantemente por cuarzoarenitas rojizas y blancas de granulometría fina a media. Estas areniscas se presentan frecuentemente compactas y muy silicificadas.

Las Coberteras Cenozoicas son unidades con una gran distribución en el área, resultado de los intensos procesos erosivos que afectaron a las unidades anteriores. Se presentan generalmente poco consolidadas, con espesores variables y pueden ser clasificadas como depósitos aluviales, coluviales y eluviales.

Tectónicamente, el área forma parte del compartimiento central del Cratón del São Francisco (Alkmim y Martins-Neto, 2001) y, a excepción del extremo este, donde se observan plegamientos asociados a la orogenia brasiliana/panafricana, el área representa una cobertera tabular poco deformada a escala regional. No obstante, estructuras tectónicas de orientación NW y NE fueron observadas en trabajos de campo y



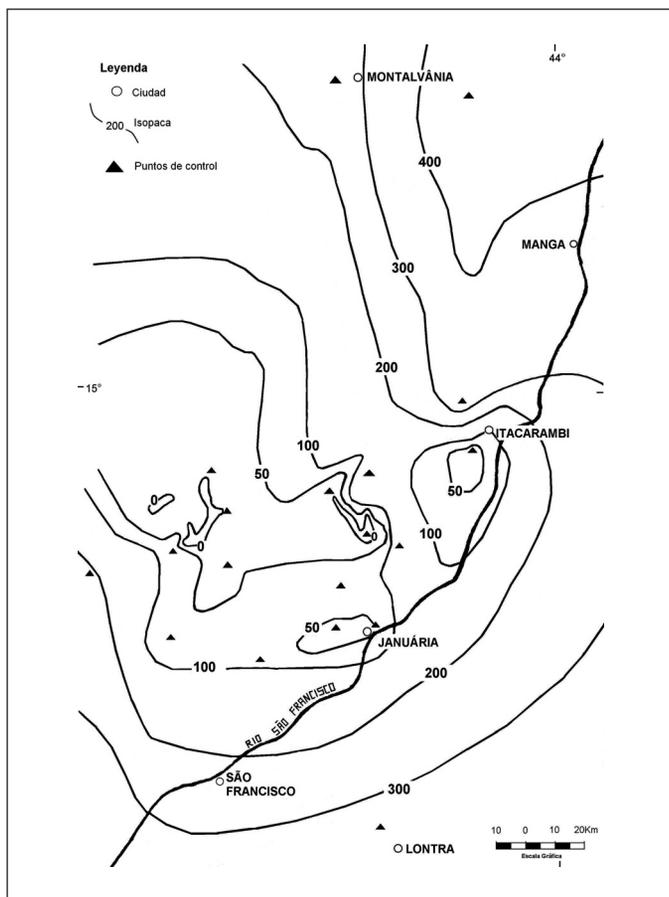


Figura 4. Mapa de isopacas de la Fm. Sete Lagoas (escala aproximada). Los triángulos representan puntos de control, donde el espesor fue verificado por levantamiento de secciones o testigos de sondeo (Iglesias, 2007)

Figure 4. Isopachs map of Sete Lagoas Formation (approximately scale). Triangles represent control points, where thickness was verified by stratigraphical sections, by core samples or by tubular wells (Iglesias, 2007)

a través de datos de satélite - SRTM (Figura 6). De manera general, la estructuración del área de estudio está controlada por la disposición del basamento, que muestra altos estructurales (Alto de Januária) y depocentros locales en la porción sur y este del área, donde el espesor del Grupo Bambuí es substancialmente mayor.

El río São Francisco representa una divisoria en la distribución y espesor de las formaciones del Grupo Bambuí en el área. La falta de correspondencia entre el margen izquierdo (porción oeste del área), donde afloran las rocas carbonáticas de la Formación Sete Lagoas, y el margen derecho (porción este), representada por la sucesión siliciclástica-carbonática de las formaciones Serra de Santa Helena y Lagoa do

Jacaré, fue relacionada por diversos autores (Robertson, 1963; Cassedane, 1972; Lopes, 1979) a una falla de gravedad, enmascarada por las extensas coberteras de la planicie aluvial del río São Francisco, de dirección NNE con hundimiento del bloque del margen derecho.

Eventos de reactivación tectónica asociados a la apertura del Atlántico Sur (Cretácico-Terciario), dieron lugar a la sedimentación de las areniscas del Grupo Urucuia (Campos y Dardenne, 1997), además de una fracturación generalizada, según las direcciones NE y NW, que condicionan gran parte del sistema de drenaje del área hasta la actualidad.

Hidrogeología

El paquete de rocas carbonáticas y pelíticas del Grupo Bambuí, así como los sedimentos arenosos de las coberteras cenozoicas y las areniscas del Grupo Urucuia permiten la definición de dos sistemas acuíferos hidráulicamente conectados: el inferior, cárstico-fisural, y el inmediatamente superior, granular (Velásquez *et al.*, 2007a y 2007b).

El sistema acuífero cárstico-fisural está constituido por la secuencia de rocas carbonáticas y pelíticas subhorizontales del Grupo Bambuí y ocupa, a excepción de las mesetas del margen oeste del río São Francisco, la mayor parte del área estudiada. Las unidades carbonáticas sufrieron un intenso proceso de fracturación y carstificación. Así, las mejores posibilidades de almacenamiento corresponden a las zonas de mayor incidencia de fracturas en las unidades carbonáticas.

En general, el acuífero cárstico-fisural es libre, aunque las pelitas funcionan localmente como acuíferos promoviendo condiciones de artesianismo. Los caudales de los pozos son extremadamente variables en el dominio cárstico-fisural, desde pocos m³/h hasta 260 m³/h, reflejando el elevado grado de anisotropía de este sistema acuífero. La profundidad media del acuífero es de 85 m, con media de 70 m de espesor saturado.

El sistema acuífero granular está constituido por las siguientes unidades: areniscas del Grupo Urucuia, coberteras terciario-cuaternarias y depósitos aluviales y coluviales recientes. La recarga del sistema granular tiene lugar a partir de la infiltración directa de la precipitación.

Velásquez *et al.* (2007a) realizaron estudios hidrogeoquímicos en el área de investigación, a partir del análisis químico de 155 muestras de agua en pozos entubados. Respecto al fluoruro, los resultados del estudio mostraron que el 18,7% de los sondeos se

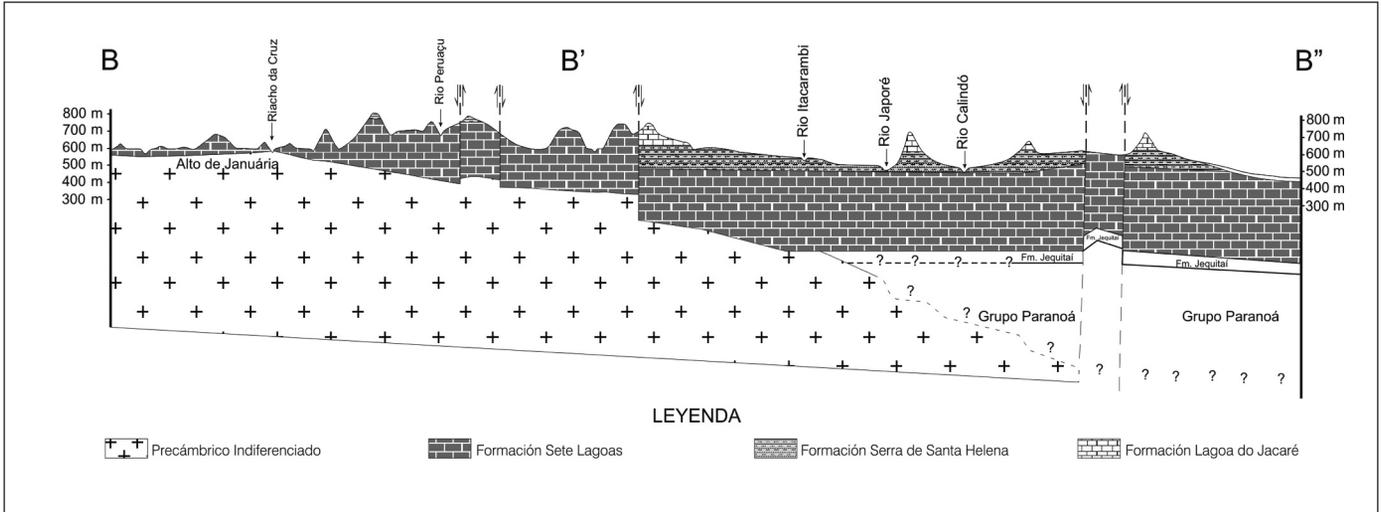


Figura 5. Perfil geológico BB' y B'B''
 Figure 5. Geological section BB' and B'B''

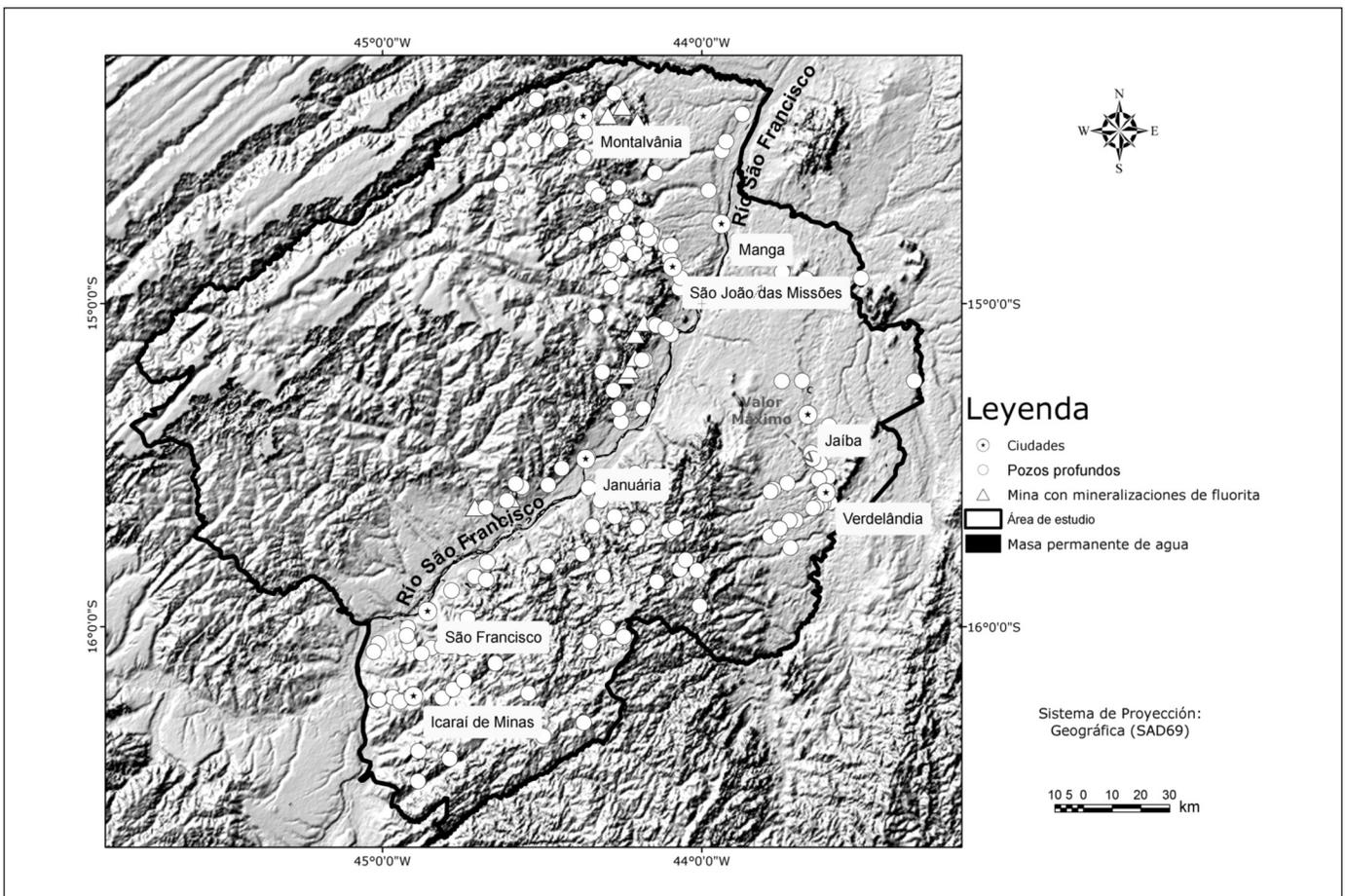


Figura 6. Modelo Digital del Terreno y localización de los sondeos estudiados y de las mineralizaciones de fluorita
 Figure 6. Digital terrain model and location of the studied wells and fluorite mineralizations

encontraban por encima de 0,8 mg/L, valor máximo recomendado para fluoruración en Brasil (DOU, 1976), y un 8,4% encima de 1,5 mg/L, valor máximo permitido de potabilidad (DOU, 2004).

Metodología

Esta investigación tomó como base los datos obtenidos por Velásquez *et al.* (2003, 2007a y 2007b), en los que fue estudiada la hidrogeología, geoquímica del flúor y la epidemiología de la fluorosis dental en el área, y también fue ejecutada una cartografía geológica de integración regional a la escala 1:500.000 por Iglesias (2007).

De los 155 sondeos investigados preliminarmente, se utilizaron en el presente proyecto informaciones de 145 sondeos (de ellos solamente 144 poseen los datos hidroquímicos completos) para la identificación de las unidades hidroestratigráficas y de sus correlaciones con los contenidos anómalos de fluoruro: perfiles litológicos, localización geográfica, profundidad total, concentración de fluoruro y datos hidroquímicos indicadores de facies carbonáticas.

Cabe destacar una dificultad encontrada, que fue la inexistencia de registros de los perfiles litológicos de los sondeos perforados por las empresas públicas, que constituyen el 80% de los sondeos inventariados. Tan solo 30 sondeos disponían de esos datos, los cuales fueron facilitados por la empresa de saneamiento COPASA-MG. Las unidades litológicas de los restantes 115 sondeos fueron interpretadas y discriminadas a partir de su localización en el mapa geológico. Los resultados se cotejaron con perfiles estratigráficos, con la descripción de sondeos testificados (DNPM y CPRM, 1980) y con perfiles litológicos de los sondeos construidos por la empresa de saneamiento.

Las cotas de los sondeos estudiados fueron obtenidas por medio de la interpolación de los datos altimétricos del SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), disponibles por el USGS (2004), con cuadrícula original de 90m x 90m, calculadas en las coordenadas exactas de los sondeos muestreados. Tanto para la interpolación de la cuadrícula SRTM como para el cálculo de las coordenadas de los sondeos fue utilizado el aplicativo Surfer (Golden Software, 2004), con su interpolador "nearest neighbor" y la subrutina "slice", respectivamente.

Los sondeos fueron agrupados de acuerdo con las unidades hidroestratigráficas correspondientes, validados por el estudio estadístico de F, conductividad eléctrica, Mg^{2+} y SO_4^{2-} para cada grupo. Estos parámetros han sido escogidos en función de sus especificidades litoestratigráficas y mineralizaciones hidroter-

males, permitiendo una identificación de la distribución y concentración del fluoruro en esas unidades.

Para las correlaciones entre las unidades y las concentraciones anómalas naturales del flúor, tema central del presente estudio, estas concentraciones fueron usadas como criterio para relacionarlas a dos niveles de significación sanitaria: 0,8 mg/L (valor máximo recomendado por la legislación brasileña - *Portaria* N° 635/BSB de 26/12/1975 - para fluoruración en Brasil, según la temperatura local) y 1,5 mg/L (valor máximo permisible por la *Portaria* 518/2004 del *Ministério da Saúde*).

Resultados

A partir de la identificación de las unidades geológicas atravesadas por los 145 sondeos analizados, fue posible individualizar las dos grandes unidades acuíferas de la región: la Formación Sete Lagoas y la Formación Lagoa do Jacaré. La circulación de las aguas corresponde, principalmente, a las porciones carbonáticas fisurales y cársticas presentes en ambas formaciones, quedando comprobado por las características físico-químicas de 154 análisis (Velásquez *et al.*, 2007). El 81% de esas aguas presentan pH alcalino, con media de 7,4 (6,7 a 9,3); el 71% de los análisis muestran durezas totales superiores a 200 mg/L

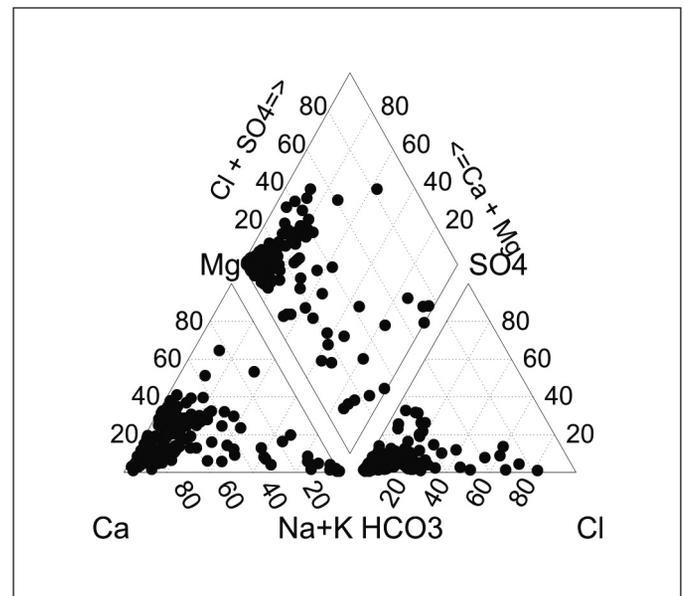


Figura 7. Diagrama de Piper para las 148 muestras válidas en sondeos, Velásquez *et al.* (2007)

Figure 7. Piper Diagram for the 148 valid samples in deep wells, Velásquez *et al.* (2007a)

CaCO₃, con media de 287 mg/L CaCO₃ (3 a 1.087). De las muestras válidas, el 78% (148) son de tipo bicarbonatado cálcico (Figura 7).

La diferenciación hidroquímica entre los dos grandes acuíferos fue basada en los parámetros de conductividad eléctrica y en las concentraciones de los iones F⁻, Mg²⁺ y SO₄²⁻, que reflejan las diferencias

hidroquímicas de las respectivas aguas de circulación. La elección de esos parámetros se debió a la presencia, hacia el techo de la Fm. Sete Lagoas, de niveles característicamente dolomíticos, encajantes de las mineralizaciones de sulfuros asociados a la fluorita. En la Formación Lagoa do Jacaré, por el contrario, no fueron encontradas diferencias petrográfi-

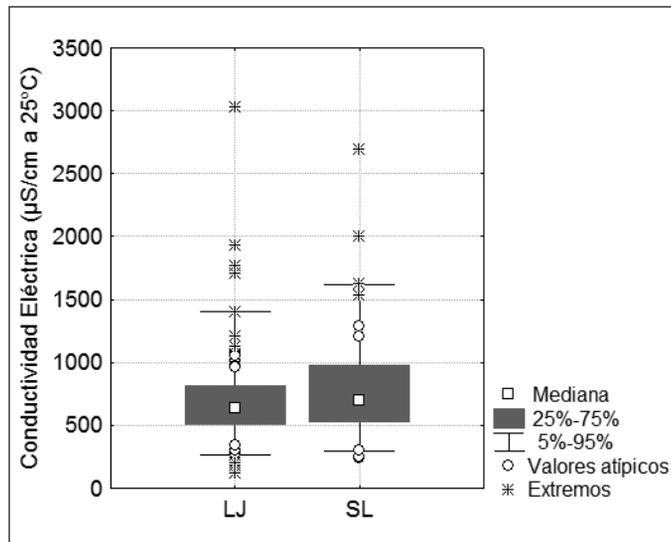


Figura 8. Diagrama de caja de los valores de conductividad eléctrica de las unidades acuíferas Lagoa do Jacaré (LJ) y Sete Lagoas (SL)

Figure 8. Electric conductivity box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and Sete Lagoas (SL)

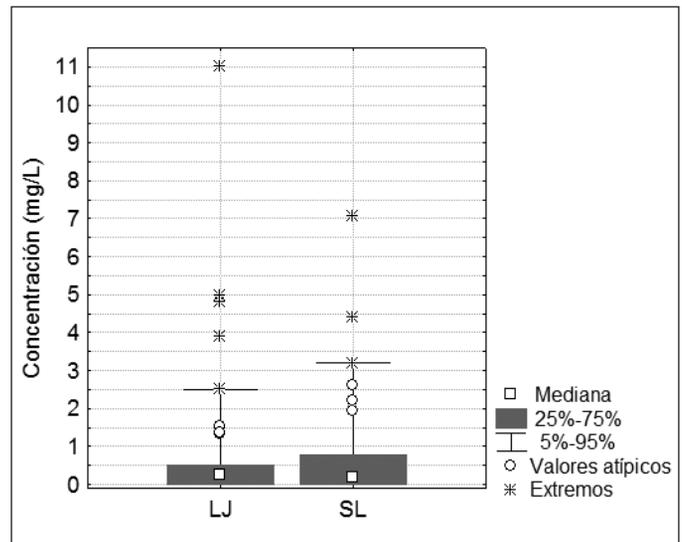


Figura 9. Diagrama de caja de los valores de F de las unidades acuíferas Lagoa do Jacaré (LJ) y Sete Lagoas (SL)

Figure 9. F box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and Sete Lagoas (SL)

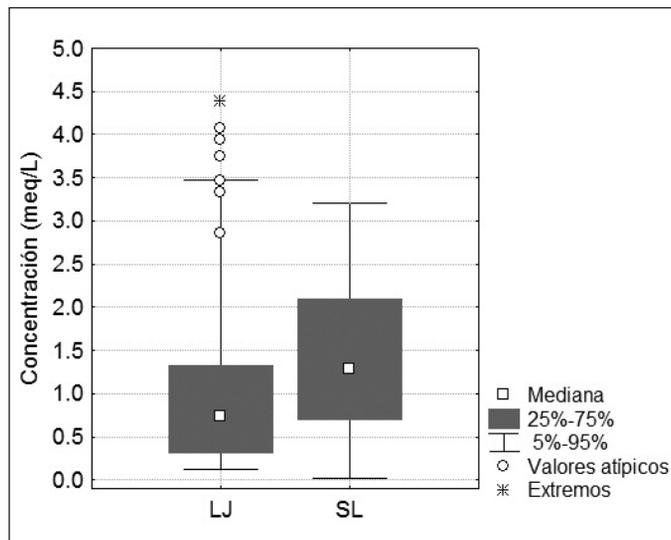


Figura 10. Diagrama de caja de los valores de Mg²⁺ de las unidades acuíferas Lagoa do Jacaré (LJ) y Sete Lagoas (SL)

Figure 10. Mg²⁺ box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and Sete Lagoas (SL)

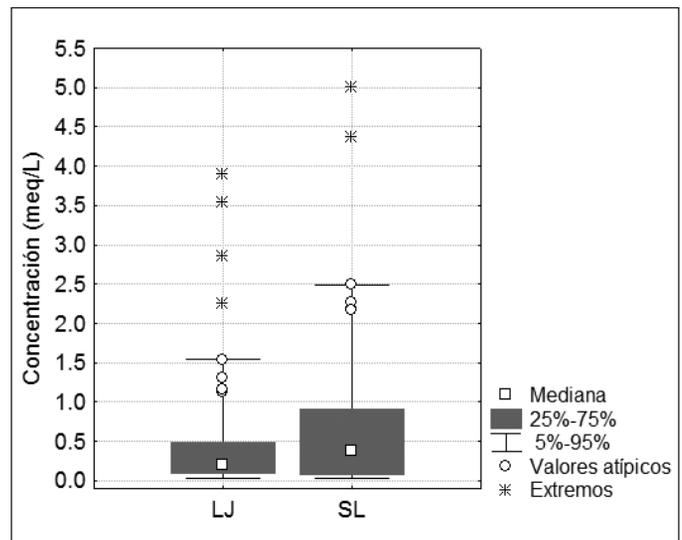


Figura 11. Diagrama de caja de los valores de SO₄²⁻ de las unidades acuíferas Lagoa do Jacaré (LJ) y Sete Lagoas (SL)

Figure 11. SO₄²⁻ box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and Sete Lagoas (SL)

Formaciones acuíferas	Parámetros	Nº Sondeos	mín.	máx.	Media	Mediana	Desviación estándar
Lagoa do Jacaré	C.E.(μ S/cm)	89	120	3.023	714,2	636,0	408,4
Sete Lagoas		55	236	2.690	799,1	697,0	430,3
Lagoa do Jacaré	F ⁻ (mg/L)	89	0,00	11,00	0,62	0,24	1,42
Sete Lagoas		56	0,00	7,05	0,67	0,20	1,23
Lagoa do Jacaré	Mg ²⁺ (mg/L)	89	1,10	53,29	12,92	8,94	12,94
Sete Lagoas		54	0,31	50,40	18,63	16,70	12,10
Lagoa do Jacaré	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	87	1,10	187,40	21,37	10,30	33,14
Sete Lagoas		54	1,37	240,30	36,12	20,86	48,66

Tabla 1. Valores estadísticos de los parámetros en los acuíferos de las Formaciones Lagoa do Jacaré y Sete Lagoas
 Table 1. Statistical values from the aquifer parameters of Lagoa do Jacaré and Sete Lagoas Formations

cas y mineralógicas significativas para este estudio. Esas diferencias justifican un tratamiento hidroestratigráfico individualizado de las Formaciones Sete Lagoas y Lagoa do Jacaré.

Aunque las facies hidroquímicas de los dos acuíferos sean semejantes, los valores de todos los parámetros antes citados son ligeramente superiores en la unidad acuífera Sete Lagoas, como se puede observar en la Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Tabla 1.

Este mismo análisis estadístico, cuando se efectúa para los niveles basal y de techo de la Fm. Sete Lagoas, por separado, muestra valores mucho más elevados en las aguas del nivel de techo. Siguiendo ese tratamiento, los sondeos de los dos acuíferos fueron reagrupados, respectivamente, en: Grupo 1-LJ (Formación Lagoa do Jacaré), Grupo 2-SL_{techo} (nivel de techo de la Formación Sete Lagoas) y Grupo 3-SL_{base} (nivel basal e intermedio de la Formación Sete Lagoas) (Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Tabla 2), corroborando la influencia de los factores mineralógicos, petrológicos y de la dinámica de circulación del flujo.

Estos resultados indican claramente una diferenciación hidroquímica entre los niveles basal/intermedio y de techo de la Fm. Sete Lagoas, presentando valores más elevados en el techo para los cuatro parámetros analizados, destacándose el Mg²⁺ como el que se presenta más elevado, incluso en relación al acuífero de la Fm. Lagoa do Jacaré. Este carácter hidroquímico se debe a la influencia de los horizontes fuertemente dolomitizados contenidos en el techo de la Fm. Sete Lagoas, encajantes de las mineralizaciones asociadas de fluorita y sulfuros.

Cabe destacar que los valores de los datos hidroquímicos del Grupo 2-SL_{techo} son notablemente superiores en comparación con los del acuífero de la Fm. Lagoa do Jacaré, incluso cuando el Grupo 2-SL_{techo} es analizado en conjunto con el Grupo 2-SL_{base} (Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11). El acuífero de la base de la Fm. Sete Lagoas posee los valores más bajos de los tres grupos, excepto para el Mg²⁺ (Figura 14).

Asimismo, se observa un comportamiento parejo entre el F⁻ y la conductividad eléctrica en las tres unidades acuíferas, quedando demostrado por la correlación positiva (*Pearson's*) existente entre ambos.

Es importante resaltar que, tanto el Grupo 1-LJ como el Grupo 2-SL_{techo} incluyen sondeos con mayor o menor participación de las lutitas de la Formación Serra de Santa Helena, situada estratigráficamente entre las Formaciones Sete Lagoas y Lagoa do Jacaré. La carencia de perfiles litológicos y constructivos de los sondeos no permitió la individualización de sondeos que, eventualmente, explotasen agua solamente de la Formación Serra de Santa Helena.

Para el análisis estadístico específico del fluoruro, objeto de este estudio, es importante enfatizar que sus valores límites fueron de 0,8 y de 1,5 mg/L, relativos, respectivamente, al máximo valor recomendado para fluoruración en la región y al máximo para la potabilidad, conforme citado en la Metodología.

La Figura 16 muestra la tendencia de la contribución de cada grupo dentro del conjunto de tres límites de concentración de fluoruro: (a) en el intervalo entre 0 y 0,8 (mg/L), concentraciones aceptables, predominan los sondeos del Grupo 3-SL_{base} (94,4%), con la participación decayendo en los Grupos 1-LJ (82,0%) y Grupo 2-SL_{techo} (68,4%), mientras que en las concentraciones (b) mayores de 0,8 (mg/L) el grupo

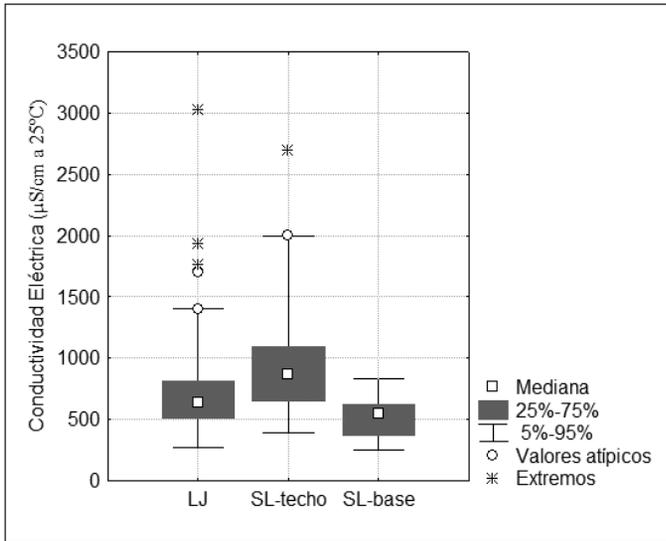


Figura 12. Diagrama de caja de los valores de conductividad eléctrica de las unidades acuíferas de la Fm. Lagoa do Jacaré y de los niveles de techo y basal/intermedio de la Fm Sete Lagoas
 Figure 12. Electric conductivity box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and top and botton/middle levels of the Sete Lagoas (SL)

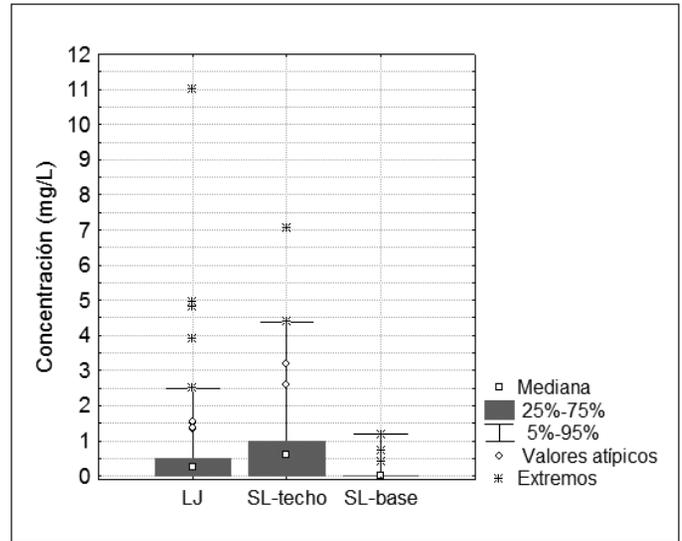


Figura 13. Diagrama de caja de los valores de F de las unidades acuíferas de la Fm. Lagoa do Jacaré y de los niveles de techo y basal/intermedio de la Fm. Sete Lagoas
 Figure 13. F box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and top and botton/middle levels of the Sete Lagoas (SL)

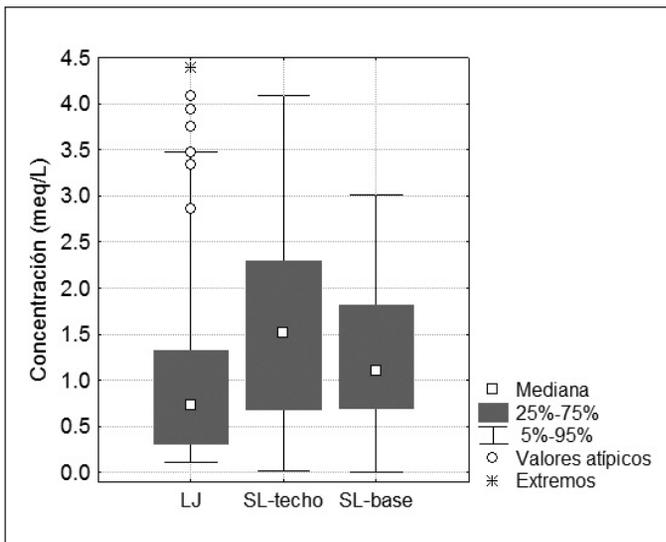


Figura 14. Diagrama de caja de los valores de Mg²⁺ de la unidad acuífera de la Fm. Lagoa do Jacaré y de los niveles de techo y basal/intermedio de la Fm. Sete Lagoas
 Figure 14. Mg²⁺ box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and top and botton/middle levels of the Sete Lagoas (SL)

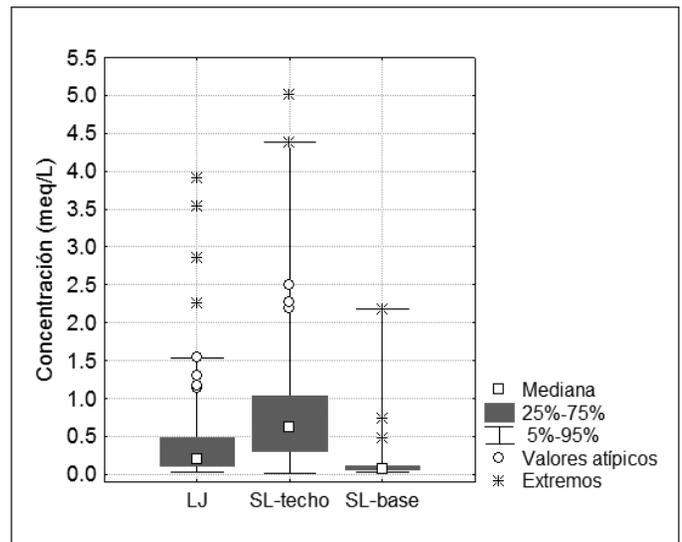


Figura 15. Diagrama de caja de los valores de SO₄²⁻ de la unidad acuífera de la Fm. Lagoa do Jacaré y de los niveles de techo y basal/intermedio de la Fm. Sete Lagoas
 Figure 15. SO₄²⁻ box values from the aquifer units of Lagoa do Jacaré (LJ) and top and botton/middle levels of the Sete Lagoas (SL)

más importante es el Grupo 2-SL_{techo} (31,6%), seguido del Grupo 1-LJ (18,0%) y Grupo 3-SL_{base} (5,6%). Cuando se analiza el límite de concentración de fluoruro (c) superior a 1,5 (mg/L), límite más crítico, la participación del Grupo 3-SL_{base} desaparece (0%), des-

taándose el Grupo 2-SL_{techo} (15,8%), seguido solamente por el Grupo 1-LJ (7,9%).

Esa misma tendencia creciente de los contenidos de fluoruro en el sentido Grupo 3-SL_{base} → Grupo 1-LJ → Grupo 2-SL_{techo} se repite en lo referente a valores en

Formaciones acuíferas	Parámetros	Nº Sondeos	Valor mín.	Valor máx.	Media	Mediana	Desviación estándar
Grupo 1-LJ		89	120	3.023	714,2	636,0	408,4
Grupo 2-SL _{techo}	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	37	236	2.690	922,2	865,0	458,9
Grupo 3-SL _{base}		18	247	835	524,8	551,5	154,5
Grupo 1-LJ		89	0,00	11,00	0,62	0,24	1,42
Grupo 2-SL _{techo}	F ⁻ (mg/L)	38	0,00	7,05	0,93	0,60	1,41
Grupo 3-SL _{base}		18	0,00	1,18	0,13	0,00	0,33
Grupo 1-LJ		89	1,10	53,29	12,92	8,94	12,94
Grupo 2-SL _{techo}	Mg ²⁺ (mg/L)	37	0,31	50,40	19,86	18,80	12,96
Grupo 3-SL _{base}		17	1,22	36,60	15,96	13,45	9,82
Grupo 1-LJ		87	1,10	187,40	21,37	10,30	33,14
Grupo 2-SL _{techo}	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	36	2,40	240,30	48,15	32,15	53,3
Grupo 3-SL _{base}		18	1,37	104,48	12,05	3,44	24,64

Tabla 2. Valores estadísticos de los parámetros del acuífero de la Formación Lagoa do Jacaré y niveles basal y de techo de la Formación Sete Lagoas

Table 2. Statistical values from the aquifer parameters of Lagoa do Jacaré Formation and compartments of Sete Lagoas Formation

media y mediana de fluoruro (Tabla 1 y Tabla 2). Las medias, por ejemplo, de fluoruro en los Grupos 3-SL_{base}, Grupo 1-LJ y Grupo 2-SL_{techo} fueron de 0,13, 0,62 e 0,93 mg/L, respectivamente.

El Grupo 3-SL_{base} representaría la situación menos crítica respecto al fluoruro. En la región de Januária-Itacarambi, lugar donde aflora este grupo, son escasas las mineralizaciones de fluorita, no favoreciendo las altas concentraciones de fluoruro en las aguas.

Los sondeos que atraviesan solamente ese hori-

zonte son característicamente menos profundos y poseen valores de conductividad eléctrica inferiores (Figura 12), indicando menor profundidad de circulación, por lo tanto, menor tiempo de contacto agua-roca, disminuyendo, así, la capacidad de disolución y concentración del fluoruro. El reducido espesor que presenta la Fm. Sete Lagoas en la zona se debe al adelgazamiento del paquete asociado al alto estructural de Januária.

En cuanto a los valores intermedios de fluoruro encontrados en los sondeos del Grupo 1-LJ, los resultados también se mostraron coherentes, visto que las concentraciones frecuentes de fluorita han sido encontradas principalmente en venas calcíticas y, de forma más esporádica, en la matriz rocosa de esa formación (Velásquez *et al.*, 2003).

Conclusiones

Aún existiendo la necesidad de mayor precisión en la descripción de los sondeos, fue posible, por medio del control de campo, de la profundidad de los sondeos y de sus testificaciones, proponer la individualización de 3 grupos de sondeos en la región estudiada, según las características hidroestratigráficas de las unidades por ellos atravesadas. Tal agrupamiento es corroborado por los datos de fluoruro, conductividad eléctrica, Mg²⁺ y SO₄²⁻ del agua subterránea para cada grupo.

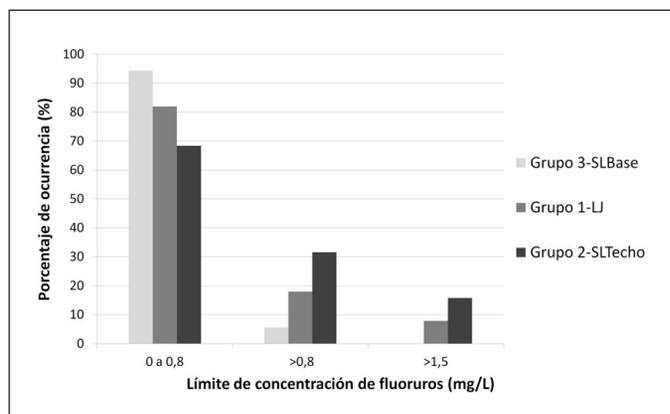


Figura 16. Histogramas de la concentración de F en los grupos de sondeos por rango de concentración

Figure 16. Fluoride concentration histograms of the well groups by concentration range

La probabilidad de concentraciones elevadas de fluoruro, en función de la unidad hidroestratigráfica, expresada en orden decreciente, corresponde a: nivel superior de la Fm. Sete Lagoas; Fm. Lagoa do Jacaré; y los niveles inferior y medio de la Fm. Sete Lagoas.

La mayor incidencia de sondeos con exceso de flúor en el techo de la Fm. Sete Lagoas está comprobada por las mineralizaciones de fluorita que existen en ese nivel, siguiendo un excelente control estratigráfico. Sucede también que en las áreas de mayor espesor de ese horizonte (mayor percolación), característicamente dolomítico, se observan las concentraciones más altas de fluoruro.

Se verifica, así, que las concentraciones anómalas de fluoruro en las aguas subterráneas de la región de estudio están controladas, tanto por la disponibilidad de fluorita, como por las condiciones litológico-estratigráficas. No obstante, los factores estructurales, que no fueron objeto de este trabajo, tales como patrones y génesis de las fracturas y de los conductos cársticos relacionadas a ellas, deben ser igualmente investigados.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecen a las siguientes instituciones el apoyo financiero y técnico: CNPq (Proceso CT-Hidro 503.146/2003), FAPEMIG (Processos: CRA 294/99, CRA772/05 e CRA 1110/03); a las instituciones: IGC/UFMG, CAPES, MAE-AECI, COPASA-MG; a la Dra. Jane Nobre-Lopes (CPRM-RJ) y a los geólogos Dr. Javier Eduardo Becerra Becerra, Dra. Laura González Acebrón y Salvador Jordana.

Referencias

- Abreu Lima, S.A. 1997. *Fácies, ambiente deposicional e aspectos diagenéticos das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região norte de Minas Gerais, Bacia do São Francisco*. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto, 121 pp.
- Alkmim, F.F. y Martins-Neto, M.A. 2001. Estratigrafía e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registros da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. En: Pinto, C.P. y Martins-Neto, M.A. (eds), *A Bacia do São Francisco: geologia e recursos minerais*, SBG, Belo Horizonte, 31-34.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) - *Fluoride, hydrogen fluoride and fluorine*. Atlanta, 05/05/2007, <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts11.html>
- Baptista, M.B. y Meneguesso, G. 1976. *Projeto Leste do Tocantins-Oeste do São Francisco (LETOS)*, Folha Januária. Convênio DNPM/CPRM. Rio de Janeiro, 10 v.
- Borges, V.S.M. y Coelho, C.E.S. 2002. Estudo de inclusões fluidas e isótopos de Sr dos depósitos de fluorita de Serra do Ramalho (BA) e Montalvânia (MG). *XLI Congresso Brasileiro de Geologia*, João Pessoa, 489.
- Campos, J.E.G. y Dardenne, M.A. 1997. Estratigrafía e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27 (3), 257-282.
- Cassedanne, J. 1972. *Catalogue descriptif des gîtes de Plomb et du Zinc du Brésil. Clermond-Ferrand*. Thèse de Doctorat es Sciences Naturelles. Department de Géologie et Minéralogie, Université de Clermond-Ferrand, France.
- Coelho, E.S.C.; Gomes, A.S.R.; Cunha, I.A.; Martins, V.S. 2002. Estudo de inclusões fluidas dos depósitos neoproterozóicos de Pb-Zn-F do Craton do São Francisco. *XLI Congresso Brasileiro de Geologia*, João Pessoa, 406.
- Costa, M.T., Branco, J.J.R. 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte – Brasília. *XIV Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte, 1-119.
- DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) y CPRM (Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais), 1980. *Projeto sondagens Bambuí em Minas Gerais: Relatório Final*. Belo Horizonte, v.1.
- DOU (Diário Oficial da União), Brasil. 1976. *Portaria N° 635/BSB de 26 de dezembro de 1975* (aprueba normas y patrones sobre la fluoruración del agua de los sistemas públicos de abastecimiento destinado al consumo humano), 30 janeiro. Seção 1.
- DOU (Diário Oficial da União), Brasil. 2004. Ministério da Saúde. *Portaria N° 518, de 25 de março de 2004* (establece los procedimientos y responsabilidades relativos al control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano y patrones de potabilidad), 26 de março de 2004.
- Edmunds, M.; Smedley, P. 2005. Fluoride in Natural Waters. En: Selinus, O.; Alloway, B.; Centeno, J.A.; Finkelman, R. B.; Fuge, R.; Lindh, U.; Smedley, P. (eds), *Essentials of Medical Geology Impacts of the Natural Environmental on Public Health*, Elsevier Academic Press, San Diego, 301-329.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute), Inc. 1999-2006. *ArcMap/ArcEditor*, commercial software. Version 9.2.
- Fundação João Pinheiro. *Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil online*. Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) 1991 - 2000. Microsoft Excel-sites-91-00, Belo Horizonte, 21/09/2006, <http://www.fjp.gov.br>.
- Golden Software, Inc. 2004. *Surfer* (Surface Mapping System), commercial software. Version 8.
- Iglesias, M. 2007. *Estratigrafía e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado. IGC/UFMG. Belo Horizonte, 122 pp.
- Iglesias, M. y Uhlein, A. 2009. Estratigrafía do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(2): 256-266.
- Lopes, O.F. 1979. *Mineralization em plomb, zinc et fluorine encasées dans le Group Bambuí, du Proterozoïque Supérieur de la région d'Itacarambi (Minas Gerais, Brésil)*. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie. Paris IV, Paris, 190 pp.
- Nobre-Lopes, J. 2002. *Diagenesis of the dolomites hosting Zn/Ag mineral deposits in the Bambuí Group at Januária region-MG*. Tese de doutorado. Unicamp, Campinas, 183 pp.

- Patrus, M.L.R.A; Santos, A.C.S dos; Figueiredo, V.L.S.; Matos, A.R.; Menezes, I.C.R. 2001. Parcela mineira da bacia do rio São Francisco: caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície. En: Pinto, C.P y Neto, M.A.M. (eds.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*, Belo Horizonte, 285-326.
- Rao, N.S. 1997. The occurrence and behaviour of fluoride in the groundwater of the Lower Vamsadhara River basin, India. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, 42 (6), 877-893.
- Robertson, J.F. 1963. Geology of the Lead-Zinc deposits in the município of Januária, state of Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1110 (B), 110.
- SEMAD (Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável), Minas Gerais, 2006. *Sistema Integrado de Informação Ambiental – SIAM* (online). Belo Horizonte, 22/3/2007, <http://www2.siam.mg.gov.br/webgis/semadmg/viewer.htm>.
- SINIMA (Sistema Nacional de Informações Ambientais). Ministério de Meio Ambiente. Brasil. *Mapa de Áreas de Incidência de Secas*, 15/09/2008, Brasil, <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>.
- StatSoft, Inc. 2004. *Statistica* (Data Analysis Software System) version 7. Tulsa, StatSoft, Inc.
- USGS (United States Geological Survey). 2004. *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, Escena de 3 Arcossegundos. 05/10/2007, <http://seamless.usgs.gov>
- Velásquez, L.N.M., Fantinel, L.M., Ferreira, E.F., Uhlein, A., Castilho, L. S. de Vargas, A.M.D., Costa, W.D. 2003. *Origem do fúor na água subterranean e sua relação com os casos de fluorose dental no município de Sao Francisco, MG, e e epidemiologia de fluorose desntária associada*. Relatório Fapemig. 138 pp.
- Velásquez, L.N.M., Fantinel, L.M., Uhlein, A., Ferreira, E.F., Castilho, L. S. de Vargas, A.M.D., Aranha, P.R.A. 2007a. *Investigação hidrogeológica do Flúor em aquíferos carbonáticos do Médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada*. Relatório CNPq, 130 pp.
- Velásquez, L.N.M., Fantinel, L.M., Ferreira, E.F., Castilho, L. S. de Vargas, A.M.D., Aranha, P.R.A., Marques, G.F., Minardi, P.S.P., Rodrigues, P.S.H., Uhlein, A., Quéméneur, J.J. 2007b. *Estudo das tipologias das ocorrências de fluorita que ocasionam anomalias nos níveis de fluoreto da água subterrânea e sua relação com os casos de fluorose dental no município de Sao Francisco, Minas Gerais*. Relatório Fapemig, 147 pp.
- WHO (World Health Organization). 2004. *Guidelines for Drinking-water Quality*. V. 1. Recommendations. 3rd edition. Geneva.

Recibido: septiembre 2008

Revisado: marzo 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: enero 2010

