

Régime hydrologique et flux de matières dissoutes du karst de São Domingos, Goiás, Brésil

par Jean Loup Guyot ⁽¹⁾, Leonildes Melo Filho ⁽²⁾, & Augusto Auler ⁽³⁾

1 : ORSTOM, CP 09747, 70001-970 Brasília, DF, Brésil

2 : Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, CP 4383, 79919-970 Brasília, DF, Brésil

3 : University of Bristol, Angleterre

Abstract

The karstic massif of São Domingos, located in the Northern part of the state of Goiás, is formed by a carbonate series of the Precambrian, with a thickness of about a hundred meters. This "Serra do Calcário" is crossed from East to West by the exogenous watercourses provenient from the Cretaceous sandstone series of the "Serra Geral" of Goiás.

The study of the pluviometric and hydrometric data available has made possible the characterisation of the rivers hydrological regimes of this region, and consequently made clear the important phenomena of stream piracy of the "Serra Geral" towards the "Serra do Calcário" and the Rio Paranã, former of the Tocantins river.

A control of the inflow and the outflow from the massif, allowed in July 94, the French-Brazilian caving expeditions to appreciate the hydrogeochemical role of the "Serra do Calcário" over the rivers of the region. The results obtained, however temporary, make it possible to move towards an idea of the magnitude of the dissolution rate of the São Domingos tropical karst.

Résumé

Le massif karstique de São Domingos, situé au nord de l'état de Goiás, est constitué d'une série carbonatée du Précambrien d'une centaine de mètres d'épaisseur. Cette « Serra do Calcário » est traversée d'est en ouest par des cours d'eau exogènes issus des séries gréseuse du Crétacé de la « Serra Geral » de Goiás.

L'étude des données pluviométriques et hydrométriques disponibles a permis de caractériser les régimes hydrologiques des rivières de la région, et mettre ainsi en évidence d'importants phénomènes de capture souterraine des eaux de la « Serra Geral » vers la « Serra do Calcário » et le rio Paranã, formateur du fleuve Tocantins.

Un contrôle des flux entrants et des flux sortants du massif, a permis en juillet 94 (Expéditions spéléologiques franco-brésilienne GOIÁS 94) d'apprécier le rôle hydrogéochimique de la « Serra do Calcário » sur les rivières de la région. Les résultats obtenus, bien que provisoires, permettent d'avancer un ordre de grandeur de la vitesse de dissolution du karst tropical de São Domingos.

1. La région de São Domingos

La région de São Domingos est située à 300 km au Nord de Brasília, dans l'état de Goiás, qui avec les états voisins du Mato Grosso du Sud, du Mato Grosso et du District Fédéral, forment la région Centre-Ouest du Brésil. Cette région, qui fait partie de l'ensemble morphologique du « Planalto Central » brésilien, est caractérisée par une végétation d'arbustes et de graminées : le « Cerrado ». Trois domaines lithologiques distincts s'individualisent : la « Serra Geral de Goiás » constituée de grès du Crétacé, le massif calcaire de São Domingos « Serra do Calcário », et la surface d'érosion sur laquelle est située la ville de São Domingos (DUTRA, 1997).

Les eaux de pluie absorbées par le massif gréseux de la « Serra Geral » résurgent à la base des falaises de grès et forment des rivières qui s'écoulent vers l'ouest et viennent buter contre la lisière de la « Serra do Calcário ». Ces rivières traversent alors le massif calcaire par des cours souterrains et vont rejoindre le rio Paranã, formateur du grand rio Tocantins (LE BRET, 1991).

La région karstique de São Domingos peut être définie comme un vaste « causse », ensemble karstifié présentant un amont à cours d'eau exogènes constitués, de fort débit (de plusieurs centaines de l/s à plus de 5m3/s en étiage) qui, en traversant le massif calcaire, se perdent dans d'impressionnantes goules. Ces dernières se développent en galerie-tunnel de grand diamètre. Ces mêmes cours d'eau réapparaissent plusieurs kilomètres en aval par de puissantes résurgences dont certaines sont pénétrables (RODET, 1997).

2. Histoire géologique

Les roches qui affleurent dans la région sont essentiellement le socle cristallin granito-gneissique et les couvertures protérozoïques et crétacées. Les roches du socle cristallin se sont formées il y a plus de 2.5 milliards d'années. Sur ces séries, il y a 1 milliard d'années environ, des sédiments ont commencé à se déposer, qui constituent aujourd'hui les roches calcaires du Groupe Bambuí. Cette sédimentation a pris fin il y a 600 millions d'années, et cet intervalle de temps a reçu le nom de Néoprotérozoïque. Cet épisode est caractérisé par une grande concentration de micro-organismes marins, producteurs d'oxygène et de carbonate de calcium, qui sont à l'origine d'une fantastique production de roches calcaires qui est une des caractéristiques du Groupe Bambuí. La fin du dépôt de ces



Figure 1 : Localisation de la région de São Domingos

sédiments (il y a 600 millions d'années) a été marquée par l'orogénèse Brasileiro/Pan-Africaine. Le passage de l'ère Néoprotérozoïque à l'ère Paléozoïque est marqué par l'apparition de nouvelles formes de vie marine que sont les organismes pluricellulaires. Probablement, à cette époque, le Supercontinent Gondwana était émergé, entraînant le début de l'altération des roches protérozoïques. Cette érosion a continué durant le Paléozoïque et s'est intensifiée à la fin du Mésozoïque. Les grès de la formation Urucua se sont déposés, il y a 135 millions d'années. La sédimentation de cette série détritique s'est effectuée dans un milieu essentiellement désertique. Dans la région, elle présente 300 m d'épaisseur, et recouvrait probablement le Groupe Bambuí. L'ouverture de l'Océan Atlantique a provoqué la séparation de l'Afrique et de l'Amérique. Ce phénomène, associé aux changements climatiques affectant la nouvelle Amérique du Sud, est à l'origine d'une longue période d'érosion qui a débuté il y a 60 millions d'années. Depuis cette époque, et jusqu'à aujourd'hui, les roches du groupe Bambuí ont été soumises aux phénomènes d'altération chimique et mécanique. L'âge des systèmes karstiques est très difficile à estimer, mais ils ont vraisemblablement moins de 60 millions d'années (MELO FILHO L., 1997).

3. Climat

L'ensemble de la région de São Domingos est soumise à un climat tropical chaud sub-humide, caractérisé par un hiver sec et un été pluvieux. Les données climatologiques de la station de Posse permettent de connaître les grands traits du climat de la région de São Domingos. La température moyenne annuelle de l'air est de 23.3°C., et les températures extrêmes enregistrées sont de 7.0°C pour les minima et 36.8°C pour les maxima. Avec une insolation moyenne de 2424 heures par an et une humidité relative de 67%, la station de Posse reçoit 1538 mm de pluie par an. L'essentiel de ces précipitations s'observe durant les 5 mois de novembre à mars, qui totalisent 80% des précipitations annuelles. Par contre, les 3 mois de juin à août ne représentent que 1% environ de la pluviométrie annuelle, le mois de juillet étant statistiquement le mois le plus sec. Les données pluviométriques de 161 stations du DNAEE du quadrant 11-16° de latitude Sud / 44-49° de longitude Ouest, ont été utilisées pour tracer la carte des pluies moyennes annuelles de la région. La tendance générale observée est un gradient positif d'Est en Ouest, avec des précipitations inférieures à 1000 mm par an sur les marges orientales de la Serra Geral (Bassin du Rio São Francisco), et des valeurs supérieures à 1500 mm sur la partie occidentale. La pluviométrie moyenne annuelle sur la Serra do Calcário de São Domingos doit être de l'ordre de 1300 mm par an (Guyot, 1997).

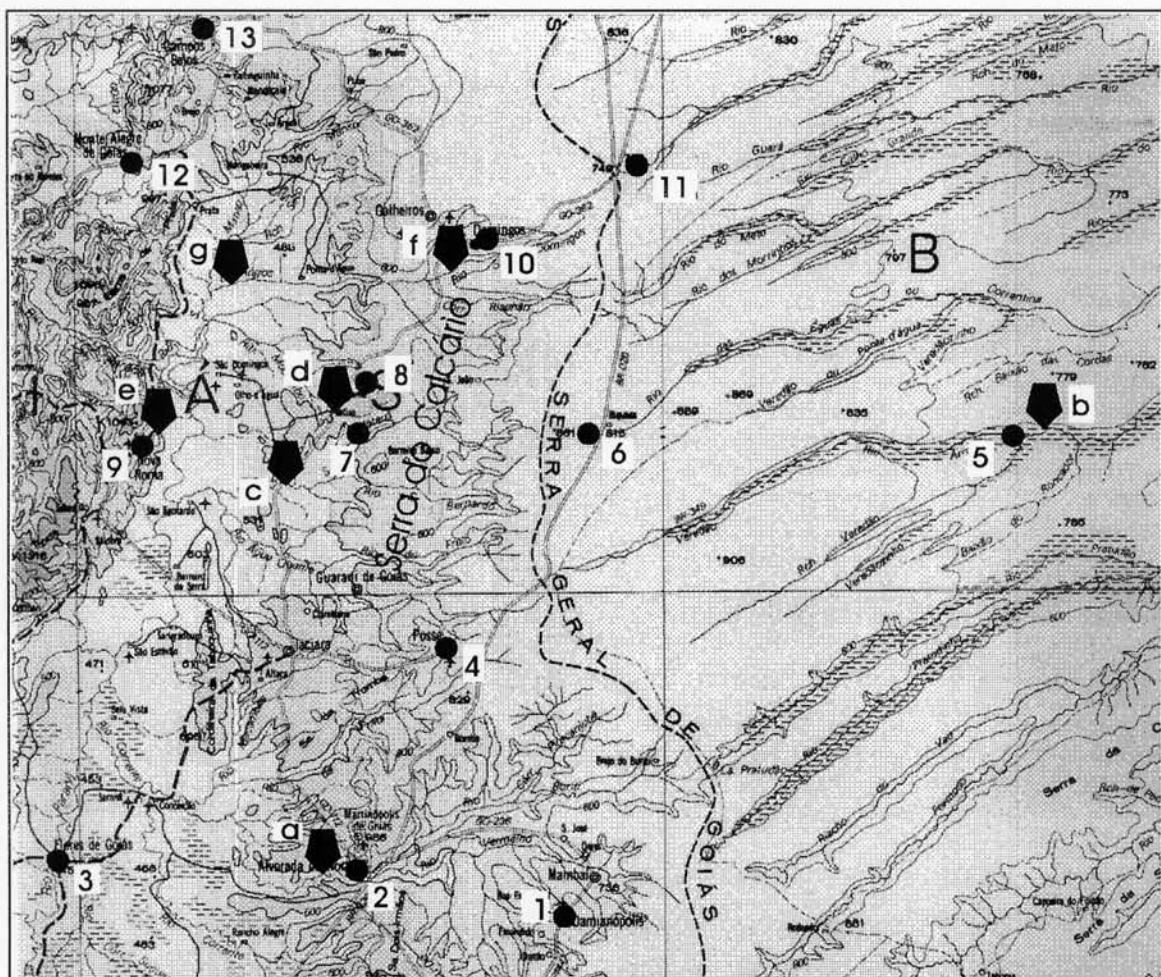


Figure 3 : Carte de la région de São Domingos (● station pluviométrique, ◆ station hydrométrique)

[1: Damianópolis, 2: Alvorada do Norte, 3: Flores de Goiás, 4: Posse, 5: Arrojalândia, 6: Fazenda Planalto, 7: Fazenda Ingazeiro, 8: São Vicente, 9: Nova Roma, 10: São Domingos, 11: Fazenda Prainha, 12: Monte Alegre de Goiás, 13: Campos Belos, a: Rio Corrente à Alvorada do Norte, b: Rio Arrojado à Arrojado, c: Rio São Mateus à Puente São Mateus, d: Rio São Vicente à São Vicente, e: Rio Paranã à Nova Roma, f: Rio São Domingos à São Domingos, g: Rio São Domingos à Fazenda Veneza].

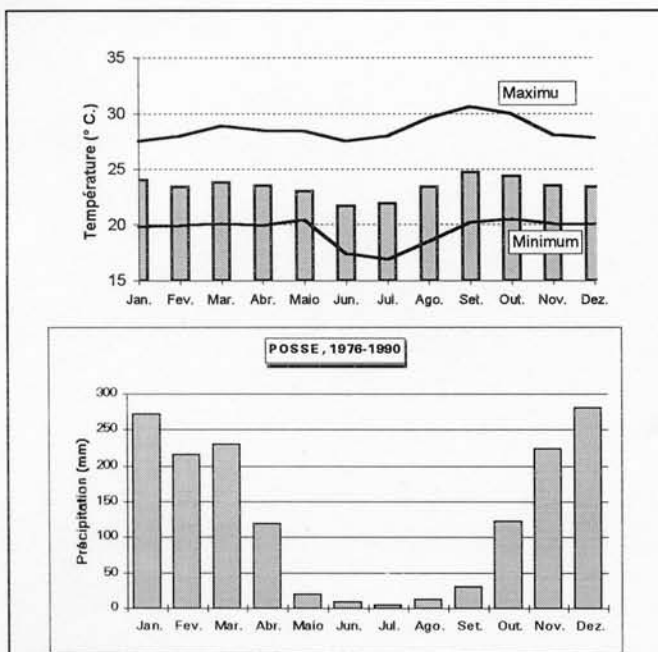


Figure 3 : Caractéristiques climatiques de la station de Posse (Données INEMET).

4. Hydrologie

La distribution des débits moyens mensuels présente pour l'ensemble des stations un régime tropical austral, caractérisé par une saison de hautes eaux de novembre à avril, et une période de basses eaux de juin à octobre. Toutefois, deux types d'hydrogrammes s'individualisent nettement : 1. les cours d'eau issus des formations gréseuses de la Serra Geral de Goiás avec une faible variabilité des débits au cours de l'année, 2. les formateurs du Rio Paranã à une certaine distance de la Serra Geral. Le rapport des débits extrêmes mensuels RQ_m (débit moyen mensuel maximum / débit moyen mensuel minimum) est toujours inférieur à 2 pour les rivières issues de la Serra Geral. Ce rapport RQ_m varie de 2 à 9 sur les autres cours d'eau du bassin du Paranã, avec des valeurs plus faibles dans les bassins proches de la Serra Geral. La comparaison des hydrogrammes des rios Paranã à Ponte Paranã (31 370 km²) et Corrente à Porto Novo (31 120 km²) dont les bassins sont de même taille, est particulièrement démonstrative.

La Serra Geral de Goiás est un aquifère poreux de grande extension qui joue un rôle de réserve hydrique en modulant les débits aux exutoires au cours du cycle hydrologique. Cette caractéristique permet aux cours d'eau de la région d'avoir un débit d'étiage soutenu, alors que les précipitations sont pratiquement nulles durant les 5 mois de la saison sèche. Ce rôle régulateur de la Serra Geral sur les débits journaliers s'observe particulièrement bien dans la région de São Domingos. A São Domingos, le débit de la rivière est quasiment constant, mis à part quelques pics de courte durée lors de la saison pluvieuse, dus aux pluies sur le bassin situé entre la résurgence et la station hydrométrique. A São Vicente et à Ponte São Mateus, le même phénomène est observé, mais avec des pics beaucoup plus importants, bien que toujours de courte durée. Cette réponse plus importante en crue provient d'une plus grande extension des bassins compris entre la Serra Geral et les stations de mesure. Certaines crues importantes peuvent avoir lieu en dehors de la saison des pluies, d'avril à octobre, phénomène à prendre en considération lors des explorations des rivières souterraines. Le débit spécifique (qs) observé sur les cours d'eau du bassin du Rio São Francisco est de l'ordre de 9 l/s.km², valeur qui peut être considérée comme représentative des

rivières issues de la Serra Geral. Les formateurs du Rio Paranã présentent un qs supérieur, de l'ordre de 12 l/s.km², du fait d'une pluviométrie plus importante. Par contre, certains de ces formateurs montrent un qs anormalement élevé (rios São Domingos, São Vicente, São Mateus) probablement lié à une sous estimation de la superficie des bassins versants. Effectivement, ces cours d'eau sont issus de résurgences localisées au pied du versant occidental de la Serra Geral, qui drainent les eaux souterraines de cet immense aquifère, bien au delà des limites topographiques des bassins versants de surface (Le Bret, 1991). Il s'agit d'un bel exemple de capture des eaux du bassin du Rio São Francisco vers le bassin du Rio Tocantins-Paraná. Pour le Rio São Domingos, c'est environ 1500 km² qui seraient ainsi capturés, alors que le bassin topographique n'est que de 320 km². De même, pour le Rio São Mateus (systèmes São Bernardo - Palmeiras, Terra Ronca - Malhada, et São Mateus - Imbira) et le Rio São Vicente (systèmes São Vicente et Angélica - Bezerra), les superficies capturées seraient de l'ordre de 700 km².

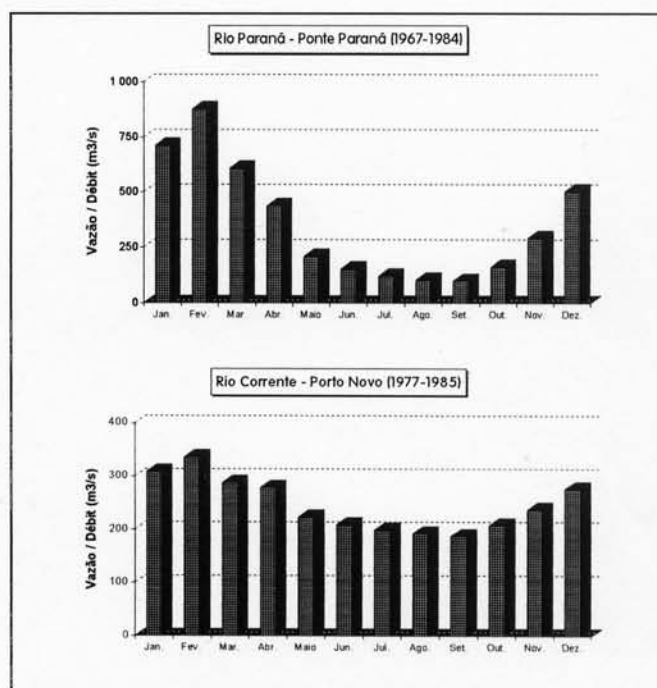


Figure 4 : Débits moyens mensuels (Données DNAEE).

En juillet 94, au cours de l'expédition spéléologique Franco-Brésilienne GOIÁS 94, une équipe a réalisé des mesures de débit, relevé un certain nombre de paramètres physico-chimiques, et effectué un échantillonnage d'eau sur les différentes rivières traversant le karst de São Domingos. Le mois de juillet 94 est caractérisé sur tous les postes pluviométriques de la région par une absence de pluie, faisant suite à un mois de juin pluvieux. Les débits des cours d'eau de la région ne seront donc pas à leur plus bas niveau d'étiage. Les débits ont été mesurés sur 15 cours d'eau par exploration du champ des vitesses dans la section à l'aide d'un micro-moulinet. Pour chaque rivière, les vitesses ont été mesurées sur plusieurs verticales (de 4 à 18, suivant la largeur). Les conditions de travail avec cet équipement étaient parfois limite, notamment pour les rios São Vicente, Terra Ronca et São Bernardo (profondeur > 80 cm, vitesses > 1 m/s).

Le graphique débit des pertes vs. superficie individualise clairement les cours d'eau issus de la Serra Geral des autres cours d'eau, et il est manifeste que la Serra Geral contribue au débit de ces rivières, bien au delà des limites supposées de ces bassins versants.

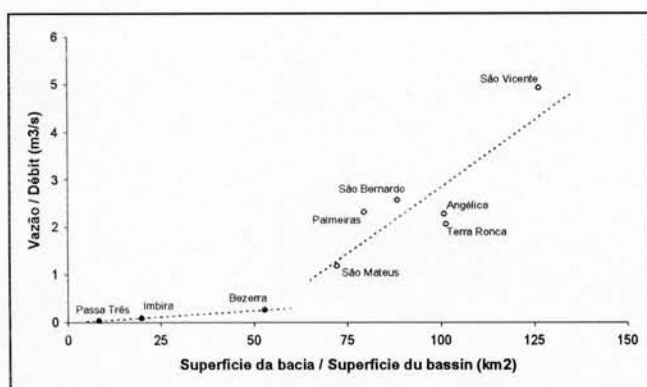


Figure 5 : Débit des pertes vs. superficie du bassin.

A partir des débits aux résurgences et aux pertes, un bilan hydrique 'entrée-sortie' du massif calcaire a pu être réalisé. Les différences de débit entre entrées et sorties de la Serra do Calcário sont toujours positives et les valeurs sont cohérentes, ce qui a posteriori atteste de la bonne qualité des jaugeages effectués. La valeur moyenne du débit spécifique du massif calcaire à cette époque de l'année est d'environ de 5 l/s.km².

5. Les flux de matières dissoutes

Lors des mesures de débit aux pertes et résurgences du massif calcaire de São Domingos, les mesures de la température, du pH, de la conductivité et de la turbidité de l'eau ont été réalisées in situ. Ces résultats qui ne sont représentatifs que de la saison de basses eaux (juillet 94) donnent toutefois des indications intéressantes sur le fonctionnement du système karstique. Les rivières issues de la Serra Geral présentent des eaux acides (pH < 7) et des conductivités très faibles, et ce d'autant plus que la part de leur bassin dans la Serra Geral est importante. Avec une conductivité de 1 µS/cm, c'est de l'eau distillée qui s'écoule dans le Rio São Vicente. La traversée de la Serra do Calcário par ces cours d'eau se traduit par une augmentation sensible du pH et de la conductivité, du fait des apports en eau plus chargée en éléments dissous des autres rivières (rios Bezerra, Passa Três, Pau Pombo, Imbira), et des apports du karst lui-même. Les ruisseaux Pau Pombo et Passa Três qui drainent des zones calcaires présentent des pH et conductivités relativement élevés.

Tous les éléments majeurs en solution n'ayant pas été analysés, la charge totale en matière dissoute (MD) a été estimée à partir de la valeur de la conductivité (Rodier, 1975). Les résultats obtenus, permettent de calculer les flux de matières en solution transportées à travers les différents systèmes karstiques. Par différence entre les entrées (pertes) et les sorties (résurgences) du massif calcaire, le flux de matières dissoutes qui provient de la Serra do Calcário peut être calculé. En rapportant ces valeurs à la superficie des affleurements calcaires, un taux d'érosion est obtenu. Ces valeurs ne sont que des approximations, du fait de l'absence d'un suivi régulier des débits et de la chimie des eaux au cours du cycle hydrologique, mais elles permettent néanmoins d'avoir un ordre de grandeur des vitesses de dissolution de ce massif calcaire. Ces résultats montrent qu'entre 5 et 10 millions d'années, la Serra do Calcário aura disparu si les conditions hydro-climatiques actuelles persistent.

Références

- BARBOSA, O.; BRAUN, O.C.G.; BAPTISTA, M.B.; CARTNER-DYER, R. & COTTA, J.C. 1981. Geologia e Inventário dos Recursos Minerais da Região do Estado de Goiás. Projeto Brasília - D.N.P.M., Brasília, 147 pp.
- DUTRA, G. 1997. Geografia da região. In : Expedições franco-brasileiras GOIÁS 94 & 95, GBPE-GREGEO-GSBM, Brasília : 15-19.
- GUYOT, J.L., AULER, A., OGA, D., OBSTANCIAS, I., APPAY, J.L. 1997. Balanço hidrogeológico. In : Expedições franco-brasileiras GOIÁS 94 & 95, GBPE-GREGEO-GSBM, Brasília : 52-58.
- GUYOT, J.L. 1997. Hidroclimatologia da região. In : Expedições franco-brasileiras GOIÁS 94 & 95, GBPE-GREGEO-GSBM, Brasília : 43-51.
- LE BRET, M. 1991. Le district spéléologique de São Domingos, Etat de Goiás, Brésil. In : Actes de la Première rencontre d'Octobre, N° 1, Spéléo Club de Paris, Paris : 41-55.
- MELO FILHO, L. 1997. Aspectos geológicos. In : Expedições franco-brasileiras GOIÁS 94 & 95, GBPE-GREGEO-GSBM, Brasília : 20-23.
- RODET, J. 1997. Registros carstológicos. In : Expedições franco-brasileiras GOIÁS 94 & 95, GBPE-GREGEO-GSBM, Brasília : 24-42.
- RODIER, J. 1975. L'analyse de l'eau. Ed. Dunod, Paris, 629 p.

Bilan des flux de matières en solution [S Tot.= superficie totale du bassin, S Calc.= superficie des calcaires dans le bassin, Q=débit, Cond.= conductivité, MD= matières en solution, QD= flux de MD, QD Calc.= flux de MD qui provient des calcaires, ER= taux d'érosion, ER Calc.= taux d'érosion pour les calcaires].

Rivière	Lieu	S Tot. (km ²)	S Calc. (km ²)	Q (m ³ /s)	Cond. (µS/cm)	MD (mg/l)	QD (t/d)	QD Calc. (t/d) (t/j)	ER (t/km ² .ano)	ER Calc. (t/km ² .ano)
Angélica	Perte	101		2.27	8	6	1.1		4	
Bezerra	Perte	53		0.24	29	20	0.4		3	
Angélica	Résurgence	168	14	2.57	18	12	2.7	1.2	6	33
São Vicente	Perte	127		4.91	1	1	0.3		1	
Passa Três	Perte	9		0.02	247	170	0.3		14	
São Vicente	Résurgence	157	22	5.01	27	19	8.0	7.4	19	126
São Mateus	Perte	72		1.17	9	6	0.6		3	
Imbira	Perte	20		0.08	80	55	0.4		7	
São Mateus	Résurgence	114	22	1.27	92	63	7.0	5.9	22	97
Terra Ronca	Perte	102		2.05	17	12	2.1		7	
Terra Ronca	Résurgence	116	14	2.20	30	21	3.9	1.8	12	48
Palmeiras	Perte	80		2.32	4	3	0.6		3	
São Bernardo	Perte	89		2.57	13	9	2.0		8	
São Bernardo	Résurgence	189	20	5.03	29	20	8.7	6.1	17	110