



POTAMOS
ENGENHARIA E HIDROLOGIA LTDA

Inteligência em
Recursos Hídricos



WORKSHOP GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS

O USO DE FERRAMENTAS PARA A ELABORAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO E OUTORGAS INTEGRADAS

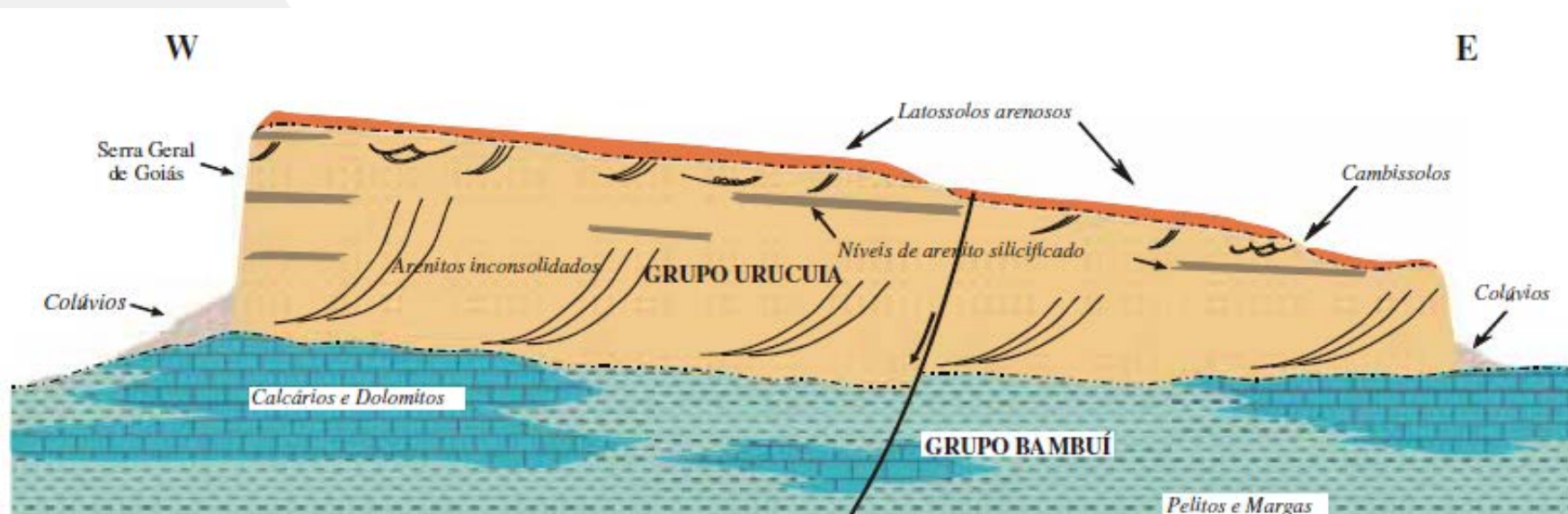
Eng. Mário Cicareli Pinheiro

SETEMBRO DE 2014

TEMAS A SEREM ABORDADOS

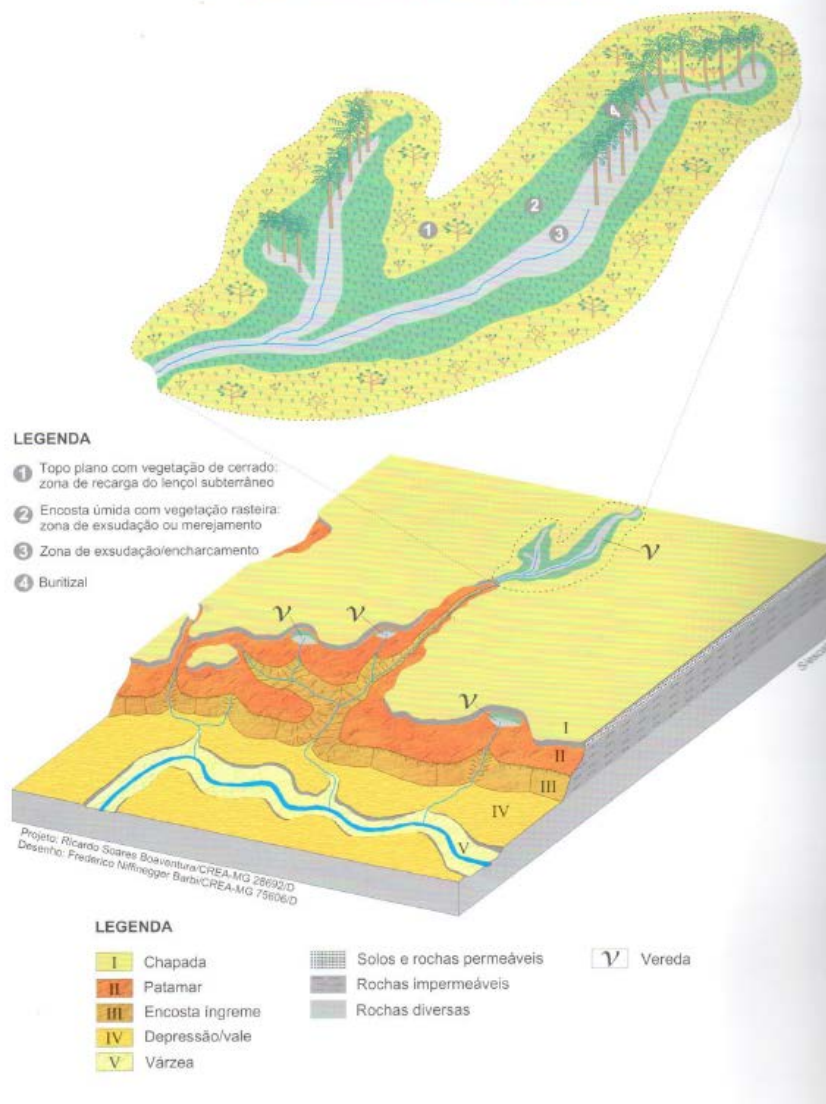
- Caracterização do Aquífero Urucuia → aspectos hidrometeorológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos.
- O contexto do problema → o aumento do uso da água e a capacidade de suporte do sistema.
- Balanço hídrico de sistemas aquíferos → relações entre águas subterrâneas e águas superficiais.
- Ferramentas disponíveis para o gerenciamento dos recursos hídricos.
- Considerações finais.

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA – PERFIL GEOLÓGICO



Perfil leste-oeste esquemático do contexto geológico do Sistema Aquífero Urucua no oeste da Bahia.

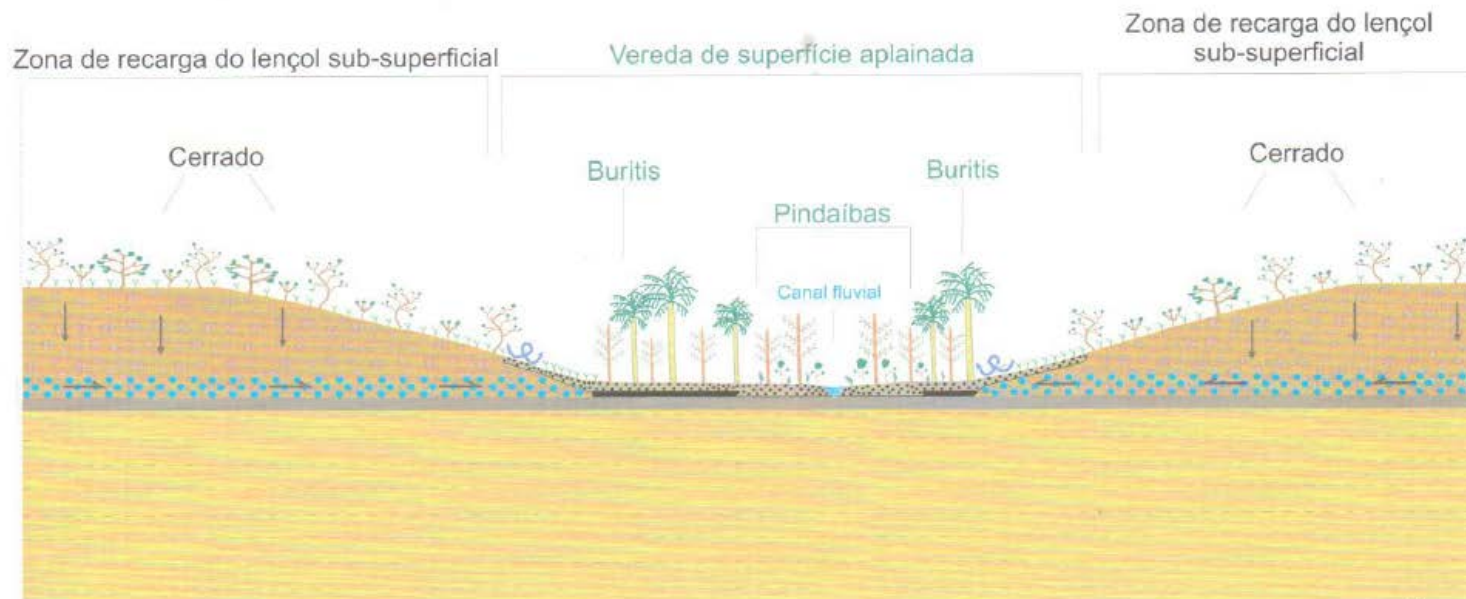
Bloco diagrama demonstrativo de ocorrência de vereda sobre relevo tabular ou chapada



MORFOLOGIA DOS CURSOS DE ÁGUA NAS CHAPADAS DE TERRENOS ARENOSOS

Fonte: Boaventura, 2007.



Perfil geomorfológico esquemático de veredas (A-B) Vereda de superfície aplainada em corte transversal



Projeto: Ricardo Soares Boaventura/CREA-MG 28692/D
Desenho: Frederico Niffenegger Barbi/CREA-MG 75606/D

S/escala

LEGENDA

	Solos permeáveis		Solos turfosos		Fluxo de água subterrânea
	Camada de solo impermeável		Solos hidromórficos		Infiltração de água no solo
	Rochas permeáveis		Lençol sub-superficial		Exsudação

Fonte: Boaventura, 2007

VEREDA TÍPICA



VEREDA TÍPICA



CARACTERÍSTICA HIDROLÓGICA – BAIXO ESCOAMENTO SUPERFICIAL



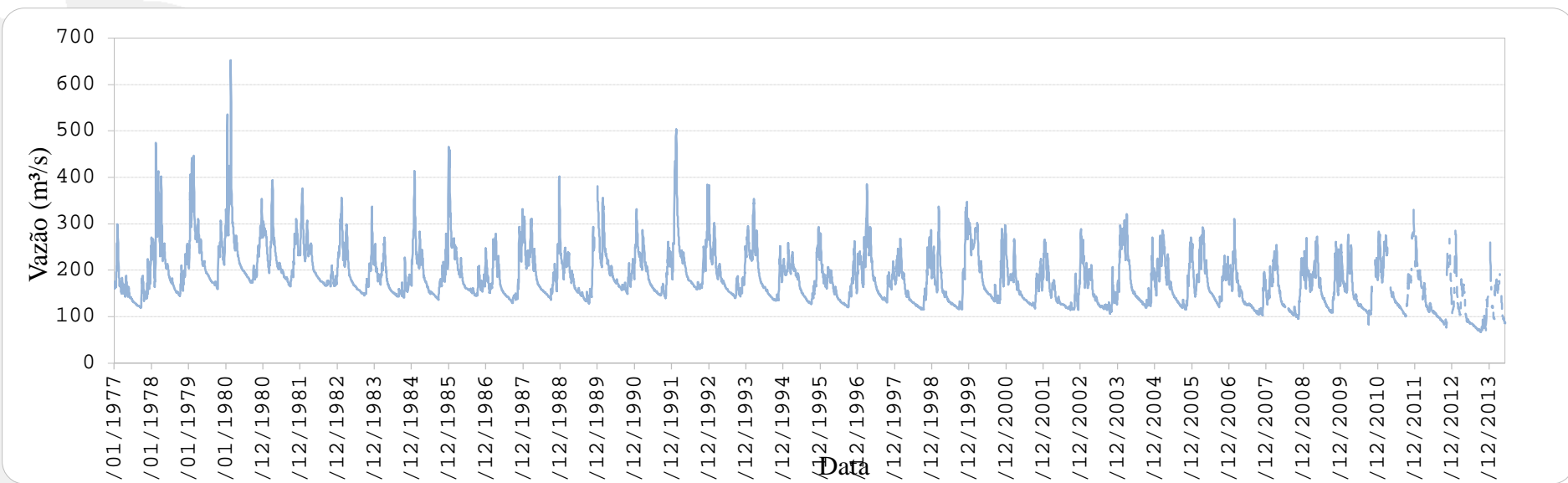
TERRENOS PLANOS E ARENOSOS → ALTA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO



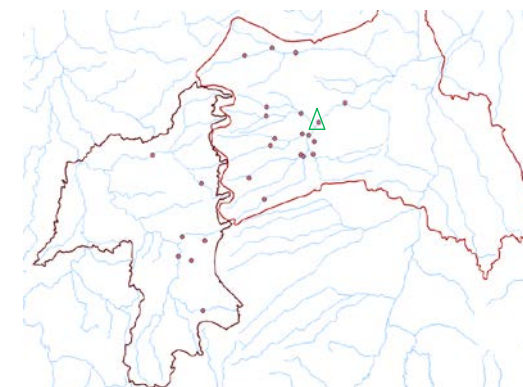
CARACTERÍSTICAS DA BORDA OESTE DA CHAPADA



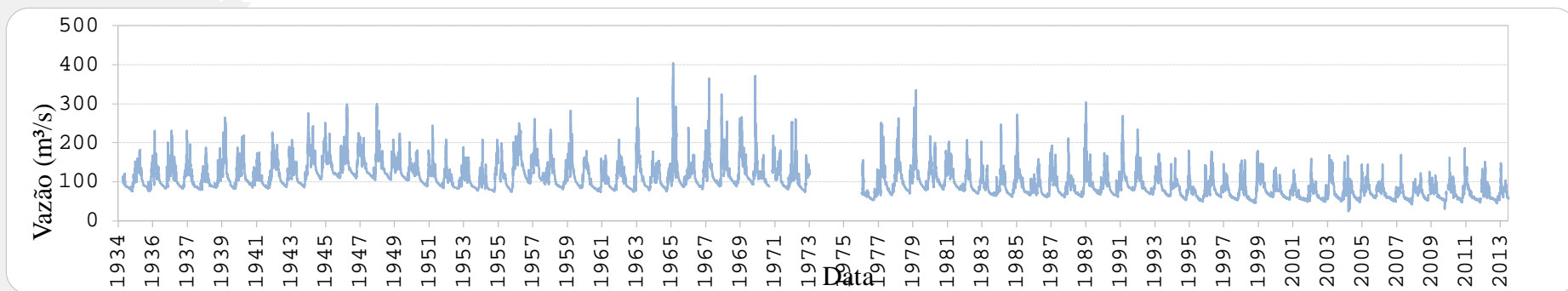
IMPACTO DO USO DA ÁGUA



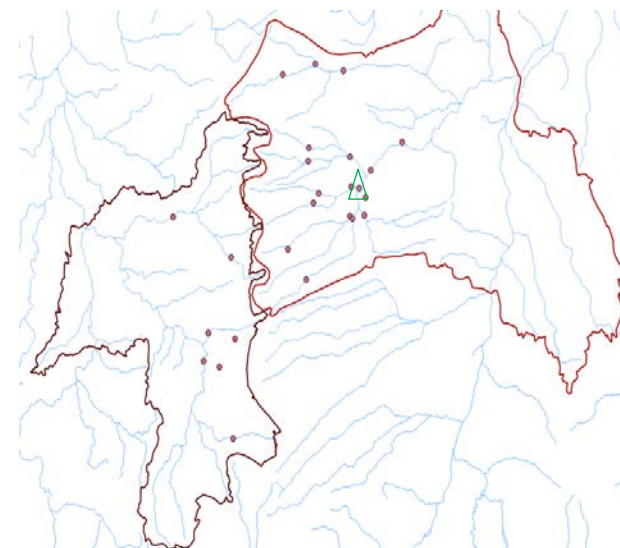
Estação Fluviométrico Rio Grande em São Sebastião



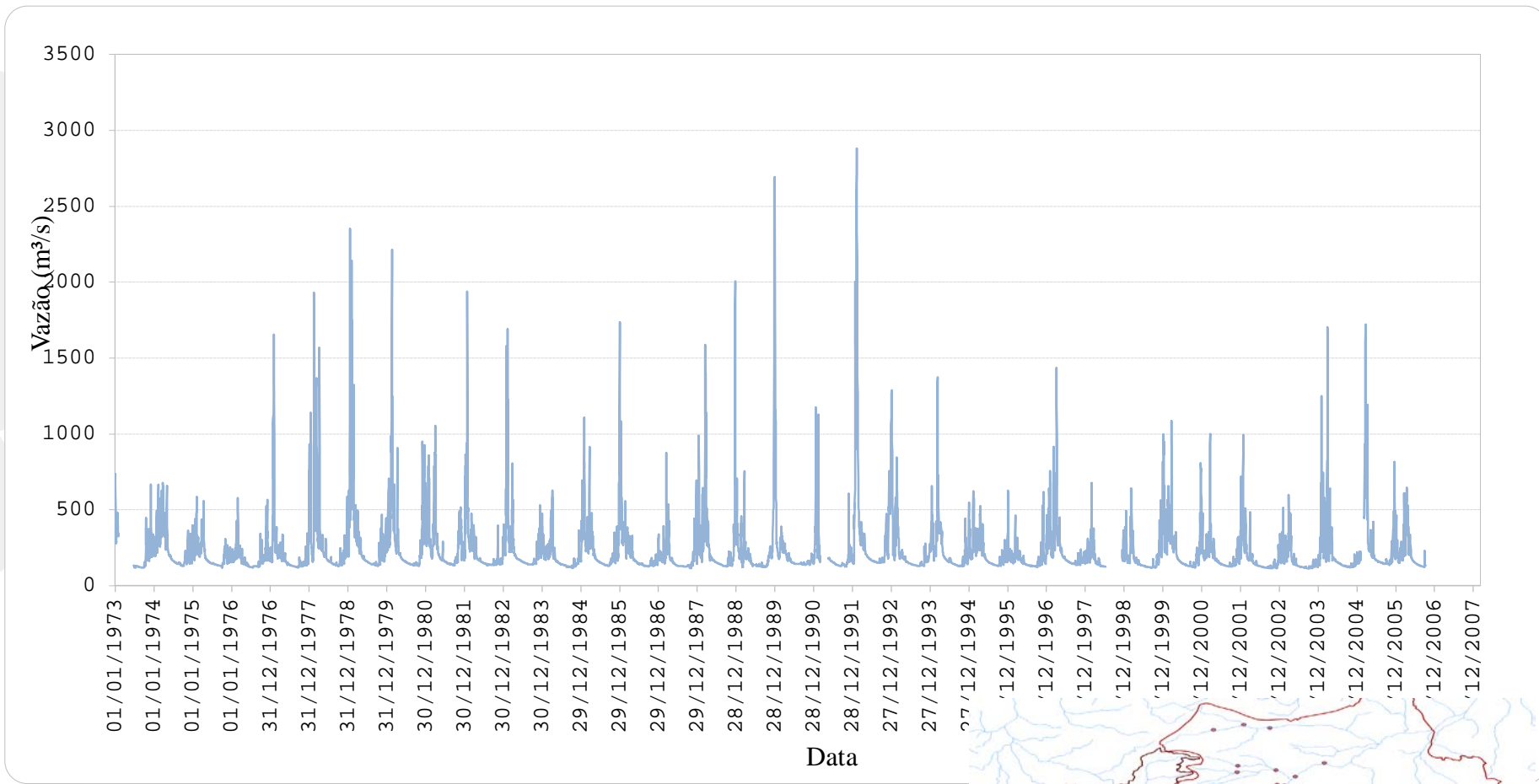
IMPACTO DO USO DA ÁGUA



Estação Fluviométrica Rio Grande em Barreiras



IMPACTO DO USO DA ÁGUA



Estação Fluviométrica Rio Palma em Rio da Palma



VERIFICAÇÃO DE ESTACIONARIDADE DA SÉRIE TEMPORAL

Para avaliar a possibilidade de impacto (redução sistemática das vazões) nos mananciais da região, ocasionado pelo rebaixamento da água em poços de bombeamento, foi aplicado um método de identificação de séries temporais, baseado no conceito de regressão linear da variável hidrológica com o tempo.

A regressão linear entre a variável hidrológica (vazão média mensal) $Q(t)$ e o tempo t (mês) é dada por:

$$Q(t) = \alpha + \beta \times t$$

sendo α o coeficiente linear e β o coeficiente da regressão. Caso a série de vazões $Q(t)$ seja estacionária, isto é, sem tendências para aumentar ou diminuir ao longo do tempo, tem-se o coeficiente $\beta \cong 0$ (próximo de zero) e o coeficiente α praticamente igual à vazão média de longo termo.

A questão de identificar uma tendência linear consiste em verificar se o valor de β é significativamente próximo de 0 (zero), do ponto de vista estatístico. Para tanto, é feito o seguinte teste de hipóteses:

- Hipótese nula $H_0: \beta = 0$
- Hipótese alternativa $H_a: \beta \neq 0$ (tendência de diminuir ao longo do tempo)

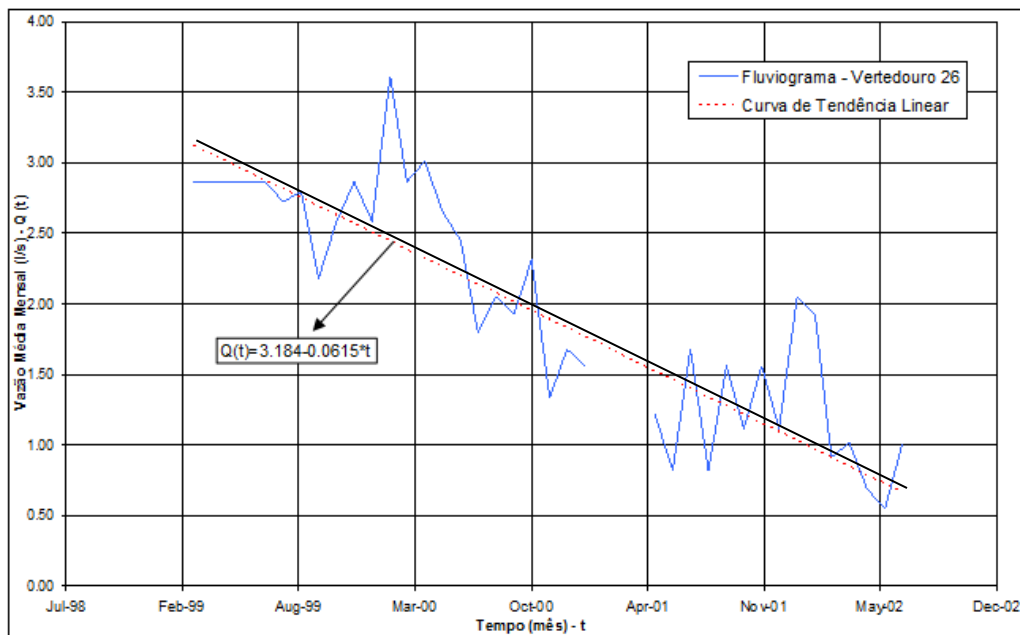
As hipóteses são testadas pela estatística:

$$T_c = \left| \frac{\rho \times \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \right|$$

que segue a distribuição t-Student com $(N-2)$ graus de liberdade, sendo N o número total de meses e ρ o coeficiente de correlação linear. No caso, se:

$$T_c \geq t_{N-2, \alpha/2}$$

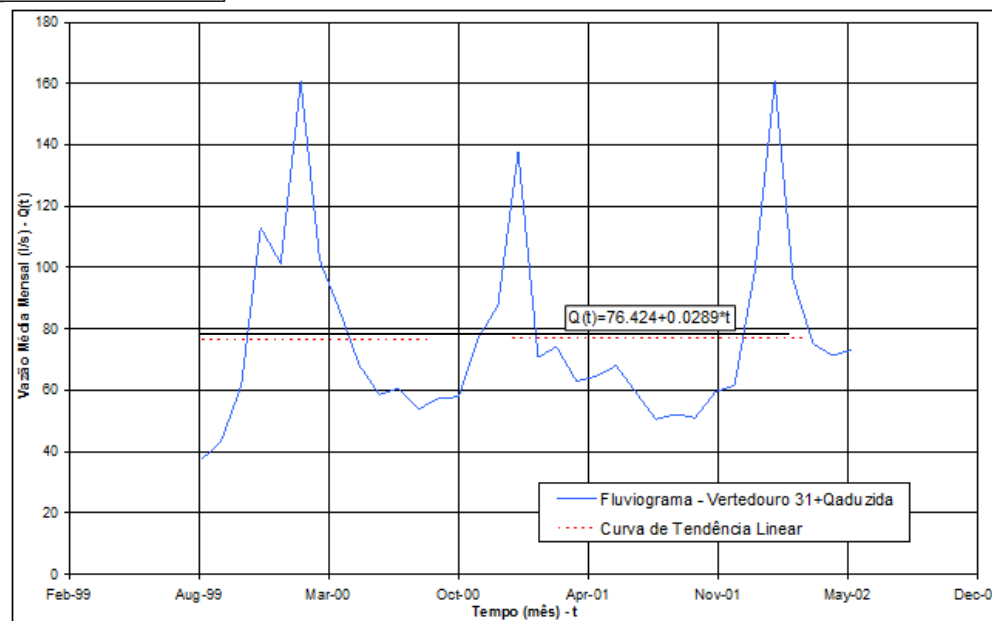
onde $t_{N-2, \alpha/2}$ é o quantil da distribuição t-Student, para diferentes níveis de significância e graus de liberdade, a hipótese nula H_0 deverá ser rejeitada, indicando que existe tendência na série.



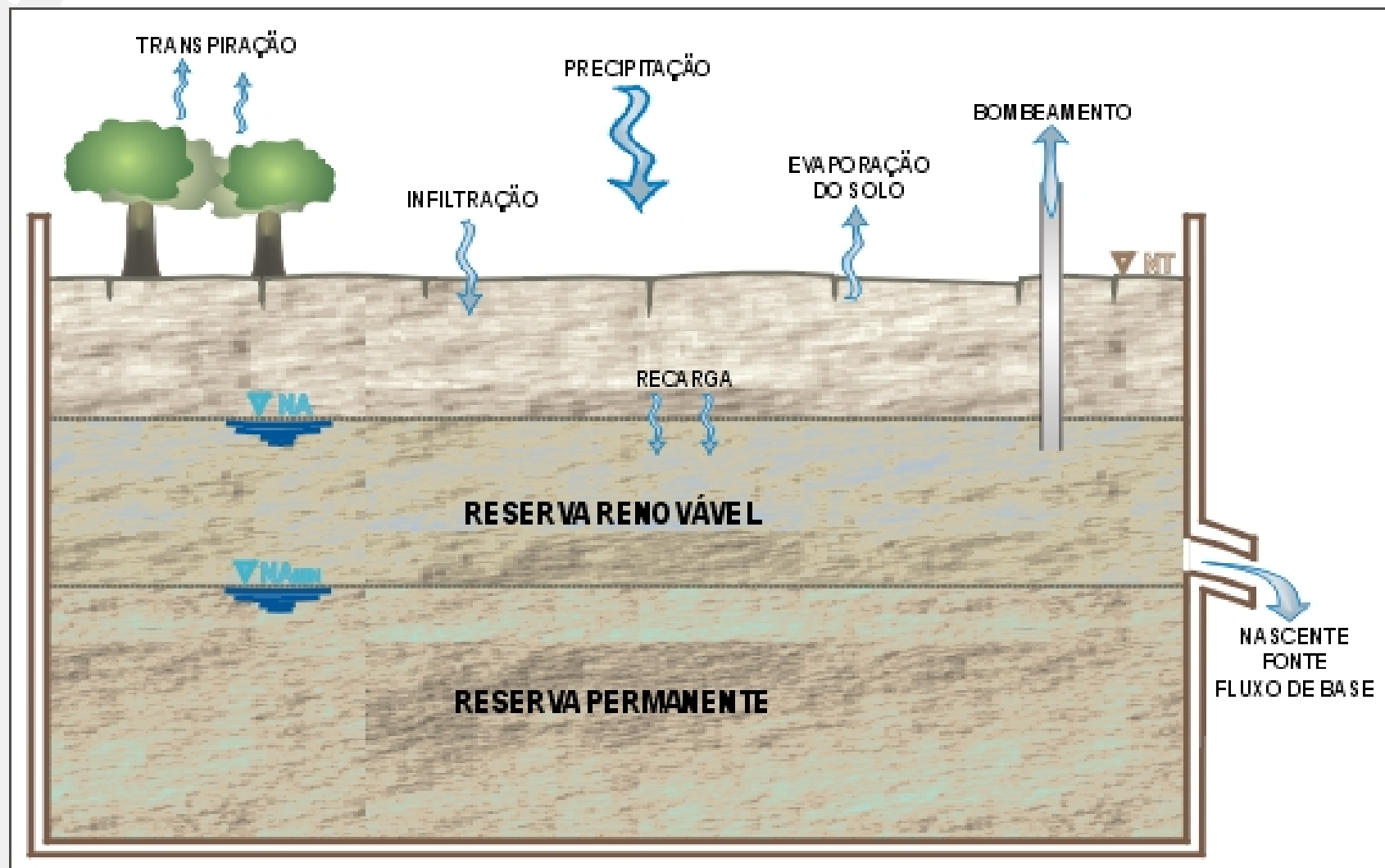
Série com tendência

VERIFICAÇÃO DE ESTACIONARIDADE DA SÉRIE TEMPORAL

Série sem tendência



BALANÇO HÍDRICO DE SISTEMAS AQUÍFEROS - GERAL



SISTEMA AQUÍFERO ESTRATIFICADO

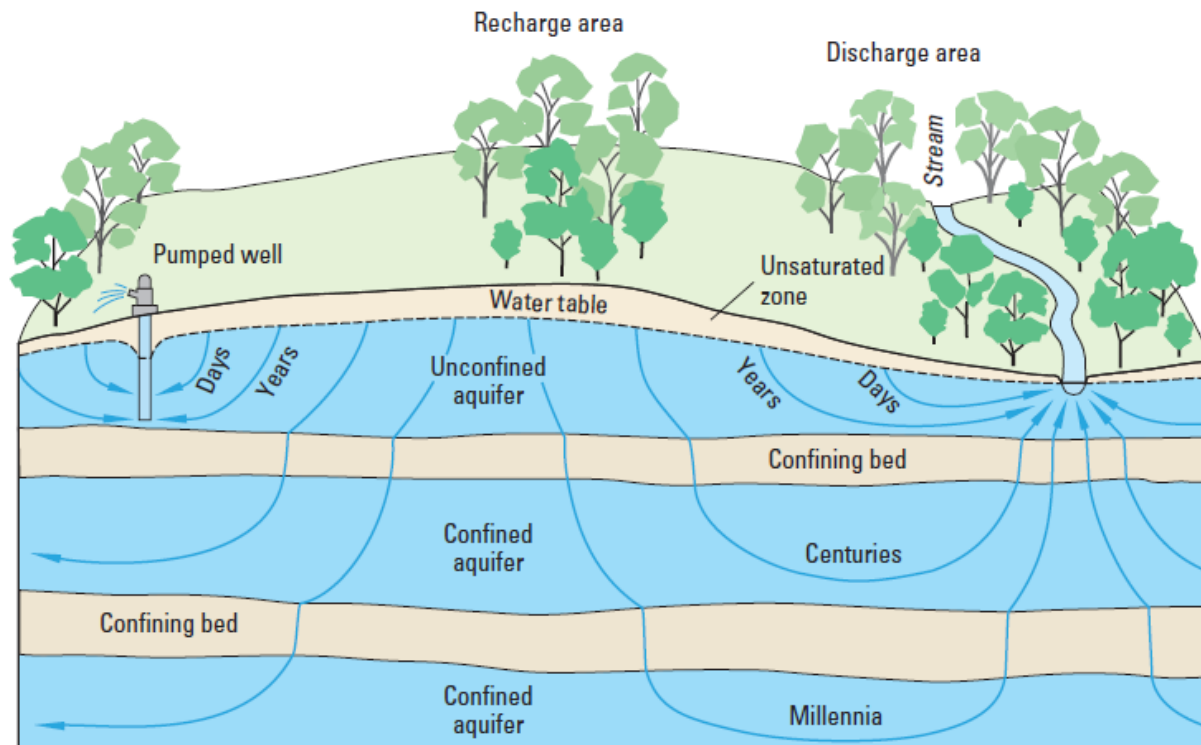


Figure 1. Groundwater flow paths in a multi-aquifer groundwater system. Groundwater flows from recharge areas at the water table to discharge locations at the stream and well. The residence time of groundwater can range from days to millennia (modified from Winter and others, 1998).

Fonte: USGS (2012).

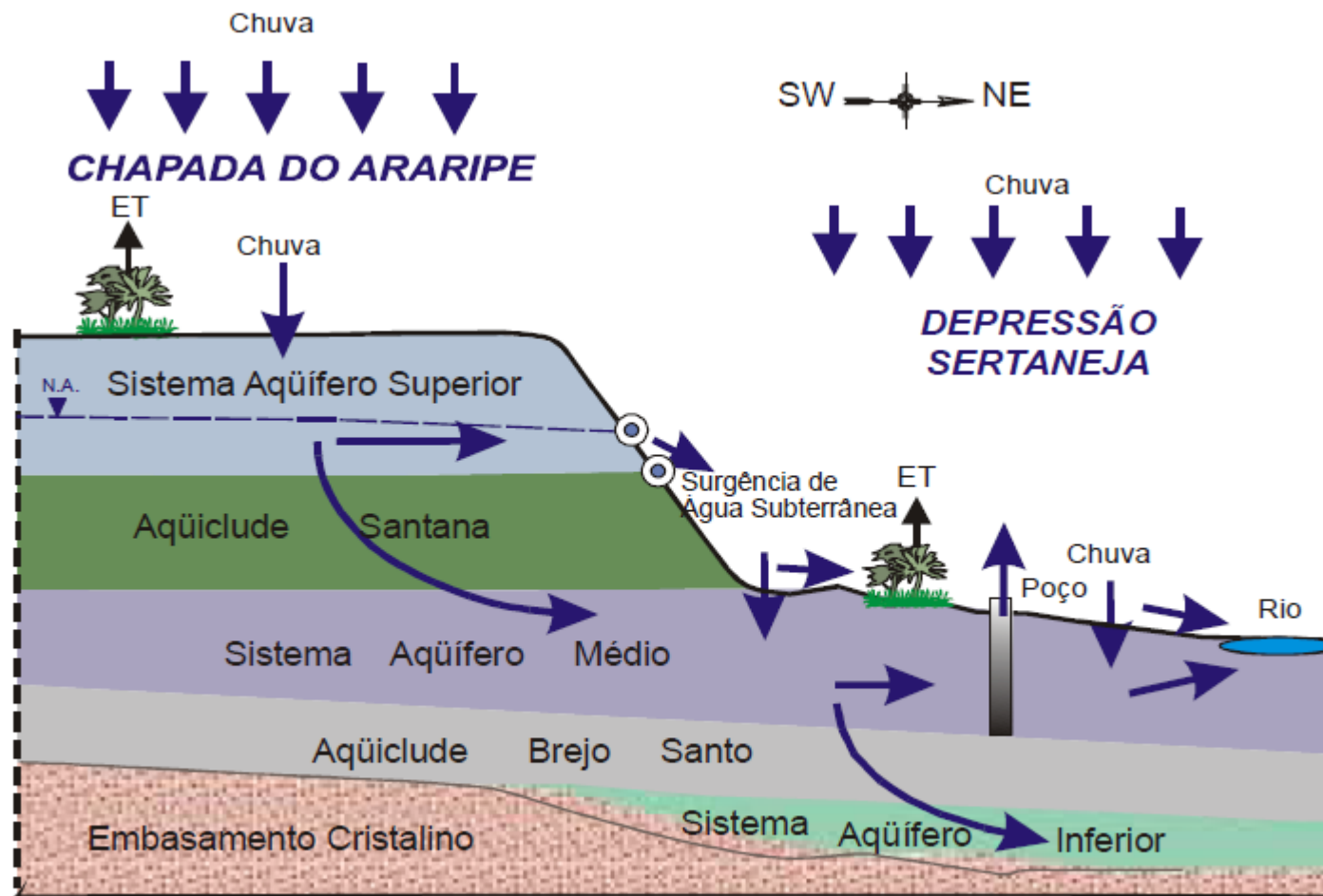
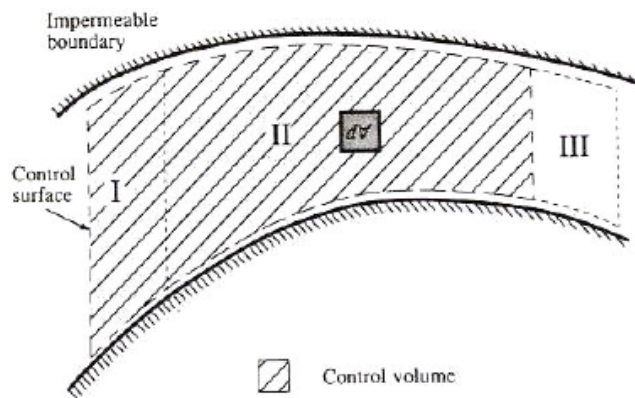


Figura 2 - Esquema do balanço hídrico na bacia do Araripe.

Fonte: KIMURA (2003)



(a) Fluid in regions I and II (the control volume) at time t occupies regions II and III at time $t + \Delta t$.



Substituting (2.1.4), (2.1.6), and (2.1.7) into (2.1.3) gives

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{c.v.} \beta \rho dV + \int_{III} \beta \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} + \int_I \beta \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.1.8)$$

For fluid entering the control volume, the angle between the velocity vector \mathbf{V} , pointing into the control volume, and the area vector $d\mathbf{A}$, pointing out, is in the range $90^\circ < \theta < 270^\circ$ for which $\cos \theta$ is negative [see Fig 2.1.1 (d)]. Consequently, $\mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}$ is always negative for inflow. For fluid leaving the control volume $\cos \theta$ is positive, so $\mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}$ is always positive for outflow. At the impermeable boundaries, \mathbf{V} and $d\mathbf{A}$ are perpendicular and therefore $\mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = 0$. Thus, the integrals in (2.1.8) over inlet I and outlet III can be replaced by a single integral over the entire control surface representing the outflow minus inflow, or *net outflow*, of extensive property B :

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{c.v.} \beta \rho dV + \int_{c.s.} \beta \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.1.9)$$

Integral Equation of Continuity

The integral equation of continuity applies to a volume of fluid. If mass is the extensive property being considered in the Reynolds transport theorem, then $B = m$, and $\beta = dB/dm = 1$. By the law of conservation of mass, $dB/dt = dm/dt = 0$ because mass cannot be created or destroyed. Substituting these values into the Reynolds transport theorem (2.1.9) gives

$$0 = \frac{d}{dt} \int_{c.v.} \rho dV + \int_{c.s.} \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.2.1)$$

which is the integral equation of continuity for an unsteady, variable-density flow.

If the flow has constant density, ρ can be divided out of both terms of (2.2.1), leaving

$$\frac{d}{dt} \int_{c.v.} dV + \int_{c.s.} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2.2.2)$$

The integral $\int_{c.v.} dV$ is the volume of fluid stored in the control volume, denoted by S , so the first term in (2.2.2) is the time rate of change of storage dS/dt . The second term, the net outflow, can be split into inflow $I(t)$ and outflow $Q(t)$:

$$\int_{c.s.} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \int_{outlet} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} + \int_{inlet} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = Q(t) - I(t) \quad (2.2.3)$$

and the integral equation of continuity can be rewritten

$$\frac{dS}{dt} + Q(t) - I(t) = 0$$

or

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (2.2.4)$$

EQUAÇÕES BÁSICAS

EQUAÇÕES DO BALANÇO HÍDRICO

BALANÇO HÍDRICO NA SUPERFÍCIE DO SOLO

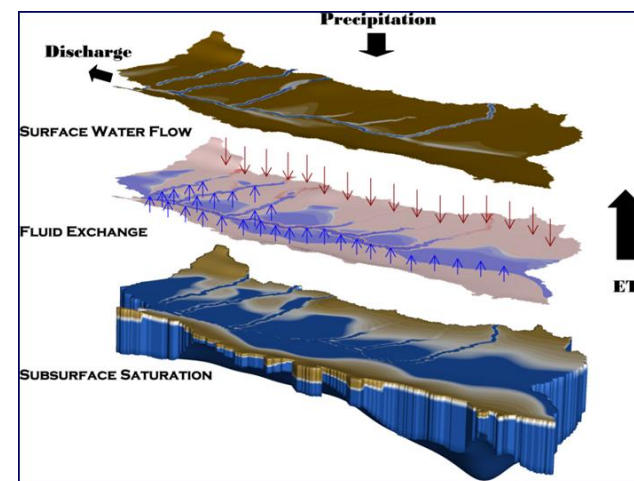
Precipitação - Escoamento - Abstrações Iniciais = **Infiltração**

BALANÇO HÍDRICO NA ZONA DE AERAÇÃO DO SOLO

Infiltração - Evapotranspiração - Interflow = **Recarga** ± DVol

BALANÇO HÍDRICO DA RESERVA RENOVÁVEL

Recarga - Fluxo de Base = ± DVol
DVol = 0, no longo termo



ALGUNS INDICADORES DO AQUÍFERO URUCUIA

ÁREA DO SISTEMA: 76.000 km²

PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL: 1200 mm

RESERVA RENOVÁVEL: 30,78 x 10⁹ m³/ano

- Vazão média: 976 m³/s
- Deflúvio: 405 mm
- Tempo de residência: 122 anos

RESERVA PERMANENTE: 3,77 x 10¹² m³

- Espessura média: 50 m

ALGUNS INDICADORES DO AQUÍFERO URUCUIA

Estação Fluviométrica Rio Palma em Rio da Palma

- Área Drenagem: 12.400 km²
- Vazão Média: 231 m³/s (587 mm/ano)

Estação Fluviométrica Rio Grande em São Sebastião

- Área Drenagem: 33.100 km²
- Vazão Média (1972 a 2013): 184 m³/s (175 mm/ano)
- Vazão Média (1972 a 1986): 208 m³/s (198 mm/ano)
- Vazão Média (1987 a 2013): 177 m³/s (168 mm/ano)
- Vazão Média (2000 a 2013): 165 m³/s (157 mm/ano)

FERRAMENTAS PARA ELABORAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO E OUTORGAS INTEGRADAS

- Elaboração do modelo hidrogeológico conceitual.
- Implantação de rede de monitoramento hidrométrico: qualidade e quantidade.
- Definir meta para o gerenciamento e critérios de outorga.
- Desenvolvimento de modelos de simulação.
- Implantação de Sistema de Informações.
- Implantação de Sistema de Gerenciamento.

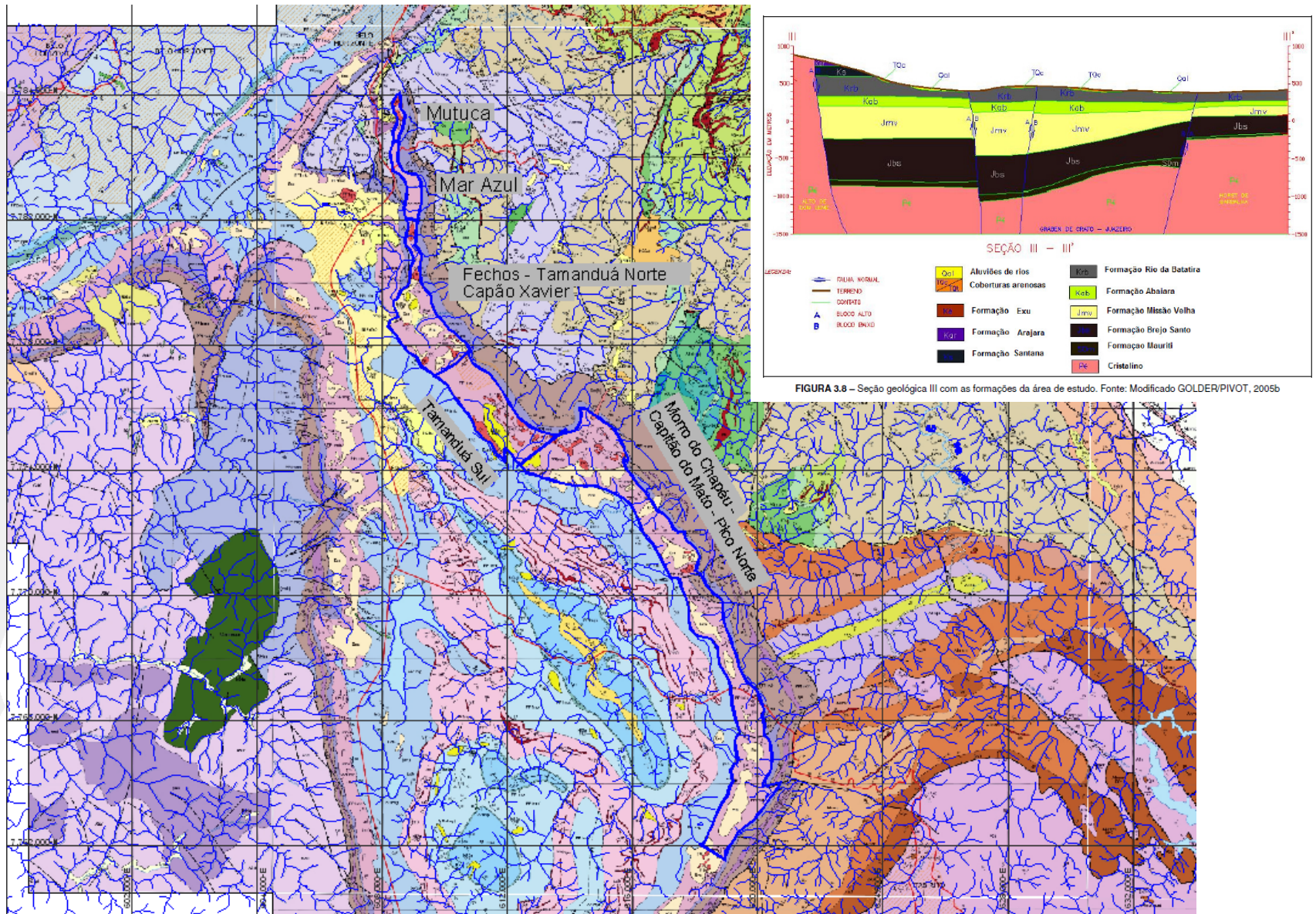
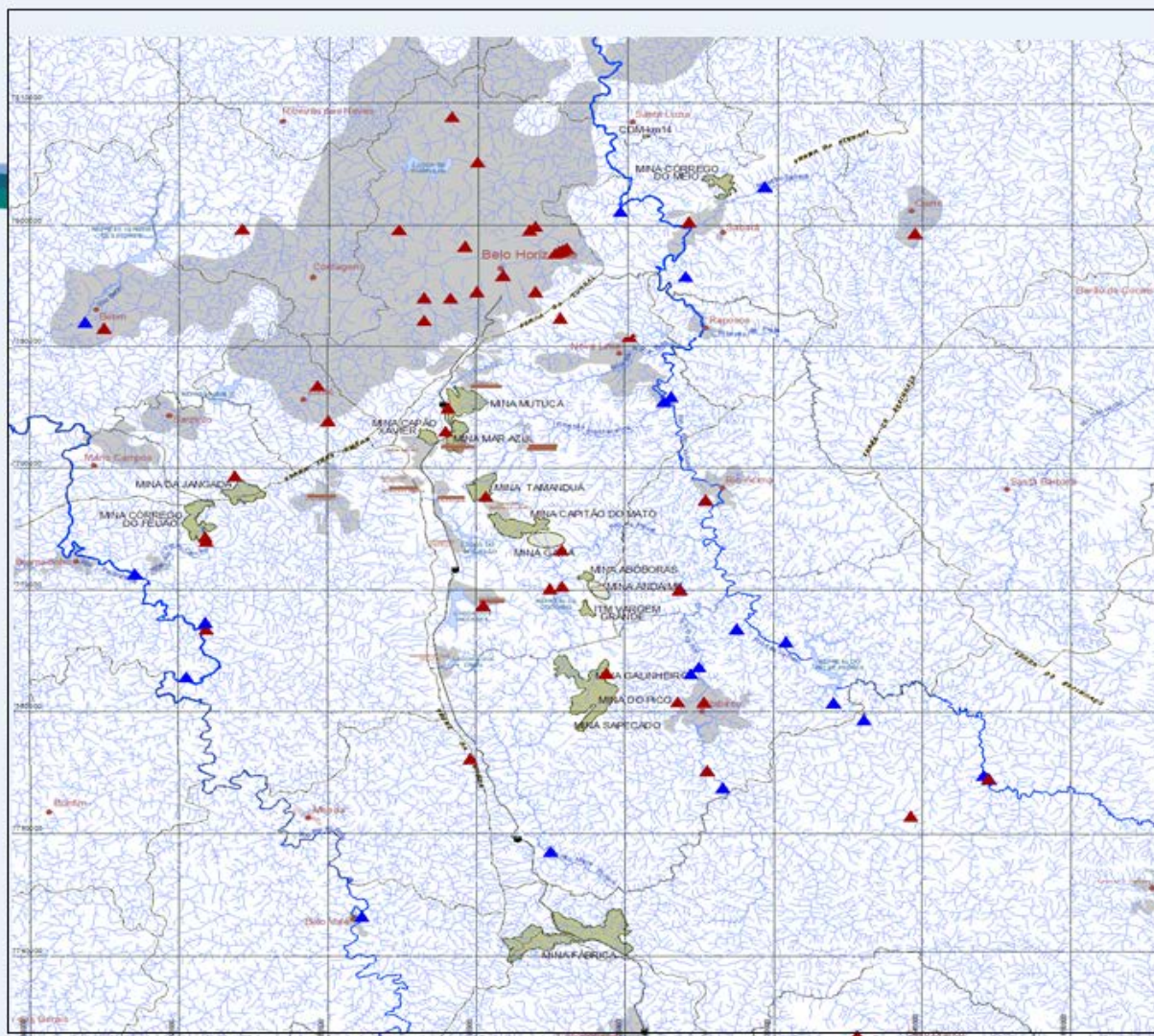


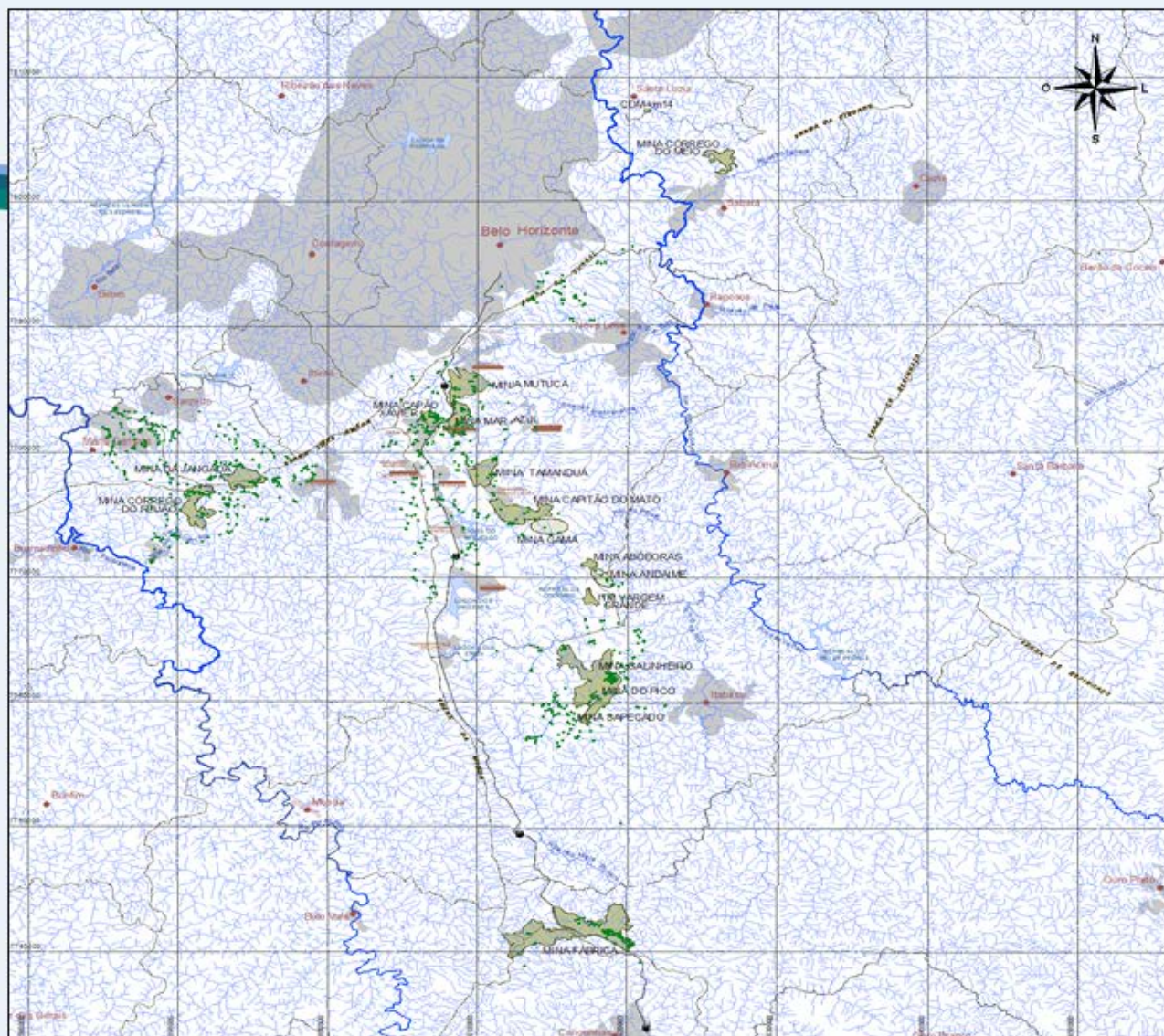
FIGURA 3.8 – Seção geológica III com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005b

MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO E FLUVIOMÉTRICO



- ▲ FLUVIOMÉTRICOS
- ▲ PLUVIOMÉTRICOS

MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO



● PONTOS DE MONITORAMENTO
INA'S
PIEZÔMETROS
POÇOS

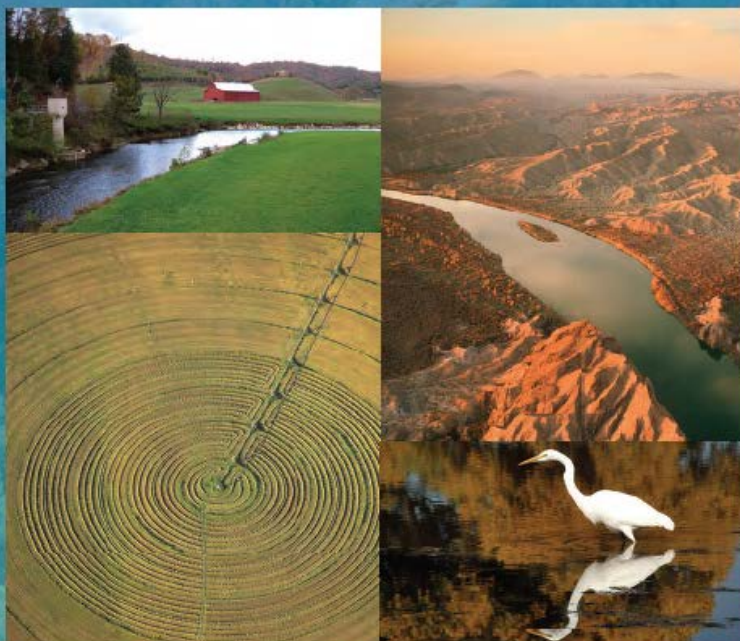
METAS, CRITÉRIOS E DIRETRIZES

- Metas e diretrizes → os usos da água, aspectos consuntivos e conservativos.
- Irrigação na bacia do rio São Francisco → transpor a água ou usar no local da gênese.
- Plano de múltiplos usos para os rios → irrigação, geração de energia elétrica, navegação fluvial, conservação e vazão ecológica.
- Critérios para outorga de águas superficiais e águas subterrâneas.



Groundwater Resources Program

Streamflow Depletion by Wells—Understanding and Managing the Effects of Groundwater Pumping on Streamflow



Circular 1376

U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey

Hydrology Days

Basin-Scale Stream-Aquifer Modeling of the Lower Arkansas River, Colorado

Enrique Triana¹

Graduate Research Assistant and PhD candidate, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins

John W. Labadie²

Professor, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins

Timothy K. Gates³

Professor, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins

GEO-MODSIM: SPATIAL DECISION SUPPORT SYSTEM FOR RIVER BASIN MANAGEMENT

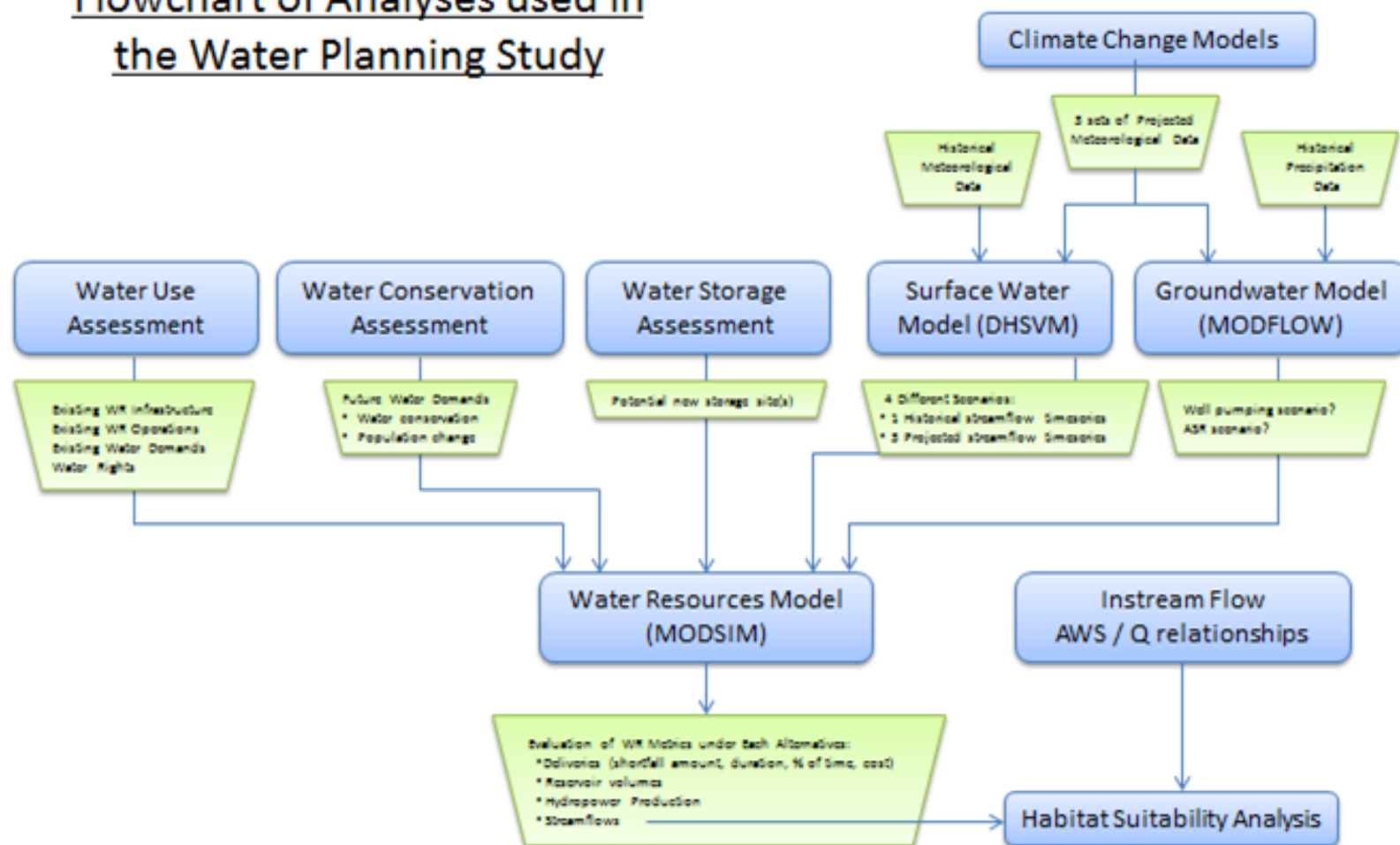
Enrique Triana and John W. Labadie
Department of Civil and Environmental Engineering
Colorado State University
Fort Collins, CO 80526-1372

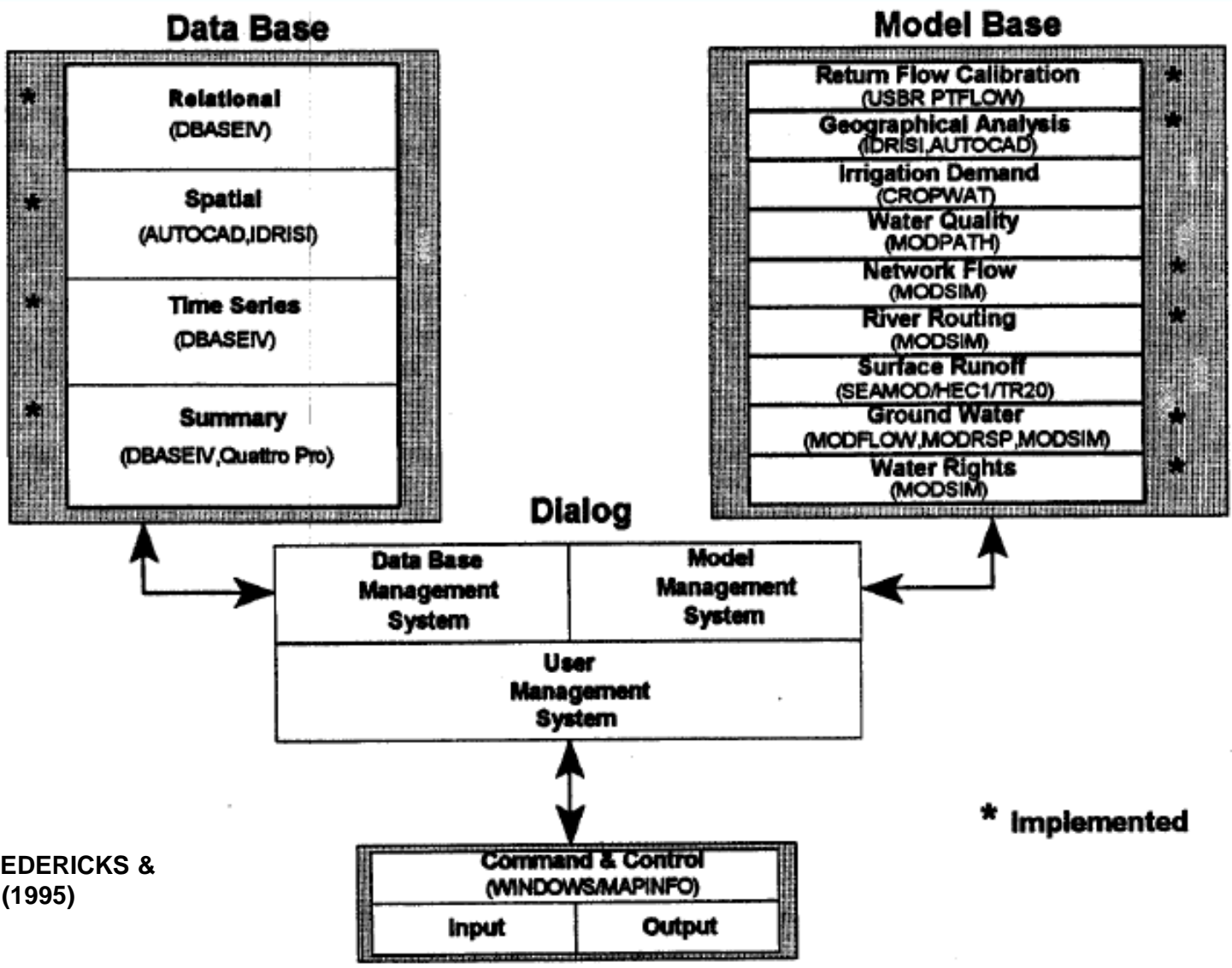
presented at:
2007 ESRI International User Conference
San Diego Convention Center
San Diego, California
June 18-22, 2007

ABSTRACT: The MODSIM river basin management model has been extended to GEO-MODSIM for integration with GIS for spatial data base management, analysis, and display. GEO-MODSIM is a custom ArcMap extension that provides the foundation for integrated river basin management. Numerous geodatabase layers are loaded and processed in GEO-MODSIM, including topography, political divisions, hydrography, irrigated fields, soil maps, land use, field measurements, and satellite imagery. Spatial-temporal data bases are also loaded such as NEXRAD precipitation data, water rights, gauging station records, diversions, pumping wells, and monitored surface water locations. These base GIS layers are processed to delineate watersheds, generate geometric networks, and create hydro-networks. Formatted data sets are created for executing external spatially distributed network flow optimization models, groundwater models and water quality models directly from the ArcMap interface. GEO-MODSIM is applied to the Lower Arkansas River basin, Colorado for salinity management and the Imperial Irrigation District, California for water conservation analysis.

KEY WORDS: Conjunctive use, Decision support systems, Geographic information systems, Geometric networks, Network analysis, River basin management, Water quality modeling, Water rights

Flowchart of Analyses used in the Water Planning Study





Fonte: FREDERICKS & LABADIE (1995)

Figure 2.1 Stream-Aquifer Management Decision Support System (SAMDSS)

Hydrology Days

Basin-Scale Stream-Aquifer Modeling of the Lower Arkansas River, Colorado

Enrique Triana¹

Graduate Research Assistant and PhD candidate, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins

John W. Labadie²

Professor, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins

Timothy K. Gates³

Professor, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins

Abstract. A methodology is presented for modeling stream-aquifer interactions at the basin scale that integrates an artificial neural network (ANN), a geographical information system (GIS), and the MODSIM generalized river basin network flow model. This methodology allows development of dynamic, spatially dependent relationships between measurable aquifer stresses and river return flow; as well as providing a linkage of system features and characteristics to the river basin network flow model. GIS provides

GEO-MODSIM: SPATIAL DECISION SUPPORT SYSTEM FOR RIVER BASIN MANAGEMENT

Enrique Triana and John W. Labadie
Department of Civil and Environmental Engineering
Colorado State University
Fort Collins, CO 80526-1372

presented at:
2007 ESRI International User Conference
San Diego Convention Center
San Diego, California
June 18-22, 2007

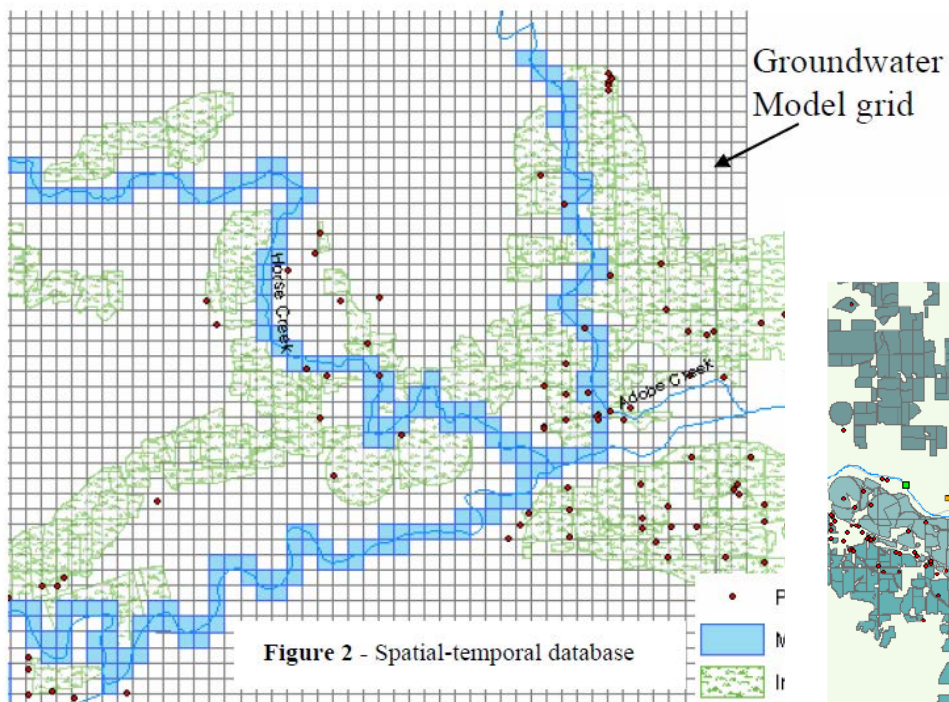
ABSTRACT: The MODSIM river basin management model has been extended to GEO-MODSIM for integration with GIS for spatial data base management, analysis, and display. GEO-MODSIM is a custom ArcMap extension that provides the foundation for integrated river basin management. Numerous geodatabase layers are loaded and processed in GEO-MODSIM, including topography, political divisions, hydrography, irrigated fields, soil maps, land use, field measurements, and satellite imagery. Spatial-temporal data bases are also loaded such as NEXRAD precipitation data, water rights, gauging station records, diversions, pumping wells, and monitored surface water locations. These base GIS layers are processed to delineate watersheds, generate geometric networks, and create hydro-networks. Formatted data sets are created for executing external spatially distributed network flow optimization models, groundwater models and water quality models directly from the ArcMap interface. GEO-MODSIM is applied to the Lower Arkansas River basin, Colorado for salinity management and the Imperial Irrigation District, California for water conservation analysis.

KEY WORDS: Conjunctive use, Decision support systems, Geographic information systems, Geometric networks, Network analysis, River basin management, Water quality modeling, Water rights

INTRODUCTION

MODSIM 8.0 (Labadie, 2005) is a generalized river basin network flow model designed to aid stakeholders in developing a *shared vision* of planning and management goals, while gaining a better understanding of the need for coordinated operations in complex river basin systems that may impact

Triana, Labadie and Gates



Basin-scale stream-aquifer modeling of the Lower Arkansas River, Colorado

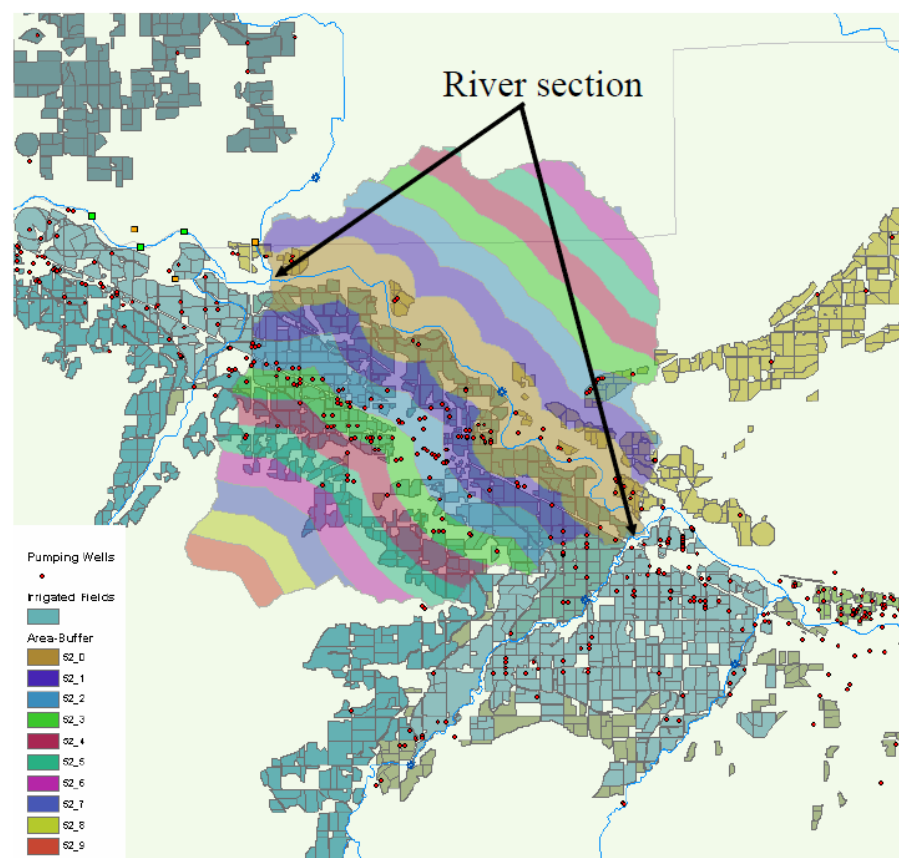
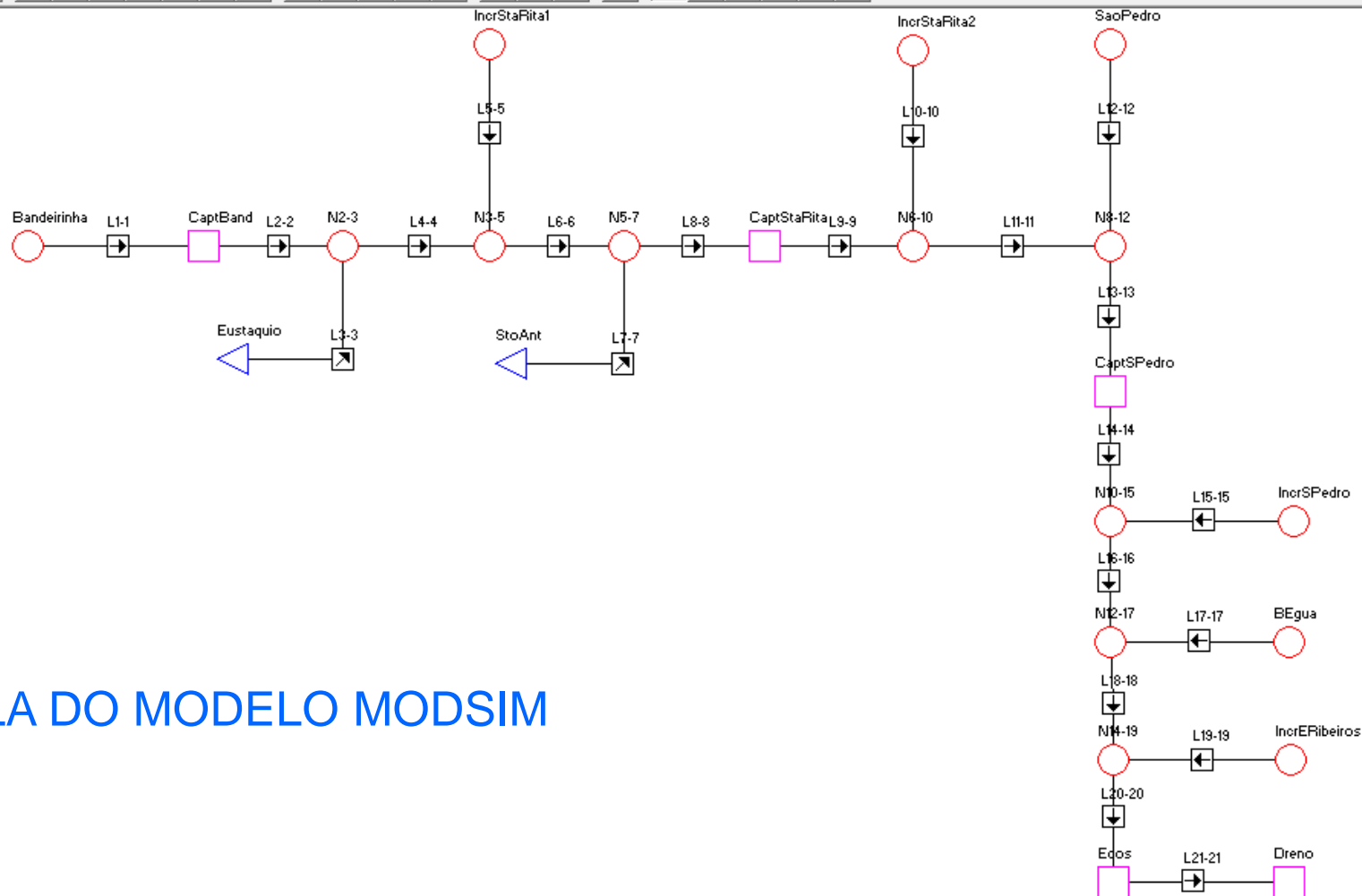
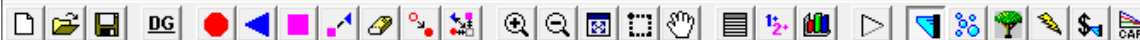


Figure 3 - Basin characteristics grouped by buffer-areas

LabSid-AcquaNet

Arquivo Definições Gerais Opções Análise/Comparação Ferramentas

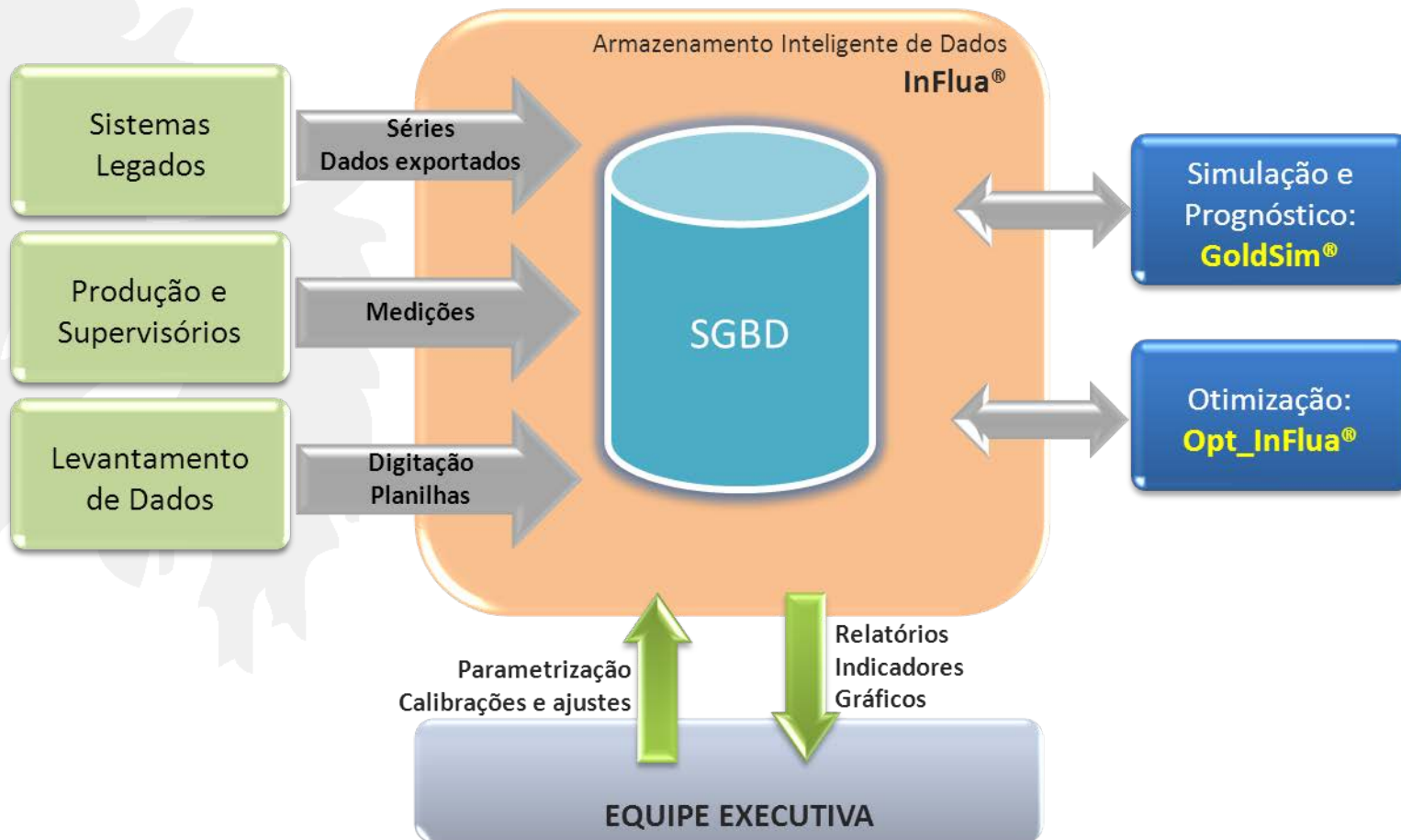


TELA DO MODELO MODSIM

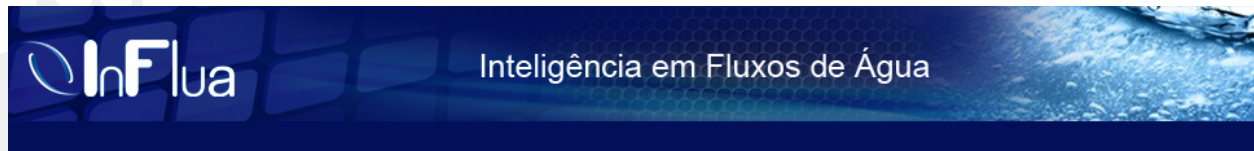
ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO



ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÕES



APLICATIVO PARA ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO



LOGIN SENHA

Esqueceu sua senha?



(c) 2011 - Todos os direitos reservados



(c) 2011 - Todos os direitos reservados

CONSIDERAÇÕES FINAIS (1)

- Existem diversas ferramentas para o balanço hídrico integrado entre os sistemas aquíferos e os cursos de água, que podem dar o suporte para as outorgas para uso da água.
- As ferramentas englobam os modelos de redes de fluxos de água superficial (MODSIM) e subterrânea (MODFLOW), em ambiente GIS.
- Preferencialmente, os modelos devem estar acoplados ao um Sistema de Gerenciamento com base de processamento de dados.
- A importância de se fixarem metas e políticas, congregadas nos Planos Diretores de Bacias.
- A importância de se estabelecer o limite da capacidade de suporte do Sistema Aquífero.

CONSIDERAÇÕES FINAIS (2)

- Cadastrar todos os poços de bombeamento e identificar o perfil estratigráfico → água da reserva renovável ou da zona vadoza.
- Identificar os tipos de nascentes e as respectivas conexões → rever a rede de monitoramento.
- Consolidar o balanço hídrico global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOAVENTURA, R. S., Vereda Berço das Águas, Ecodinâmica Consultores Associados, 2007.
- FREDERICKS, J.W., LABADIE, J.W., Decision Support System for Conjunctive Stream-Aquifer Management, Colorado State University, 1995.
- KIMURA, G., Caracterização Hidrogeológica do Sistema Sedimentar do Gráben Crato-Juazeiro, no Vale do Cariri (CE), Dissertação de Mestrado, UFMG, 2003.
- MOREIRA, T. A., Riscos Ambientais e Modernização Agrícola: O Caso da Depleção dos Recursos Hídricos em Barreiras-BA, Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, 2013.
- TRIANA, E., LABADIE, J.W., GATES, T.K., Basin-Scale Stream-Aquifer Modeling of the Lower Arkansas River - Colorado, Hydrology Days, 2005.
- TRIANA, E., LABADIE, J.W., Geo-ModSim: Spatial Decision Support System for River Basin Management, ESRI International User Conference, 2007.
- USGS – United States Geological Survey, Streamflow Depletion by Wells – Understanding and Managing the Effects of Groundwater Pumping on Streamflow, Circular 1376, 2012.

MÁRIO CICARELI PINHEIRO

Engenheiro Civil, especializado em Obras Hidráulicas (UFRJ, 1977).
Mestrado e Doutorado pela COPPE/UFRJ.

Engenheiro da CEMIG, Chefe da Divisão de Hidrometeorologia Operacional (1979 a 1986).

Diretor da empresa HIDROSISTEMAS Engenharia de Recursos Hídricos Ltda.
(1986 a 1989).

Diretor do DMAE – Monte Carmelo, Departamento Municipal de Água e Esgotos
(1989 a 1990).

Professor Adjunto da Escola de Engenharia da UFMG (1990 em diante).

Diretor da empresa POTAMOS Engenharia e Hidrologia Ltda. (1993 em diante).

Endereço: mario.cicareli@potamos.com.br