



ETAPA 03 - MODELAGEM MATEMÁTICA DE FLUXO RECALIBRAÇÃO / VALIDAÇÃO DO MODELO DE FLUXO

SANTO ANTÔNIO ENERGIA S.A.
PORTO VELHO, RO

Operação N° 10252

10252-0000-EV-RT008-A

REV.	DESCRIÇÃO / FINALIDADE	DATA	ELAB.	VERIF.	APROV.	AUTOR.
A	Aprovado	07/12/2012	FRosa	JSilva	JSilva	BCivolani
0	Documento de acompanhamento/Para informação	21/09/2012	FRosa	JSilva	JSilva	BCivolani



SUMÁRIO

Página

1.0	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	04
2.0	METODOLOGIA.....	06
2.1	ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL.....	06
2.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO	07
2.3	CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO.....	07
2.4	PROGNÓSTICO III – ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO EM REGIME TRANSIENTE E VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	08
3.0	MODELO ADOTADO.....	09
4.0	BASES DE DADOS UTILIZADAS.....	10
5.0	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	12
6.0	DADOS CONSIDERADOS.....	19
6.1	MALHA OU GRID	19
6.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH)	19
6.3	TAXA DE RECARGA/EVAPOTRANSPIRAÇÃO	24
6.4	CALIBRAÇÃO	26
7.0	RESULTADOS.....	30
7.1	SIMULAÇÃO REMANSO DO RIO.....	30
7.2	SIMULAÇÃO REMANSO DO RESERVATÓRIO.....	32
7.3	SIMULAÇÃO TRANSIENTE.....	34
8.0	CONCLUSÕES.....	36
9.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

TABELAS

TABELA 5.1	CARGAS HIDRÁULICAS INSERIDAS NOS TRECHOS DOS RIOS MADEIRA E JACI-PARANÁ
TABELA 5.2	CARGAS HIDRÁULICAS INSERIDAS COMO O RESERVATÓRIO (MAR/2012)
TABELA 5.3	CARGAS HIDRÁULICAS INSERIDAS COMO O RESERVATÓRIO (ABR/2012 – JUN/2012)
TABELA 6.2.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH) CONSIDERADAS X CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS (K) ADOTADAS
TABELA 6.2.2	COMPARAÇÃO ENTRE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS ADOTADAS E OBTIDAS COM AS CALIBRAÇÕES DE MAR/2011 E MAR/2012



TABELA 6.2.3	COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES DE ARMAZENAMENTO ADOTADOS E OBTIDOS COM A CALIBRAÇÃO DE JUN/2012
TABELA 6.4.1	DADOS DE CARGA HIDRÁULICA UTILIZADOS NAS CALIBRAÇÕES DOS MODELOS

FIGURAS

FIGURA 1.1	LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO MADEIRA E DA ÁREA MODELADA (MODIFICADO DE RIBEIRO NETO, 2006)
FIGURA 2.1	ROTEIRO METODOLÓGICO BASEADO EM CAVALCANTI (2002)
FIGURA 5.1	POLÍGONO E ÁREA MODELADA
FIGURA 5.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA ÁREA
FIGURA 5.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO ESTACIONÁRIO (MAR/2011)
FIGURA 5.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO ESTACIONÁRIO (MAR/2012)
FIGURA 6.2.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EM ÁREA (LAYER 01)
FIGURA 6.2.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EM SEÇÃO TRANSVERSAL Y=8986940,7. EXAGERO VERTICAL DE 100X
FIGURA 6.3.1	ÁREAS COM RECARGA DIFERENCIADA
FIGURA 6.3.2	RECARGAS EFETIVAS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZADAS PARA OS TIME STEPS (0-15: MAR/2012; 15-46: ABR/2012; 46-77: MAI/2012 E 77-92:JUN/2012)
FIGURA 6.4.1A	GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DAS CARGAS CALCULADAS E OBSERVADAS (MAR/2011)
FIGURA 6.4.1B	GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS CALCULADAS E OBSERVADAS (MAR/2012)
FIGURA 6.4.1C	GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS CALCULADAS E OBSERVADAS (JUN/2012)
FIGURA 7.1.1	ÁREA DO REMANSO DO RIO SIMULADA COMO CARGA HIDRÁULICA CONSTANTE
FIGURA 7.1.2	DIFERENÇA ENTRE A TOPOGRAFIA E AS CARGAS HIDRÁULICAS PÓS SIMULAÇÃO DO REMANSO DO RIO (MAR/2011)
FIGURA 7.2.1	ÁREA DO REMANSO DO RESERVATÓRIO SIMULADA COMO CARGA HIDRÁULICA CONSTANTE
FIGURA 7.2.2	DIFERENÇA ENTRE A TOPOGRAFIA E AS CARGAS HIDRÁULICAS PÓS SIMULAÇÃO DO REMANSO DO RESERVATÓRIO (MAR/2012)
FIGURA 7.3.1	DADOS FUTUROS DE RECARGA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO
FIGURA 7.3.2	DIFERENÇA ENTRE CARGAS HIDRÁULICAS PÓS-SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO (70,2M) AO LONGO DO TEMPO



1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A Conestoga-Rovers e Associados Engenharia Ltda. (CRA) foi contratada pela Santo Antônio Energia S.A. (SAESA) para desenvolver o Modelo Matemático de Fluxo da Área de Influência Direta – AID do reservatório do Aproveitamento Hidroelétrico de Santo Antônio, no rio Madeira.

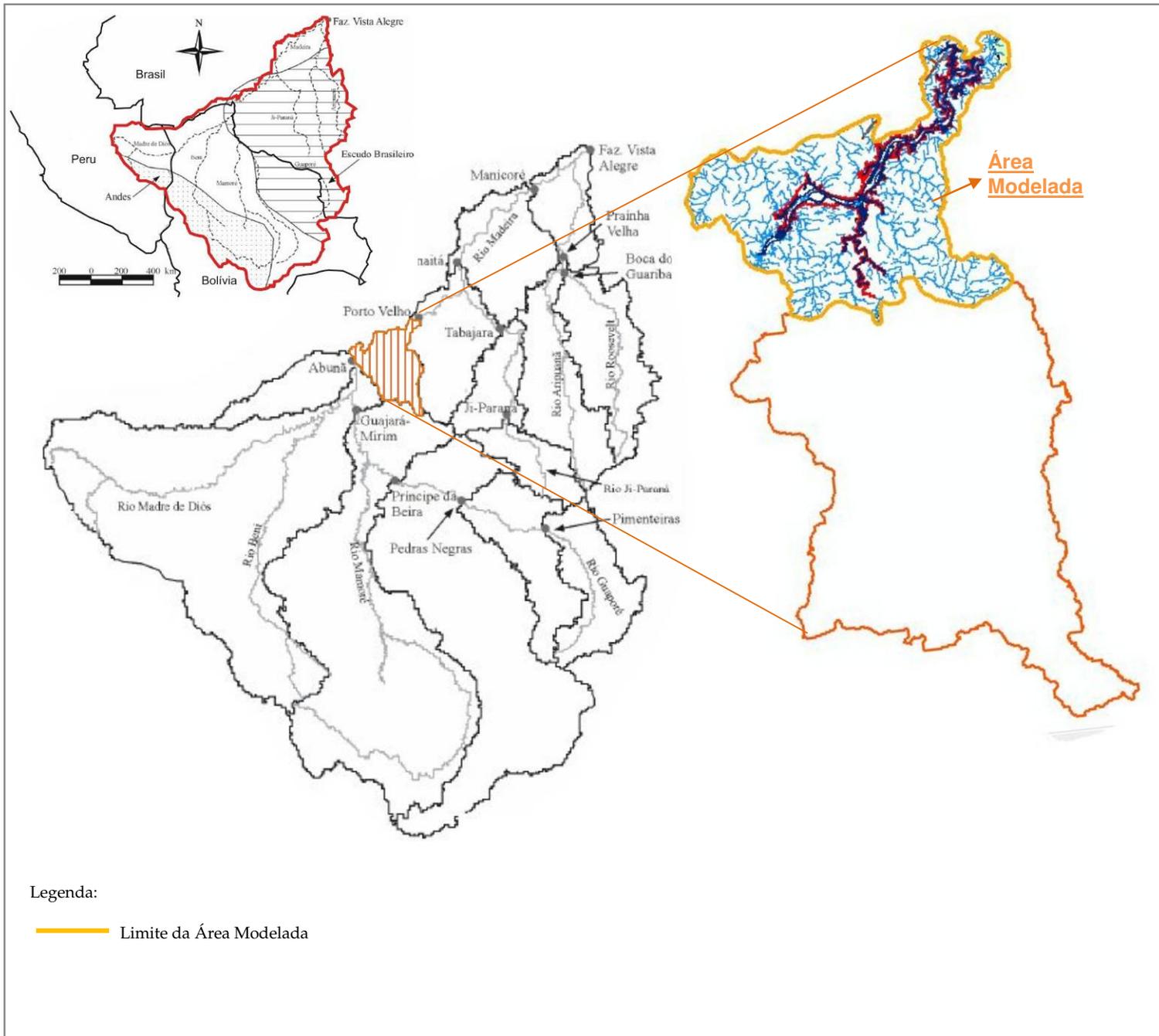
O presente relatório reporta as atividades previstas na Etapa # 3 do *Modelo Matemático de Fluxo*, terceira fase do *Monitoramento do Lençol Freático*. Para tanto, foi considerado o comunicado da SAESA, emitido em julho de 2012, informando à CRA que devido a alterações no referencial de nível do ramal Porto Velho-Abunã, conforme monografias disponibilizadas no site do IBGE e corrigidas em 15/06/2011, houve a necessidade de uma readequação da cota de enchimento do reservatório de 70,5 m para 70,2 m. A cota redefinida para 70,2 m foi então considerada no prognóstico de enchimento.

O modelo matemático de fluxo foi elaborado com os dados da área ocupada pela Unidade Hidrelétrica (UHE) Santo Antônio, localizada na bacia do rio Madeira, à montante da cidade de Porto Velho - RO (**FIGURA 1.1**), bem como da simulação de enchimento do futuro reservatório considerando-se as linhas de cota de inundação de 70,2 m.

Em síntese, o objetivo da Modelagem Matemática de Fluxo é o de traduzir o modelo conceitual hidrogeológico do *site*, após a interpretação consistente dos dados existentes, para um modelo matemático capaz de simular o movimento da água subterrânea e a dinâmica do sistema hidrogeológico para ações de intervenção, como o rebaixamento do nível d'água através de bombeamento, barreiras hidráulicas, além de permitir observar a elevação do nível d'água resultante do enchimento de reservatórios.



FIGURA 1.1
LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO MADEIRA E DA ÁREA MODELADA
(MODIFICADO DE RIBEIRO NETO, 2006)

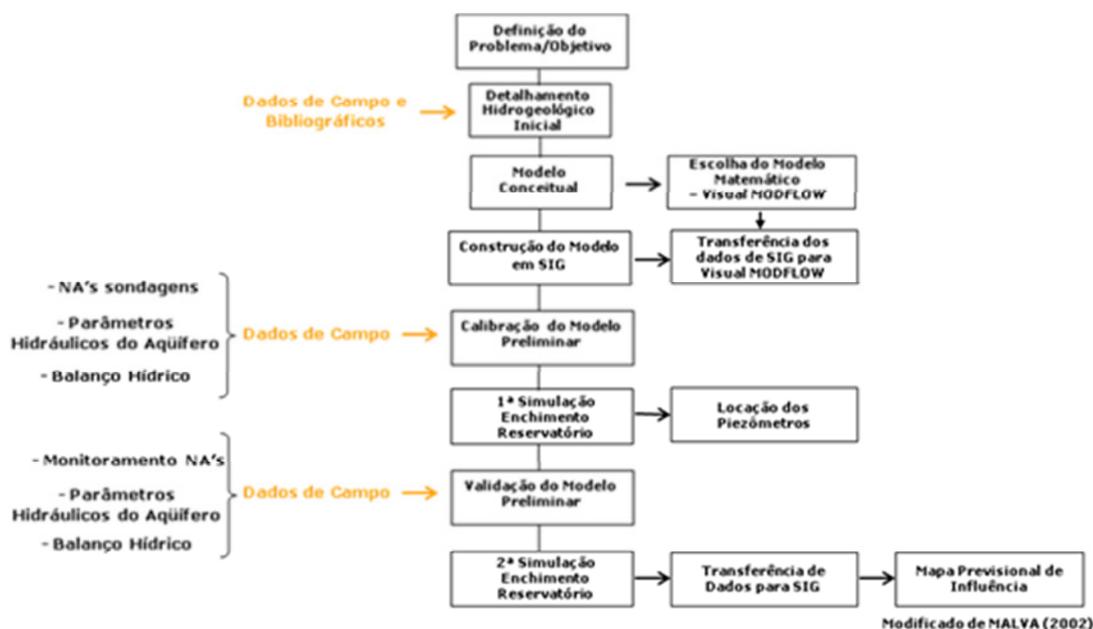




2.0 METODOLOGIA

Tratando-se do enchimento de um reservatório em ampla área da Bacia Hidrográfica, foi utilizada a metodologia testada por CAVALCANTI (2002) e esquematizada na **FIGURA 2.1**, a qual associa o Sistema de Informação Geográfica (SIG) à modelagem matemática para execução de Mapa Previsional de Influência do Reservatório sobre o Aquífero Livre (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

FIGURA 2.1
ROTEIRO METODOLÓGICO BASEADO EM CAVALCANTI (2002)



2.1 ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Item inicial e principal constitui-se no entendimento do funcionamento do sistema hidrogeológico através da interpretação dos dados levantados em bibliografia e em campo, tais como geologia, hidrogeologia, climatologia, dados de poços existentes e sondagens executadas na área e ensaios hidráulicos realizados no aquífero de interesse. O objetivo final é a concepção de um modelo conceitual hidrogeológico da área ocupada pela bacia de contribuição do reservatório.



2.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO

Com a definição do modelo conceitual hidrogeológico, foi iniciada a sua reprodução através da inserção dos dados no modelo matemático. O modelo matemático de fluxo adotado foi um modelo numérico de diferenças finitas, centrado no bloco de três dimensões para estado estacionário. Foi utilizado o aplicativo VisualMODFLOW® 4.0, da *Waterloo Hydrogeologic Software* do Canadá, composto por um pacote integrado que combina as mais recentes versões do USGS MODFLOW® (MCDONALD & HARBAUGH, 1988) para cálculo do fluxo e balanço hídrico geral das águas subterrâneas, o USGS ZONEBUDGET® (HARBAUGH, 1990) para balanço hídrico individual das células do modelo, o WinPEST® (DOHERTY, 1998) para fazer prognósticos de valores dos parâmetros de calibração, mantendo uma calibração razoável e o USGS MODPATH® (POLLOCK, 1989) para definição das linhas de trajetórias de partículas.

O aplicativo VisualMODFLOW baseia-se na derivação de uma equação diferencial parcial tridimensional conhecida como Equação Fundamental do Fluxo de Água Subterrânea, obtida através da aplicação do princípio de conservação de massa (Equação da Continuidade) e da Lei de Darcy. Para a resolução desta equação para o cálculo das cargas hidráulicas, deve-se definir uma condição inicial de carga e as condições de contorno da área de interesse, que fazem parte do modelo conceitual da área.

Seguindo a metodologia adotada e ilustrada na **FIGURA 2.1**, o modelo conceitual hidrogeológico é introduzido num Sistema de Informação Geográfica (SIG), para tanto utilizando-se do aplicativo especializado *ArcGIS 9.3*, extensão *ArcGIS 3-D Analyst*.

2.3 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO

A aproximação do modelo matemático construído com o modelo conceitual real elaborado é alcançada com a etapa de calibração do modelo matemático. A calibração foi executada, inicialmente, através do método de tentativa e erro para a determinação dos parâmetros mais sensíveis no modelo (Análise de Sensibilidade), utilizando-se o pacote WinPEST (DOHERTY, 1998).

Para a checagem da calibração bem como os seus prognósticos foram utilizados critérios qualitativos, tais como a comparação entre os mapas potenciométricos considerando-se a forma dos contornos, as direções de fluxo e a avaliação de quão razoável é a representação das propriedades imputadas no modelo; além de critérios quantitativos baseados na comparação entre as cargas hidráulicas calculadas e medidas em campo, atentando-se para os resultados de erro médio quadrático, erro médio quadrático normalizado e balanço de massa (equilíbrio hídrico).



2.4 PROGNÓSTICO III – ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO EM REGIME TRANSIENTE E VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO

Após a obtenção do modelo calibrado para a referida cota de enchimento de 70,2 m, foi feito o prognóstico simulando-se os efeitos do enchimento do reservatório em estado transiente para verificar a situação final de equilíbrio, gerando-se o respectivo mapa potenciométrico e permitindo-se observar o comportamento simulado do nível d'água na fase pós-enchimento.

Com o objetivo de se comparar os piores cenários de enchimento, o presente relatório inclui também a apresentação de dois outros modelos estacionários executados para a simulação e comparação do remanso do Rio Madeira (fase pré-enchimento) com o remanso do reservatório (fase pós-enchimento). Para tanto, um modelo de cheia em estado estacionário foi calibrado com dados de campo coletados em Março de 2011 para simular o remanso do Rio Madeira, e outro modelo estacionário de cheia pós-enchimento foi calibrado com dados de campo coletados em Março de 2012, para simular o remanso do reservatório. Uma vez calibrado, o modelo estacionário de Março de 2012 foi utilizado como condição inicial (condição de chuva – período de cheia) do modelo transiente pós-enchimento do reservatório até a campanha de Junho de 2012 (condição de seca – período de vazante), quando foram efetuadas as medições de nível d'água dos poços cacimba na área do assentamento de reforma agrária Joana D'Arc. A partir do modelo transiente foram elaborados mapas previsionais de influência do enchimento do reservatório (intervalos de 1, 90, 270 e 365 dias).

Para a confecção de um Mapa Previsional de Influência, as etapas até então descritas são suficientes.



3.0 MODELO ADOTADO

Para a escolha do modelo utilizado neste trabalho, foram avaliadas as seguintes questões antes de sua utilização:

- Atendimento dos objetivos pré-definidos;
- Utilização dos dados existentes ou possíveis de serem coletados;
- Considerações acerca dos dados existentes (anisotropias e/ou heterogeneidades) e;
- Ser acessível, técnica e economicamente.

Para atender a estas questões foi adotado o modelo de fluxo numérico, de diferenças finitas centrado no bloco, de três dimensões, para estado estacionário e transiente.

O aplicativo empregado, VISUAL MODFLOW®, baseia-se na derivação de uma equação diferencial parcial tridimensional conhecida como Equação Fundamental de Fluxo de Água Subterrânea, obtida através da aplicação do princípio de conservação de massa (Equação da Continuidade) e da Lei de Darcy. Para tal equação ser resolvida para o cálculo das cargas hidráulicas (potenciometria), deve-se definir uma condição inicial de carga e as condições de contorno da área de interesse, que fazem parte do modelo conceitual da área.



4.0 BASES DE DADOS UTILIZADAS

Para a presente etapa de modelagem, foram utilizadas as bases de dados referentes à Etapa # 2 - *Modelo Matemático de Fluxo Transiente*, acrescidas de novas informações disponibilizadas pelos trabalhos de campo desenvolvidos pela CRA e bases de dados fornecidos pela SAESA:

- CPRM (2005) – Base cartográfica em formato SIG com geologia, recursos minerais, geomorfologia e hidrogeologia em escala 1:100.000 para Área de Influência Direta (AID) e 1:250.000 para Área de Influência Indireta (AII) do reservatório;
- CPRM (2005) – Relatório Técnico – “Levantamento de Informações para subsidiar o Estudo de Viabilidade do Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) do Rio Madeira” - PROJETO RIO MADEIRA/AHE SANTO ANTÔNIO. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL/FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., Porto Velho - RO;
- SAESA-CSAC (2009) – Histórico de cota e vazão do Rio Madeira entre janeiro de 2008 e março de 2009;
- SAESA-CSAC (2009) – Histórico de precipitação na bacia do Rio Madeira entre novembro de 2008 e março de 2009;
- SAESA-CSAC (2009) – Taxa de infiltração do reservatório considerada como critério para cálculos do empreendimento;
- CPRM/SAESA-CSAC/CRA – Tabela com medição de carga hidráulica realizada em alguns setores da futura área de inundação (item 6.4);
- FURNAS – Base cartográfica em plataforma SIG (espaçamento de curvas de nível a cada 5 m);
- PCE (2009) – Relatório (nº 02/09) com Levantamento Batimétrico realizado no Rio Madeira, à montante e à jusante da cachoeira de Santo Antônio, no município de Porto Velho - RO;
- PCE (2009) – Relatório com Levantamento Topo-Batimétrico do Rio Madeira e principais afluentes na área de influência do futuro reservatório da UHE de Santo Antônio (PORTO VELHO-RO – HUMAITÁ-AM);
- SAESA-CSAC (2009) – Relatório de investigações geológico-geotécnicas no eixo da barragem de Santo Antônio;
- SAESA – Tabela com Agentes Poluidores e Poços;
- SAESA – Área de Inundação do Reservatório com Remanso (cota 70,5 m);
- SAESA – Estudos de Viabilidade e Projeto Básico da UHE Jirau - Ficha Resumo;
- CRA – Perfiss litológico-constructivos dos poços de monitoramento instalados (MNAs);
- CRA – Tabela padrão para o modelo de fluxo contendo as coordenadas, cotas e dados constructivos dos poços de monitoramento instalados (MNAs), além de medições do nível d’água obtidas ao longo das campanhas de monitoramento hidrogeológico (até Junho 2012);



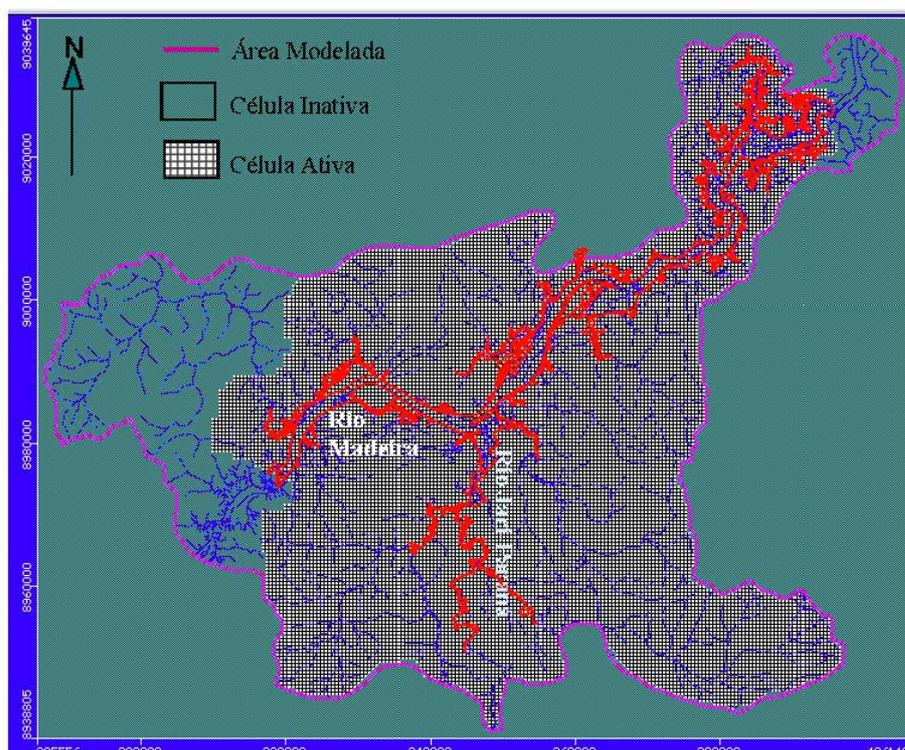
- CRA – Tabela padrão para o modelo de fluxo contendo as coordenadas, cotas e medições de carga hidráulica dos poços cacimba situados na área do assentamento Joana D’Arc;
- SAESA – Dados de pluviometria/fluviometria de estações de medição dispostas ao longo da calha do Rio Madeira e principais afluentes;
- SAESA – Dados hidrossedimentológicos incluindo leitura das réguas, vazão e área de seções transversais (out/2008 – mar/2011);
- SAESA – Tabelas com histórico de cota do Rio Madeira e Jaci-Paraná (leituras telemétricas de vazões);
- SAESA – Dados hora/hora de fluviometria, vazão e pluviometria das estações Abunã, Caldeirão do Inferno (jusante), Jaci-Paraná Vila e UHE Santo Antônio;
- SEDAM – Tabela com medições diárias de precipitação pluviométrica nas estações de Jirau, Santo Antônio, Calama e Extrema, entre Janeiro de 2011 e Junho de 2012;
- SAESA – *Shapefiles* para adição à plataforma SIG:
 - Cota de inundação máxima (70,5 m);
 - Limite externo e dos lotes do assentamento Joana D’Arc I, II e III (base fundiária fornecida pelo INCRA);
 - Lotes Joana D’Arc, adquiridos pela SAESA;
 - Lotes Joana D’Arc do INCRA;
 - Remanso da cota de inundação pela média das máximas anuais;
 - Vias de acesso;
- SAESA – Dados topográficos da AID baseada em levantamento aerofotogramétrico realizado pela empresa AEROMAPA, com curvas topográficas a cada 0,5 m e a cada 100 m; e
- SAESA – Informação sobre alteração do referencial topográfico (*datum*) de SAD 69 para SIRGAS 2000 pelo IBGE, com diferença negativa de 30 cm. Com a adoção deste referencial, a cota oficial de enchimento do reservatório altera-se para 70,2 m.



5.0 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

A área modelada foi definida considerando-se a sub-bacia envolvida, abrangendo a Área de Influência Indireta (AII) destacada na **FIGURA 1.1** com coloração laranja. Devido à ausência de dados e à não influência direta do reservatório no rumo S/SW, apenas a porção norte da AII foi considerada na modelagem. Ainda na **FIGURA 1.1**, dentro da área modelada, pode-se observar a linha da cota 70,2 m do futuro reservatório (contorno em vermelho). O polígono inicialmente inserido no modelo tem área de aproximadamente 12.000 km², enquanto a área realmente modelada, onde há somente células ativas (células brancas com *grid*, **FIGURA 5.1**), possui aproximadamente 8.340 km².

FIGURA 5.1
POLÍGONO E ÁREA MODELADA



O contorno inicial da área modelada (linha rosa da **FIGURA 5.1**) foi traçado sobre os divisores de água da sub-bacia do Rio Madeira, com exceção da porção sul, onde três braços do Rio Jaci-Paraná foram cortados. O limite NE da área modelada foi definido como o eixo da barragem de Santo Antônio, enquanto o limite SW foi estabelecido na Ilha do Padre, onde está sendo construída a barragem de Jirau. Desconsiderou-se a extremidade W do modelo inserindo-se células inativas nesta porção (cor verde água da **FIGURA 5.1**), uma vez que a mesma não apresenta a densidade adequada de informações para a modelagem.



Para a definição da topografia da área a ser modelada foram mescladas cotas obtidas em levantamento bibliográfico e trabalhos de campo ao longo de seções no Rio Madeira e principais afluentes, incluindo batimetria, pontos cotados distribuídos por toda a área, pontos das estações de medição de fluviometria/pluviometria, poços de monitoramento instalados (MNAs), poços cacimba cadastrados no assentamento Joana D'Arc e com curvas topográficas de espaçamento de 1 metro, baseadas em levantamento aerofotogramétrico da AID (*grid* de 100 x 100 m). As cotas resultantes dessa composição variam entre 20 e 180 m (manm – metros acima do nível do mar), sendo que às margens do Rio Madeira, com sentido geral NE-SW, predominam as cotas entre 50 m (próximo à UHE) e 70 m (rumo montante – Jirau). Na margem esquerda, próxima à UHE até a porção central do reservatório, predominam cotas entre 90 e 100 m, enquanto que para o rumo montante, após o seu estreitamento na porção central, passam a predominar cotas entre 80 e 90 m. Na margem direita, as cotas aumentam com o distanciamento do rio, chegando a 120 m. Nota-se que na margem esquerda (rumo NE) não há grandes variações na topografia, enquanto que tomando-se o rumo SW observa-se relevo mais acidentado. As cotas do leito do Rio Madeira variam entre 20 e 73 m, enquanto que as cotas dos principais afluentes da margem direita (rios Jaci-Paraná e Caracol) variam entre 66 e 74 m.

O Rio Madeira constitui-se na zona de descarga hídrica regional, enquanto que seus afluentes principais e secundários as zonas de descarga locais. Neste contexto e em conformidade com a topografia local, o sentido de fluxo da água subterrânea se dá preferencialmente dos topos das vertentes para as drenagens, sendo o rio Madeira o nível de base regional (**FIGURA 5.2**). A recarga hídrica ocorre em toda área não impermeabilizada, enquanto a evapotranspiração ocorre em maior proporção nas áreas de vegetação densa, observadas principalmente ao longo da margem esquerda do Rio Madeira e nas porções mais a Sul do rio Jaci-Paraná e seus tributários.

As **condições de contorno** são utilizadas para definir, com base no sistema hidrogeológico real, as fronteiras hidráulicas que delimitam o domínio do modelo. Quando possível, devem coincidir com os limites hidrogeológicos naturais (rios, lagos, divisores de água, etc.) ou qualquer feição hidrogeológica dentro do domínio que afete o sistema. Os limites da área modelada encontram-se grande parte em divisores de água superficial, onde se estima que o fluxo subterrâneo seja nulo (**FIGURA 5.3**).

Para o modelo estacionário pré-enchimento do reservatório, considerou-se condição de contorno do tipo rio (carga hidráulica constante – tipo 1) ao longo do Rio Madeira e na porção do Rio Jaci-Paraná, entre o Rio Madeira e a cidade de Jaci-Paraná (pontos em verde apresentados no mapa da **FIGURA 5.3**). Os dados de cota de base dos rios foram obtidos a partir das seções transversais ao longo dos mesmos, apresentadas em PCE (2009), enquanto as cotas do nível de água dos rios foram baseadas em medições de Março de 2011 nas estações hidrométricas R9 (UHE, saída da área modelada), R4, Cachoeira do Teotônio-



Jusante, Cachoeira do Teotônio-Montante, Cachoeira do Teotônio-Montante II, Pedral-Jusante, Cachoeira do Morrinho-Jusante, Cachoeira do Morrinho-Montante, Foz do Rio Jaci-Paraná (ponte), Vila Jaci-Paraná (entrada da área modelada pelo Rio Jaci-Paraná), Caldeirão do Inferno-Jusante (entrada da área modelada pelo Rio Madeira). Com a ausência da estação Jirau, considerou-se o gradiente hidráulico linear entre Caldeirão do Inferno-Jusante e Abunã (TABELA 5.1).

TABELA 5.1
CARGAS HIDRÁULICAS INSERIDAS NOS TRECHOS DOS RIOS MADEIRA
E JACI-PARANÁ

		11-Mar	
Trecho de Jusante para Montante		CHI	CHF
Rio 0	R9 (Barragem - UHE) - R4	58.20	62.43
Rio 1	R4 - Jusante Cachoeira Teotônio	62.43	62.92
Rio 2	Cachoeira Teotônio Montante - Cachoeira Teotônio Montante II	65.46	66.28
Rio 3	Cachoeira Teotônio Montante II - Pedral Jusante	66.28	67.11
Rio 4	Pedral Jusante - Cachoeira do Morrinho Jusante	67.11	67.94
Rio 5	Cachoeira do Morrinho Jusante - Cachoeira do Morrinho Montante	67.94	68.80
Rio 6	Cachoeira do Morrinho Montante - Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) I	68.80	70.68
Rio 7	Cachoeira do Morrinho Montante - Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) II	69.60	70.36
Rio 8	Cachoeira do Morrinho Montante - Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) III	69.70	70.02
Rio 9	Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) I - Jusante Caldeirão do Inferno I	70.68	72.25
Rio 10	Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) I - Jusante Caldeirão do Inferno II	70.67	70.90
Rio 11	Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) I - Jusante Caldeirão do Inferno III	71.80	71.94
Rio 12	Foz do Rio Jaci Paraná (ponte) I - Jusante Caldeirão do Inferno IV	72.13	72.25
Rio 13	Jusante Caldeirão do Inferno - Jirau	72.25	72.32
Rio 14	Foz do Jaci-Paraná - Vila Jaci-Paraná	70.76	71.40

CHI - carga hidráulica inicial CHF - carga hidráulica final em cada trecho

As drenagens principais fora da área do reservatório foram consideradas como condição de contorno tipo dreno (carga dependente do fluxo - tipo 3), sendo as referentes cotas de base inseridas como a cota do terreno definida pela interpolação dos dados topográficos subtraída de 0,5 m nas cabeceiras e 2,0 m nas desembocaduras.

As drenagens secundárias não foram consideradas como condições de contorno.

Quanto ao movimento da água subterrânea em profundidade, devido à limitação de informação, considerou-se fluxo nulo nos limites do modelo.



FIGURA 5.2
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA ÁREA

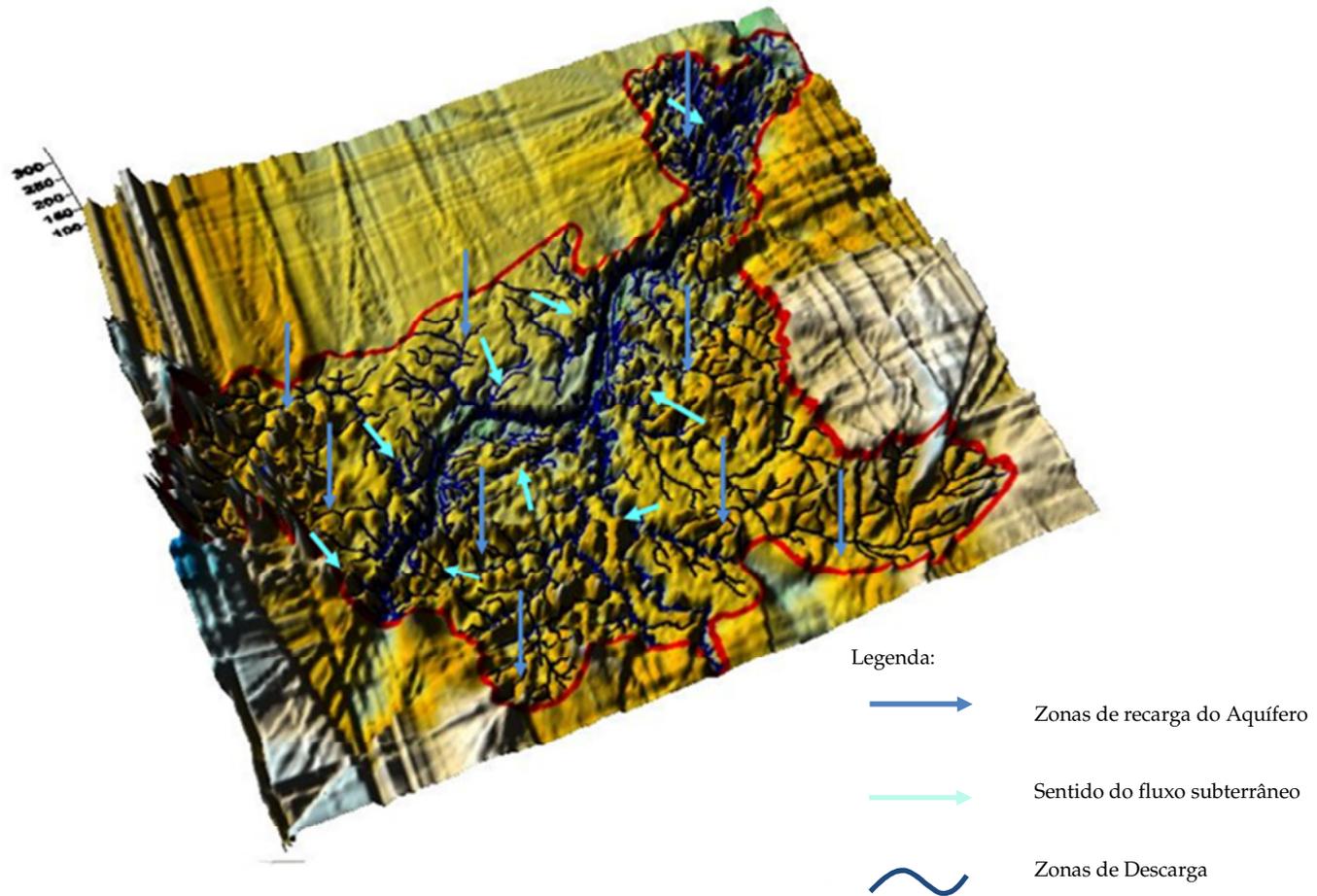
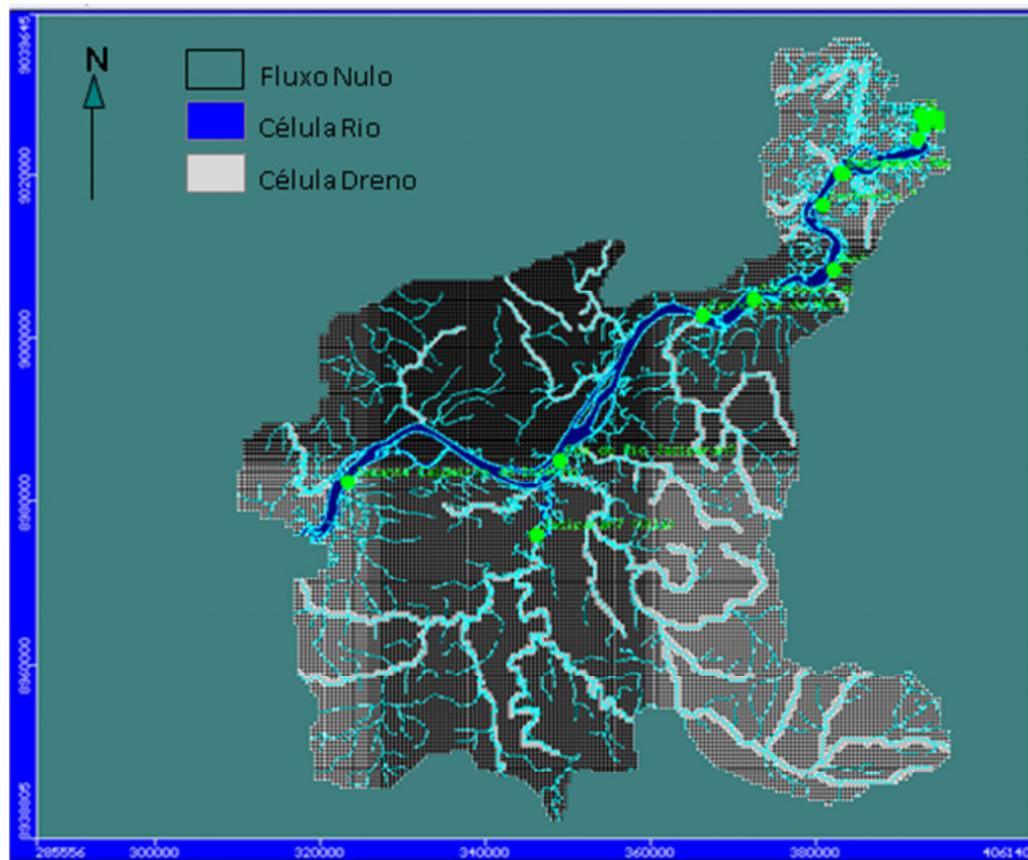




FIGURA 5.3
CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO ESTACIONÁRIO (MAR/2011)



● Cachoeira Morrinho Montante – Ponto de Leitura de Cargas Hidráulicas – Fase Rio

Para o modelo estacionário pós-enchimento do reservatório, considerou-se condição de contorno do tipo carga hidráulica constante (tipo 1) na área delimitada com a cota de operação do reservatório igual a 70,2 m (FIGURA 5.4). As cotas de nível d'água basearam-se no histórico de medições feitas ao longo do mês de Março de 2012 nas estações hidrométricas R9 (UHE, saída da área modelada), Vila Jaci-Paraná (entrada da área modelada pelo Rio Jaci-Paraná) e Caldeirão do Inferno-Jusante (entrada da área modelada pelo Rio Madeira). Os demais trechos foram inseridos calculando-se o gradiente hidráulico entre as estações R9 e Caldeirão do Inferno-Jusante, considerando a variação do gradiente conforme o remanso do reservatório (TABELA 5.2).



TABELA 5.2
CARGAS HIDRÁULICAS INSERIDAS COMO O RESERVATÓRIO (MAR/2012)

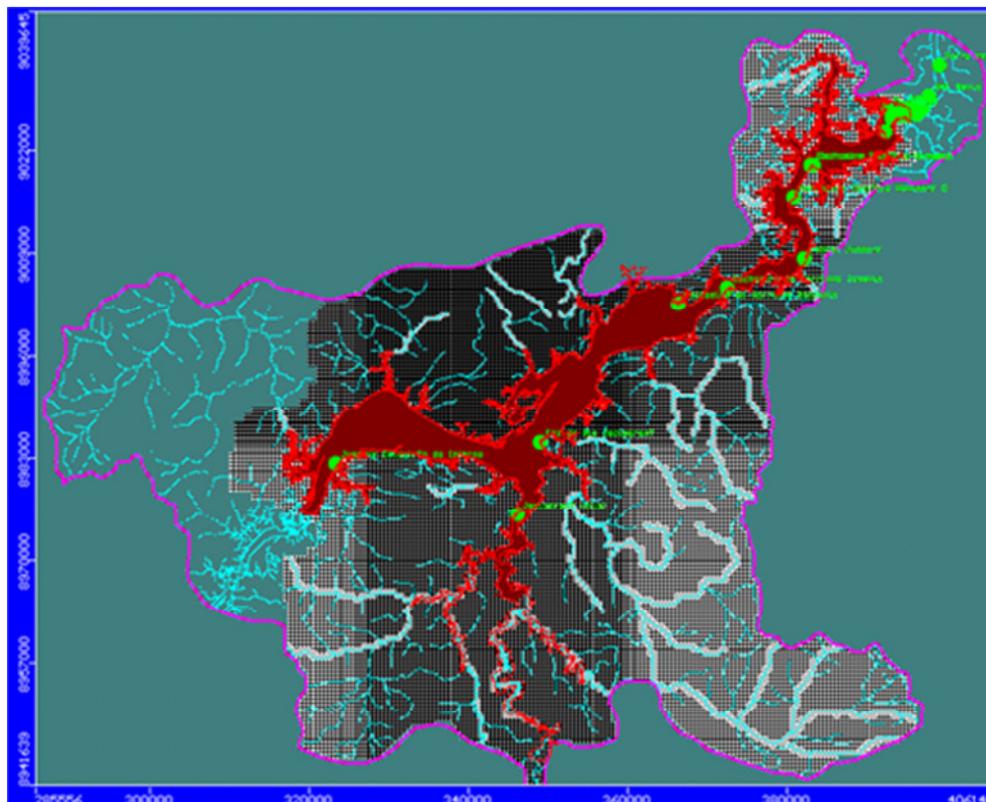
		Pós-Enchimento	
		12-Mar	
Trecho de Jusante para Montante		CHI	CHf
Rio 0	R9 (Barragem - UHE) - R4	69.60	69.60
Rio 1	R4 – Jusante Cachoeira Teotônio	69.60	69.60
Rio 2	Cachoeira Teotônio Montante – Cachoeira Teotônio Montante II	69.80	70.10
Rio 3	Cachoeira Teotônio Montante II – Pedral Jusante	70.10	70.10
Rio 4	Pedral Jusante – Cachoeira do Morrinho Jusante	70.80	71.10
Rio 5	Cachoeira do Morrinho Jusante - Cachoeira do Morrinho Montante	71.10	71.10
Rio 6	Cachoeira do Morrinho Montante - Foz do Rio Jaciparaná (ponte) I	71.80	72.10
Rio 7	Foz do Rio Jaciparaná (ponte) I - Jusante Caldeirão do Inferno I	73.53	73.53
Rio 8	Jusante Caldeirão do Inferno – Jirau	73.55	73.90
Rio 9	Foz do Jaci-Paraná – Vila Jad -Paraná	72.97	72.97
dados estimados com base no gradiente entre entrada (Rio 0) e saída (Rio 7)			
dados medidos na tabela leituras telemétricas			

CHI – carga hidráulica inicial CHf – carga hidráulica final em cada trecho

Para o modelo transiente pós-enchimento do reservatório, considerou-se também condição de contorno do tipo carga hidráulica constante (tipo 1) na área delimitada com a cota de operação do reservatório igual a 70,2 m (**FIGURA 5.4**). As cotas de nível d'água basearam-se no histórico de medições mensais entre Março e Junho de 2012, nas estações hidrométricas R9 (UHE – saída da área modelada), Vila Jaci-Paraná (entrada da área modelada pelo Rio Jaci-Paraná) e Caldeirão do Inferno-Jusante (entrada da área modelada pelo Rio Madeira), (pontos em verde apresentados no mapa da **FIGURA 5.4**). Os demais trechos foram inseridos calculando-se o gradiente hidráulico entre as estações R9 e Caldeirão do Inferno-Jusante, considerando a variação do gradiente conforme o remanso do reservatório (**TABELA 5.3**).



FIGURA 5.4
CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO ESTACIONÁRIO (MAR/2012)



● Cachoeira Morrinho Montante – Ponto de Leitura de Cargas Hidráulicas – Fase Reservatório

TABELA 5.3
CARGAS HIDRÁULICAS INSERIDAS COMO O RESERVATÓRIO (ABR/2012 – JUN/2012)

		Pós-Enchimento					
		12-Apr		12-May		12-Jun	
	Trecho de Jusante para Montante	CHi	CHf	CHi	CHf	CHi	CHf
Rio 0	R9 (Barragem - UHE) - R4	70.04	70.04	70.17	70.17	70.15	70.15
Rio 1	R4 - Jusante Cachoeira Teotônio	70.04	70.04	70.17	70.17	70.15	70.15
Rio 2	Cachoeira Teotônio Montante - Cachoeira Teotônio Montante II	70.24	70.54	70.37	70.67	70.23	70.53
Rio 3	Cachoeira Teotônio Montante II - Pedral Jusante	70.54	70.54	70.67	70.67	70.53	70.53
Rio 4	Pedral Jusante - Cachoeira do Morrinho Jusante	71.24	71.54	70.83	71.13	70.72	71.02
Rio 5	Cachoeira do Morrinho Jusante - Cachoeira do Morrinho Montante	71.54	71.54	71.13	71.13	71.02	71.02
Rio 6	Cachoeira do Morrinho Montante - Foz do Rio Jaciparaná (ponte) I	72.24	72.54	71.64	71.94	71.21	71.51
Rio 7	Foz do Rio Jaciparaná (ponte) I - Jusante Caldeirão do Inferno I	73.00	73.00	72.65	72.65	72.06	72.06
Rio 8	Jusante Caldeirão do Inferno - Jirau	72.94	73.24	72.56	72.86	71.92	72.22
Rio 9	Foz do Jaci-Paraná - Vila Jaci-Paraná	72.87	72.87	72.84	72.84	71.61	71.61
	dados estimados com base no gradiente entre entrada (Rio 0) e saída (Rio 7)						
	dados medidos na tabela leituras telemétricas						

CHi – carga hidráulica inicial

CHf – carga hidráulica final em cada trecho



6.0 DADOS CONSIDERADOS

6.1 MALHA OU GRID

O *grid* representativo da área modelada tem um total de aproximadamente 8.340 km², com malha regular de 500 x 500 m (vide **FIGURA 5.1**). Em profundidade, o modelo foi dividido em um total de seis *layers*, ao longo dos quais as unidades hidrogeológicas foram distribuídas (**FIGURA 6.2.2**).

6.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH)

Observam-se três sistemas aquíferos principais na região, distribuídos em área (**FIGURA 6.2.1**), com base nos dados de mapeamento geológico e hidrogeológico obtidos em CPRM (2005), na escala 1:250.000, para a Área de Influência Indireta (AII) do reservatório. Em profundidade (**FIGURA 6.2.2**), as unidades foram definidas com base em bibliografia (CAMPOS & MORAIS, 1999), perfis de sondagens geológico-geotécnicas executadas no eixo da barragem (SAESA/CSAC, 2009) e nos perfis litológicos de poços de monitoramento instalados pela CRA no entorno do reservatório:

- I) sedimentos inconsolidados quaternários, compondo um aquífero poroso do tipo livre a semi-confinado, com distribuição ampla e heterogênea (*Layers* 1 e 2);
- II) sedimentos consolidados compondo um aquífero poroso/fraturado do tipo livre com distribuição reduzida e descontínua (*Layers* 1 e 2) e ;
- III) rochas cristalinas, compondo aquíferos fraturados e/ou porosos (manto de alteração – *Layer* 3) do tipo livre a confinado, com distribuição ampla e descontínua (*Layers* 4, 5 e 6).

A **Unidade I**, denominada nesse trabalho de Sistema Aquífero Sedimentar Inconsolidado (SASI), é composta, predominantemente, por sedimentos aluviais e detrito-lateríticos quaternários recentes, sedimentos inconsolidados de origem fluvial formando terraços, depósitos lateríticos e pediplanos (Formação Jaci-Paraná) e sedimentos aluviais ao longo do rio Madeira (Formação Rio Madeira). Tais sedimentos repousam discordantemente sobre as rochas sedimentares e graníticas, sendo que o embasamento cristalino encontra-se em média a 40 m de profundidade (CAMPOS & MORAIS, 1999).

A **Unidade II**, denominada nesse trabalho de Sistema Aquífero Sedimentar Consolidado (SASC), é composta por arenitos arcóseos, arcóseos e ortoconglomerados neoproterozóicos (Formação Palmeiral). Os afloramentos que margeiam os rios Jaci-Paraná e Branco encontram-se geralmente encobertos por colúvios derivados do desmantelamento



dos litotipos da própria Formação Palmeiral ou encobertos por sedimentos inconsolidados do Quaternário. Também estão dispostos sobre o embasamento cristalino.

A **Unidade III**, denominada de Sistema Aquífero Cristalino (SAC), é composta por uma suíte granítica tardia neoproterozóica (Suíte Rondônia) e por outras suítes graníticas mesoproterozóicas (Suíte Intrusiva São Lourenço Caripunas, Suíte Intrusiva Teotônio, Suíte Intrusiva Santo Antônio e Suíte Intrusiva Serra da Providência). As rochas pertencentes a essas suítes são predominantemente monzogranitos, sienitos e sienogranitos, com grau de fraturamento variando entre médio e alto. A Suíte Santo Antônio apresenta intenso processo geoquímico supergênico, sendo coberto por extensa carapaça laterítica em superfície, pertencente à Formação Jaci-Paraná. A Suíte Teotônio possui cobertura sedimentar (argilo-siltosa) na região da Cachoeira Morrinhos, enquanto a Suíte Rondônia, na porção dos rios Jaci-Paraná e Caracol, encontra-se recoberta por sedimentos das formações Jaci-Paraná e Rio Madeira. Além das coberturas descritas, as rochas do embasamento possuem mantos de alteração de espessura decamétrica, capeados por perfis lateríticos imaturos de baixa infiltração.

A geometria e as unidades hidrogeológicas permaneceram as mesmas, tal como definidas na Etapa #1 – *Modelo Matemático de Fluxo Preliminar*, considerando que a descrição litológica das sondagens executadas para a instalação dos poços de monitoramento (MNAs) são congruentes com os dados bibliográficos (CPRM, 2005) nas áreas próximas ao reservatório, embora agregando pouca informação sobre a geologia em profundidade (p. ex. profundidade do topo rochoso), exceto para o MNA-51, o qual indicou granito alterado a 13 m de profundidade (definindo a profundidade do *Layer 1*), e o MNA-43, o qual indicou granito alterado a 25 m de profundidade (definindo a base do *Layer 2*).

Os valores de condutividade hidráulica (K) para as unidades consideradas (vide **TABELA e FIGURA 6.2.1**) foram obtidos a partir de levantamento bibliográfico (valores médios e máximos para cada litologia) e ensaios de infiltração feitos em sondagens geológico-geotécnicas situadas no eixo da barragem da UHE Santo Antônio (SAESA-CSAC, 2009). A **FIGURA 6.2.2** apresenta as unidades hidrogeológicas em seção transversal. A **TABELA 6.2.2** compara os valores de condutividade inicialmente adotados e os obtidos após calibração. Os valores de porosidade e de coeficiente de armazenamento para cada litologia foram obtidos da bibliografia. A **TABELA 6.2.3** apresenta uma comparação entre os valores adotados e os obtidos após calibração.



FIGURA 6.2.1
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EM ÁREA (LAYER 01)

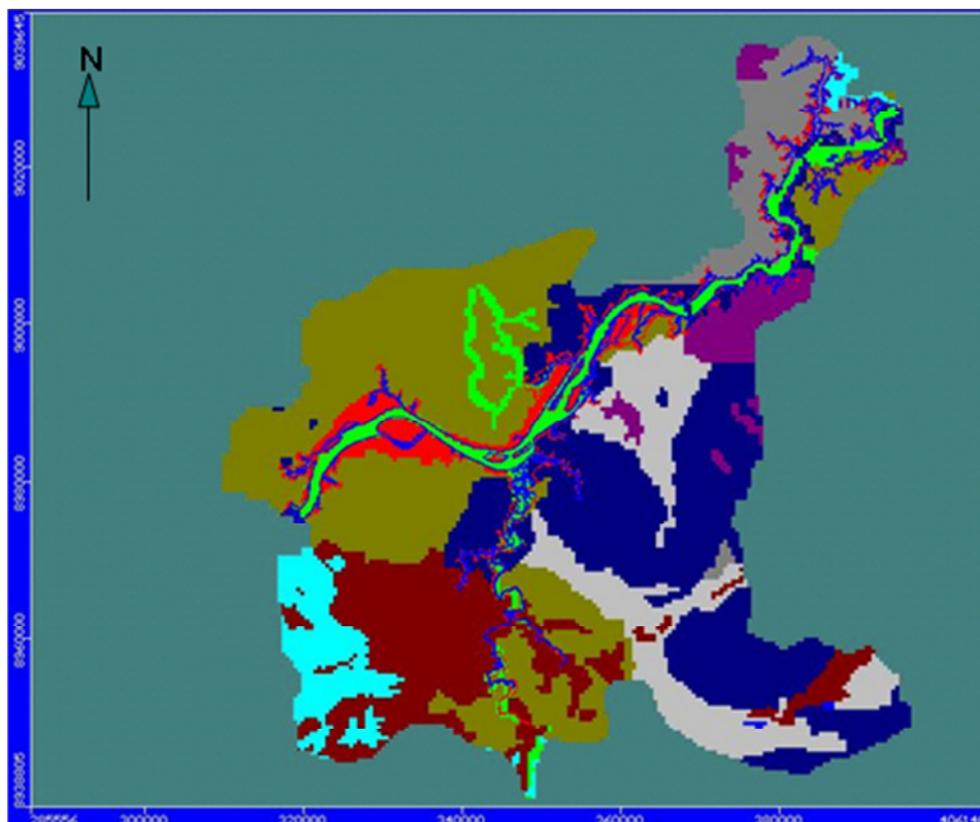


TABELA 6.2.1
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH) CONSIDERADAS X CONDUTIVIDADES
HIDRÁULICAS (K) ADOTADAS

SISTEMAS AQUÍFEROS	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS	LITOTIPOS	UH	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
Sistema Aquífero Sedimentar Inconsolidado (SASI)	Sedimentos Aluvionares Indiscriminados	Areia, Cascalho/Argila, Silte	10	0,0001	0,0001	0,0001
	Sedimentos Aluvionares - Areias	Areia	11	1,E-07	1,E-07	1,E-08
	Sedimentos Aluvionares - Argilas	Argila	9	1,E-06	1,E-06	1,E-07
	Cobertura Detrito-Laterítica	Sedimentos areno-argilosos/concreções ferruginosas	12	1,E-05	1,E-05	1,E-06
	Fm. Jaciparaná - Terraços Arenosos	Areia, silte	8	1,E-07	1,E-07	1,E-08
	Fm. Jaciparaná - Lat. Imat. Concrecionário	Lateritos imaturos concrecionários	6	1,E-07	1,E-07	1,E-08
	Fm. Jaciparaná - Lat. Imat. Mosqueado	Lateritos imaturos mosqueado	6	1,E-07	1,E-07	1,E-07
	Fm. Jaciparaná - Pediplanos ar silte areia	Argila, silte, areia	7	1,E-06	1,E-06	1,E-07
	Fm. Rio Madeira	Areia ferruginosa, silte, argila/sedimento conglomerático	13	1,E-06	1,E-06	1,E-07
Sistema Aquífero Cristalino (SAC)	Suite Intrusiva Rondônia	Granito, monzogranito, sienito, sienogranito, albita granito	2	1,E-06	1,E-06	1,E-07
	Fm. Nova Floresta	Basalto, Gabro, Norito, Troctolito/diabásio	4	1,E-05	1,E-05	1,E-06
Sistema Aquífero Sedimentar Consolidado (SASC)	Fm. Palmeiral (ind)	Arcóseos, arenitos arcósianos, conglomerados/siltitos	3	1,E-08	1,E-08	1,E-07
Sistema Aquífero Cristalino (SAC)	Suite Intrus. São Lourenço - Caripunas	Riodacito, quartzo-sienito, sienogranito	5	1,E-06	1,E-06	1,E-07
	Suite Intrus. Teotônio	Monzodiorito, monzonito, qtz-sienito, sienito, sienogranito	2	1,E-06	1,E-06	1,E-07
	Suite Intrus. Santo Antonio	Monzogranito, sienogranito/pegmatito	4	1,E-05	1,E-05	1,E-06
	Suite Intrus. Serra da Providência	Charnockito, gabróide, mangerito, monzogranito, sienogranito	3	1,E-08	1,E-08	1,E-07

UH – Unidades Hidrogeológicas

Kx, Ky, Kz = condutividade hidráulica nos tensores x, y, z (m/s)

TABELA 6.2.2



COMPARAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS ADOTADAS E OBTIDAS COM AS CALIBRAÇÕES DE MAR/2011 E MAR/2012

Unidades Hidrogeológicas	Litotipo	Condutividade Inicial (m/s)	Condutividade Pós Calibração (m/s) Mar/2011	Condutividade Pós Calibração (m/s) Mar/2012	Condutividade Pós Calibração(m/s) Jun/2012
Unidade 2 	Manto de alteração argiloarenoso/rochas fraturadas (L-01)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x = 5 \times 10^{-5}$	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-4}$ $K_z = 5.15 \times 10^{-5}$	$K_x = K_y = 2 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 2 \times 10^{-6}$
Unidade 3 	Suítas Graníticas fraturadas (L-02/L-03/L-04/ L-05/L-06)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-8}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 8 \times 10^{-7}$ $K_z = K_x = 8 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1.1 \times 10^{-7}$ $K_z = 5 \times 10^{-8}$
Unidade 4 	Interface manto de alteração/rocha (L-03)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x/2 = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 5 \times 10^{-6}$
Unidade 5 	Arenitos Arcosianos (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1.3 \times 10^{-6}$ $K_z = 4.9 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 5.2 \times 10^{-6}$ $K_z = 3.9 \times 10^{-6}$
Unidade 6 	Lateritos (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-7}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-8}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ $K_z/100 = 5 \times 10^{-8}$	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = 1.15 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 8.3 \times 10^{-8}$ $K_z = 6.7 \times 10^{-8}$
Unidade 7 	Argila, Silte, Areia (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 7 \times 10^{-7}$ $K_z = K_x = 7 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 1.65 \times 10^{-7}$ $K_z = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1.7 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 1.7 \times 10^{-6}$
Unidade 8 	Areia, Silte (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x/2 = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ $K_z = 5.5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 7.1 \times 10^{-6}$ $K_z = 1.5 \times 10^{-6}$
Unidade 9 	Argila (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-7}$ $K_z = K_x/10 = 1 \times 10^{-8}$	$K_x = K_y = 9 \times 10^{-7}$ $K_z = K_x = 9 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 7.9 \times 10^{-7}$ $K_z = 1 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 8.0 \times 10^{-8}$ $K_z = 6.7 \times 10^{-9}$
Unidade 10 	Areia, Cascalho, Argila, Silte (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-4}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-4}$	$K_x = K_y = 2 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x/4 = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 2.8 \times 10^{-5}$ $K_z = 3.6 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1.0 \times 10^{-4}$ $K_z = K_x = 1.0 \times 10^{-4}$
Unidade 11 	Areia (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-4}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-4}$	$K_x = K_y = 3 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x/6 = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-5}$ $K_z = 3.4 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 6.2 \times 10^{-5}$ $K_z = K_x = 6.2 \times 10^{-6}$
Unidade 12 	Sed. Areno-Argiloso (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 5.5 \times 10^{-6}$ $K_z = 4.2 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1.0 \times 10^{-6}$ $K_z = 1.0 \times 10^{-7}$
Unidade 13 	Areia ferruginosa, conglomerática (L-01/L-02)	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 1 \times 10^{-7}$	$K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ $K_z = K_x = 5 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 9 \times 10^{-6}$ $K_z = 3.7 \times 10^{-6}$	$K_x = K_y = 1.0 \times 10^{-6}$ $K_z = 1.0 \times 10^{-7}$

K_x, K_y, K_z = condutividade hidráulica nos tensores x, y, z (m/s)



TABELA 6.2.3
COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES DE ARMAZENAMENTO ADOTADOS E
OBTIDOS COM A CALIBRAÇÃO DE JUN/2012

Unidade	Litotipo	Armazenamento Inicial		Armazenamento Pós Calibração (JUN/12)	
Unidade 2 	Manto de alteração argilo-arenoso / rochas fraturadas (L-01)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,1$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,018$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,015$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 3 	Súites Graníticas fraturadas (L-02/L-03/L-04/L-05/L-06)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,019$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,048$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 4 	Interface manto/rocha (L-03)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,029$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,04$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 5 	Arenitos Arcosianos (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 6 	Lateritos (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,05$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,058$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 7 	Argila, Silte, Areia (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,01$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,018$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,01$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 8 	Areia, Silte (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 9 	Argila (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,01$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,034$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,01$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 10 	Areia, Cascalho, Argila, Silte (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,1$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,015$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,08$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 11 	Areia (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,1$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,022$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,084$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 12 	Sed. Areno-Argiloso (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,016$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$
Unidade 13 	Areia ferruginosa, conglomerática (L-01/L-02)	$S_s = 0,02$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,05$ $\phi_{total} = 0,3$	$S_s = 0,016$ $\phi_{ef} = 0,15$	$S_y = 0,046$ $\phi_{total} = 0,3$

S_s – Coeficiente de armazenamento pela espessura aquífera (1/m);

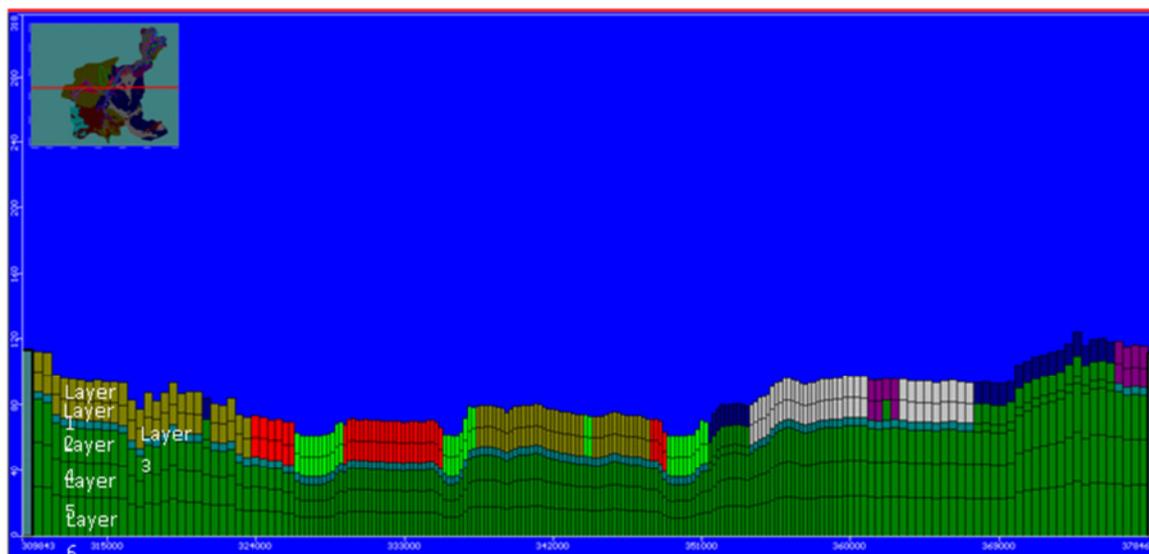
S_y – Coeficiente de armazenamento;

ϕ_{ef} – Porosidade efetiva

ϕ_{total} – Porosidade total



FIGURA 6.2.2
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EM SEÇÃO TRANSVERSAL Y=8986940,7.
EXAGERO VERTICAL DE 100X



6.3 TAXA DE RECARGA / EVAPOTRANSPIRAÇÃO

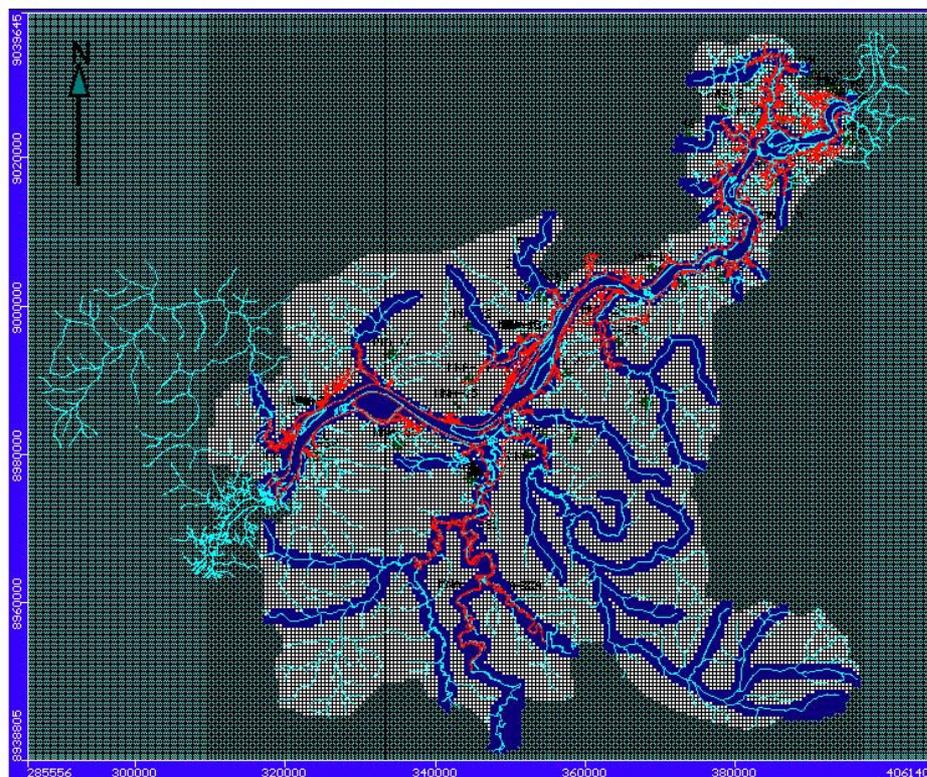
A taxa de recarga inicial utilizada foi de 560 mm/ano (25% da precipitação anual) e a taxa de evapotranspiração igual a 1200 mm/ano, com profundidade de extinção igual a 1,0 m para toda a área. Tais valores constituem médias baseadas em dados fornecidos pela SAESA e em resultados de modelamento matemático hidrológico realizado na Bacia do Rio Madeira por RIBEIRO NETO (2006).

Após calibração da campanha de Março de 2011, obteve-se uma recarga efetiva final igual a 300 mm/ano para a maior parte da e igual a 250 mm/ano nas proximidades dos corpos de água, enquanto que a evapotranspiração calibrada foi mesma de entrada (1200 mm/ano), com uma profundidade de extinção igual a 4,0 m para toda a área.

Para a campanha de Março de 2012, obteve-se uma recarga efetiva final igual a 286 mm/ano para a maior parte da área (células brancas, FIGURA 6.3.1) e igual a 10 mm/ano nas proximidades dos corpos d'água (células azuis, FIGURA 6.3.1), enquanto a evapotranspiração calibrada foi a mesma de entrada (1320 mm/ano), com profundidade de extinção igual a 3,0 m para toda a área.



FIGURA 6.3.1
ÁREAS COM RECARGA DIFERENCIADA – MARÇO DE 2012



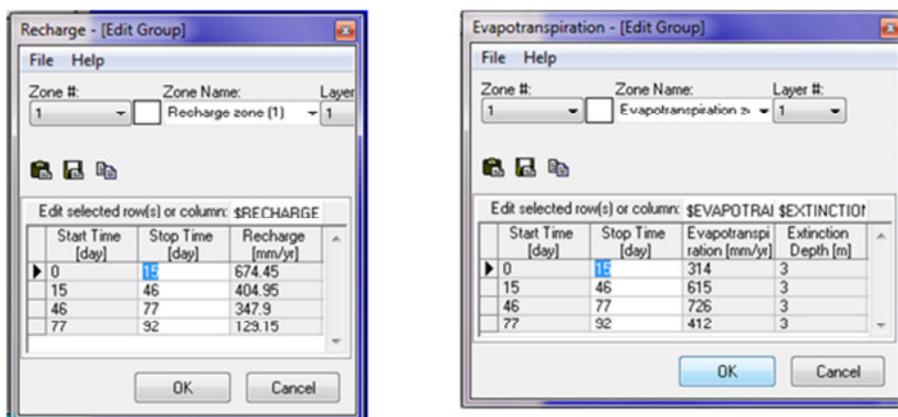
Legenda:

-  Recarga Efetiva igual à 286 mm/ano
-  Recarga Efetiva igual à 10 mm/ano

Para a campanha de jun/2012, a recarga efetiva pós-calibração para toda a área modelada foi de 129,15 mm/ano (**FIGURA 6.3.2**), enquanto a evapotranspiração calibrada foi de 412 mm/ano, com profundidade de extinção igual a 3,0 m para toda a área.



FIGURA 6.3.2
RECARGAS EFETIVAS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZADAS PARA OS TIME STEPS (0-15: MAR/2012; 15-46: ABR/2012; 46-77: MAI/2012 E 77-92: JUN/2012)



6.4 CALIBRAÇÃO

O modelo tem sua calibração efetuada normalmente através de critérios qualitativos e quantitativos. Os critérios qualitativos consistem na comparação com o mapa potenciométrico obtido através dos dados de potenciometria, observando-se as linhas equipotenciais, os sentidos preferenciais de fluxo da água subterrânea e gradientes hidráulicos. Os critérios quantitativos, sendo estes os principais critérios adotados nesse trabalho, são obtidos através da comparação dos resíduos da média das cargas hidráulicas medidas em campo (observadas) com as obtidas no modelo (FIGURAS 6.4.1a, 6.4.1b e 6.4.1c).

A TABELA 6.4.1 apresenta as cargas hidráulicas utilizadas na calibração do modelo estacionário, obtidas a partir das campanhas de medição do nível d'água subterrânea de mar/2011 e mar/2012, nos poços de monitoramento instalados (MNAs) pela CRA no entorno do reservatório.

Ressalta-se que, para o cálculo das cargas hidráulicas considerou-se a cota do terreno indicado pela nova topografia baseada em levantamento aerofotogramétrico, como referência para a maioria dos poços. Ainda, cargas hidráulicas foram reduzidas de 0,30 m devido à alteração de referencial de nível (*datum*) pelo IBGE. Para o modelo transiente, foram utilizadas as medições obtidas na campanha de jun/2012, época da realização do monitoramento inicial dos poços cacimba situados na área do assentamento Joana D'Arc (TABELA 6.4.2).



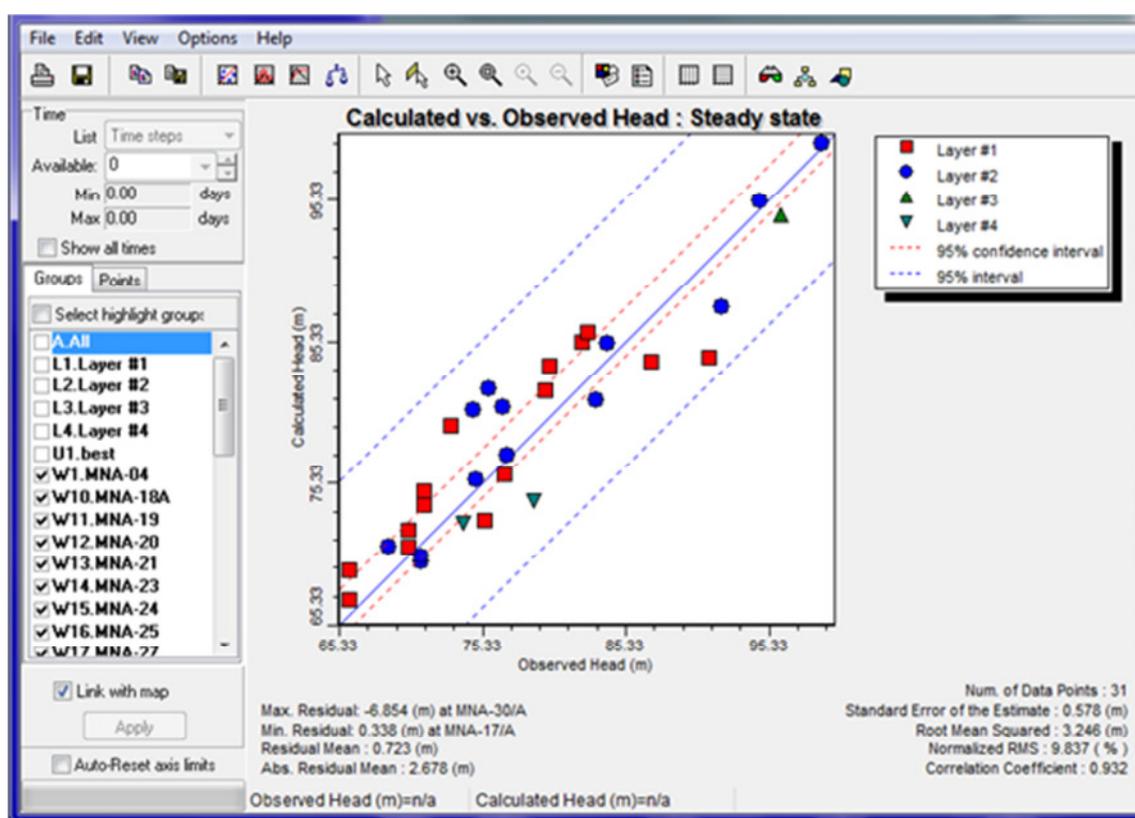
TABELA 6.4.1
DADOS DE CARGA HIDRÁULICA UTILIZADOS NAS CALIBRAÇÕES DOS
MODELOS

Poço	X [m]	Y [m]	11-Mar CH [m]	12-Mar CH [m]	12-Jun CH [m]	Poço	X [m]	Y [m]	12-Jun CH [m]
MNA-04	387569.1	9031484	71.22	72.35	70.25	PCJD-01	350628	8998467	96.999
MNA-05	388521.5	9028937	73.09	73.86	69.83	PCJD-02	350310	8998742	87.569
MNA-06	386365.2	9024979	70.18	71.78	70.22	PCJD-07	347355	8994395	71.17
MNA-07	383238	9024482	71.26			PCJD-08	347292	8994523	76.69
MNA-08	378360.6	9026886	75.73	76.58	75.61	PCJD-09	347130	8994623	76.85
MNA-10	368732.7	9005271	76.78	76.53	75.75	PCJD-10	346894	8994761	75.09
MNA-11	354151.7	9001318	76.85	76.91	76	PCJD-11	346823	8994873	78.48
MNA-12	344561.6	8997342	82.27	82.66	81.73	PCJD-12	340070	9001720	86.41
MNA-14	344523	8990297		75.76	73.75	PCJD-13	340579	9001160	85.84
MNA-15	342754.5	8986719			71.3	PCJD-14	340534	9001164	85.84
MNA-16	334151	8993525		82.18	79.92	PCJD-15	341962	8999740	85.4
MNA-17	395264.2	9022188	99	99.2	93.57	PCJD-16	338437	8996455	83.8
MNA-18	387566.3	9016546		77.81	77.59	PCJD-17	338332	8996354	85.09
MNA-18A	387566.3	9016546	77.02	77.96	77.8	PCJD-18	342354	8991643	75.2
MNA-19	385262.9	9017425	66.05			PCJD-19	342822	8991953	76.64
MNA-20	384124.2	9018560	75.5	75.5	73.6	PCJD-20	342687	8991930	75.96
MNA-21	386398.9	9010533	84			PCJD-21	342613	8992097	76.77
MNA-23	378238.6	9003884	74.66	74	73.03	PCJD-22	342582	8992321	77.96
MNA-24	372830.4	9003204	83.23			PCJD-23	342526	8992234	76.89
MNA-25	364256.6	8995153	79.76	79.91	78.76	PCJD-25	337938	8996805	85.07
MNA-27	357535	8991018	79.97	80.38	78.79	PCJD-26	341212	8987463	76.42
MNA-28	352711.4	8978245	82.65	83.58	83.07	PCJD-27	339939	8988276	76.51
MNA-29	344555	8976381	87.14	84.58	83.41	PCJD-28	334058	8993395	76.85
MNA-30	345263	8976965	91.14	87.73	87.11	PCJD-29	333887	8993914	81.37
MNA-31	345549.2	8968895	68.81	67.42	66.65	PCJD-30	333595	8994163	81.86
MNA-32	350710.8	8960750	83.7		72	PCJD-31	331571	8995993	78.63
MNA-32A	350764	8960695	74.85		72	PCJD-32	331677	8995764	77.46
MNA-33	343416.5	8960963	66			PCJD-33	347307	9008131	87
MNA-34	341287	8982448	74		72	PCJD-34	347389	9008043	86.86
MNA - 35	335003.2	8981469		80.48	79.54	PCJD-35	348196	9007136	83.61
MNA - 36	333560.3	8978474		92.1	89.05	PCJD-36	349119	9006201	84.1
MNA - 37	324377.9	8979913		76.92	76.36	PCJD-37	349162	9006287	84.74
MNA-38	324009.1	8985903	71	72		PCJD-38	350522	9004930	78.91
MNA-38A	323997.8	8985865	71	71		PCJD-39	350525	9004899	78.61
MNA-39	320441.8	8978395	70.18			PCJD-40	350492	9004853	79.7
MNA-40	322826.1	8981016	78.9	79.2	78.4	PCJD-41	353846	9001527	77.55
MNA - 42	392696.3	9029591		83.62		PCJD-43	352547	9003009	82.81
MNA-43	393922.3	9028662	96.19	97.36	94.25	PCJD-44	354851	9007717	87.75
MNA-46	394534.2	9022697	94.72	95.98	93.83	PCJD-47	352716	9009843	85.7
MNA - 47	392988.8	9029783		91.84		PCJD-48	352662	9009884	86.24
MNA-48	394383.2	9028578	92.07	91.92	89.94	PCJD-49	352574	9009819	85.25
	sem medida					PCJD-50	356851	9011751	90.32
						PCJD-56	369165	9006971	84.34



A comparação dos resíduos das cargas medidas em campo (TABELA 6.4.1) com as obtidas no modelo calibrado apresentou um erro médio normalizado igual a 9,8% (mar/2011), 9,7% (mar/2012) e 10,1% (jun/2012), próximo ao valor considerado razoável para um modelo calibrado (10%). Os gráficos das diferenças entre as cargas medidas observadas e calculadas são apresentados nas FIGURAS 6.4.1a, 6.4.1b e 6.4.1c.

FIGURA 6.4.1a
GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS CALCULADAS E OBSERVADAS (MAR/2011)



O modelo calibrado apresentou um balanço de equilíbrio hídrico (entradas menos saídas) com discrepância igual a 0,21% de erro final (mar/2011), indicando que as equações parciais de fluxo tiveram resolução numérica consistente (ANDERSON & WOESSNER, 1994). Para o dia 01 do modelo transiente (campanha de mar/2012), a discrepância ficou em 0,63%, enquanto que para o dia 90 (campanha de jun/2012), a discrepância ficou em 0,07%, indicando boa solução numérica para ambas as campanhas.



FIGURA 6.4.1b
GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS CALCULADAS E OBSERVADAS (MAR/2012)

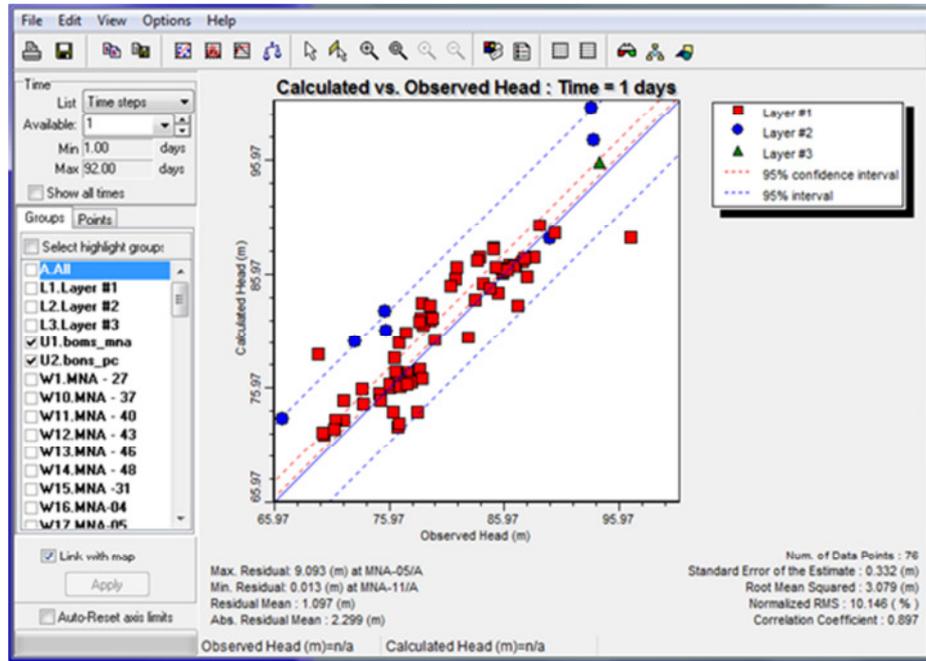
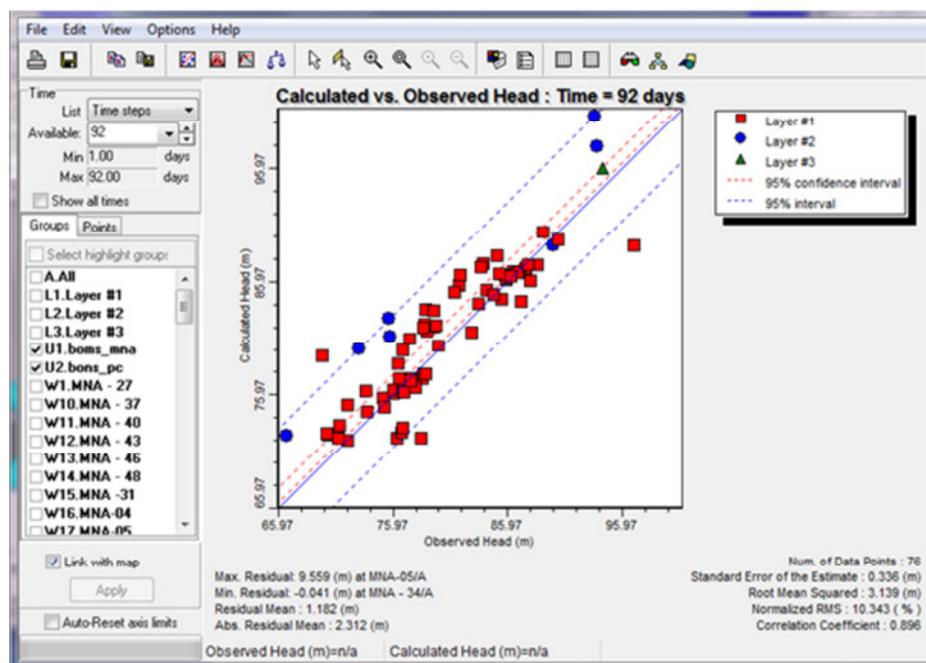


FIGURA 6.4.1c
GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS CALCULADAS E OBSERVADAS (JUN/2012)





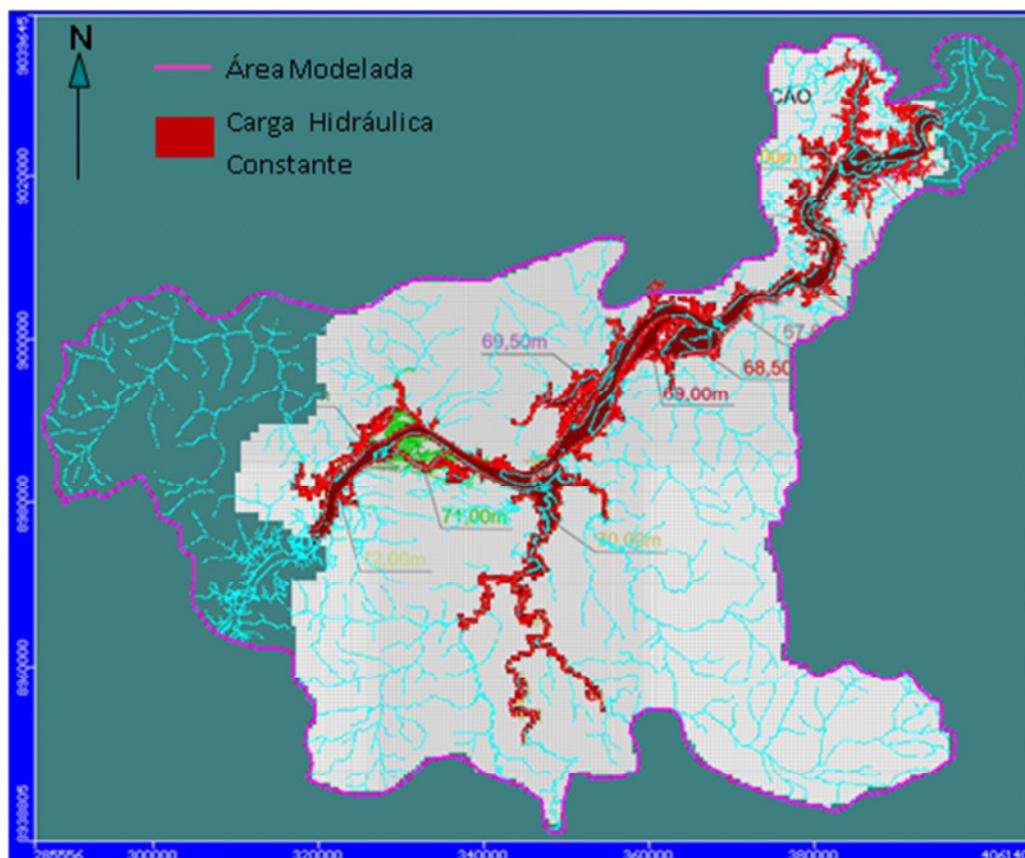
7.0 RESULTADOS

Uma vez calibrado, verificaram-se os seguintes resultados no modelo de fluxo.

7.1 SIMULAÇÃO REMANSO DO RIO

Após calibração, inseriu-se o remanso do rio como condição de contorno tipo carga hidráulica constante, preenchendo-se a Área do Remanso Fase Rio (natural) com as cotas variáveis entre 72,0 m (UHE Jirau) e 59,0 m (UHE Santo Antônio), conforme ilustrado pela **FIGURA 7.1.1**, para simular uma situação de cheia anual (vazão = 38.550 m³/s) no mapa potenciométrico calibrado em período de chuva (mar/2011).

FIGURA 7.1.1
ÁREA DO REMANSO DO RIO SIMULADA COMO CARGA HIDRÁULICA
CONSTANTE



Legenda:

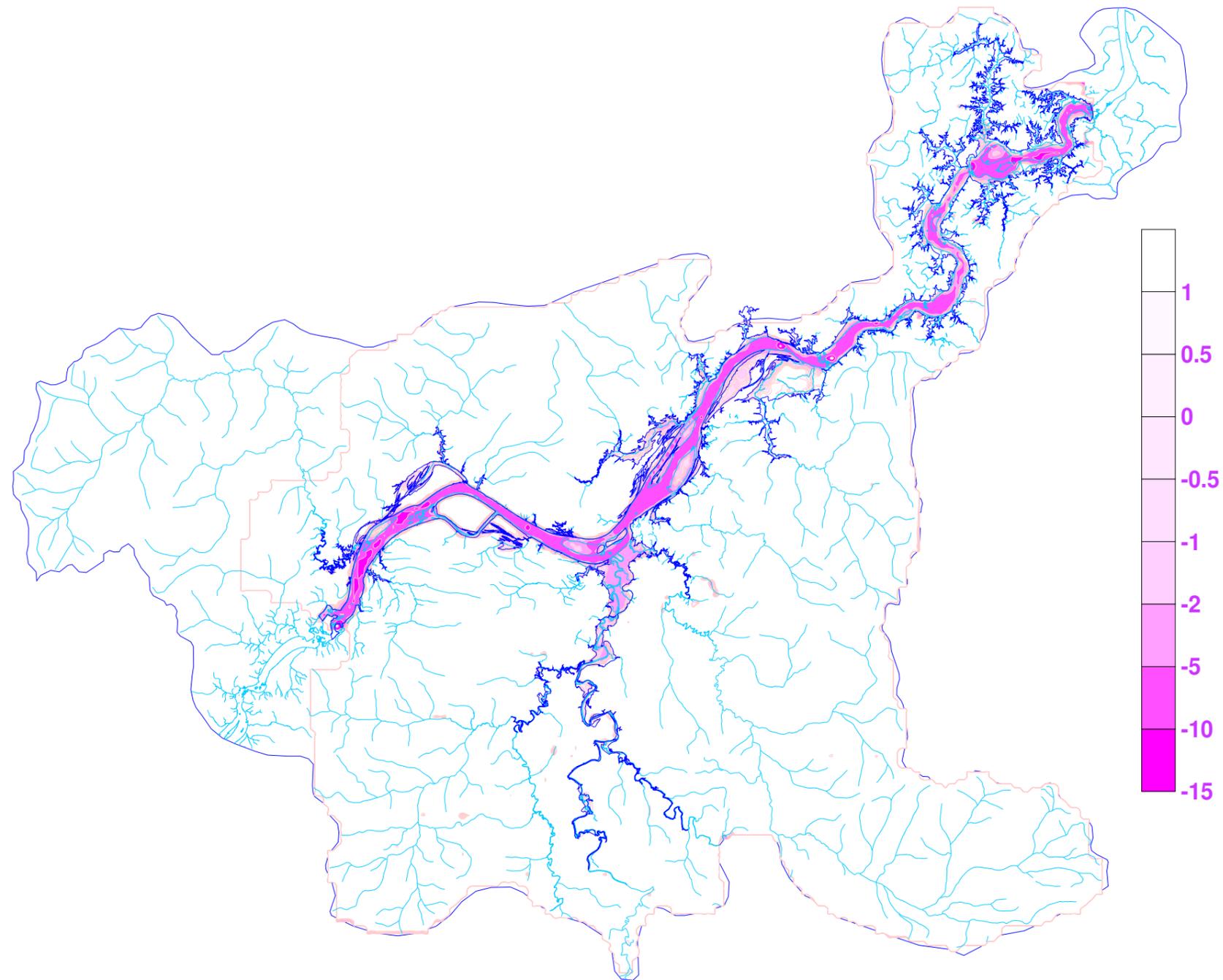
69,00 m: Cotas variáveis do remanso na Fase Rio.



A FIGURA 7.1.2 apresenta as áreas afetadas com o remanso do rio, indicando que as maiores amplitudes de variação do nível d'água encontram-se restritas à calha do Rio Madeira, incluindo a região de confluência com o Rio Jaci-Paraná, como principal tributário. Observa-se grosso modo que as áreas afetadas com o remanso do rio ocorrem bem próximas ao reservatório, ao longo de algumas drenagens secundárias.



FIGURA 7.1.2
DIFERENÇA ENTRE A TOPOGRAFIA E AS CARGAS HIDRÁULICAS PÓS-SIMULAÇÃO DO REMANSO DO RIO (MAR/2011)



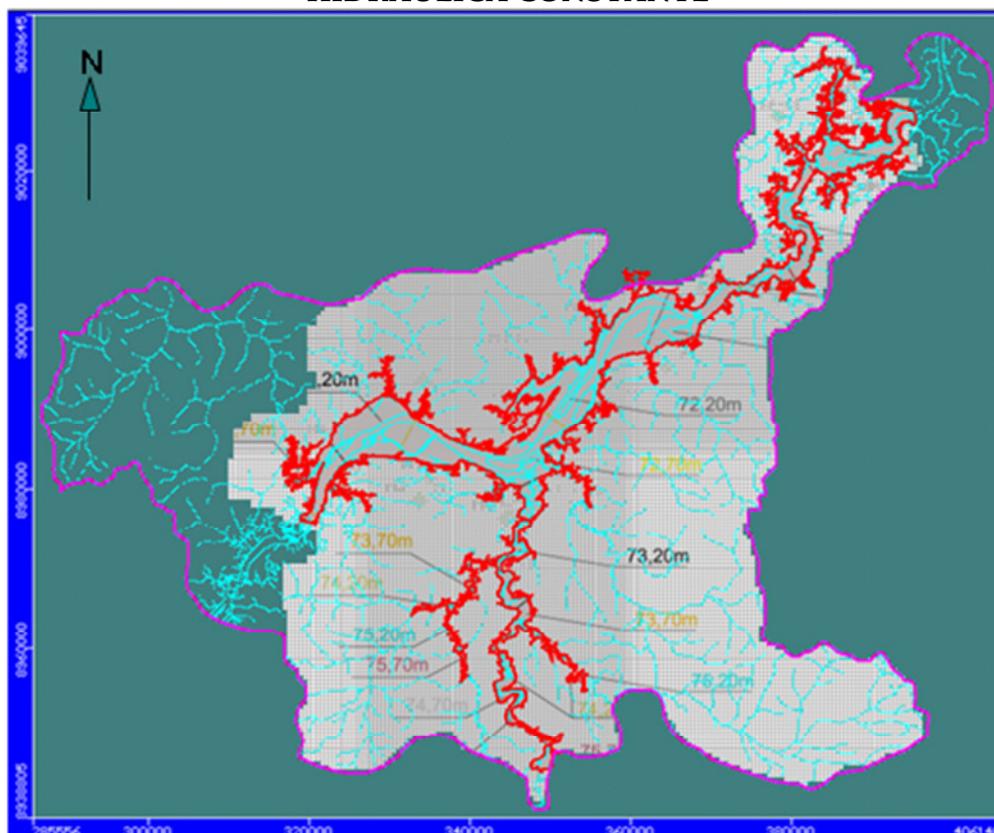


7.2 SIMULAÇÃO REMANSO DO RESERVATÓRIO

Após obter o modelo calibrado, o remanso do reservatório foi inserido como condição de contorno do tipo carga hidráulica constante preenchendo-se a Área de Inundação do Reservatório com Remanso com cotas variáveis entre 74,2 m (UHE Jirau) e 70,2 m (UHE Santo Antônio) e entre 72,7 m (foz do Rio Jaci-Paraná) e 75,7 m (montante do Rio Jaci-Paraná), conforme ilustrado pela **FIGURA 7.2.1**, para simular uma situação de cheia anual (vazão = 38.550 m³/s) no mapa potenciométrico calibrado em período de chuva pós-enchimento do reservatório (mar/2012).

A **FIGURA 7.2.2** ilustra respectivamente, o comparativo entre mapas potenciométricos (remanso do rio e remanso do reservatório) e as áreas afetadas com o remanso do reservatório. Observa-se grosso modo que as principais alterações ocorrem nas áreas mais próximas ao reservatório (calha do Rio Madeira).

FIGURA 7.2.1
ÁREA DO REMANSO DO RESERVATÓRIO SIMULADA COMO CARGA
HIDRÁULICA CONSTANTE

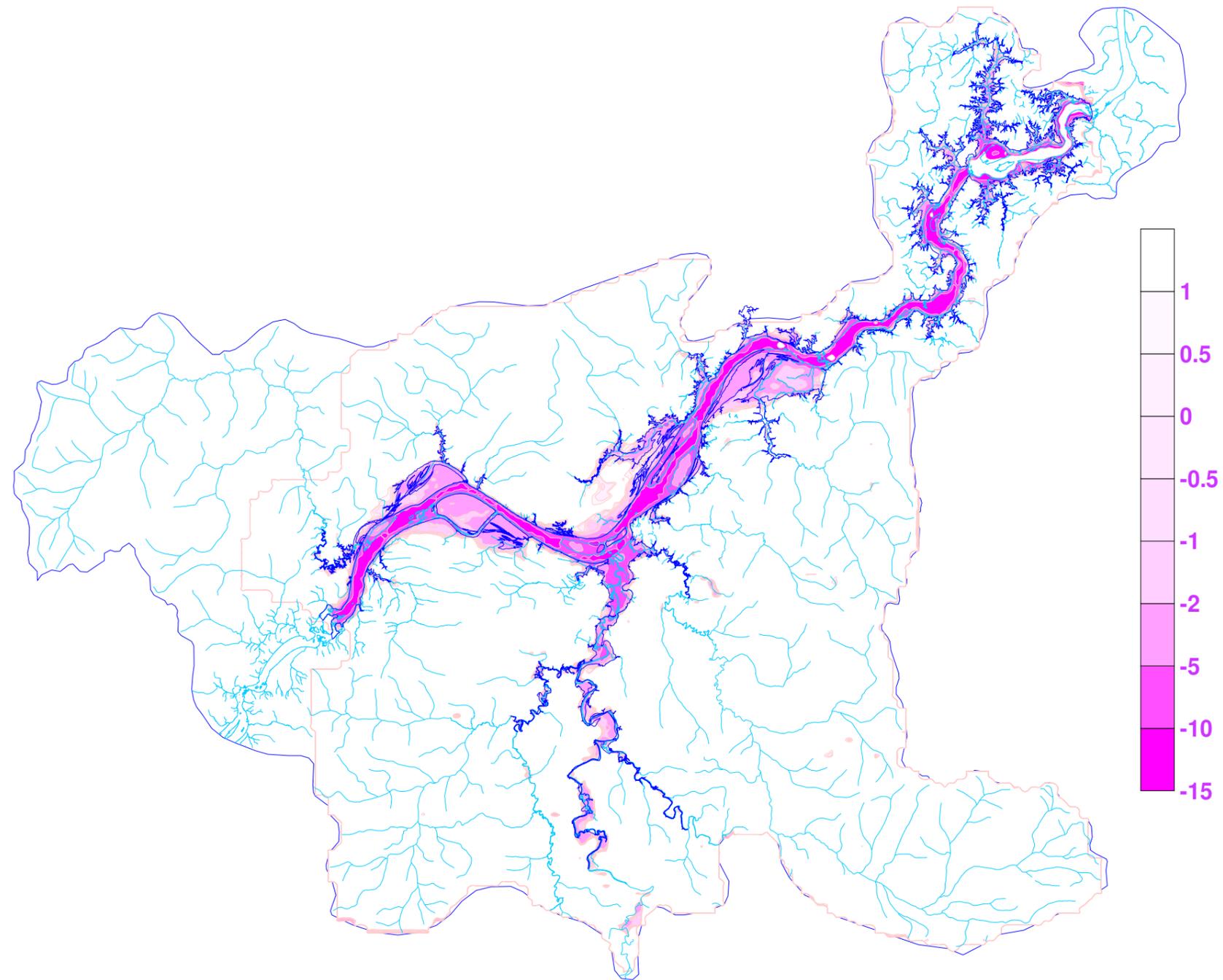


Legenda:

72,00 m: Cotas variáveis do remanso na Fase Reservatório.



FIGURA 7.2.2
DIFERENÇA ENTRE A TOPOGRAFIA E AS CARGAS HIDRÁULICAS PÓS-SIMULAÇÃO DO REMANSO DO RESERVATÓRIO (MAR/2012)

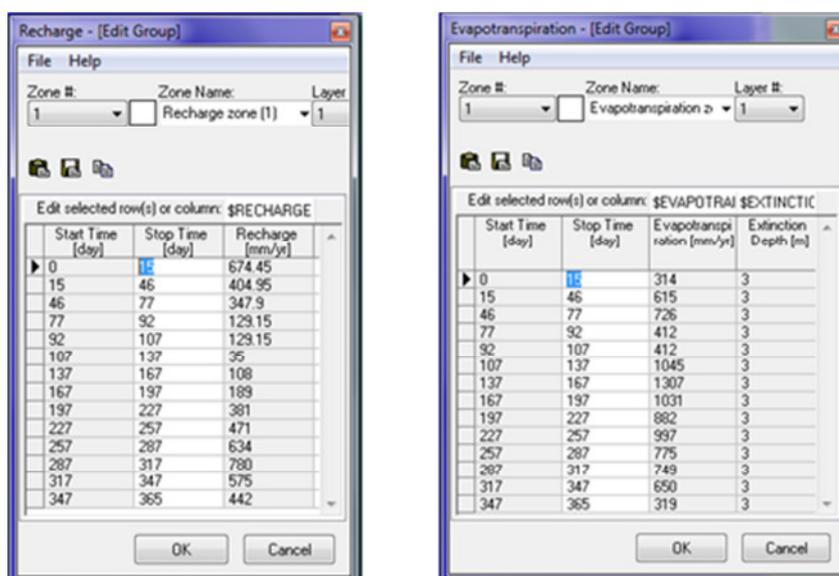




7.3 SIMULAÇÃO TRANSIENTE

Após obter o modelo transiente calibrado, de mar/2012 a jun/2012, dados de recarga e evapotranspiração foram inseridos ao longo do tempo para simulações do comportamento do aquífero, baseando-se nos valores históricos mensais destes parâmetros (FIGURA 7.3.1). Os drenos foram simulados com a mesma cota de base e o reservatório com as mesmas cargas hidráulicas medidas e calculadas em jun/2012.

FIGURA 7.3.1
DADOS FUTUROS DE RECARGA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

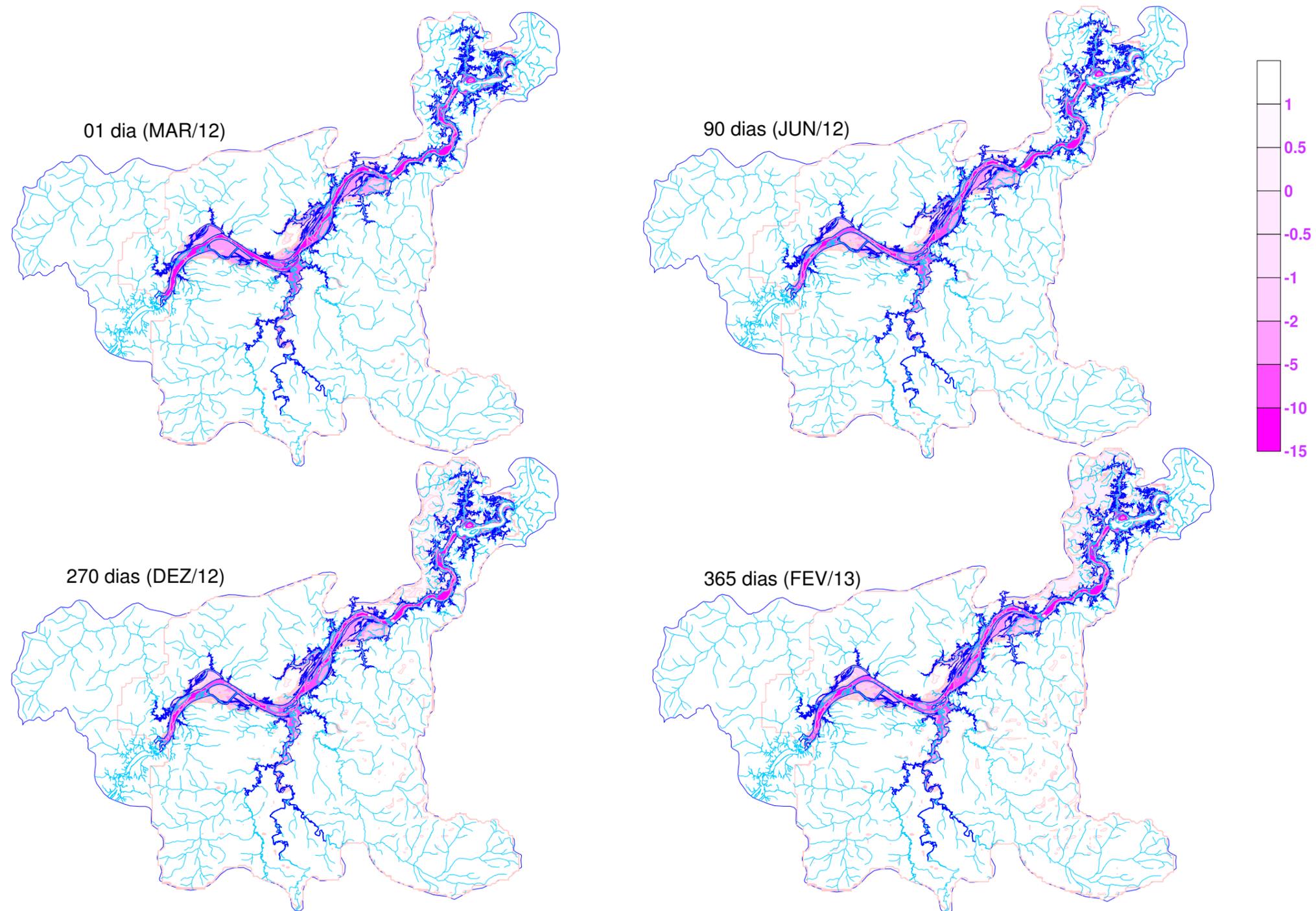


O sentido e velocidade de fluxo subterrâneo foram definidos com base na superfície potenciométrica gerada pela modelagem matemática hidrogeológica através do aplicativo MODFLOW. A geração da superfície potenciométrica considera a litologia, características do aquífero e taxas de recarga (infiltração) e descarga, dados não considerados durante a execução de um mapa potenciométrico sem o auxílio do aplicativo.

A FIGURA 7.3.2 apresenta a diferença entre a topografia e as cargas hidráulicas obtidas com o enchimento (mar/2012) e após um período de 30 dias (abr/2012), 90 dias (jun/2012), 270 dias (dez/2012) e 365 dias (fev/2013). Observa-se nesta figura que as áreas potencialmente afetadas pelo enchimento ao longo do tempo encontram-se nas proximidades do reservatório (calha do Rio Madeira), expandindo-se lateralmente na margem esquerda, na porção mais próxima ao eixo da barragem, após um período de 270 dias. Este prognóstico deve, em tese, ser re-validado através da inclusão de dados obtidos das campanhas remanescentes de monitoramento hidrogeológico, uma vez que o resultado obtido é decorrente de dados históricos que podem não se reproduzir no futuro.



FIGURA 7.3.2
DIFERENÇA ENTRE A TOPOGRAFIA E CARGAS HIDRÁULICAS PÓS-SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO (70,2 M) AO LONGO DO TEMPO





8.0 CONCLUSÕES

O modelo matemático de fluxo desenvolvido para a área de influência do reservatório do Aproveitamento Hidroelétrico de Santo Antônio mostrou uma calibração consistente com as medidas de carga hidráulica obtidas em campo, indicando que o mesmo é capaz de prever satisfatoriamente o comportamento futuro do aquífero. Os resultados previstos em termos de elevação do nível de água subterrâneo são consistentes com as observações de campo feitas na área de influencia do reservatório.

Como ocorre em qualquer modelamento matemático de aquíferos, os resultados obtidos constituem uma aproximação da realidade, baseada em premissas e dados que requerem uma série de interpolações e aproximações. Portanto, os resultados obtidos no modelamento deverão ser sempre confirmados através do plano de monitoramento atualmente em andamento, de forma a possibilitar futuras recalibrações e/ou refinamentos, assegurando sempre cenários futuros consistentes com as observações de campo.



9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. (2002) Previsão e análise da elevação do lençol freático no processo de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) de reservatórios hidrelétricos. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W, (1992) Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. San Diego, California, Academic Press Inc. 381p.

CAMPOS, J. C. V. & MORAIS, P. R. C. (1999) Morfologia dos Aquíferos da área urbana de Porto Velho (RO). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13, Belo Horizonte, (CD-ROM).

CAVALCANTI, M. A. M. P. (2002) A Modelagem Matemática associada ao Sistema de Informação Geográfica como instrumento de previsão no estudo de impacto hidrogeológico de reservatórios. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CPRM (2005) Base cartográfica em formato SIG - Geologia, recursos minerais, geomorfologia e hidrogeologia. Escala 1:100.000 para Área de Influência Direta (AID) e 1:250.000 para para Área de Influência Indireta (AII) - PROJETO RIO MADEIRA / AHE SANTO ANTÔNIO. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL / FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A. Porto Velho, 2005.

CPRM (2005) Levantamento de Informações para subsidiar o Estudo de Viabilidade do Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) do Rio Madeira - PROJETO RIO MADEIRA / AHE SANTO ANTÔNIO. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL / FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A. Porto Velho, 2005.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (1999) Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo. São Paulo, CD-ROM.

FETTER, C.W. (1994) Applied Hydrogeology. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall, 4a Edição. 598p.



McDONALD, M. G. & HARBAUGH, A. W. (1988) A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Techniques of Water-Resources Investigations of US Geological Survey. USGS 06-A1, Washington, EUA. 576p.

RIBEIRO NETO, A. (2006) Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira. Tese de Doutorado, Unversidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE – UFRJ), Rio de Janeiro.

PCE (2009) UHE SANTO ANTÔNIO – Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrosedimentológico do Rio Madeira e do futuro reservatório da UHE Santo Antônio. Levantamento Topobatimétrico do Rio Madeira e Análise Granulométrica do Leito – Trecho UHE Jirau a Humaitá – Relatório Final R4 – PJ0967-X-H41-GR-ED-103-1A.

SAESA-CSAC (2009) UHE SANTO ANTONIO – Relatório de Sondagens Complementares. Documento S-RT-CC-GEG00-C30-0001, CONSÓRCIO SANTO ANTONIO CIVIL.

ZHENG, C. & WANG, P. P. (1999) MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and User's Guide Contract Report SERDP-99-1. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 1999.