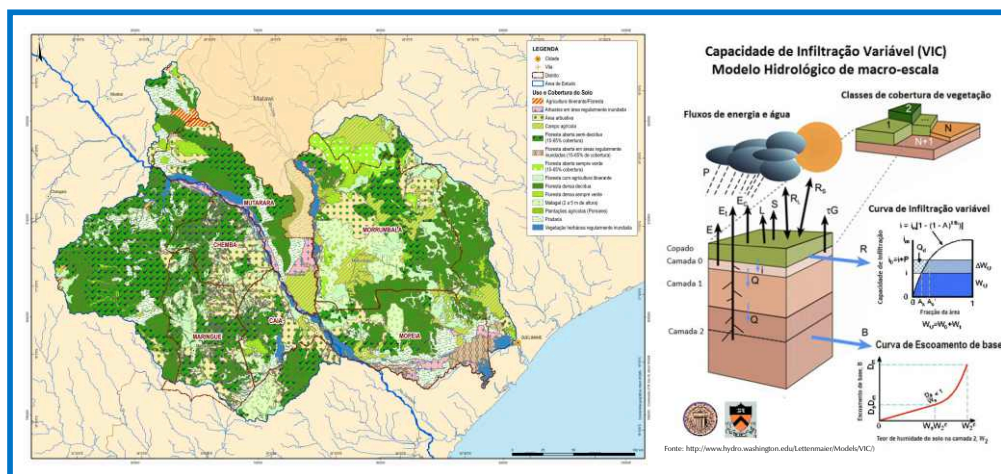




MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL
DIRECÇÃO NACIONAL DE PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO RURAL

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)



RELATÓRIO FINAL

VOLUME IV - CALIBRAÇÃO E EXPLORAÇÃO DO MODELO

MAIO 2013



**CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E
ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)**

RELATÓRIO FINAL

VOLUME IV – CALIBRAÇÃO E EXPLORAÇÃO DO MODELO VIC

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

ÍNDICE DE VOLUMES

Volume I – Descrição Geral do Projecto

Volume II – Dados de Entrada do Modelo. Recolha e Tratamento

Volume III – Manual de Utilizador do Modelo VIC e do ZambezeDIF

Volume IV – Calibração e Exploração do Modelo

Volume V - Programa de Treino

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

VOLUME IV – CALIBRAÇÃO E EXPLORAÇÃO DO MODELO

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1-1
2 ESQUEMATIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA APLICAR O MODELO VIC.....	2-1
3 DADOS DE ENTRADA.....	3-1
3.1 MODELO VIC.....	3-1
3.2 MODELO ROUT.....	3-7
4 CALIBRAÇÃO DO MODELO VIC.....	4-1
4.1 INTRODUÇÃO.....	4-1
4.2 METODOLOGIA.....	4-1
4.2.1 Fundamentação da calibração do modelo VIC.....	4-1
4.2.2 Parâmetros de calibração.....	4-2
4.2.3 Avaliação da calibração.....	4-3
4.2.4 Estações hidrométricas utilizadas na calibração.....	4-3
4.3 RESULTADOS.....	4-9
4.4 CONCLUSÕES.....	4-14
5 EXPLORAÇÃO DO MODELO VIC.....	5-1
5.1 INTRODUÇÃO.....	5-1
5.2 ANÁLISE DO REGIME HIDROLÓGICO PARA A SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	5-1
5.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COBERTO VEGETAL NO REGIME HIDROLÓGICO.....	5-8
5.4 RESPOSTA HIDROLÓGICA AOS CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DA TERRA.....	5-11
5.5 CONCLUSÕES.....	5-15
6 BIBLIOGRAFIA.....	6-1

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Descrição dos parâmetros do solo	3-2
Quadro 3.2 - Descrição dos parâmetros da vegetação usados neste estudo	3-6
Quadro 4.1 – Valores de referência do critérios de Nash e Sutcliffe	4-3
Quadro 4.2 – Parâmetros do modelo calibrados	4-10
Quadro 4.3 – Valores dos critérios de avaliação da calibração	4-10
Quadro 5.1 – Precipitação anual nas células 60, 63,73, 407, 114 e148	5-1
Quadro 5.2 – Uso e coberto da terra das células 60, 63,73, 407, 114 e148	5-2
Quadro 5.3 – Representatividade das classes de uso e cobertura em % dos cenários	5-12
Quadro 5.4 – Caudal médio, máximo e mínimo simulados para diferentes cenários de uso e cobertura da terra	5-14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da rede hidrográfica da área de estudo	2-1
Figura 2.2 – Grelha de células aplicada à área de estudo	2-2
Figura 2.3 – Numeração das células da grelha da área de estudo no modelo VIC	2-3
Figura 3.1 – Densidade aparente do solo das camadas 0, 1 e 2	3-3
Figura 3.2 – Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento	3-4
Figura 3.3 – Condutividade hidráulica do solo e porosidade de cada uma das camadas	3-5
Figura 3.4 - Mapa do uso e cobertura da terra da área de estudo	3-6
Figura 3.5 – Direcção do escoamento ("Flow Direction File")	3-8
Figura 3.6 – Dimensão das células (ficheiro Xmask)	3-8
Figura 3.7 – Fracção da área das células dentro da área de estudo ("Fraction File")	3-9
Figura 3.8 – Hidrograma unitário adoptado	3-9
Figura 4.1 – Bacia hidrográfica da estação E101- Derre	4-4
Figura 4.2 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre	4-4
Figura 4.3 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre	4-5
Figura 4.4 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E101-Derre	4-5
Figura 4.5 – Bacia hidrográfica da estação E480- EN1	4-6
Figura 4.6 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1	4-6
Figura 4.7 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1	4-7
Figura 4.8 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E480 - EN1	4-7

Figura 4.9 – Bacia hidrográfica da estação E291- Caia	4-8
Figura 4.10 – Ficheiro fracção (“Fraction File”) da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia	4-8
Figura 4.11 - Ficheiro direcção de escoamento (“Direction File”) da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia	4-9
Figura 4.12 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal na estação E291 - Caia	4-9
Figura 4.13 – Hidrogramas observados e simulados nas estações E101 – Derre, E480 – EN1 e E291 - Caia	4-11
Figura 4.14 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Lualua	4-12
Figura 4.15 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Zambeze	4-12
Figura 4.16 – Caudais médios mensais observados e simulados (2006 a 2012) nas estações E101 – Derre, E480 – EN1 e E291 - Caia	4-13
Figura 5.1 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 60 (Distrito de Caia)	5-3
Figura 5.2 – Série mensal simulada da água no solo na célula 60 (Distrito de Caia)	5-3
Figura 5.3 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 63 (Distrito de Maringue)	5-3
Figura 5.4 – Série mensal simulada da água no solo na célula 63 (Distrito de Maringue)	5-4
Figura 5.5 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 73 (Distrito de Mopeia)	5-4
Figura 5.6 – Série mensal simulada da água no solo na célula 73 (Distrito de Mopeia)	5-4
Figura 5.7 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 107 (Distrito de Morrumbala)	5-5
Figura 5.8 – Série mensal simulada da água no solo na célula 107 (Distrito de Morrumbala)	5-5
Figura 5.9 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 114 (Distrito de Chemba)	5-5
Figura 5.10 – Série mensal simulada da água no solo na célula 114 (Distrito de Chemba)	5-6
Figura 5.11 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 148 (Distrito de Mutarara)	5-6
Figura 5.12 – Série mensal simulada da água no solo na célula 148 (Distrito de Mutara)	5-6
Figura 5.13 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2007	5-7
Figura 5.14 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2010	5-8
Figura 5.15 - Séries temporais de evapotranspiração simuladas na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação	5-9
Figura 5.16 - Séries temporais de evapotranspiração simuladas na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação	5-9
Figura 5.17 - Séries temporais de água no solo simuladas na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação	5-10
Figura 5.18 - Séries temporais de água no solo simuladas na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação	5-10
Figura 5.19 - Séries temporais de escoamento superficial simuladas na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação	5-11
Figura 5.20 - Séries temporais de escoamento superficial simuladas na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação	5-11
Figura 5.21 - Bacias hidrográficas das células 96, 60, 59 e 53	5-13
Figura 5.22 – Evapotranspiração simulada para o cenário base, cenário 01, cenário 02 e cenário 03	5-14
Figura 5.23 – Escoamento simulado para o cenário base, cenário 01, cenário 02 e cenário 03	5-15

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

VOLUME IV – CALIBRAÇÃO E EXPLORAÇÃO DO MODELO

1 INTRODUÇÃO

Em cumprimento do estipulado no contrato para a prestação de serviços relativos ao Estudo de Calibração do Modelo Hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e Elaboração da Base de Dados DIF (Dynamic Information Framework), assinado entre a Direcção Nacional de Promoção do Desenvolvimento Rural (DNPDR) e o Consórcio formado pelas empresas Coba e Salomon, apresenta-se o Relatório Final na sua versão draft.

De acordo com o preconizado nos Termos de Referência, o Relatório Final é composto pelos seguintes volumes:

- Volume I – Descrição Geral do Projecto
- Volume II – Dados do Modelo. Recolha e Tratamento
- Volume III – Manual de utilizador do Modelo VIC e do ZambezeDIF
- Volume IV – Calibração e exploração do modelo
- Volume V - Programa de treino

Este Volume IV apresenta o trabalho desenvolvido tendo em vista a calibração e verificação dos resultados do modelo VIC para a área de estudo e a exploração do modelo. A exploração do modelo numa fase inicial teve como objectivo principal a análise do regime hidrológico no Baixo Zambeze, tendo como base o uso e cobertura da terra actual. Na fase seguinte, a exploração do modelo foi dirigida para a avaliação dos impactos no regime hidrológico de diferentes cenários de uso de terra e da cobertura vegetal, que poderão resultar do desenvolvimento das actividades do projecto e de outros planos governamentais em carteira para região do Vale do Zambeze.

O presente Volume é constituído por 6 Capítulos. No Capítulo 2 é apresenta-se a esquematização da área de estudo e a grelha de células que permite descrever a área de estudo nos modelos VIC e ROUT. No Capítulo 3 são apresentados os dados de entrada dos modelos.

O processo de calibração e verificação dos resultados dos modelos é exposto no Capítulo 4. Neste Capítulo são apresentados os pressupostos metodológicos de calibração do modelo VIC, os parâmetros normalmente calibrados assim como os critérios de avaliação dos resultados da simulação e as estações hidrométricas seleccionadas para a calibração do modelo. Por fim são apresentados e analisados os resultados da calibração do modelo VIC para área de estudo.

A exploração do modelo VIC é apresentada no Capítulo 5. Numa primeira fase procedeu-se à análise dos resultados para a situação de referência, isto é para o uso e coberto actual do solo. O modelo foi ainda explorado no sentido de examinar o

papel da floresta densa decídua, da agricultura, das áreas arbustivas e do matagal no regime hidrológico do Baixo Zambeze. Finalmente foram identificados dois cenários de uso e coberto vegetal onde uma fracção da área florestal é convertida em agricultura, áreas arbustivas e em matagal. Foi ainda identificado um terceiro cenário que procura representar a ocupação vegetal de há 10 anos atrás do Baixo Zambeze, onde a floresta densa decídua era classe predominante. O regime hidrológico correspondente a estes três cenários foi comparado com o regime hidrológico correspondente ao uso e coberto actual da terra.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as referências bibliográficas citadas ao longo deste volume.

2 ESQUEMATIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA APLICAR O MODELO VIC

O Modelo VIC (Liang *et al.*, 1994, 1996) será aplicado à totalidade da área de estudo, considerando a área da bacia hidrográfica do Zambeze entre Lupata (condição de fronteira a montante) e a confluência do rio Zangué, junto à vila de Caia. No Rio Chire, a área de estudo inicia-se na secção de Chilomo na fronteira com Malawi. Inclui igualmente o rio Cuácua que drena a maior parte dos distritos de Morrumbala e Mopeia, e constitui o braço Norte do Delta do Zambeze.

A área de estudo foi estabelecida a partir da área dos distritos em estudo: Chemba, Maringue e Caia na margem direita do Zambeze e Mutarara, Morrumbala e Mopeia na margem esquerda e envolvendo a totalidade das sub-bacias hidrográficas que drenam os seis distritos. Assim a área dos seis distritos é de 40 549 km² e a área de estudo foi expandida para 61 800 km², para integrar a totalidades das sub-bacias em estudo.

A Figura 2.1 apresenta a esquematização da rede hidrográfica que drena a área de estudo, incluindo as principais sub-bacias hidrográficas referidas e, bem como as estações hidrométricas actualmente operacionais.

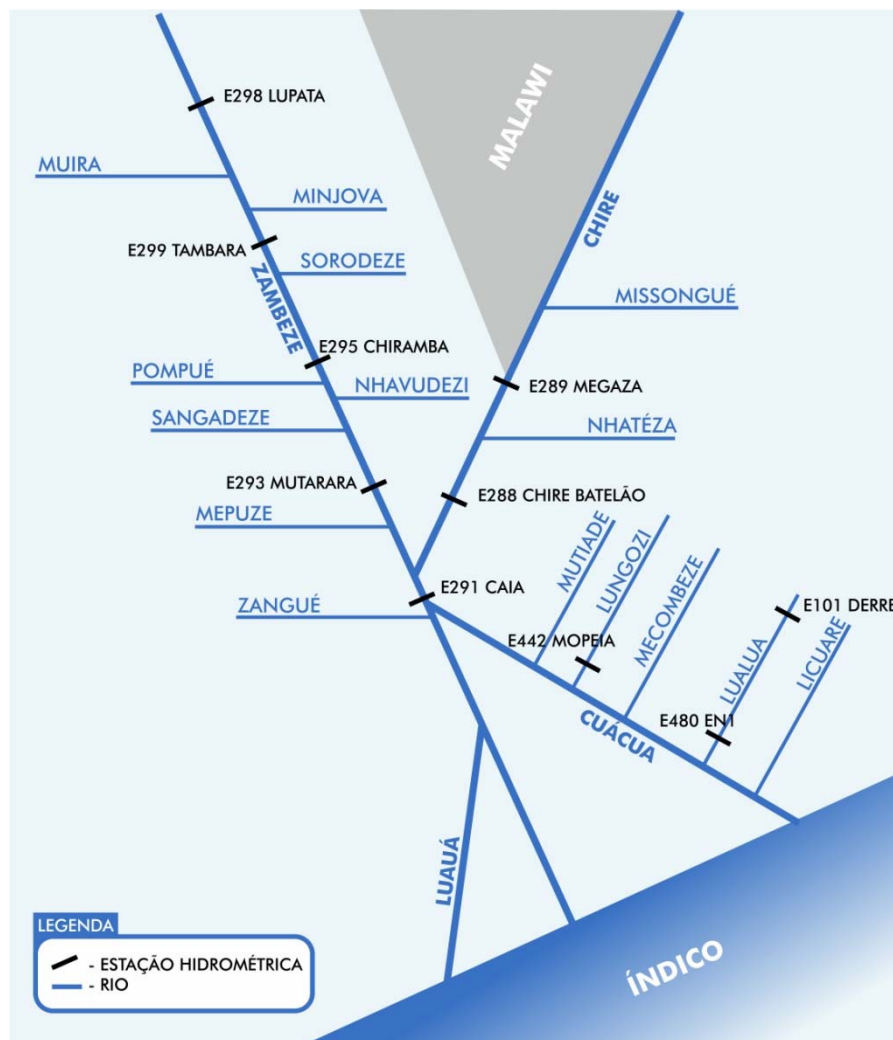


Figura 2.1 – Esquema da rede hidrográfica da área de estudo

Na área de estudo destacam-se três linhas de água principais (Zambeze, Chire e Cuácua), a que se associam as seguintes sub-bacias hidrográficas:

- Rio Zambeze, com as sub-bacias dos rios Muira, Pompué, Sangadeze, Mepuze e Zangué na margem direita e as sub-bacias de Minjova, Sorodeze, Nhavudezi e Chire na margem esquerda;
- Rio Chire, com várias pequenas sub-bacias, das quais se destacam as sub-bacias de Missongue e Nhatéza;
- Rio Cuácua, que constitui um dos braços do delta do rio Zambeze e que drena as sub-bacias dos rios Mutiade, Lungozi, Mecombeze, Lualua e Licuare, esta última já fora da nossa área de estudo.

Para aplicar o modelo VIC á área de estudo foi definida grelha de célula com dimensão de 0,25° (15' de arco) que se apresenta na Figura 2.2. A dimensão da célula foi escolhida tendo em conta as características dos dados de entrada do modelo VIC, disponibilizados pela agências internacionais e baseados em imagens de satélite e a dimensão da área de estudo.

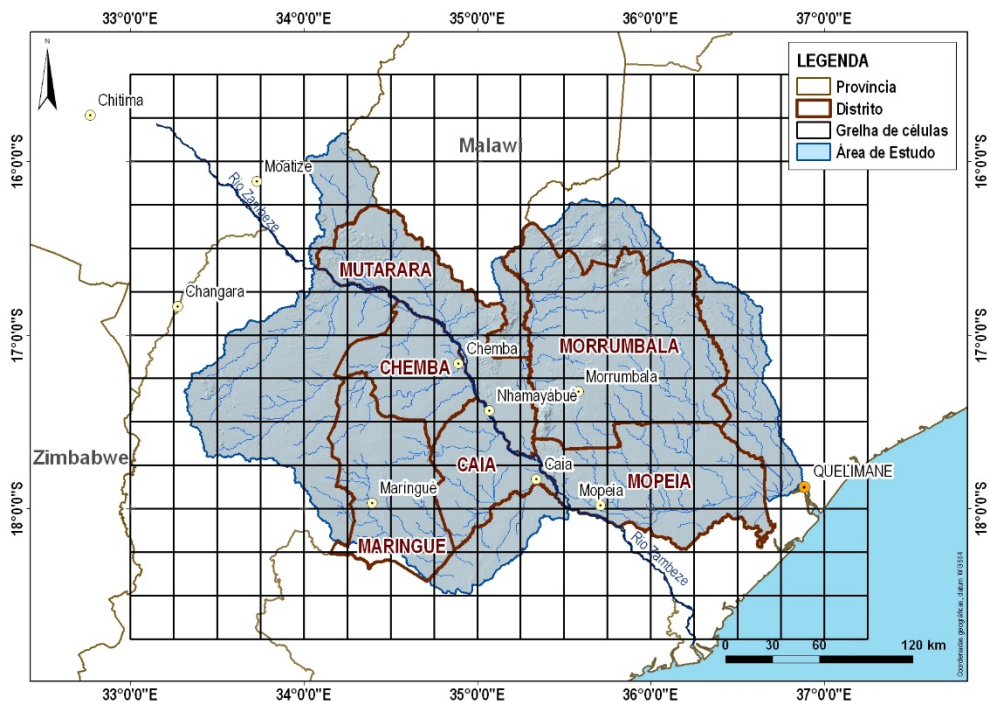


Figura 2.2 – Grelha de células aplicada à área de estudo

As células são identificadas no modelo VIC conforme a numeração apresenta na Figura 2.3.

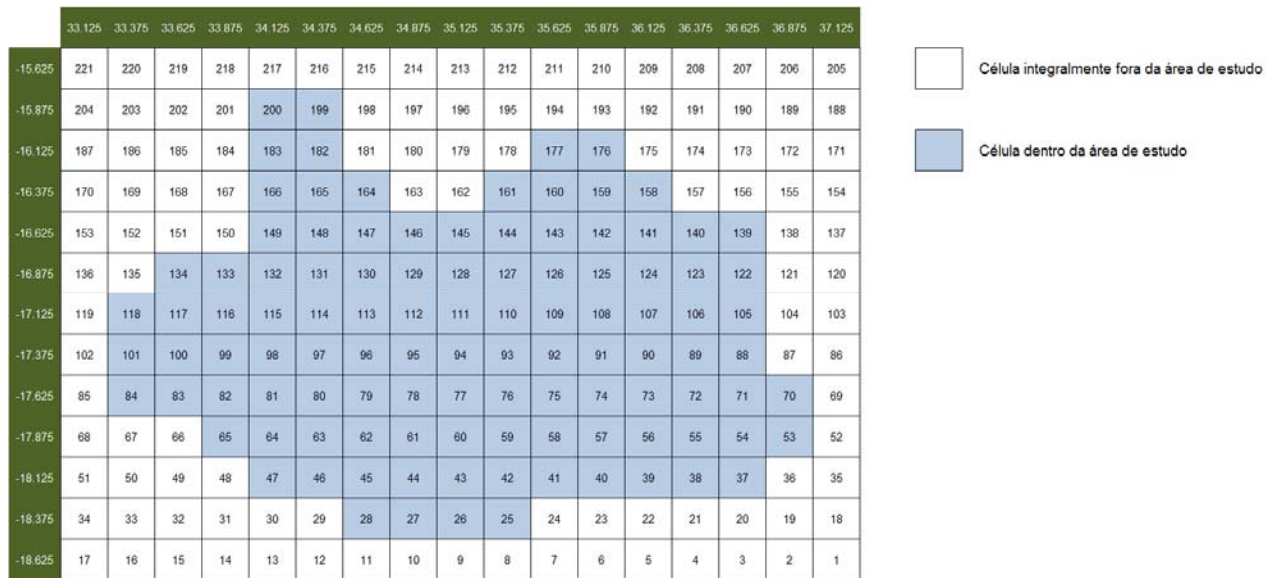


Figura 2.3 – Numeração das células da grelha da área de estudo no modelo VIC

3 DADOS DE ENTRADA

3.1 MODELO VIC

Os dados de entrada do modelo VIC¹ dividem-se em:

- Dados meteorológicos: precipitação; temperatura máxima e mínima do ar e velocidade do vento;
- Dados do solo; e
- Dados do uso e coberto da terra.

A precipitação, a temperatura máxima e mínima do ar e a velocidade média do vento constitui o conjunto mínimo de dados meteorológicos necessários para correr o modelo. São usados dados de precipitação obtidos via sensoramento remoto em alternativa aos dados da rede udométrica terrena, devido às deficiências destes do ponto de vista de cobertura espacial e continuidade das séries existentes. A qualidade dos dados gerados por esta via de observação indirecta tem sido objecto de escrutínio contínuo dos meteorologistas de todo o mundo com o objectivo de melhorar a sua fiabilidade. No presente estudo e como sugerido em Leichti *et al.* (2012) são utilizados os dados tri-horários do Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) com uma resolução espacial de 0,25 graus.

Os dados de precipitação do TRMM são resultado da combinação de três sub-produtos de observação remota um que é o Infravermelho Visível, segundo que é Imagem de Microondas e outro que é Precipitação Radar. A precipitação calibrada final PCP no TRMM resulta da combinação dos valores calibrados dos vários instrumentos de observação. Resulta por isso que por vezes o sub-produto High Quality (HQ) Precipitation derivado do microondas tem boa correlação com os dados observados em terra.

A escolha final do produto adoptada neste estudo teve por base verificações preliminares sobre o comportamento dos dados de satélite do HQ e do produto final do TRMM PCP. Numa primeira fase, optou-se por fazerem-se os primeiros estudos com recurso ao HQ onde este existe e preencher as falhas com os dados do PCP para ter séries completas. A continuidade dos trabalhos de verificação da qualidade dos dados acabou por mostrar que o produto final TRMM PCP é o mais fiável entre os diversos sub-produtos do TRMM.

Tal como acontece com a rede udométrica, actualmente a grande maioria das estações climatológicas não está operacional, verificando-se ainda um elevado número de falhas que restringem fortemente a sua utilização. Para contornar as deficiências relacionadas com a disponibilidade de dados para o modelo foi adoptada a mesma estratégia seguida para os dados de precipitação. Assim, os dados diários da temperatura máxima e mínima do ar assim como da velocidade média do vento a partir da base de dados ERA Interim do European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMRF), numa resolução de 0,70 graus com uma re-amostragem a 0,25 grau para coincidir com a dimensão da grelha do modelo.

As séries temporais dos dados meteorológicos introduzidos no modelo respeitam o período de 1 de Janeiro de 2001 a 30 de Novembro de 2012.

¹ A formulação teórica do modelo VIC é apresentada em detalhe no Volume 1 – Descrição geral do Projecto

O solo constitui uma das principais componentes do modelo VIC. O modelo possibilita a utilização de diversas camadas de solo, mas normalmente utilizam-se apenas 3. A espessura das camadas pode variar de célula para célula, com excepção da camada superficial que normalmente se adopta como tendo 5 a 10 cm de espessura.

Para os parâmetros-solo, foi necessário identificar os tipos de solos existentes e quantificar as características (Raposo, 2012) que possam ser utilizadas na obtenção directa ou indirecta dos parâmetros de entrada do modelo: densidade aparente (Dap), capacidade de campo (CC), coeficiente de emurchecimento (CE), porosidade e o parâmetro B ($=1/\lambda$ onde λ é o índice de distribuição de poros). Os valores desses parâmetros podem resultar de medições directas no terreno, mas normalmente são deduzidos com base na diferenciação pedogenética, estrutura, composição granulométrica e outras características morfo-físico-químicas de cada uma das unidades-solo. No Quadro 3.1 apresentam-se a média e o intervalo de valores dos parâmetros do solo deduzidos para cada classe textural (Raposo, 2013).

Quadro 3.1 - Descrição dos parâmetros do solo

Classe de textura	Dap (-)	CC (cm ³ cm ⁻³)	CE (cm ³ cm ⁻³)	Porosidade (cm ³ cm ⁻³)	Ks (cm h ⁻¹)	B (-)
Arenoso grosseiro [*]	1,51 (1,45-1,57)	0,06 (0,03-0,1)	0,02 (0,00-0,06)	0,43 (0,41-0,45)	48,99 (20,53-117,45)	3,37 (0,7-6,95)
Arenoso fino ^{**}	1,43 (1,31-1,51)	0,09 (0,08-0,13)	0,05 (0,04-0,07)	0,46 (0,43-0,5)	21,34 (19,39-22,88)	5,86 (5,08-7,26)
Arenoso-franco	1,54 (1,49-1,61)	0,10 (0,07-0,12)	0,05 (0,03-0,07)	0,42 (0,39-0,44)	17,00 (9,33-26,48)	5,86 (4,11-7,68)
Argilo-arenoso	1,52 (1,48-1,56)	0,34 (0,33-0,35)	0,23 (0,23-0,24)	0,43 (0,42-0,43)	1,68 (1,28-2,08)	10,11 (9,95-10,27)
Argilo-limoso	1,29 (1,21-1,36)	0,42 (0,38-0,45)	0,30 (0,25-0,34)	0,51 (0,49-0,54)	0,47 (0,22-0,97)	11,36 (9,05-13,63)
Argiloso ^{***}	1,30 (1,11-1,46)	0,45 (0,39-0,51)	0,34 (0,27-0,42)	0,51 (0,45-0,58)	0,35 (0,11-0,61)	13,65 (10,31-19,6)
Argiloso ^{****}	1,45 (1,38-1,52)	0,40 (0,35-0,44)	0,28 (0,24-0,32)	0,45 (0,43-0,48)	1,19 (0,35-2,69)	11,06 (10,19-11,9)
Argiloso ^{*****}	1,38 (1,18-1,49)	0,41 (0,37-0,45)	0,29 (0,26-0,35)	0,48 (0,44-0,56)	0,78 (0,46-2,37)	11,40 (9,95-16,52)
Franco	1,52 (1,46-1,58)	0,24 (0,22-0,24)	0,14 (0,13-0,15)	0,42 (0,4-0,45)	4,59 (3,22-6,49)	7,02 (6,56-7,55)
Franco-arenoso	1,54 (1,4-1,62)	0,17 (0,12-0,24)	0,10 (0,05-0,15)	0,42 (0,39-0,47)	10,35 (4,2-20,83)	7,09 (4,07-8,49)
Franco-argilo-arenoso	1,56 (1,46-1,62)	0,26 (0,21-0,32)	0,17 (0,13-0,22)	0,41 (0,39-0,45)	1,52 (0,5-3,02)	8,81 (7,61-10,27)
Franco-argilo-limoso	1,36 (1,34-1,38)	0,36 (0,36-0,37)	0,23 (0,22-0,24)	0,49 (0,48-0,49)	1,66 (1,22-2,28)	8,45 (8,1-9,0)

Classe de textura	Dap (-)	CC (cm ³ cm ⁻³)	CE (cm ³ cm ⁻³)	Porosidade (cm ³ cm ⁻³)	Ks (cm h ⁻¹)	B (-)
Franco-argiloso	1,47	0,34	0,23	0,44	1,61	9,34
	(1,42-1,51)	(0,31-0,37)	(0,19-0,24)	(0,43-0,47)	(0,84-3,86)	(8,37-9,95)

* Fracção arenosa constituída predominantemente por areia grossa (2-0,2 mm);

** Fracção arenosa constituída predominantemente por areia fina (0,2-0,02 mm);

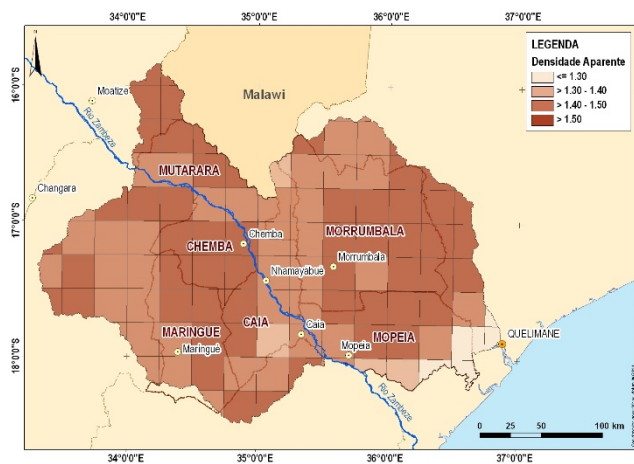
*** Fracção argilosa constituída predominantemente por minerais do de argila do tipo 2:1, com propriedades vérticas;

**** Fracção argilosa predominantemente constituída por minerais do tipo caulinite e/ou por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio;

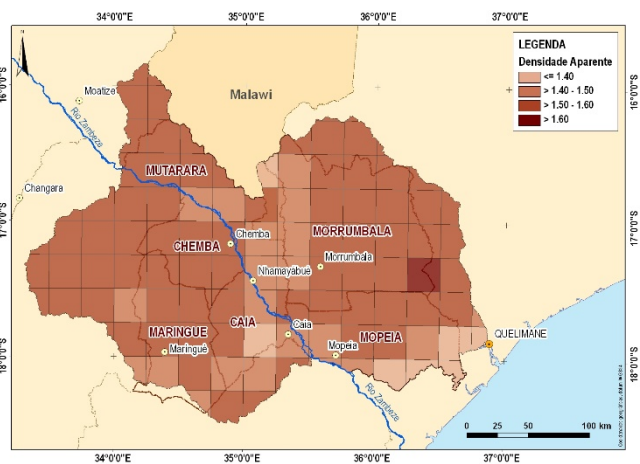
***** Fracção argilosa de características intermédias entre as referidas em *** e ****.

Nas Figuras seguintes apresentam-se os valores apurados da densidade aparente (Figura 3.1), da capacidade de campo e do coeficiente de emurchecimento (Figura 3.2), da condutividade hidráulica saturada e da porosidade (Figura 3.3) ao nível das células da grelha para cada uma das camadas em função dos valores determinados para cada unidade de solo e das fracções das unidades de solo de cada uma das células

Camada 0



Camada 1



Camada 2

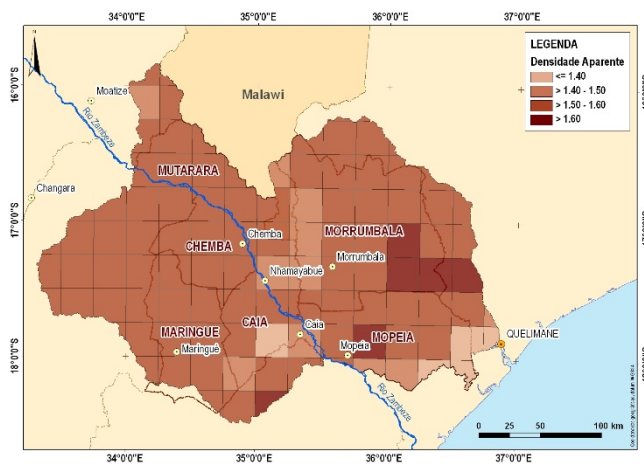
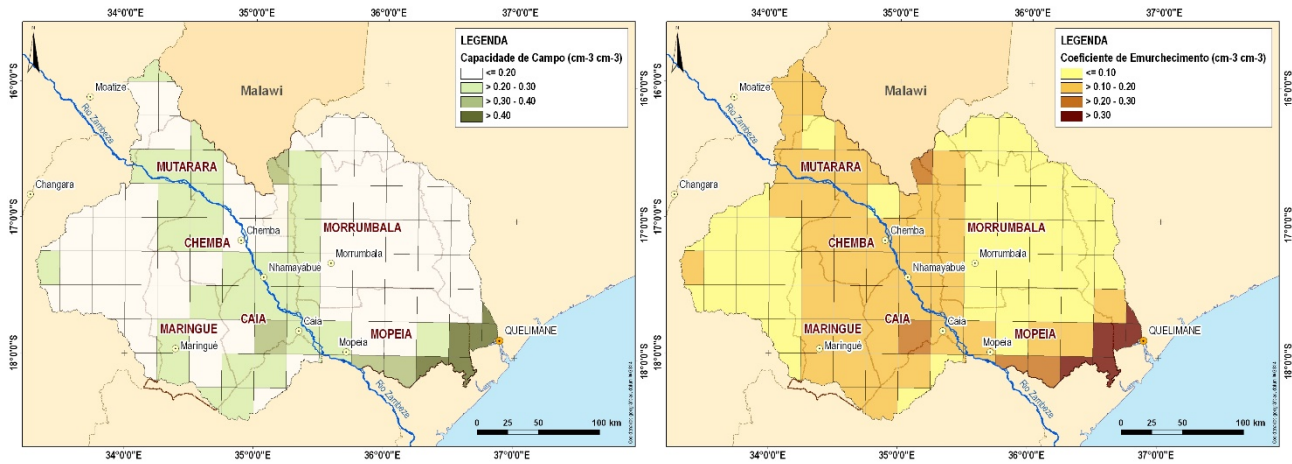
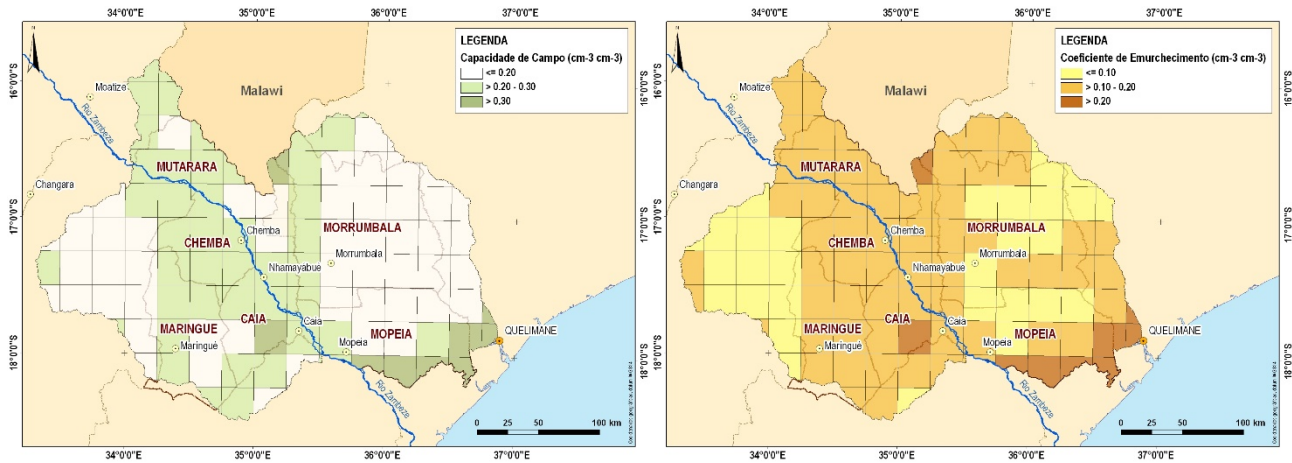


Figura 3.1 – Densidade aparente do solo das camadas 0, 1 e 2

Camada 0



Camada 1



Camada 2

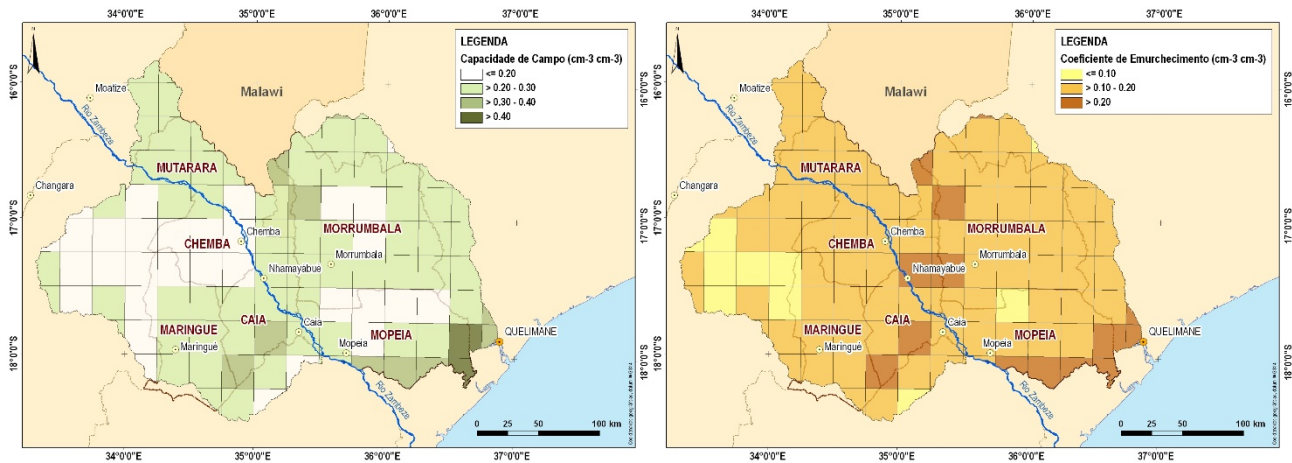
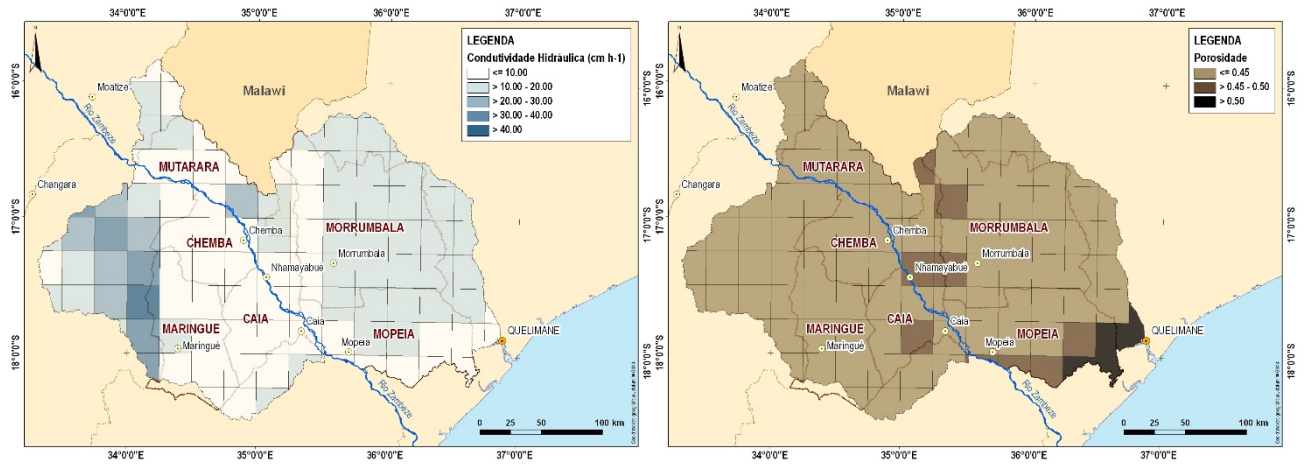
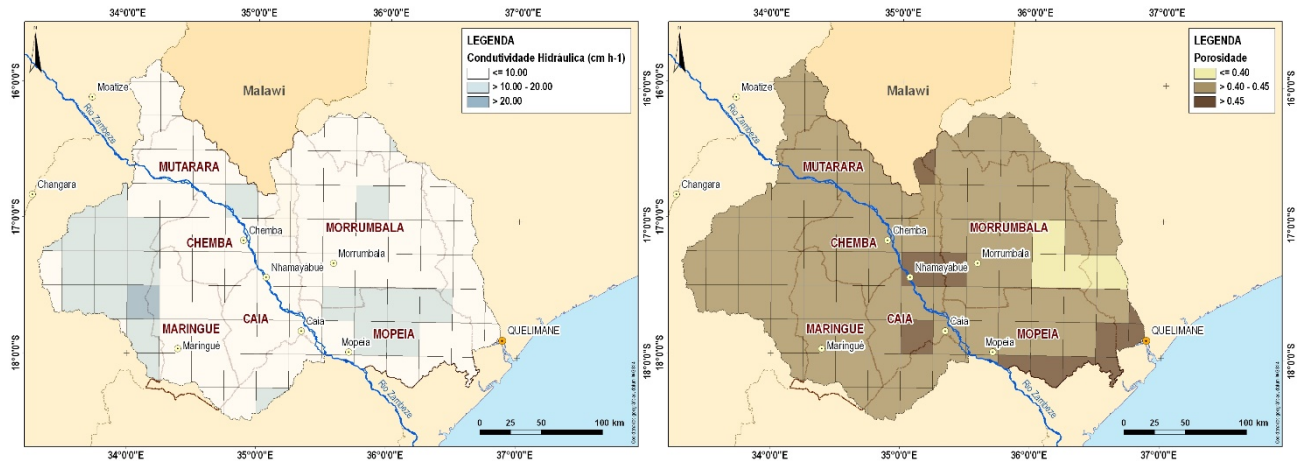


Figura 3.2 – Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento

Camada 0



Camada 1



Camada 2

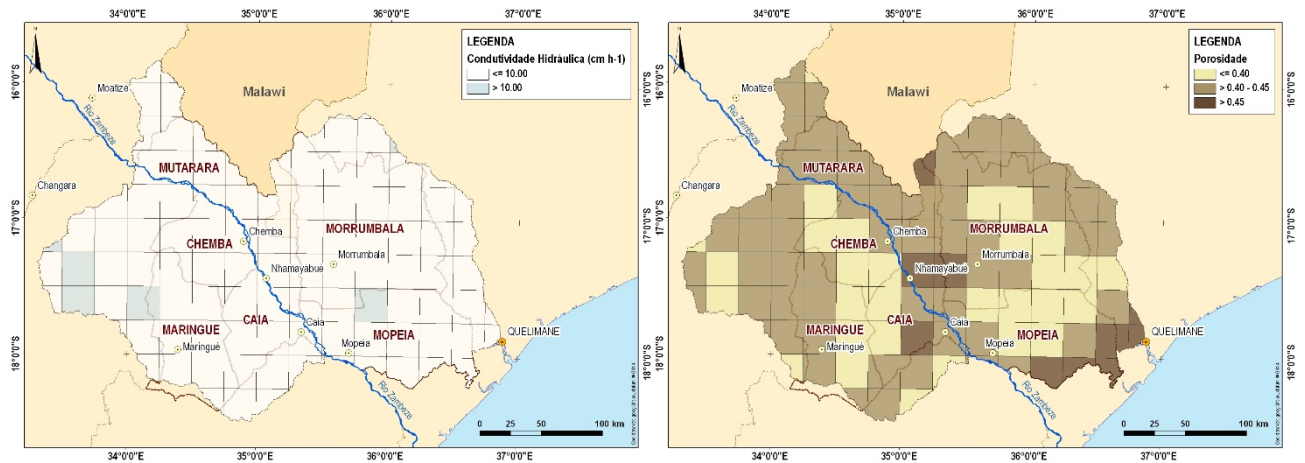


Figura 3.3 – Condutividade hidráulica do solo e porosidade de cada uma das camadas

A descrição do coberto vegetal das células da grelha teve por base os mapas de uso e cobertura da terra à escala 1:250.000 das províncias da Zambézia e Sofala (RURAL CONSULT, IUCN e RMSI, 2011), para os quais foram utilizadas imagens de satélite LANDSAT TM 4 e 5 com uma resolução espacial de 30 m. A classificação de cobertura foi feita à categoria de UCT de nível III, tendo sido identificadas 33 classes. As classes presentes na área de estudo foram agrupadas em 14 classes (Figura 3.4 e Quadro 3.2).

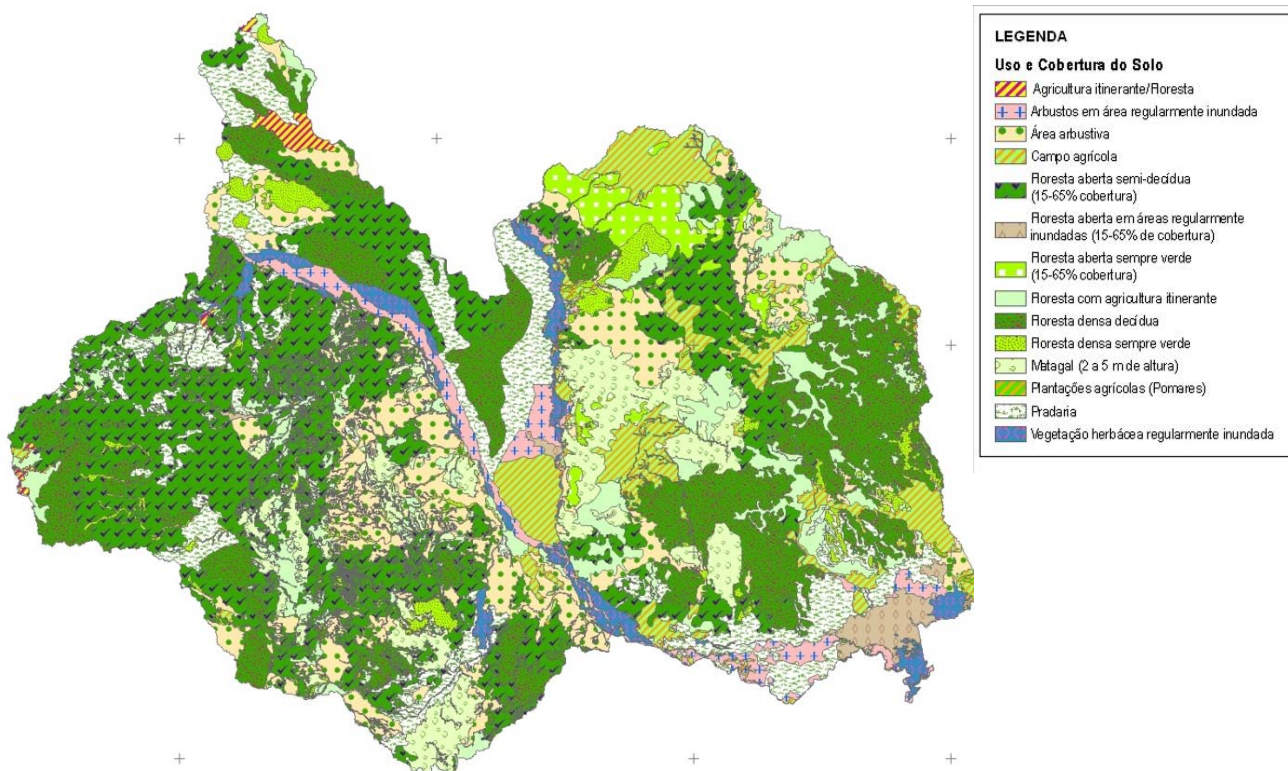


Figura 3.4 - Mapa do uso e cobertura da terra da área de estudo

No Quadro 3.2 indicam-se os parâmetros do coberto vegetal que foram introduzidos no modelo.

Quadro 3.2 - Descrição dos parâmetros da vegetação usados neste estudo

Classe de uso e cobertura da terra	Resistência da arquitectura (s m-1)	Albedo	Resistência mínima estomática (s m-1)	Índice de área foliar (IAF)	Rugosidade característica (m)	Plano deslocamento nulo (m)
Componente agrícola dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta	25	0,10-0,20	100	0,1-5,0	0,006-0,215	0,03-1,17
Campos cultivados	25	0,10-0,20	100	0,1-0,50	0,006-0,215	0,03-1,17
Cultivos Arbóreas/Plantações Florestais	60	0,18	200	1,5-5,0	1,230	7,80
Floresta decídua	60	0,18	200	1,5-5,0	1,230	9,36
Floresta sempre verde	60	0,12	250	3,4-4,4	1,476	9,36
Floresta aberta (Semi-) Decídua (15-65% cobertura)	60	0,18	150	1,5-4,1	1,133	7,49
Floresta aberta sempre verde (15-65% cobertura)	60	0,18	200	2,3-3,9	1,133	7,49
Componente florestal dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta	60	0,18	200	1,5-5,0	1,230	9,36
Matagal (2 a 5 m)	60	0,19	135	2,0-3,5	0,495	3,35

Classe de uso e cobertura da terra	Resistência da arquitectura (s m-1)	Albedo	Resistência mínima estomática (s m-1)	Índice de área foliar (IAF)	Rugosidade característica (m)	Plano deslocamento nulo (m)
Áreas arbustivas	50	0,19	135	1,5-3,5	0,495	2,01
Pradaria	25	0,20	120	1,5-3,5	0,0738	1,01
Vegetação herbácea regularmente inundada	25	0,19	135	1,5-3,5	0,495	2,01
Arbustos em áreas regularmente inundadas	50	0,19	135	1,5-3,5	0,495	2,01
Floresta aberta em áreas regularmente inundadas (15-65% de cobertura)	60	0,18	150	2,0-3,7	1,152	7,49

A área de estudo é maioritariamente dominada pelas classes floresta aberta (semi-) decídua (15-65% da cobertura) e floresta densa decídua que ocupam 25,2% e 16,2% da área total. As classes áreas arbustivas (11,9% da área) e pradaria (10% da área) têm também uma representação significativa na área de estudo.

Os campos agrícolas ocupam cerca 9% da área de estudo concentrando-se predominantemente no Distrito de Morrumbala. Na contabilização da área agrícola total incluíram-se as áreas correspondentes à agricultura dentro das classes agricultura itinerante/floresta e floresta com agricultura itinerante.

3.2 MODELO ROUTING

Os dados de entrada do modelo ROUTING compreendem a seguinte informação:

- Direcção de escoamento ("Flow Direction File");
- Dimensão das células (Ficheiro Xmask);
- Fracção das células dentro da área de estudo ("Fraction File");
- Velocidade de escoamento;
- Difusividade;
- Hidrograma unitário ("UH File"); e
- Pontos de controlo ("Station Location File").

A direcção de escoamento, a dimensão da célula, assim como a fracção da célula dentro da bacia são determinados a partir do modelo digital do terreno.

O ficheiro da direcção do escoamento estabelece a ligação entre as células da grelha. O escoamento superficial e de base simulados numa célula pelo modelo VIC são na sua totalidade direccionados para uma única célula. Na Figura 3.5 apresenta-se a direcção do escoamento em cada uma das células da área de estudo. A direcção do escoamento é dada por um número inteiro entre 1 e 8. O número 9 é usado para indicar as células de saída de caudal.

Como já foi referido, a bacia é representada por uma grelha dividida em células que podem estar fora da área da bacia (identificadas em todos os ficheiros do modelo ROUTING com o valor 0), ou que podem estar integralmente/ parcialmente dentro dos limites da bacia hidrográfica (Figura 2.2).

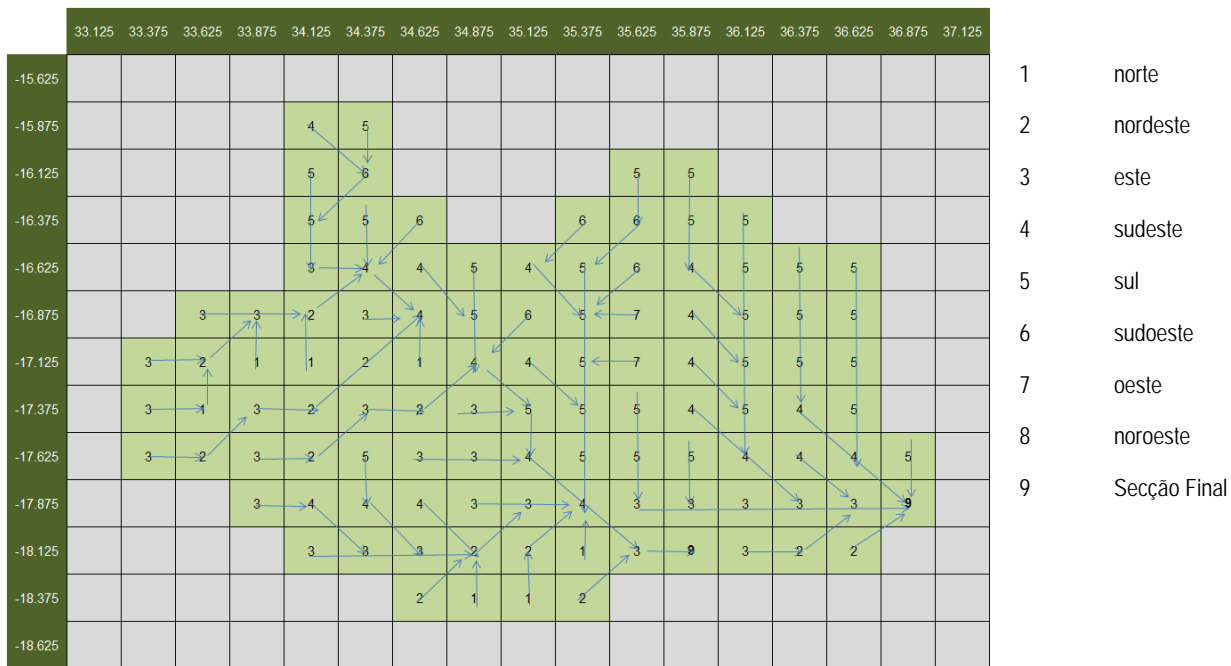


Figura 3.5 – Direcção do escoamento (“Flow Direction File”).

A área de cada célula dentro da área de estudo foi calculada com a ajuda de um software de SIG, que permitiu a sobreposição da grelha de células à área de estudo. Uma vez que a informação está em coordenadas geográficas, foi necessário projectar a informação para o sistema de coordenadas UTM, fuso 36S, datum WGS84, para mais facilmente proceder ao cálculo da dimensão de cada uma das células e das fracções dentro da área de estudo.

O tamanho de cada uma das células (expresso em m) da grelha (Figura 3.7) é fornecido ao modelo ROUTING através do ficheiro xMask.

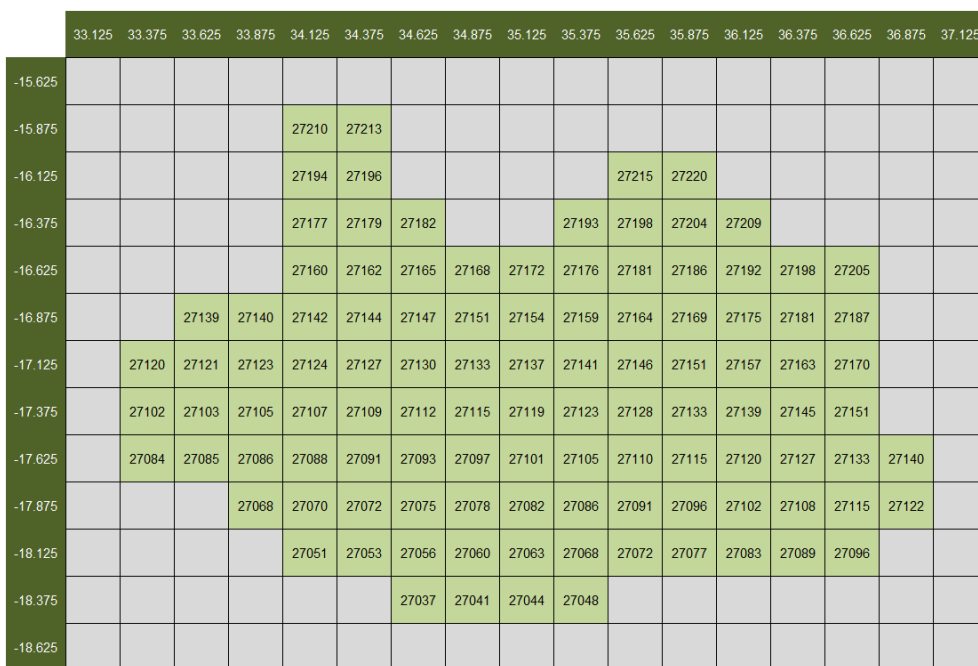


Figura 3.6 – Dimensão das células (ficheiro Xmask)

Os valores da fracção da área total de cada célula (Figura 3.7) que drena para a bacia hidrográfica são fornecidos ao modelo ROUTING, permitindo uma definição mais precisa da área da bacia.

	33.125	33.375	33.625	33.875	34.125	34.375	34.625	34.875	35.125	35.375	35.625	35.875	36.125	36.375	36.625	36.875	37.125
-15.625																	
-15.875					0.30	0.11											
-16.125					0.76	0.63					0.05	0.03					
-16.375					0.67	0.97	0.37				0.51	0.98	0.88	0.07			
-16.625					0.82	1.00	1.00	0.34	0.52	1.00	1.00	1.00	0.84	0.33			
-16.875			0.15	0.61	0.99	1.00	1.00	0.99	0.85	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.45		
-17.125		0.13	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64		
-17.375		0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81		
-17.625		0.30	0.81	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.14	
-17.875				0.10	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.29	
-18.125					0.37	0.87	0.97	1.00	1.00	0.43	0.13	0.39	0.76	0.38	0.36		
-18.375							0.32	0.88	0.41	0.01							
-18.625																	

Figura 3.7 – Fracção da área das células dentro da área de estudo (“Fraction File”).

Os valores da velocidade de escoamento ($m\ s^{-1}$) e da difusividade ($m^2\ s^{-1}$) são necessários para modelação da propagação do escoamento em canais. Quando a modelação hidrológica é efectuada para se obterem caudais mensais, considera-se aceitável adoptar para a difusividade um valor constante de $800\ m^2\ s^{-1}$ e para a velocidade um valor constante de $1,5\ ms^{-1}$. O hidrograma unitário representa a função de resposta a um impulso unitário. Na Figura 3.8 apresenta-se o hidrograma adoptado tem do em vista a obtenção de caudais mensais.

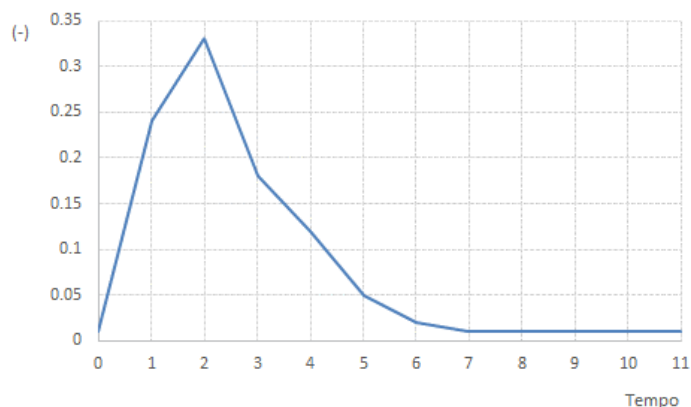


Figura 3.8 – Hidrograma unitário adoptado

Os pontos (ou estações) de controlo são as células da grelha para as quais deverão ser produzidos os hidrogramas de escoamento. O modelo permite a definição de qualquer número de estações no interior da bacia e um único ponto terminal de agregação do escoamento (saída de caudal) por bacia.

4 CALIBRAÇÃO DO MODELO VIC

4.1 INTRODUÇÃO

O processo de aplicação do modelo VIC passa inicialmente pela calibração e validação do modelo. Face às características da área em estudo e aos dados de caudais existentes, a calibração do modelo foi realizada para as bacias hidrográficas dos rios Lualaba tendo por base as alturas de água observadas nas estações E101 – Derre e E480 – EN1 entre 2006 e 2012 e as respectivas curvas de vazão.

Os caudais medidos na estação E291-Caia entre 2006 e 2012 foram também comparados com os caudais simulados. Esta análise foi feita adicionando aos caudais mensais simulados os caudais mensais em Lupata e em Chilomo, que representam as condições de fronteira da área de estudo. Foi dada ainda particular atenção às características hidrológicas das sub-bacias da margem direita do rio Zambeze.

Após a aplicação do modelo VIC para geração do escoamento em cada célula da área de estudo, foi aplicado o modelo ROUT para propagação do escoamento dentro da célula e entre células. Para utilizar este modelo, a rede hidrográfica da área de estudo foi esquematizada de forma a definir-se a rede de escoamento entre as células (Figura 3.5).

Para o processo de calibração e tendo em consideração a dimensão relativamente pequenas das bacias hidrográficas das estações E101 – Derre e E408 – EN1, optou-se por individualizar a simulação de cada um dos locais das estações, tendo sido criados para cada estação hidrométrica o ficheiro da direcção do escoamento (“Flow Direction File”), o ficheiro fracção (“Fraction File”) e o ficheiro dos pontos de controlo (“Station Location File”).

Esta individualização das bacias hidrográficas no processo de calibração permitiu descrever com maior exactidão a área de drenagem de cada uma das estações assim como a rede hidrográfica.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Fundamentação da calibração do modelo VIC

Embora alguns dos parâmetros requeridos para a modelação hidrológica com os modelos VIC e ROUTING sejam obtidos com base em observações de satélite e levantamentos de campo, alguns desses parâmetros são bastante variáveis no espaço e as avaliações *in situ* não são suficientes para se obter valores representativos de grandes áreas (> 1 km). Por outro lado, algumas variáveis têm um significado mais conceptual (como sejam as profundidades das camadas do solo) do que um significado físico. Para estes parâmetros, é necessário fazer suposições sobre os seus valores ou calibrá-los.

O processo de calibração é, na maioria dos casos de estudo, feito apenas para o modelo VIC. Esta simplificação deve-se ao facto dos modelos VIC e ROUTING serem utilizados fundamentalmente para estimar caudais mensais de grandes bacias hidrográficas, não sendo por isso necessário uma precisão muito grande nos parâmetros requeridos pelo modelo de propagação.

Parâmetros como a direcção de escoamento e fracção da célula dentro da bacia são determinados a partir do modelo digital do terreno, existindo ferramentas de cálculo automático desenvolvidas para o efeito. Para os outros parâmetros como sejam a velocidade de escoamento, difusividade e o hidrograma unitário, é aconselhável a adopção de valores físicos razoáveis, sem recurso à calibração.

Lohmann *et al.* (1996) na modelação efectuada para a bacia Wese (na Alemanha) refere valores da velocidade de escoamento entre 1 e 3 m s⁻¹ e valores da difusividade no intervalo entre 200 e 4000 m² s⁻¹.

Nijssen *et al.* (1997) refere valores de velocidade de escoamento entre 0,5 e 2,0 m s⁻¹ na bacia Columbia e de 1,0 m s⁻¹ para a bacia Delaware.

Quando a modelação hidrológica é efectuada para se obter caudais mensais, considera-se aceitável adoptar para a difusividade um valor constante de 800 m² s⁻¹ e para a velocidade um valor constante de 1,5 m s⁻¹.

Quando o objectivo do trabalho é simular caudais diários é necessário a calibração dos parâmetros do modelo ROUT, nomeadamente a velocidade de escoamento, a difusividade e o hidrograma unitário, de acordo com a metodologia proposta em Lohmann *et al.* (1996, 1998a, 1998b).

De um modo geral, a calibração dos modelos hidrológicos é efectuada com registos de caudais. Para tal é necessário executar o modelo ROUT (recorrendo a estimativas adequadas dos parâmetros requeridos por este modelo) para converter o escoamento superficial e de base simulados pelo modelo VIC em caudais. A série de registos das vazões observadas deverá ser dividida em duas partes independentes, sendo uma utilizada para a calibração e a outra para o processo de validação.

Os parâmetros do modelo VIC podem também ser calibrados utilizando observações *in situ* do teor de humidade do solo e da evapotranspiração. Neste caso, o modelo VIC é calibrado sem ser necessário executar o modelo ROUT. As imagens de satélite poderão também ser utilizadas para se obter os valores dos parâmetros com os quais serão comparados os valores simulados durante o processo de calibração do modelo VIC.

4.2.2 Parâmetros de calibração

O modelo de VIC tem muitos parâmetros, a escolha dos parâmetros a calibrar é complexa, tendo sido considerado mais apropriado ajustar apenas alguns parâmetros durante o processo de calibração. Muitas vezes, a distinção baseia-se na medida em que os valores dos parâmetros podem ser realmente medidos ou observados. Os parâmetros que são mais comumente ajustados durante a calibração do modelo VIC são:

- **b_infilt** [>0 a -0.4] - este parâmetro descreve a forma da curva variável de infiltração, isto é descreve a capacidade de armazenamento da célula em função da fracção da área da célula que se encontra saturada. Um valor mais alto de b_infilt traduz-se numa menor capacidade de armazenamento da célula em função da área saturada e consequentemente conduz a valores de escoamento mais elevados;
- **Ds** [>0 a 1] – representa a fracção de D_{max} para a qual se inicia o escoamento de base não linear (aumentando rapidamente). Quanto maior o valor de Ds, maior será o escoamento de base para valores baixos do teor de humidade da última camada do solo;
- **Ws** [>0 a 1] – é a fracção do teor máximo de água da camada inferior do solo, a partir da qual se inicia o escoamento de base não linear. Um valor alto de Ws traduz-se num aumento do teor de humidade do solo a partir do qual o escoamento de base aumenta rapidamente, retardando o pico do escoamento.
- **Dsmax** [>0 a ~ 30], representa o fluxo máximo de base (expresso em mm dia⁻¹) que pode ocorrer a partir da camada inferior do solo, depende sobretudo da condutividade hidráulica do solo]; e
- **profundidade do solo** (de cada uma das camadas) [normalmente entre 0.1 a 1.5 m] - a profundidade das camadas do solo influencia muitas variáveis do modelo. De um modo geral, e para efeitos de escoamento, os solos profundos

tendem a amortecer os caudais máximos (o escoamento de base é dominante) e a aumentar as perdas por evapotranspiração.

4.2.3 Avaliação da calibração

A escolha da melhor calibração do modelo é baseada no uso de uma função-objectivo específica para avaliar a qualidade de representatividade do modelo. A função-objectivo traduz um problema de optimização dos resultados da simulação em comparação com os dados observados.

A avaliação da eficiência dos modelos é feita comparando os resultados da simulação com os valores observados, através da estimação do erro médio absoluto (EMA), do Bias, do coeficiente de regressão (b) e do critério de eficiência de Nash e Sutcliffe (E). O valor médio do hidrograma observado foi ainda comparado com o valor médio do hidrograma simulado.

O critério de eficiência de Nash e Sutcliffe é uma das funções mais usadas em hidrologia para avaliar a qualidade do ajustamento dos modelos hidrológicos e pode ser escrita da seguinte forma:

$$E = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

permite medir até que ponto é que a variabilidade da série observada é explicada pela simulação. Quando a simulação é perfeita, o erro quadrático médio é nulo e tem-se $E = 1$. Uma eficiência de zero ($E=0$) significa que as predições do modelo são tão boas quanto o valor médio da série observada. Quando os valores do critério de Nash e Sutcliffe são negativos ($E < 0$) significa que o valor médio da série observada é um indicador melhor que a simulação. Preferencialmente os valores do critério de Nash e Sutcliffe deverão ser superiores a 0,5 (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Valores de referência dos critérios de Nash e Sutcliffe

E	Qualidade do Ajustamento
< 0,2	Insuficiente
0,2 a 0,4	Satisfatório
0,4 a 0,6	Bom
0,6 a 0,8	Muito Bom
> 0,8	Excelente

Fonte: Molnar, 2011

A escolha dos períodos de calibração e validação obedece a critérios que são função da disponibilidade de dados e características do fenómeno em estudo.

4.2.4 Estações hidrométricas utilizadas na calibração

4.2.4.1 E101 – DERRE

A estação E101 – Derre (16°57'42"S; 36°07'15" E) no rio Lualaba é uma das três estações hidrométricas utilizadas no processo de calibração/verificação do modelo VIC. Na Figura 4.1 apresenta-se a bacia hidrográfica da estação cuja área drenada é de 2 223 km². Para uma correcta descrição da bacia hidrográfica quer em termos de área drenada quer em termos da rede hidrométrica, optou-se por criar para a bacia de calibração os ficheiros de entrada do modelo ROUT (Figura 4.2 e Figura 4.3) em vez de se utilizar os ficheiros criados para área de estudo, permitindo uma descrição rigorosa da bacia hidrográfica de calibração.

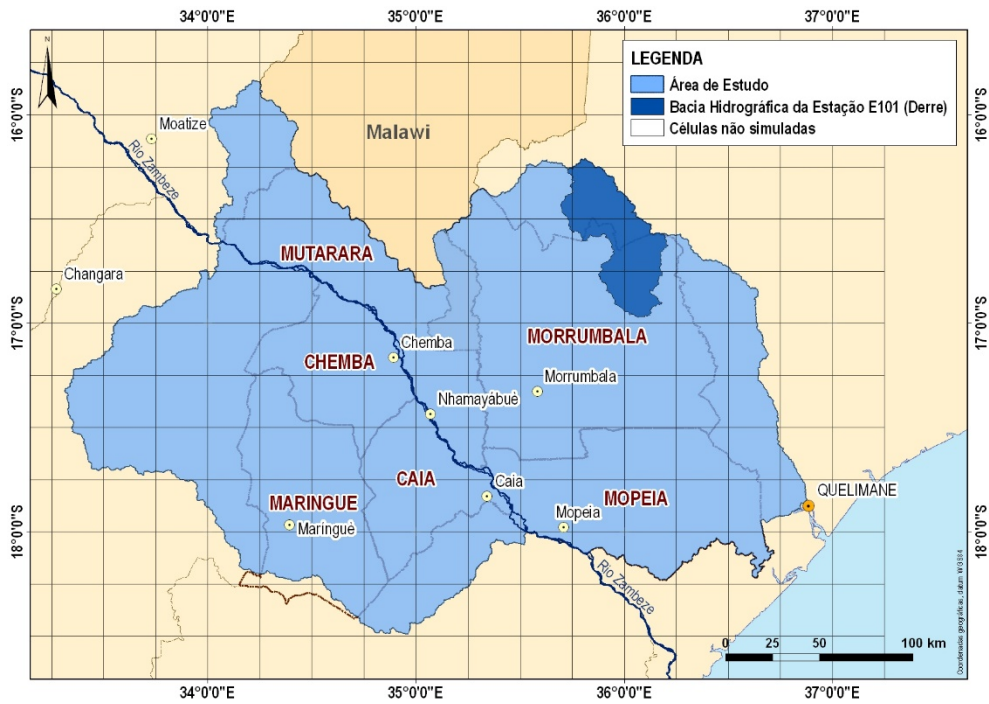


Figura 4.1 – Bacia hidrográfica da estação E101- Derre

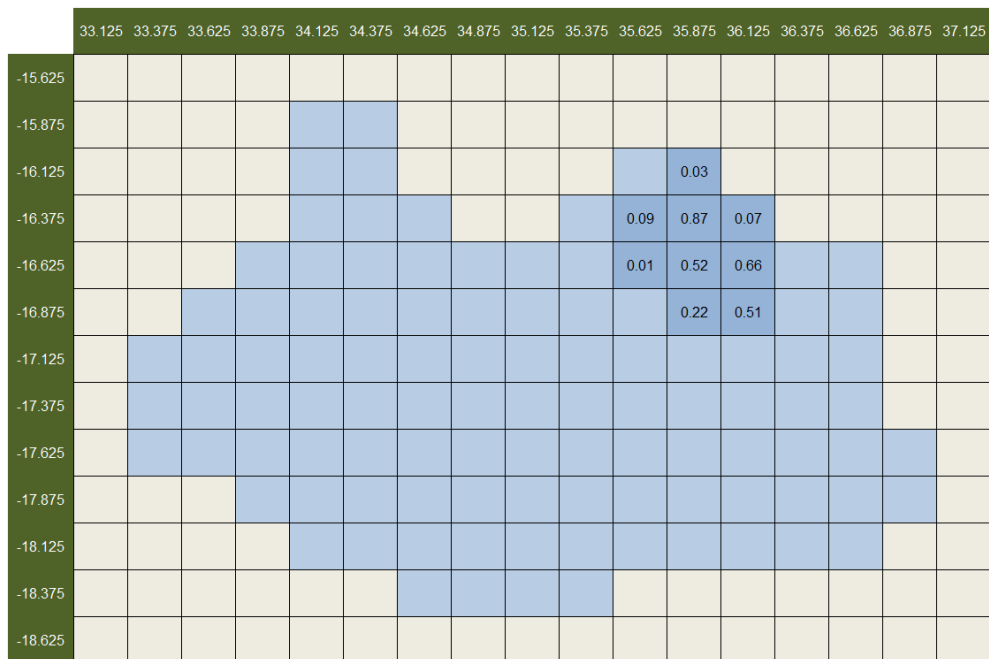


Figura 4.2 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre

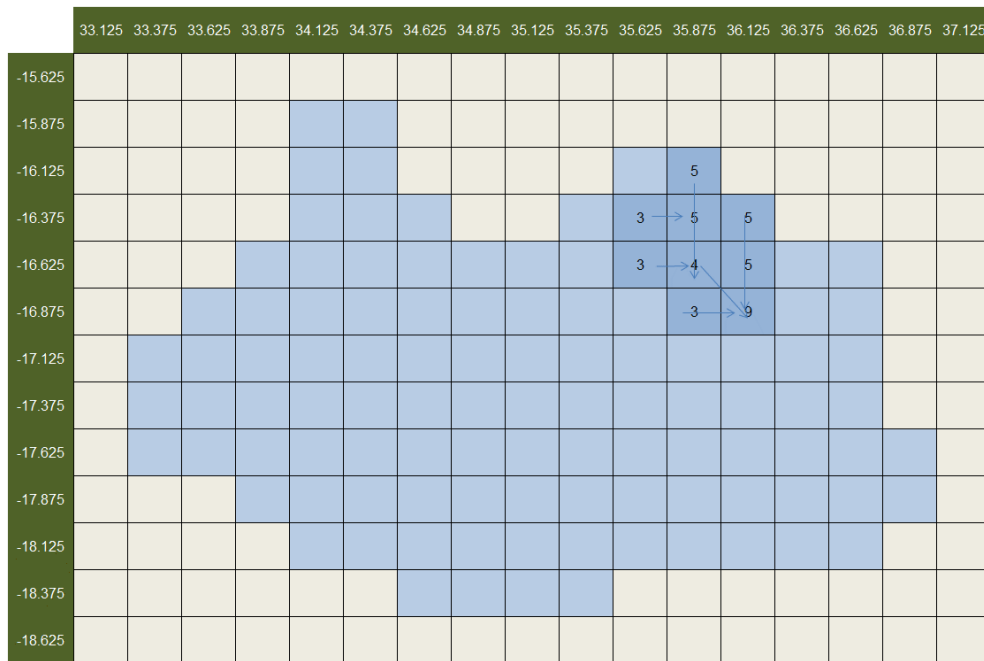


Figura 4.3 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre

Na Figura 4.4 apresenta-se a curva vazão adoptada para a estação E101 – Derre. A calibração será feita para o período de Janeiro de 2006 a Dezembro de 2012.

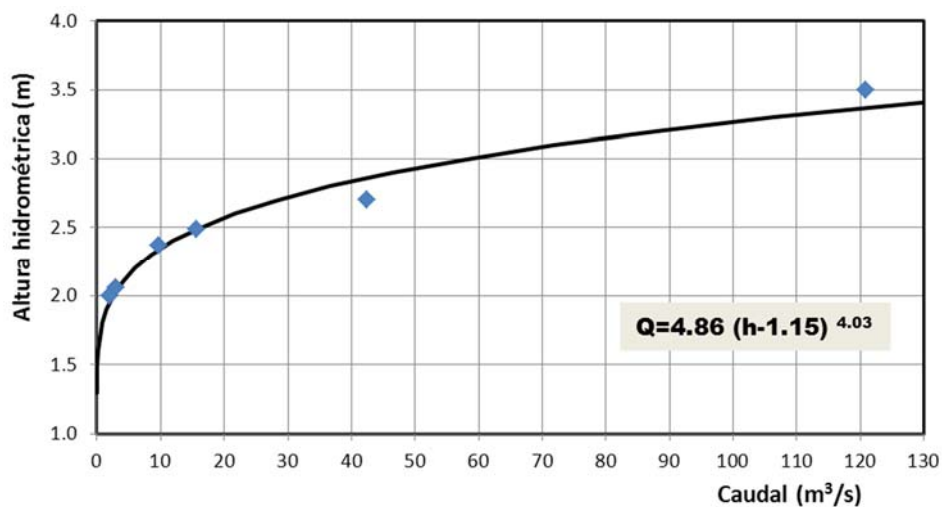


Figura 4.4 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E101-Derre

4.2.4.2 E480 – EN1

A estação E480 - EN 1 (17°31'30"S; 36°16'18"E) no rio Lualua fica a jusante da estação E101 – Derre e a sua bacia hidrográfica tem uma área de 4 807 km² (Figura 4.5).

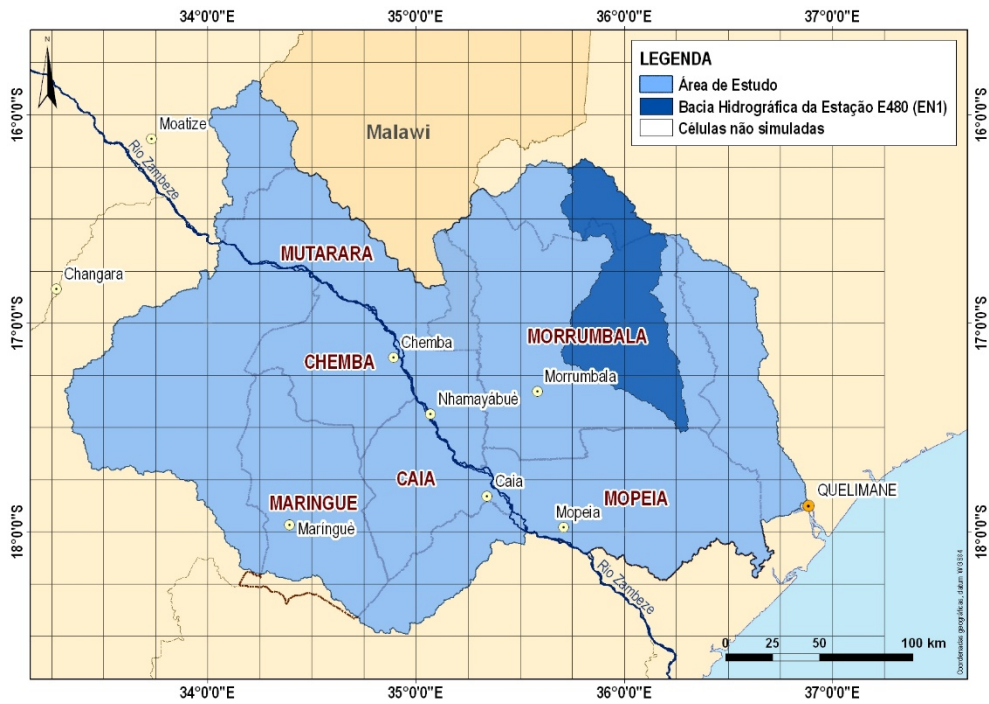


Figura 4.5 – Bacia hidrográfica da estação E480- EN1

De forma idêntica à estação E101, foram gerados os ficheiros de entrada do modelo ROUT para uma correcta descrição quer da área de drenagem quer da rede hidrográfica da estação E480-EN1. Na Figura 4.6 indicam-se as fracções contributivas de cada uma das células que descrevem a bacia hidrográfica e na Figura 4.7 apresenta-se a rede hidrográfica da estação E480 – EN1.

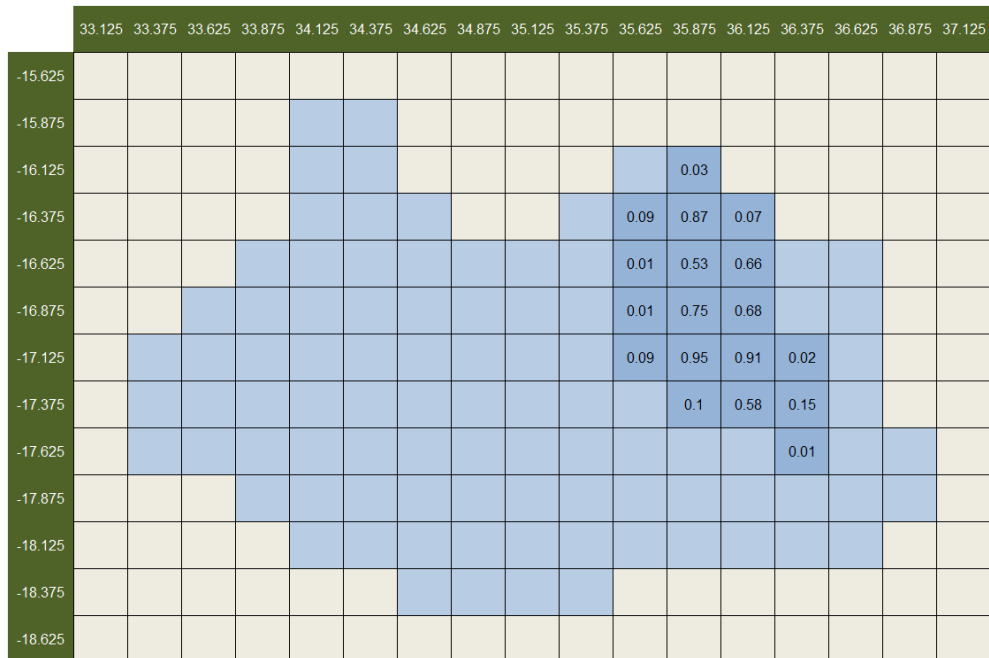


Figura 4.6 – Ficheiro fracção (“Fraction File”) da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1

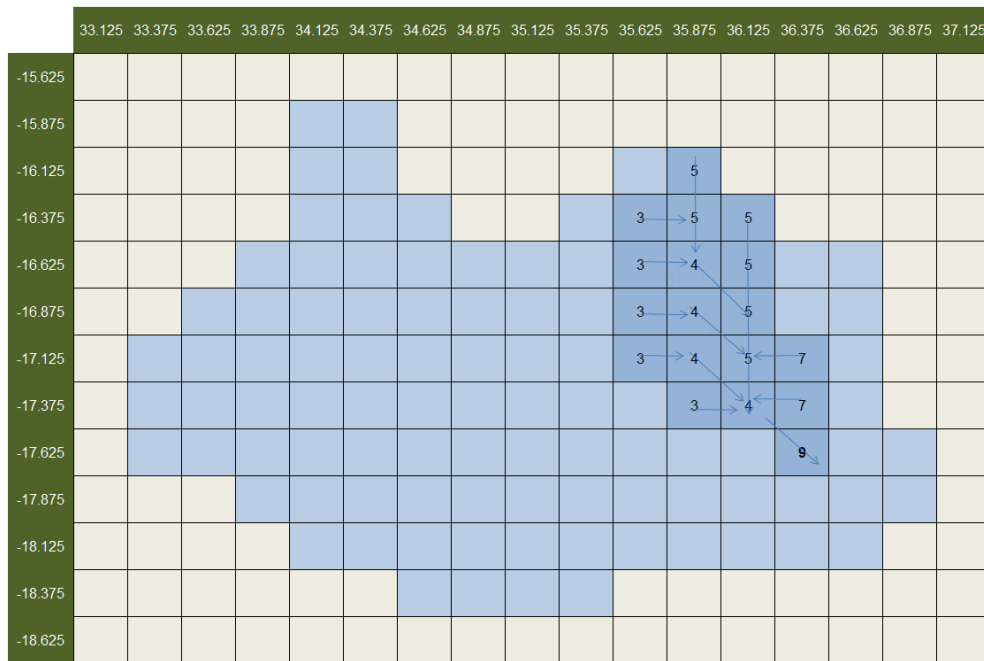


Figura 4.7 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E480 - EN1

Na Figura 4.8 representam-se as medições de caudal realizadas entre 2000 e 2013. A calibração do modelo VIC será feita com os registos desta estação de Janeiro de 2006 a Outubro de 2011.

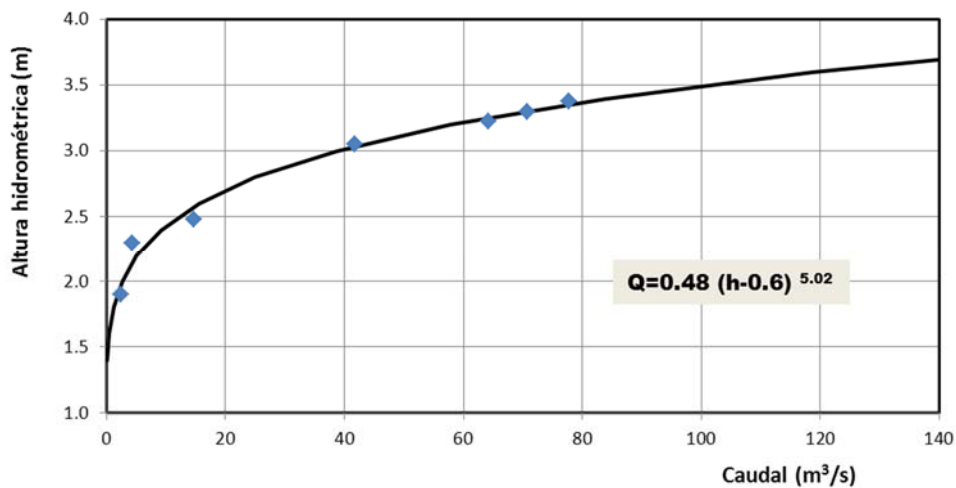


Figura 4.8 - Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E480 - EN1

4.2.4.3 E291 - CAIA

A estação E291 - Caia no rio Zambeze foi também utilizada para calibração/cerificação do modelo VIC. A bacia de drenagem desta estação drena cerca 32 841 km² da superfície total da área de estudo (Figura 4.9). Na Figura 4.10 indicam-se as fracções contributivas de cada uma das células que descrevem a bacia hidrográfica e na Figura 4.11 apresenta-se a rede hidrográfica da estação E291 - Caia.

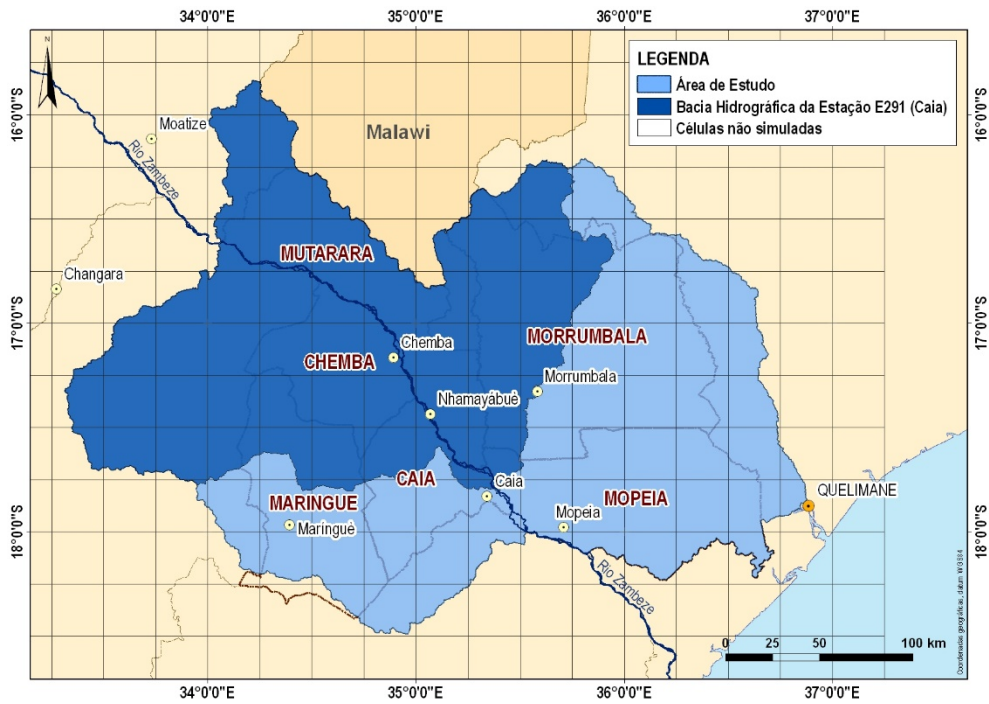


Figura 4.9 – Bacia hidrográfica da estação E291- Caia

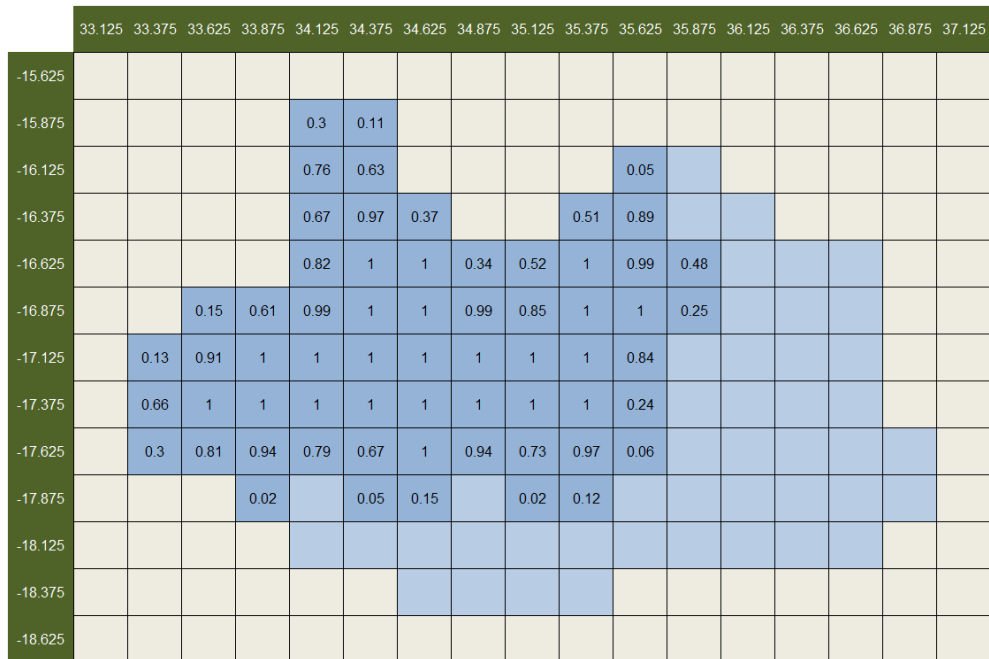


Figura 4.10 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia

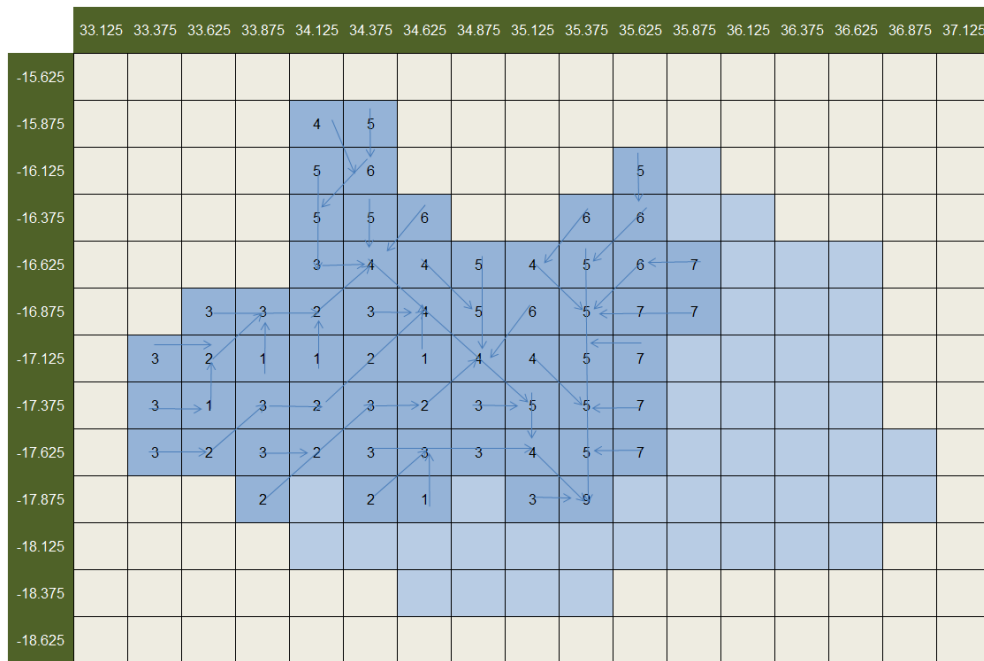


Figura 4.11 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia

A curva de vazão adoptada para a estação E2991 – caia é apresentada na Figura 4.12. A calibração e verificação do modelo VIC será feita com os registos do período de Janeiro de 2006 a Dezembro de 2012.

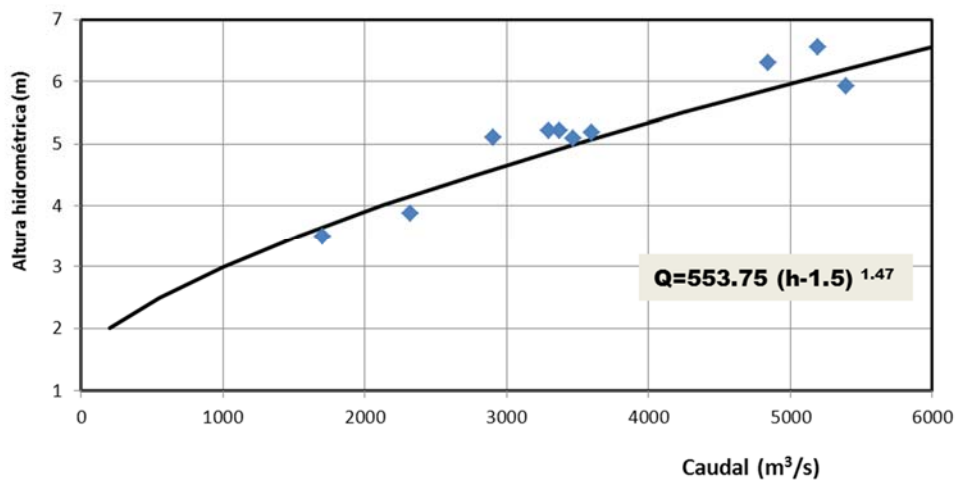


Figura 4.12 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal na estação E291 - Caia

4.3 RESULTADOS

A calibração do modelo VIC foi efectuada iterativamente, procedendo-se à alteração dos valores dos parâmetros $b_{infiltr}$; D_s , W_s , D_{smax} , d_1 , d_2 e d_3 . No Quadro 4.2 indicam-se os valores achados para os parâmetros de calibração do modelo VIC e no Quadro 4.3 apresentam-se os valores dos critérios de avaliação para cada uma das estações hidrométricas.

Quadro 4.2 – Parâmetros do modelo calibrados

Parâmetro	Valor calibrado
B_infilt (adim)	0,55
Ds (adim)	0,001
Dsmax (mm dia ⁻¹)	1,3
Ws (adim)	1
d ₁ (m)	0,1
d ₂ (m)	1,8
d ₃ (m)	2,0

Quadro 4.3 – Valores dos critérios de avaliação da calibração

Estatística de ajustamento	E101	E480	E291
Erro médio absoluto, EMAS (m ³ s ⁻¹)	9,6	20,4	414
Bias (%)	13,4	44,9	7,5
Coefficiente de regressão, b	0,95	0,97	1,1
Critério de eficiência de Nash e Sutcliffe	0,48	0,57	0,71
Média dos valores observados (m ³ s ⁻¹)	15,3	27,4	2746
Média dos valores simulados (m ³ s ⁻¹)	17,4	39,7	2953

Na Figura 4.13 comparam-se os hidrogramas observados com os hidrograma simulados e na Figura 4.14 e Figura 4.15 apresentam-se os gráficos de regressão entre os valores observados e simulados.

A Figura 4.13 mostra que o hidrograma simulado tende a reproduzir os picos de cheias observados assim como as vazões mínimas. A eficiência de Nash e Sutcliffe é igual a 0,57 a estação E480 - EN1 e igual a 0,71 na estação E291 - Caia, o que significa que o erro médio quadrático do modelo é muito menor que a variância dos valores observados. Apenas na estação E101- Dere, o valor obtido para o critério de eficiência de Nash e Sutcliffe foi ligeiramente inferior a 0,5, sendo, no entanto, este valor considerado bom na avaliação dos resultados de um modelo hidrológico (WENGER *et al.*, 2010).

O valor do coeficiente de regressão b é ligeiramente inferior a 1 quando se comparam os caudais observados com os caudais simuladas nas Estações E101 - Dere (b=0,9528) e E480 – EN1 (b=0,9736). Na estação E291 – Caia, o valor do coeficiente de regressão entres os valores observados e os simulados é de 1,0903. Quando se compara a média dos valores simulados com a dos valores observados, verifica-se que aquela é maior em todas as estações utilizadas na calibração.

O valor do indicador Bias é relativamente elevado para estação E480 – EN1, cerca de 45%. A causa de um erro de volume tão grande deve-se à diferença entre os valores observados e simulados no período 2009 a 2011. Nestes 3 anos os caudais simulados são superiores aos observados. No processo de calibração optou-se por não reduzir mais o valor do Bias em prejuízo dos restantes critérios, uma vez que análise dos valores simulados para estação E101, situada no mesmo rio a montante da estação E480, mostra que caudais máximos simulados se ajustam aos observados no período 2009 a 2011. De facto se comparam os caudais registados nas duas estações, constata-se e que os caudais em 2010 e

2011 na estação e101 são superiores aos caudais registação na estação E480, cuja bacia hidrográfica inclui a bacia da estação E101.

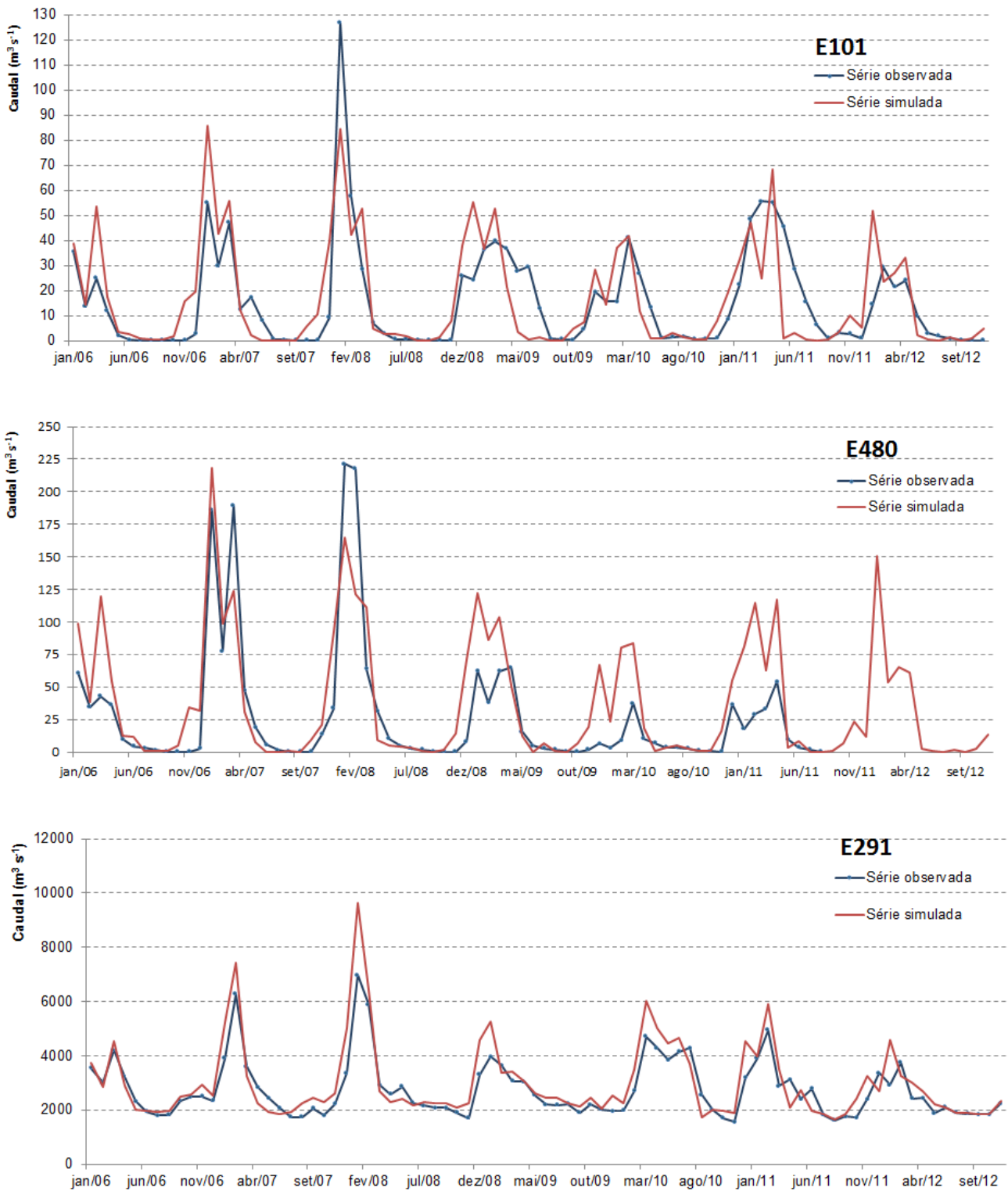


Figura 4.13 – Hidrogramas observados e simulados nas estações E101 – Derre, E480 – EN1 e E291 - Caia

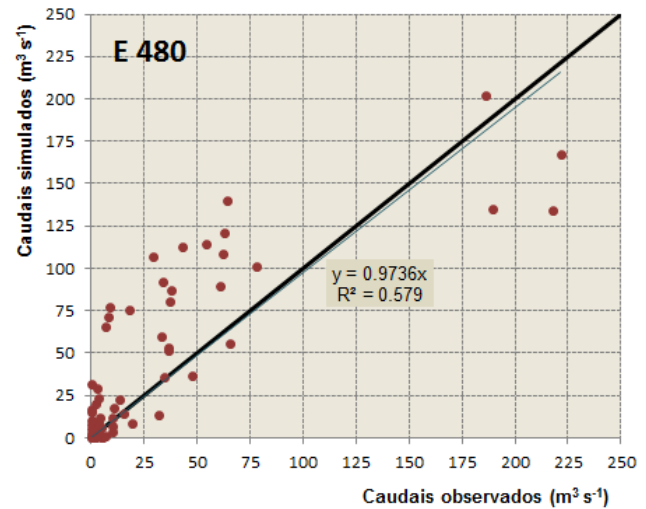
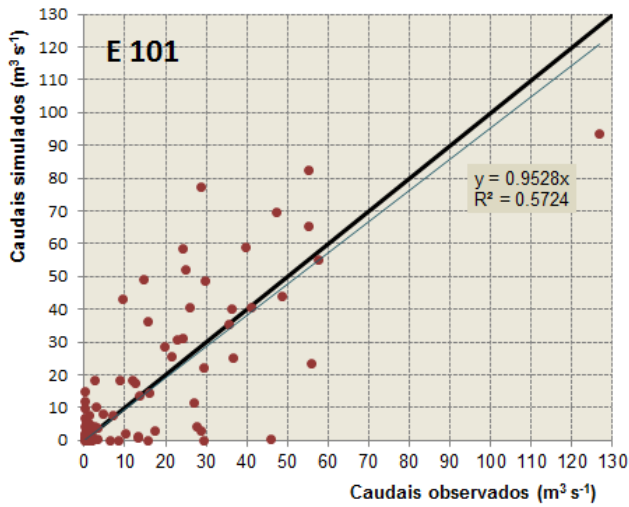


Figura 4.14 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Lualua

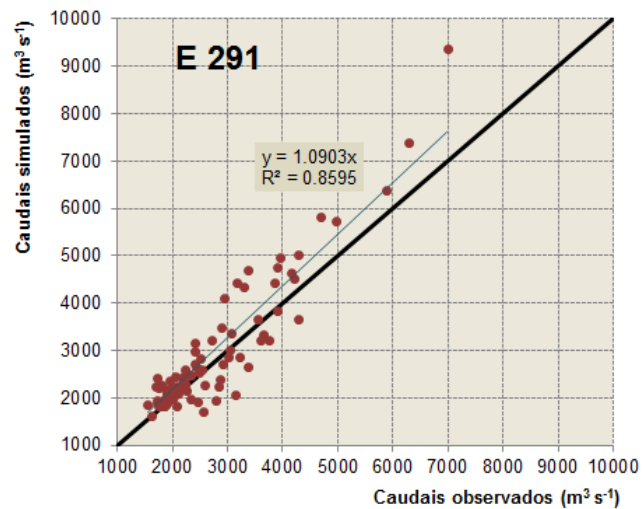


Figura 4.15 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Zambeze

Na Figura 4.16 comparam-se os caudais médios mensais observados com os simulados no período 2006 a 2012. No caso da estação E101 verifica-se uma diferença no decaimento da curva dos caudais médios simulados comparativamente com a dos observados. A forma da curva dos caudais médios simulados tem um decaimento muito mais rápido apresentando o mesmo padrão das curvas, observada e simulada, da estação E480 – EN1.

No que se refere à estação E291 – Caia, constata-se que a curva dos caudais médios simulados exhibe também o padrão da curva dos caudais médios observados.

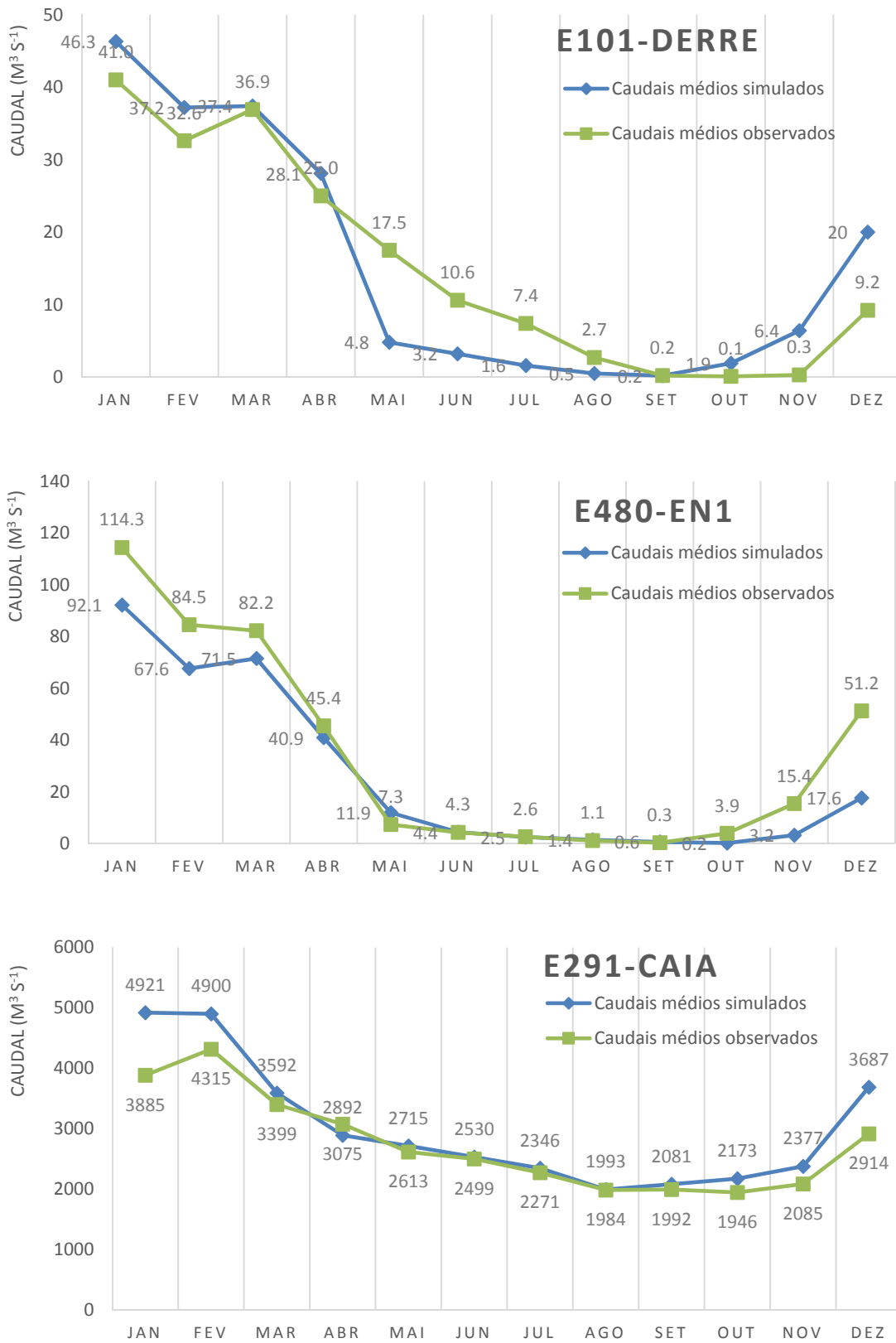


Figura 4.16 – Caudais médios mensais observados e simulados (2006 a 2012) nas estações E101 – Derre, E480 – EN1 e E291 – Caia

4.4 CONCLUSÕES

A análise gráfica e os valores obtidos para conjunto parâmetros utilizados na avaliação do modelo permite concluir que o modelo retracts com uma aproximação adequada o regime hidrológico do Baixo Zambeze, reproduzindo os picos de cheias observados assim como as vazões mínimas. Os valores obtidos para o critério de Nash e Sutcliff (entre 0,48 e 0,71) indicam que variabilidade dos caudais observados é bem explicada pela simulação. Não obstante, a comparação dos hidrogramas observados com os simulados mostram que o volume de escoamento gerado pelo modelo tende a ser superior ao observado.

A validação dos parâmetros calibrados é uma etapa fundamental do processo de verificação dos resultados do modelo mas que não pode ser feita no âmbito deste estudo, uma vez que a série de registos disponíveis (2006 a 2012) não era suficientemente longa para permitir divisão em duas séries independentes: uma para calibração e outra para validação. A análise da precipitação e dos hidrogramas observados mostra ainda que os três primeiros anos da série disponível dizem respeito a anos húmidos e ou últimos quatro a anos secos, o que não permite a sua divisão em duas séries independentes.

Assim, e embora os resultados da calibração permitam ter confiança nos resultados da modelação do regime hidrológico do Baixo Zambeze, o processo de calibração e validação deverá prosseguir nos próximos anos pelos técnicos da ARA-Zambeze, a par do trabalho de campo que é necessário continuar a realizar para aferição das curvas de vazão de cada uma das estações hidrométricas.

5 EXPLORAÇÃO DO MODELO VIC

5.1 INTRODUÇÃO

Após a calibração do modelo VIC, a sua exploração foi feita em três etapas principais. Numa primeira fase procedeu-se à análise dos resultados para a situação de referência, isto é para o uso e coberto actual do solo. Para além das séries mensais de caudais em obtidas para várias secções da área de estudo procedeu-se à análise das séries temporais da precipitação, evapotranspiração, escoamento total e água no solo.

Numa segunda etapa procurou-se perceber melhor qual o papel da floresta densa decídua, da agricultura, das áreas arbustivas e do matagal no regime hidrológico do Baixo Zambeze.

Finalmente foram identificados dois cenários de uso e coberto vegetal onde uma fracção da área florestal é convertida em agricultura, áreas arbustivas e em matagal. Foi ainda identificado um terceiro cenário que procura representar a ocupação vegetal de há 10 anos atrás do Baixo Zambeze, onde a floresta densa decídua era classe predominante. O regime hidrológico correspondente a estes três cenários foi comparado com o regime hidrológico correspondente ao uso e coberto actual da terra.

5.2 ANÁLISE DO REGIME HIDROLÓGICO PARA A SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA

Os dois modelos VIC e ROUT permitem uma análise do regime hidrológico ao nível dos principais elementos do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, escoamento gerado e água no solo) quer ao nível dos caudais em determinadas secções.

A decomposição do balanço de água será apresentado em detalhe para 6 células, uma de cada um dos distritos que compõem a área de estudo.

Na margem direita do Zambeze será estudado o regime hidrológico das células 60 (17°52'30"S e 35°7'30"E), 63 (17°52'30"S e 34°22'30"E) e 114 (17°7'30"S e 34°22'30"E) dos distritos do Caia, Maringue e Chemba, respectivamente.

Dentro do distrito de Mutarara serão analisados os resultados da modelação do regime hidrológico da célula 148 (16°30'30"S e 34°22'30"E). No distrito de Morrumbala, os resultados de modelo VIC serão apresentados para a célula 107 (17°7'30"S e 36°7'30"E) que está dentro da bacia hidrográfica da estação E480 - EN1. No distrito de Mopeia serão analisadas as componentes do balanço de água da célula 73 (17°37'30" S e 36°7'30" E)

As células 107 e 73 são aquelas onde chove mais, sendo seguidas da célula 60. A célula onde chove menos é a célula 114 (distrito de Chemba). No Quadro 5.1 indicam-se os valores da precipitação anual em cada uma das células seleccionadas para análise do regime hidrológico.

Quadro 5.1 – Precipitação anual nas células 60, 63, 73, 107, 114 e 148

Ano	Precipitação (mm)					
	CEL60 (Caia)	CEL63 (Maringue)	CEL73 (Mopeia)	CEL107 (Morrumbala)	CEL114 (Chemba)	CEL148 (Mutarara)
2006	598	711	939	1212	540	559
2007	1206	863	1329	1314	826	927
2008	898	806	978	1209	713	741

Ano	Precipitação (mm)					
	CEL60 (Caia)	CEL63 (Maringue)	CEL73 (Mopeia)	CEL107 (Morrumbala)	CEL114 (Chemba)	CEL148 (Mutarara)
2009	804	762	1122	1149	721	806
2010	746	710	794	890	651	709
2011	608	589	948	1107	590	615
2012	875	522	878	935	622	409

As células apresentam também diferenças importantes quanto ao uso e coberto vegetal (Quadro 5.2). A floresta decídua é classe dominante na célula 72 (distrito de Mopeia) onde representa 64% da superfície total da célula. Nas células 107 (Morrumbala) e Célula 148 (Mutarara), a floresta decídua assume também uma importância significativa, ocupando 27% e 19% da superfície total, respectivamente.

O coberto vegetal dominante na célula 114 situada no distrito de Chemba é a floresta aberta (semi-) decídua que representa 71% da superfície total da célula.

No conjunto das células seleccionadas a agricultura assume expressão nas células 107 (15% da área total) e célula 73 (1% da área total).

Quadro 5.2 – Uso e coberto da terra das células 60, 63, 73, 107, 114 e 148

Classe de uso e cobertura da terra	CEL60 (Caia)	CEL63 (Maringue)	CEL73 (Mopeia)	CEL107 (Morrumbala)	CEL114 (Chemba)	CEL148 (Mutarara)
Agricultura itinerante (fracção da área agrícola dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta)		10%	5%	7%	3%	
Campos cultivados	5%		10%	15%	0.5%	
Floresta decídua	4%	7%	64%	27%	6%	19%
Floresta sempre verde	1%	2%		1%	9%	8%
Floresta fechada a aberta (fracção da área florestal dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta)		22%	13%	17%	7%	
Pradaria	8%		0%		0%	11%
Áreas arbustivas	41%	9%			2%	22%
Matagal (2 a 5 m)		14%	1%	1%	0.1%	
Floresta aberta (Semi-) Decídua (15-65% cobertura)	29%	35%	7%	30%	71%	18%
Vegetação herbácea regularmente inundada	12%					11%
Arbustos em áreas regularmente inundadas	1%	1%	1%	1%	2%	11%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Nas Figuras seguintes apresentam-se as séries temporais simuladas das principais componentes do balanço de água para 6 células consideradas.

O regime hidrológico simulado em cada uma das células reflecte bem as diferenças observadas quer ao nível da precipitação quer ao nível do uso e cobertura da terra.

A evapotranspiração é significativamente maior nas células 107 (Morrumbala) e 73 (Mopeia), principalmente durante a estação seca. Nestas duas células os valores mínimos de evapotranspiração (cerca de 10 mm mês⁻¹) ocorrem durante a estação seca do ano de 2010 (Figura 5.5 e Figura 5.7), que foi o ano mais seco da série simulada. Nas outras células a evapotranspiração desce frequentemente abaixo 5 mm mês⁻¹ na estação seca.

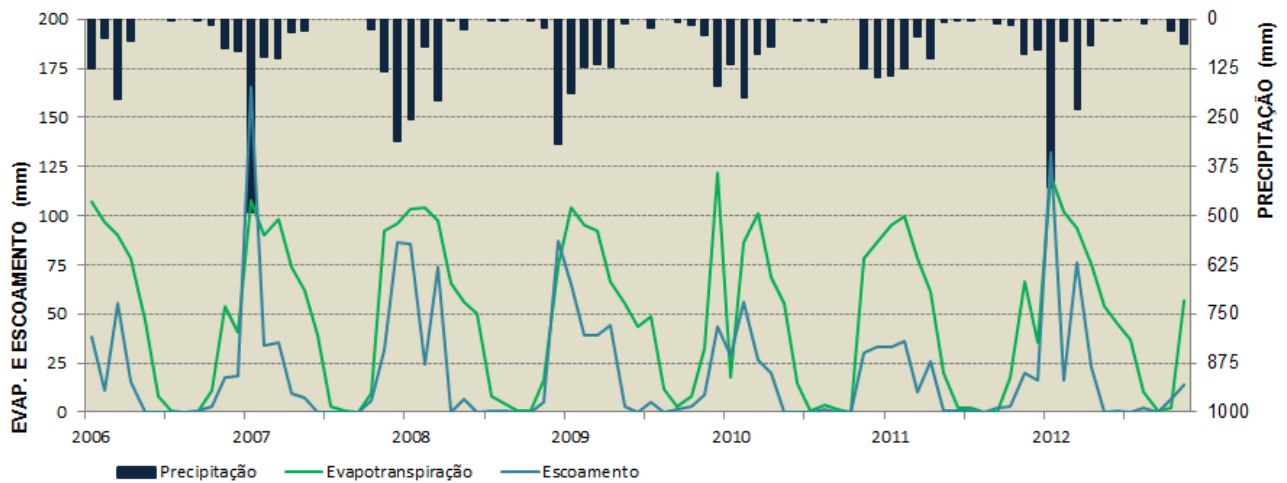


Figura 5.1 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 60 (Distrito de Caia)

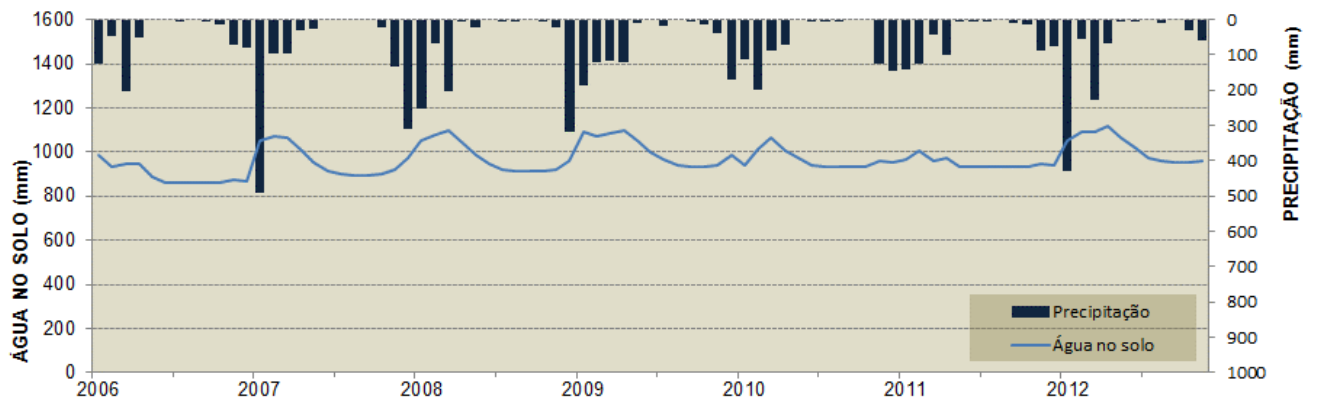


Figura 5.2 – Série mensal simulada da água no solo na célula 60 (Distrito de Caia)

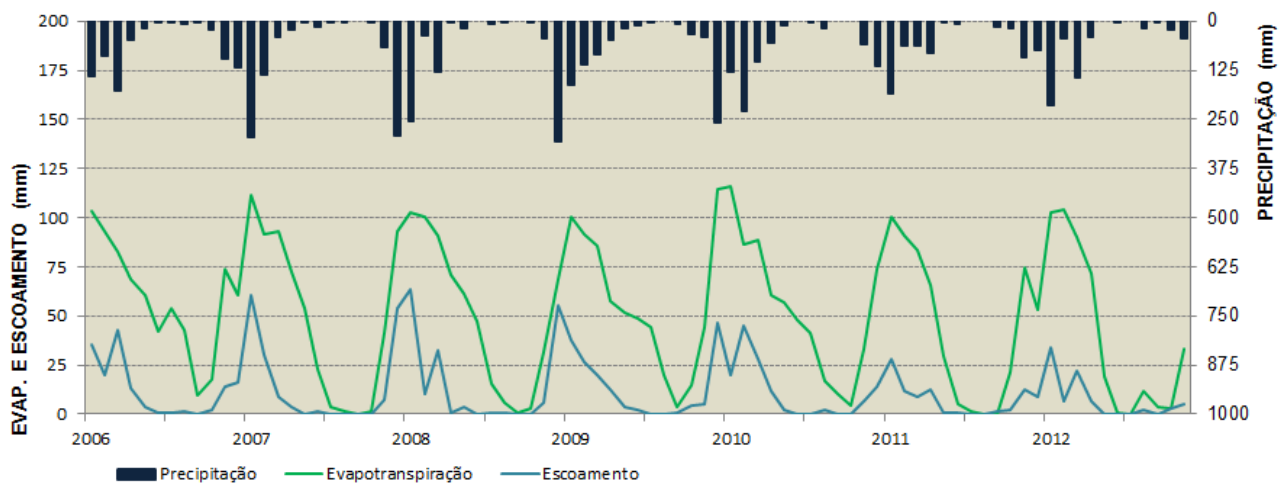


Figura 5.3 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 63 (Distrito de Maringue)

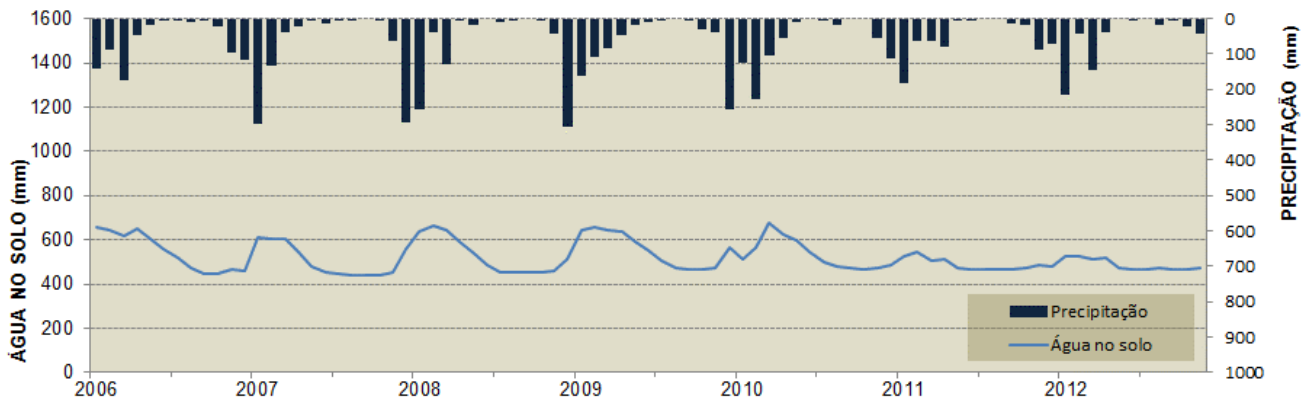


Figura 5.4 – Série mensal simulada da água no solo na célula 63 (Distrito de Maringue)

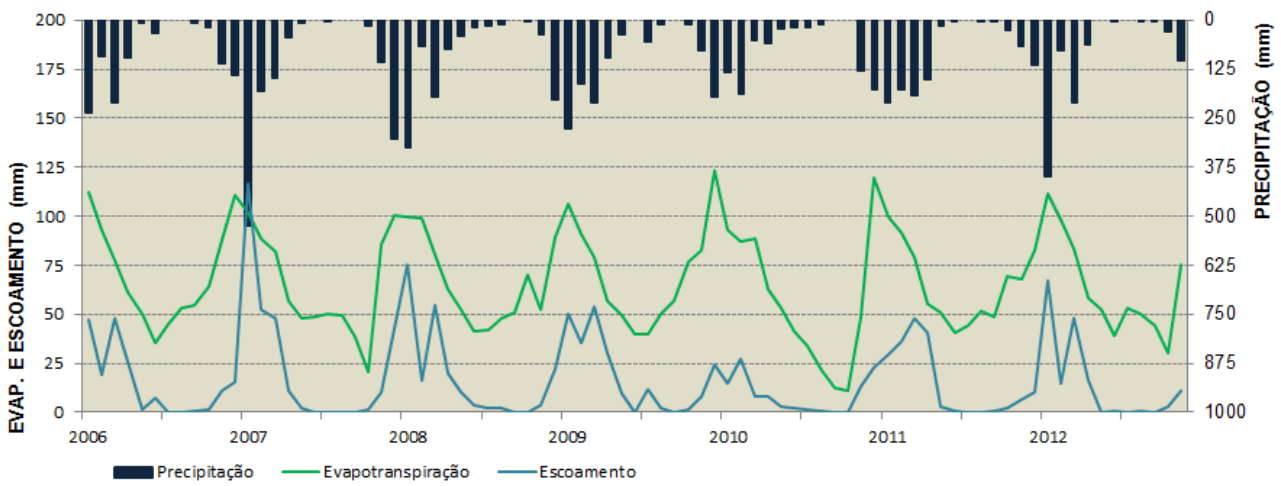


Figura 5.5 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 73 (Distrito de Mopeia)

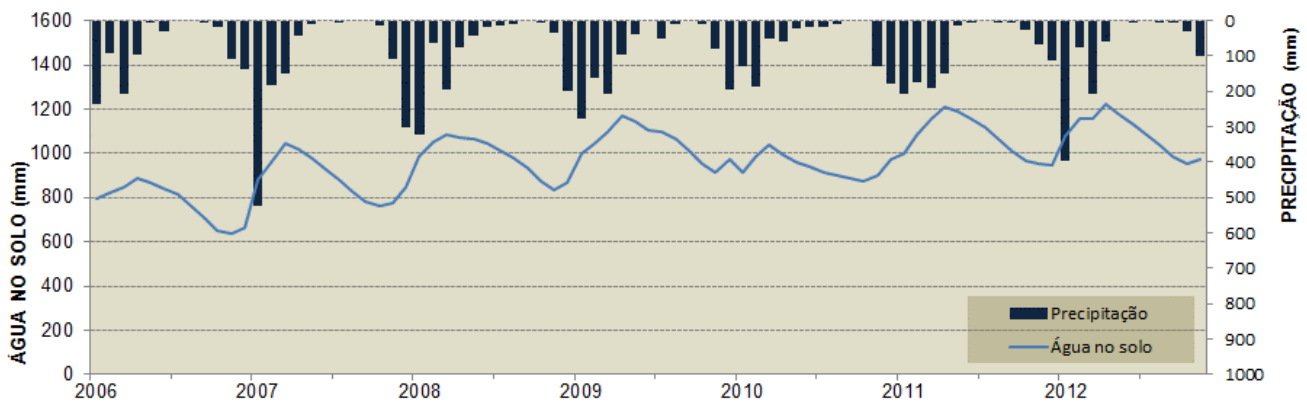


Figura 5.6 – Série mensal simulada da água no solo na célula 73 (Distrito de Mopeia)

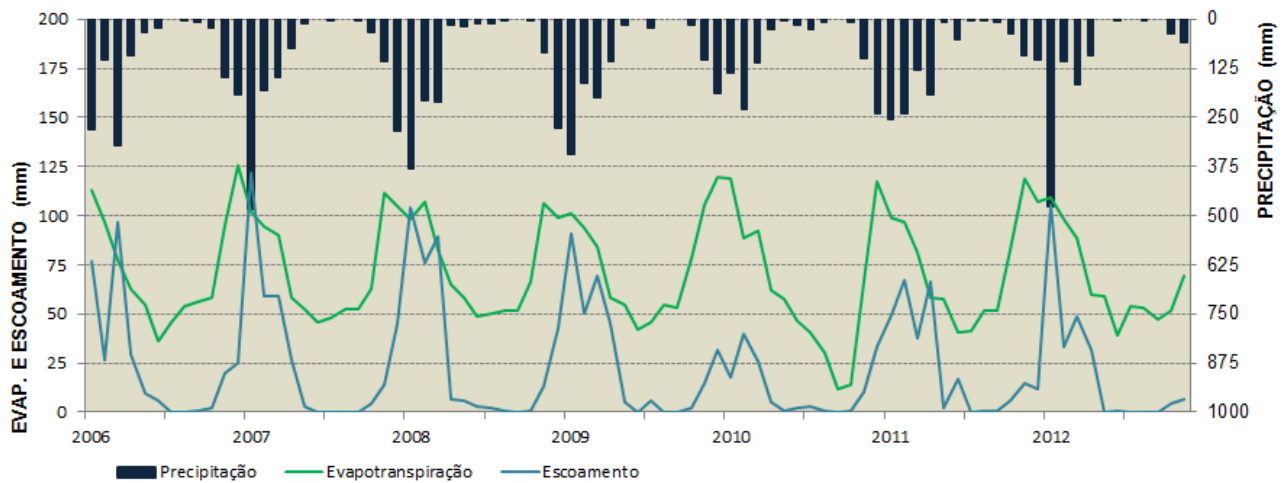


Figura 5.7 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 107 (Distrito de Morrumbala)

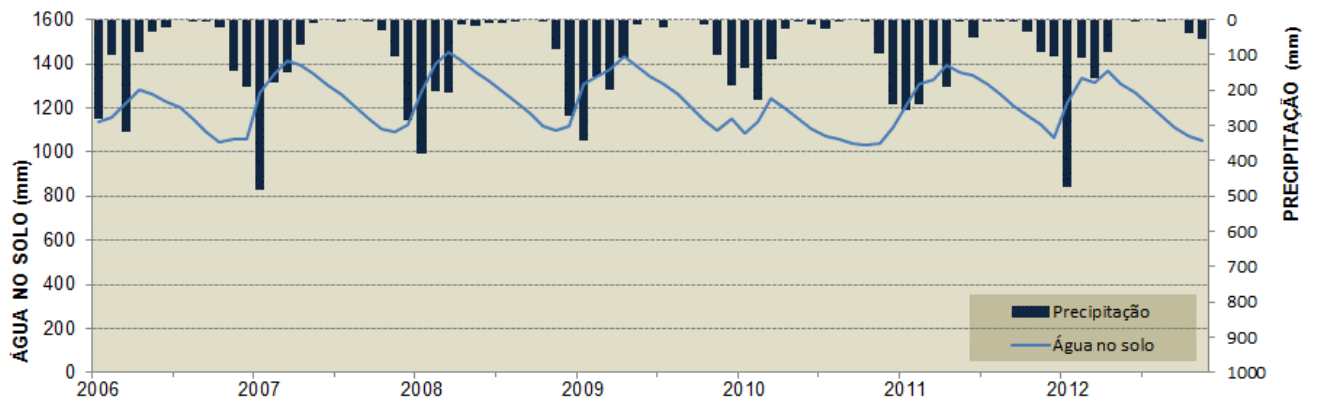


Figura 5.8 – Série mensal simulada da água no solo na célula 107 (Distrito de Morrumbala)

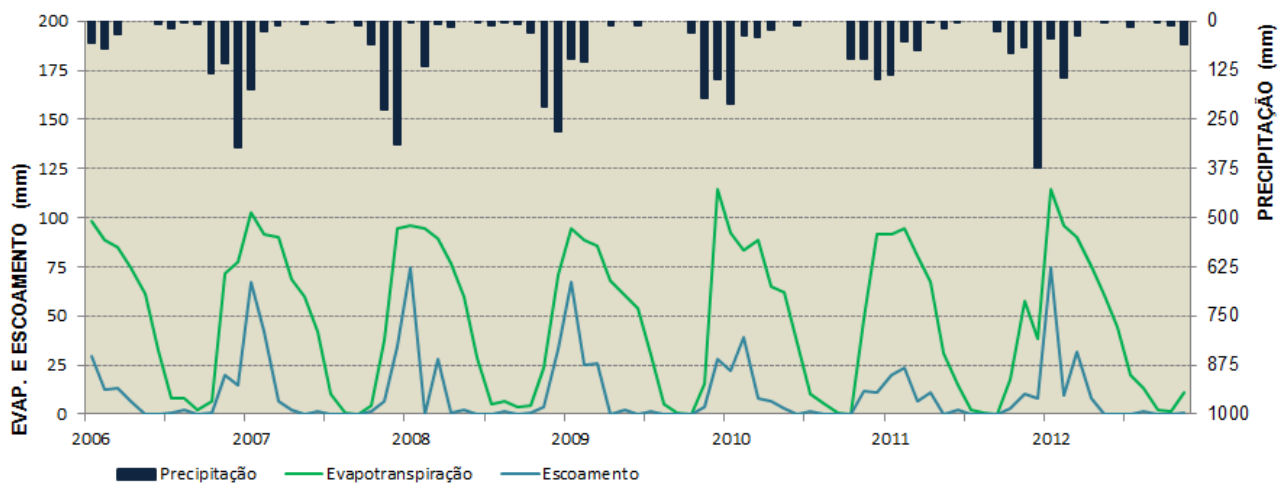


Figura 5.9 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 114 (Distrito de Chemba)

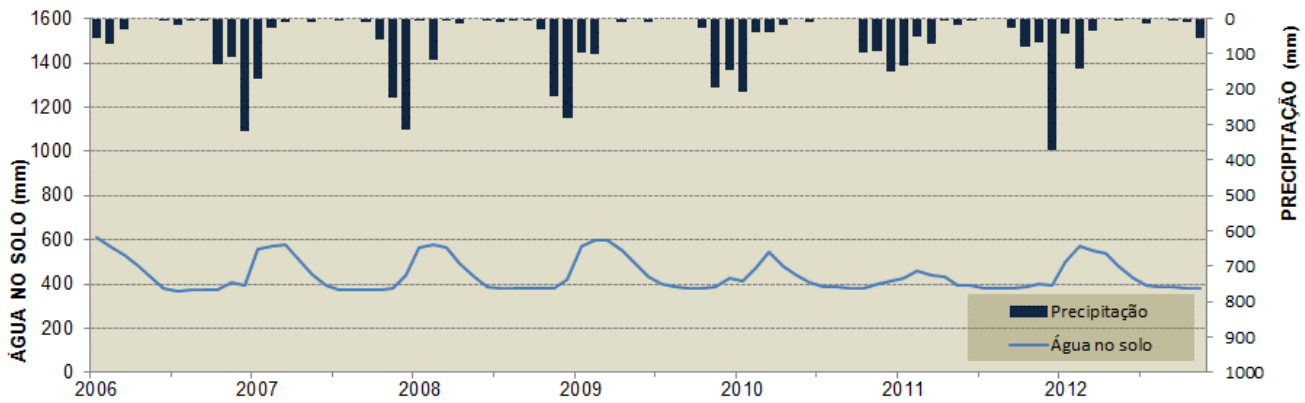


Figura 5.10 – Série mensal simulada da água no solo na célula 114 (Distrito de Chemba)

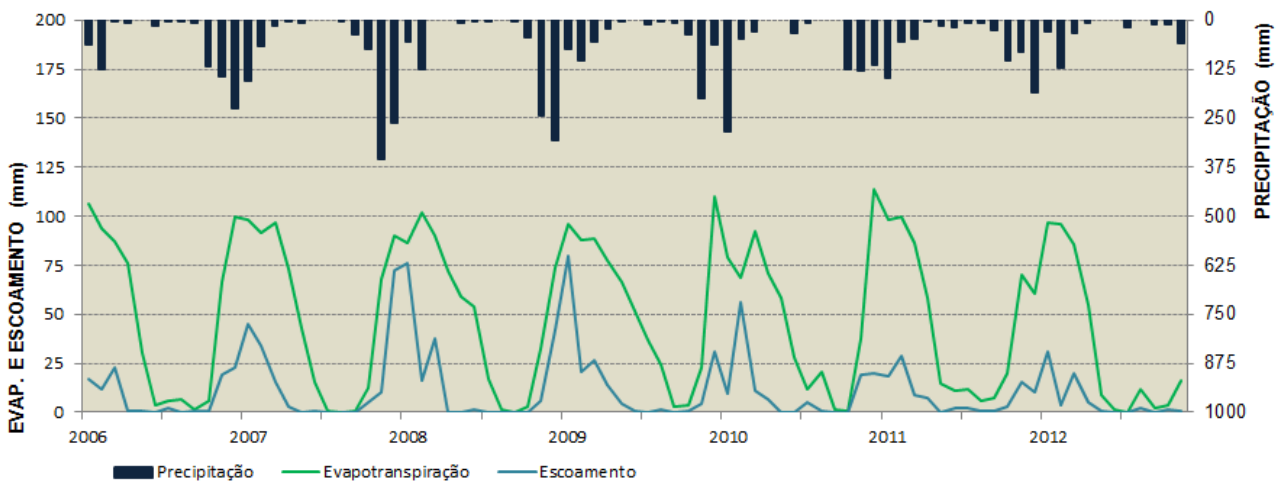


Figura 5.11 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 148 (Distrito de Mutarara)

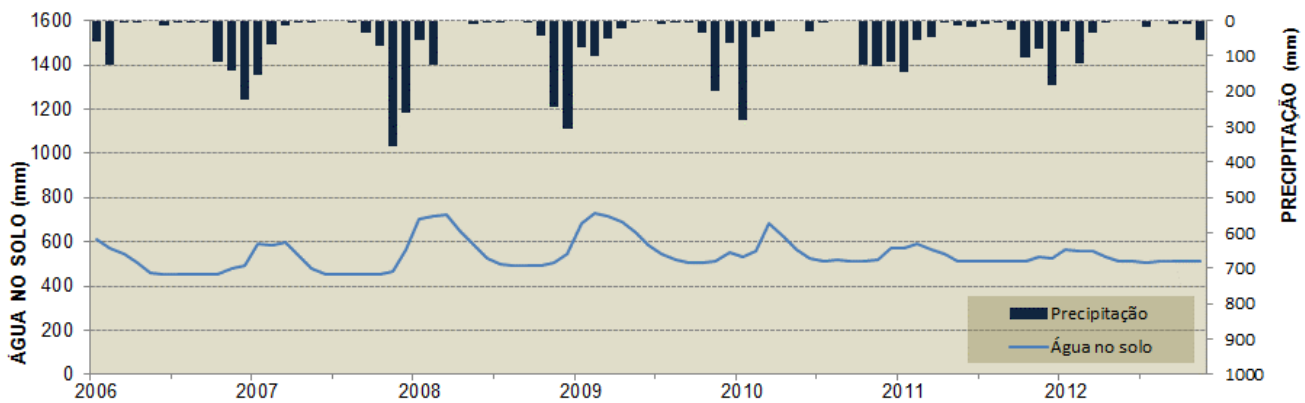


Figura 5.12 – Série mensal simulada da água no solo na célula 148 (Distrito de Mutara)

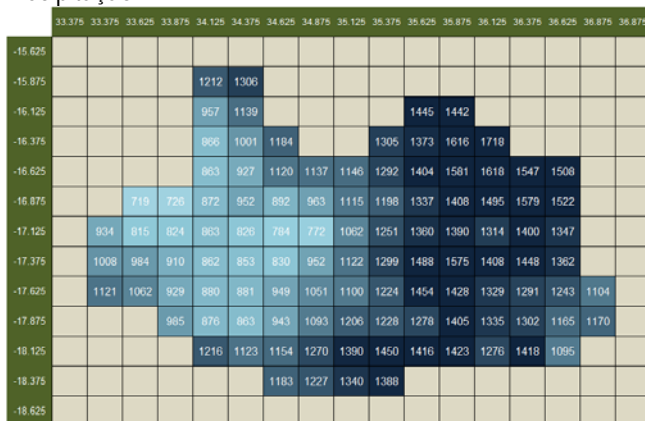
Os maiores valores da evapotranspiração simulados nas células 73 e 107 são consequência da maior quantidade de água disponível no solo (Figura 5.6 e Figura 5.8). O que explica também as diferenças encontradas ao nível do uso e coberto da terra. De facto, a floresta densa existente nas células 73 e 107 é parcialmente substituída pela floresta aberta e/ou pela floresta fechada a aberta nas outras células.

A análise das Figuras mostra também que o escoamento gerado nas células 170, 73 e 60 é significativamente superior ao gerado nas células 63, 114 e 148. O menor volume anual de escoamento simulado é quase sempre na célula 114 (no distrito Chemba) e 148 (no distrito de Mutarara).

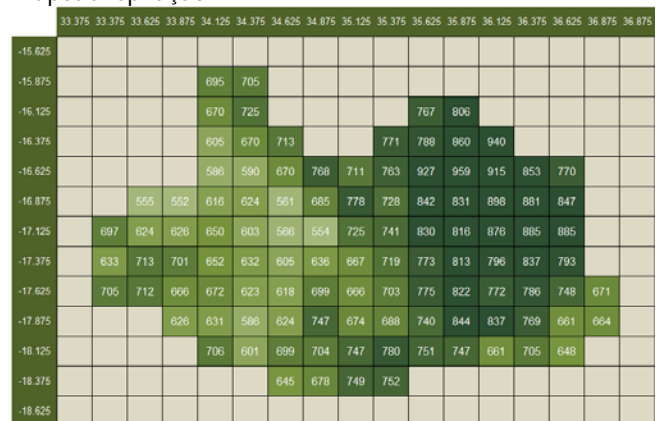
Na Figura 5.13 e na Figura 5.14 apresenta-se os valores anuais da precipitação, evapotranspiração e do escoamento total para os anos de 2007 e 2010. Estas ilustram bem as diferenças espaciais no regime hidrológico do Baixo Zambeze.

Independentemente da variabilidade espacial dos parâmetros hidráulicos do solo e dos tipos de vegetação, é a distribuição da precipitação na área de estudo que imprime um regime hidrológico diferenciado entre a margem direita e a margem esquerda do Zambeze.

Precipitação



Evapotranspiração



Escoamento total

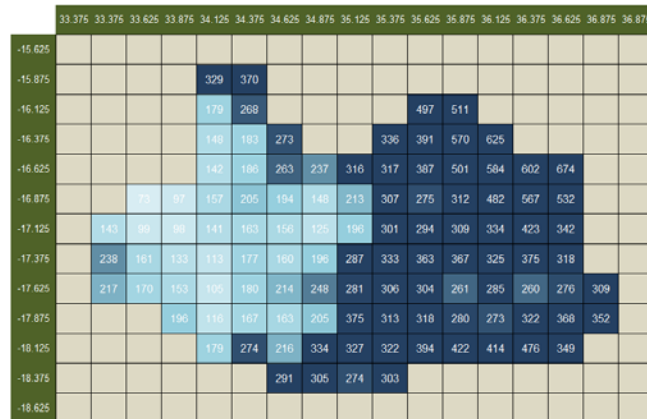
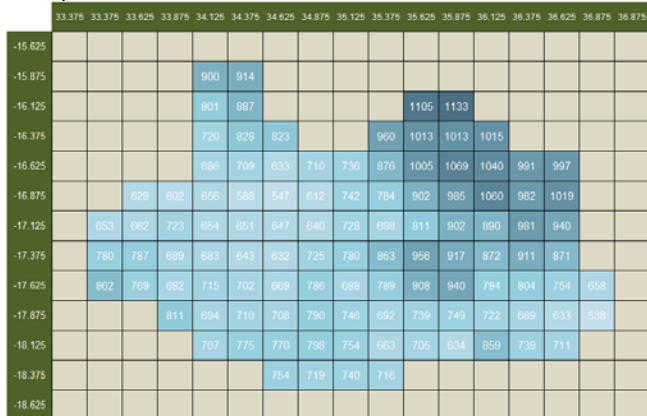
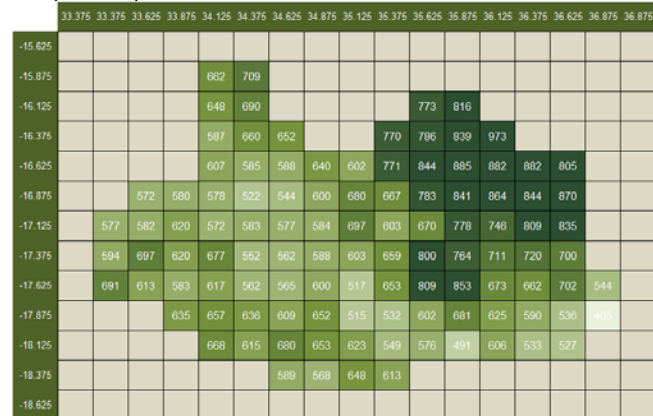


Figura 5.13 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2007

Precipitação



Evapotranspiração



Escoamento total

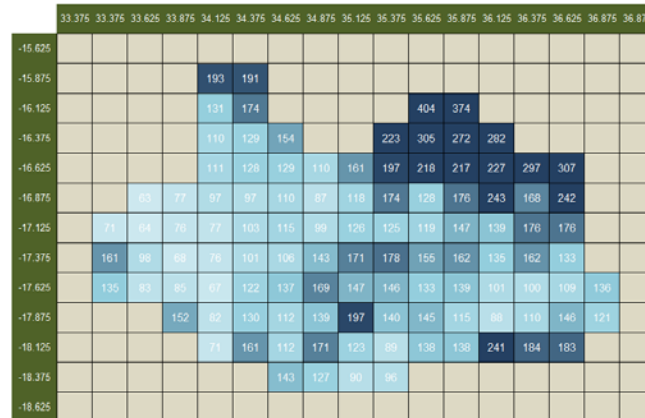


Figura 5.14 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2010

5.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COBERTO VEGETAL NO REGIME HIDROLÓGICO

De modo a melhor compreender o efeito do tipo de coberto vegetal no regime hidrológico procedeu-se à simulação das células 107 (no distrito de Morrumbala) e 114 (no distrito de Chemba) assumindo que toda a superfície das células é ocupada por um único tipo de vegetação. As classes de vegetação consideradas nesta análise foram as seguintes:

- Floresta densa decídua;
- Agricultura;
- Área arbustivas; e
- Matagal.

As duas células consideradas para esta análise estão à mesma latitude, apresentando diferenças significativas no que se refere à precipitação (Quadro 5.1). Na Figura 5.15 e na Figura 5.16 apresentam-se as séries mensais simuladas da evapotranspiração nas células 107 e 114, respectivamente. Estas Figuras mostram que os valores máximos da evapotranspiração são simulados para o uso agrícola durante a estação húmida, que corresponde á estação de crescimento. Quando a água no solo não limita a evapotranspiração na estação seca (caso da célula 107, Figura 5.15 e Figura 5.17), a evapotranspiração das culturas é claramente inferior à das florestas, das áreas arbustivas e matagal. Efectivamente, o índice de área foliar das culturas na estação seca é inferior a qualquer um dos outros cobertos.

Quando a água no solo durante a estação seca limita evapotranspiração (caso da célula 114, Figura 5.18), verifica-se que os valores simulados da evapotranspiração são da mesma ordem de grandeza para todos os tipos de vegetação (Figura 5.16).

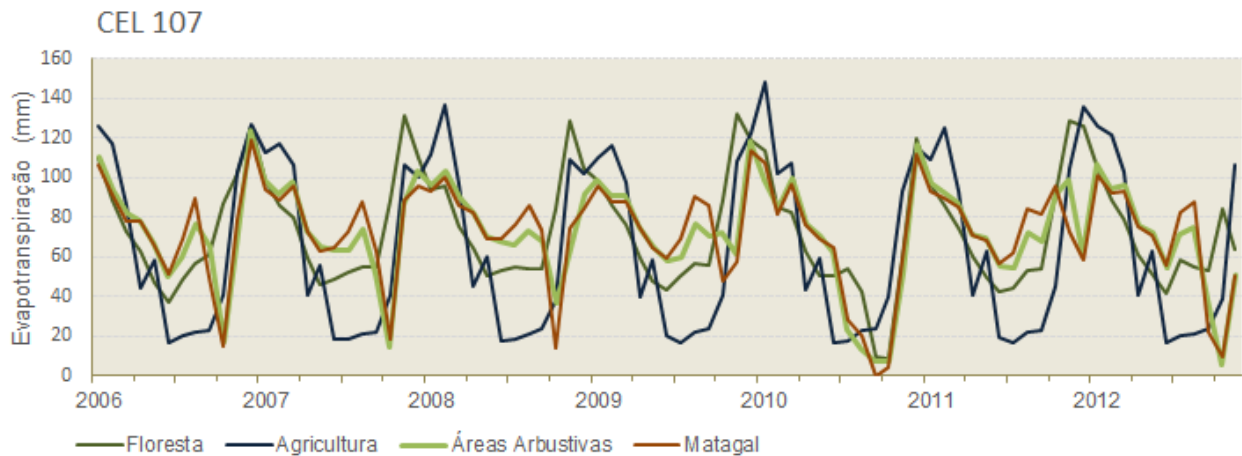


Figura 5.15 - Séries temporais de evapotranspiração simuladas na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação

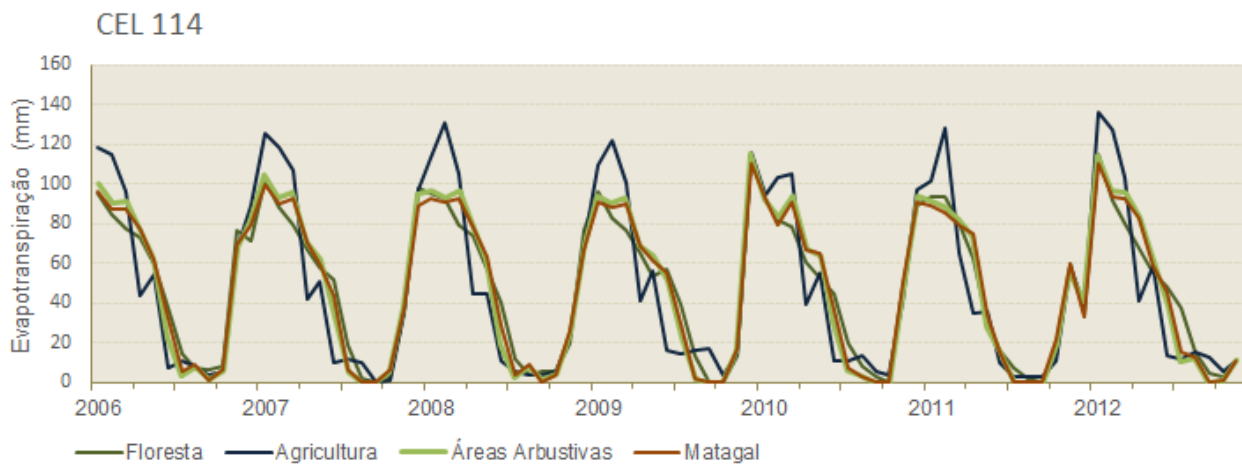


Figura 5.16 - Séries temporais de evapotranspiração simuladas na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação

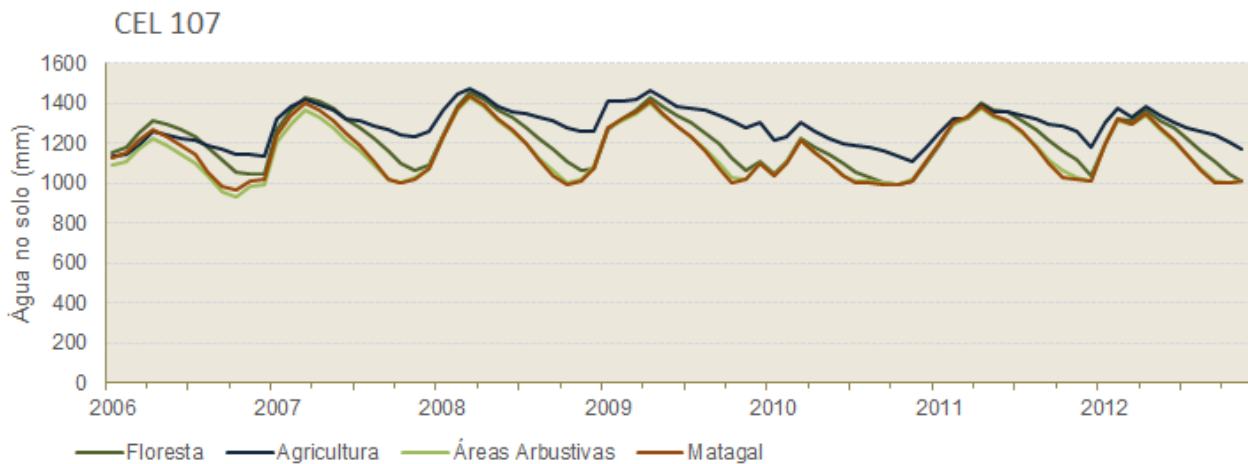


Figura 5.17 - Séries temporais de água no solo simuladas na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação

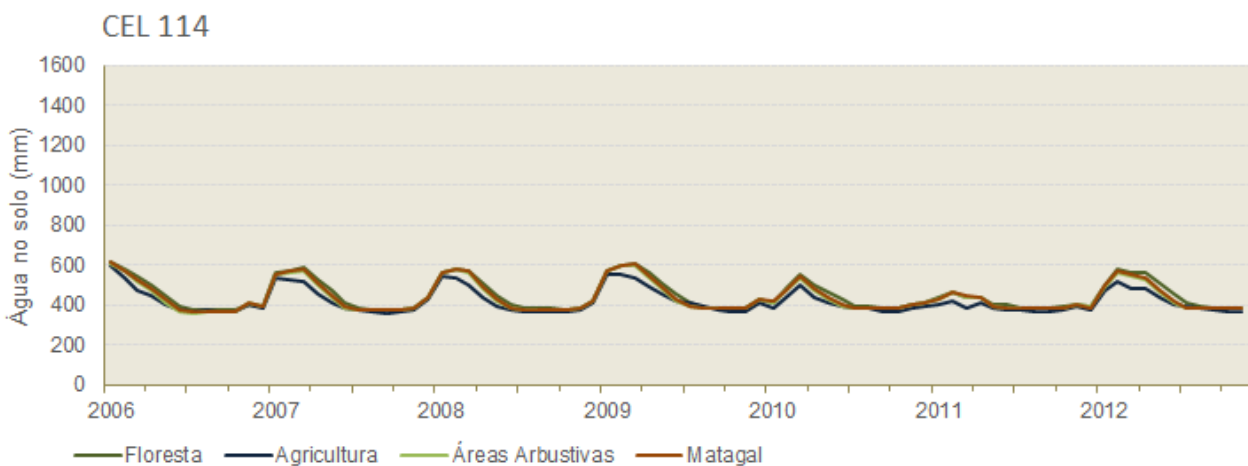


Figura 5.18 - Séries temporais de água no solo simuladas na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação

As séries mensais de escoamento simuladas para cada um dos tipos de vegetação nas células 107 e 107 são apresentadas na Figura 5.19 e Figura 5.20. Enquanto na célula 107, os caudais máximos simulados para o uso agrícola são claramente superiores aos simulados para floresta, áreas arbustivas e matagal, na célula 114 (Figura 5.19) não verificam diferenças significativas nos hidrogramas simulados para cada um dos tipos de vegetação (Figura 5.20).

Esta diferença entre as células 107 e 114 é explicada pela quantidade de água interceptada e armazenada pela vegetação. A quantidade de água interceptada e armazenada pela floresta é sempre superior a qualquer um dos outros tipos de vegetação, sendo seguida por ordem decrescente pelo matagal e áreas arbustivas. A agricultura é tipo de uso com menor capacidade de interceptação e armazenamento. Quando a precipitação é baixa (caso da célula 114), as diferenças da quantidade de água interceptada/armazenada entre os diferentes tipos de vegetação atenuam-se e o escoamento gerado tende a ser da mesma ordem de grandeza.

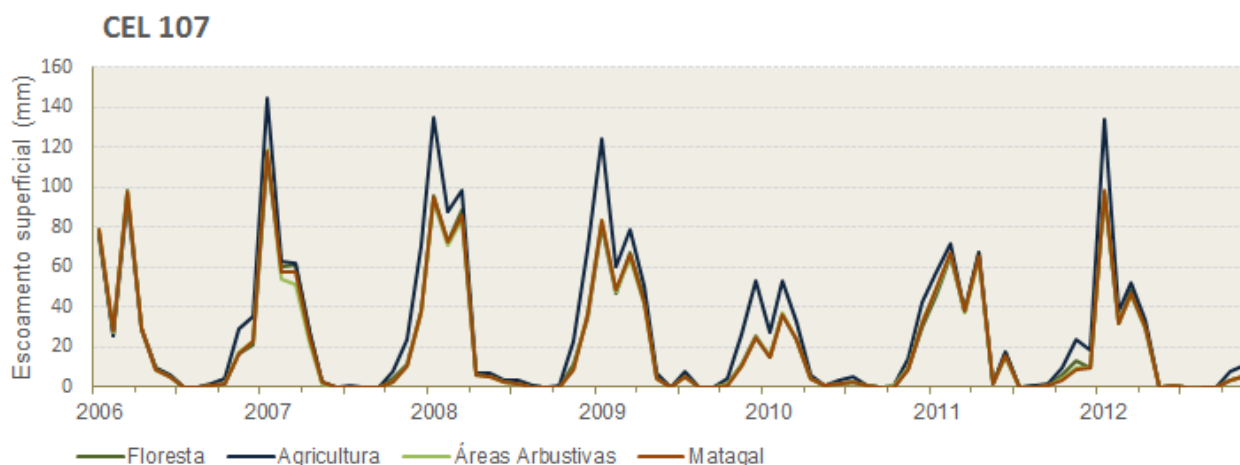


Figura 5.19 - Séries temporais de escoamento superficial simuladas na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação

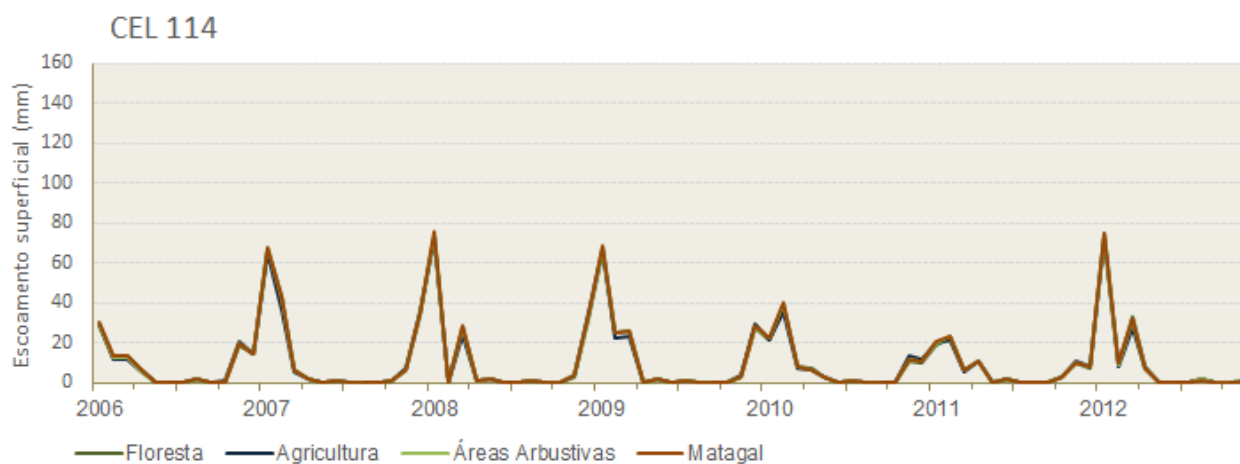


Figura 5.20 - Séries temporais de escoamento superficial simuladas na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação

5.4 RESPOSTA HIDROLÓGICA AOS CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DA TERRA

Seguindo o preconizado nos Termos de Referência, foram definidos cenários de uso da terra cujas implicações no regime hidrológico se procuram identificar. A agricultura é reconhecida como fundamental para o desenvolvimento sócio-económico da região do Baixo Zambeze, o que se tem reflectido nos vários estudos que tem sido promovidos em torno da agricultura (Mungambe *et al.*, 2009).

Os dados obtidos junto dos Distritos, nomeadamente nos Planos de Desenvolvimento, mostram que na última década verifica-se uma tendência de crescimento da área agrícola, que passou de cerca de 5%, no início da década, para cerca de 9 a 10% da área total de estudo.

Por outro lado, a análise comparativa do coberto actual com os dados do mapa da cobertura vegetal segundo o Inventário Florestal Nacional (Marzoli, 2007), evidencia para além do crescimento da área agrícola, um aumento significativo das classes arbustivas (de cerca de 4% para 12% da área total) e matagal (de cerca de 0% para 5% da área total) e uma diminuição da área de floresta densa (de cerca de 27% para 16% da área total). Embora as cartas de coberto possuam

uma escala diferente que poderá justificar algumas discrepâncias, pensa-se que as queimadas são a principal explicação para as diferenças significativas entre as cartas actuais de uso e coberto da terra e as cartas elaboradas aquando do Inventário Florestal Nacional em 2004-2005.

Com base nesta informação foram definidos três cenários (Quadro 5.3). Os cenários 01 e 02 reflectem as tendências actuais de alteração do uso e cobertura da terra, isto é um crescimento da área agrícola, das áreas arbustivas e do matagal e uma diminuição da floresta densa decídua e da floresta aberta (semi-) decídua (15-65% da cobertura). O cenário 03 corresponde à ocupação do solo segundo o Inventário Florestal Nacional, onde as classes florestais dominavam em todo o Baixo Zambeze.

Os três cenários de uso e cobertura da terra identificados e o cenário base foram modelados com o mesmo conjunto de dados de entrada diferindo apenas quanto à representatividade de cada uma das classes (Quadro 5.3).

Quadro 5.3 – Representatividade das classes de uso e cobertura em % dos cenários

Classes de uso de cobertura da terra	Cenário Base	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
Fracção da área agrícola dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta	2,7%	2,7%	2,7%	4,3%
Campos cultivados	9,0%	12,4%	17,2%	4,2%
Cultivos Arbóreos/Plantações Florestais	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
Floresta densa decídua	16,3%	10,0%	10,0%	27,3%
Floresta densa sempre verde	4,0%	4,0%	4,0%	5,2%
Fracção da área florestal dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta	5,5%	5,6%	5,6%	4,7%
Pradaria	10,0%	10,2%	10,3%	12,5%
Áreas arbustivas	11,9%	12,9%	14,9%	4,2%
Matagal (2 a 5 m)	5,5%	7,6%	10,5%	0,0%
Floresta aberta (Semi-) Decídua (15-65% cobertura)	25,2%	24,6%	14,8%	25,1%
Floresta aberta sempre verde (15-65% cobertura)	2,4%	2,4%	2,4%	2,7%
Vegetação herbácea regularmente inundada	2,7%	2,8%	2,8%	5,0%
Arbustos em áreas regularmente inundadas	3,4%	3,3%	3,3%	3,7%
Floresta aberta em áreas regularmente inundadas (15-65% de cobertura)	1,3%	1,3%	1,3%	1,1%
Total	100%	100%	100%	100%

A resposta hidrológica às alterações do uso e cobertura da terra foram avaliadas em quatro secções da área de estudo: a montante das confluências dos rios Zangué e Sangadeze com rio Zambeze (CEL60 e CEL96, respectivamente), no rio Zambeze a jusante da confluência do rio Zangué (CEL59) e na secção final do rio Cuácua (CEL53).

A área drenada pelo rio Sangadeze distribui-se pelos distritos de Mutarara, Maringue e Chemba e a área drenada pelo rio Zangué concentra-se nos distritos de Maringue e Caia. O hidrograma na célula 59 resulta da propagação do escoamento de todas as células da área de estudo com excepção da bacia de drenagem do rio Cuácua. A bacia hidrográfica do Cuácua reparte-se pelos distritos de Morrumbala e Mopeia.

A avaliação foi feita em termos dos caudais, da evapotranspiração e do escoamento total gerados nas células cujo escoamento gerado conflui para as células 60, 96, 59, e 53 (Figura 5.21).

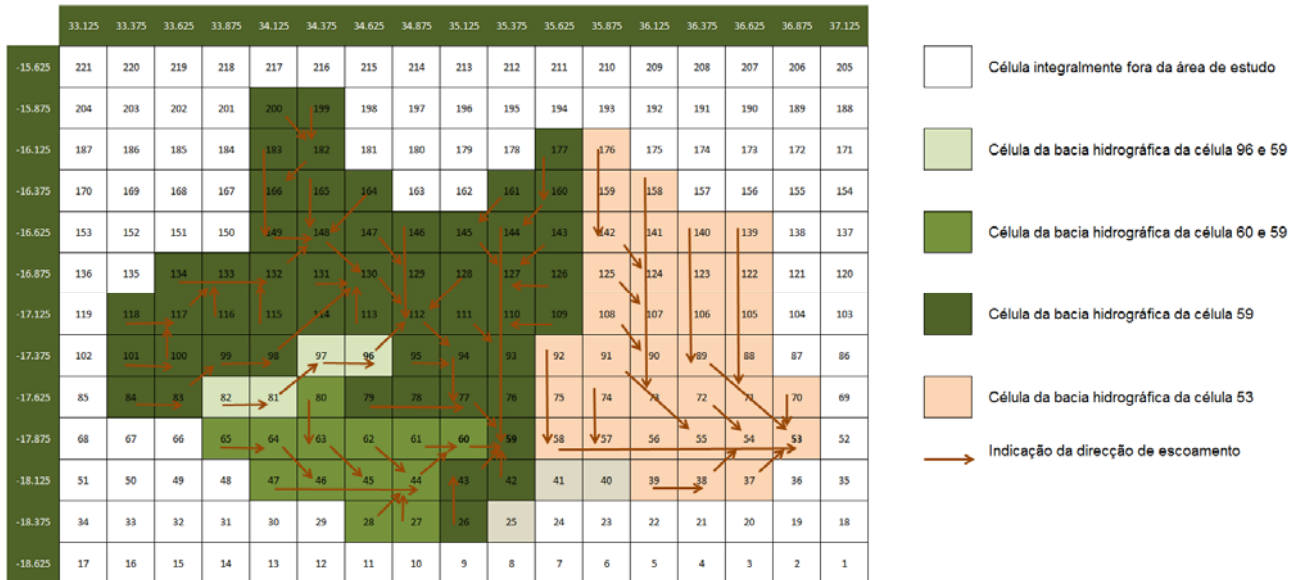


Figura 5.21 - Bacias hidrográficas das células 96, 60, 59 e 53

Na modelação dos impactos decorrentes das mudanças do uso e cobertura de terra não se entrou com os caudais em Lupata e em Chilomo. A inclusão destas duas condições fronteira iria mascarar quaisquer alterações no escoamento devidas às alterações do uso da terra na área de estudo.

No Quadro 5.4 apresentam-se os resultados obtidos. Embora a área agrícola tenha como consequência um aumento do escoamento gerado como se viu no Capítulo 5.2, os resultados do Quadro 5.4 mostram que o aumento da área agrícola preconizados nos cenários 01 e 02 tem um efeito praticamente nulo no regime hidrológico do Baixo Zambeze.

Os resultados da modelação hidrológica dos cenários do uso e cobertura da terra mostram que o cenário 01 e 02 só se traduzem numa ligeira diminuição da evapotranspiração anual na margem esquerda do rio Zambeze. A ocupação de área florestal por campos cultivados assim como por área arbustivas e matagal, tem como efeito uma exígua diminuição da evapotranspiração na estação húmida e na estação seca. A diminuição da evapotranspiração na estação seca tem significado, apenas, nas células da grelha onde água no solo não constitui um factor limitante para evapotranspiração (Figura 5.22).

No que se refere às séries de escoamento simulados ao nível das células constata-se que os cenários 01 e 02 conduzem a um pequeno aumento dos picos máximos (Figura 5.23) nas células onde a precipitação é elevada, como é o caso da célula 107 (Quadro 5.1).

Nas células onde a precipitação é baixa (caso da célula 114), os vários cenários não produzem diferenças ao nível do escoamento gerado (Figura 5.23).

Quadro 5.4 – Caudal médio, máximo e mínimo simulados para diferentes cenários de uso e cobertura da terra

Cenários de uso e cobertura da terra		Ciclo hidrológico (2006-2011)						
		Caudal médio (m³/s)	Caudal máximo (m³/s)	Caudal mínimo (m³/s)	Precipitação média anual (mm)	Evapotranspiração média anual (mm)	Escoamento médio anual (mm)	Razão de escoamento
CEL96 (rio Sangadeze)	Cenário base	9,9	66,3	0,0	683	598	104	0,15
	Cenário 01	9,9	66,3	0,0		598	104	0,15
	Cenário 02	9,9	66,2	0,0		599	103	0,15
	Cenário 03	9,9	66,2	0,0		598	103	0,15
CEL60 (rio Zangué)	Cenário base	50,0	305,4	0,3	815	652	171	0,21
	Cenário 01	50,0	305,6	0,3		652	171	0,21
	Cenário 02	50,0	305,6	0,4		653	171	0,21
	Cenário 03	49,7	303,9	0,2		654	170	0,21
CEL59 (rio Zambeze)	Cenário base	188,5	1149,7	1,2	808	652	163	0,20
	Cenário 01	188,6	1150,7	1,3		652	163	0,20
	Cenário 02	188,6	1151,2	1,5		653	163	0,20
	Cenário 03	188,2	1150,0	1,1		653	162	0,20
CEL53 (rio Cuácua)	Cenário base	135,2	891,2	2,8	1077	801	263	0,24
	Cenário 01	136,2	901,6	3,0		799	265	0,25
	Cenário 02	137,1	906,1	3,1		797	267	0,25
	Cenário 03	135,4	884,1	2,3		799	265	0,25

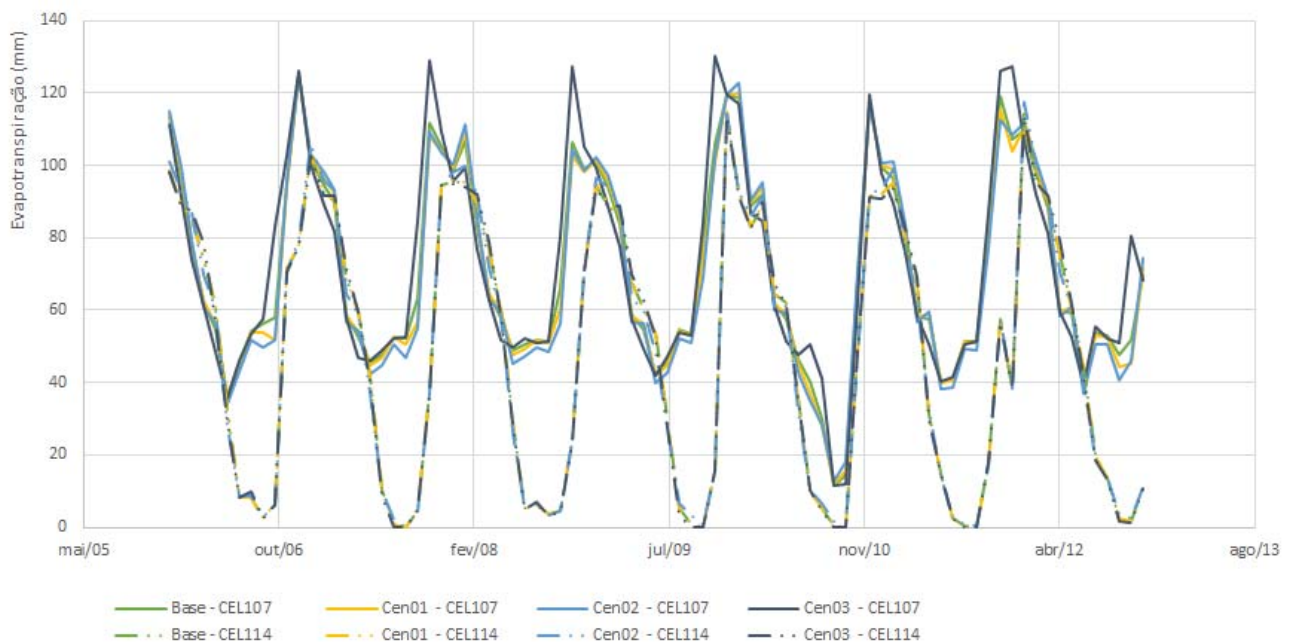


Figura 5.22 – Evapotranspiração simulada para o cenário base, cenário 01, cenário 02 e cenário 03

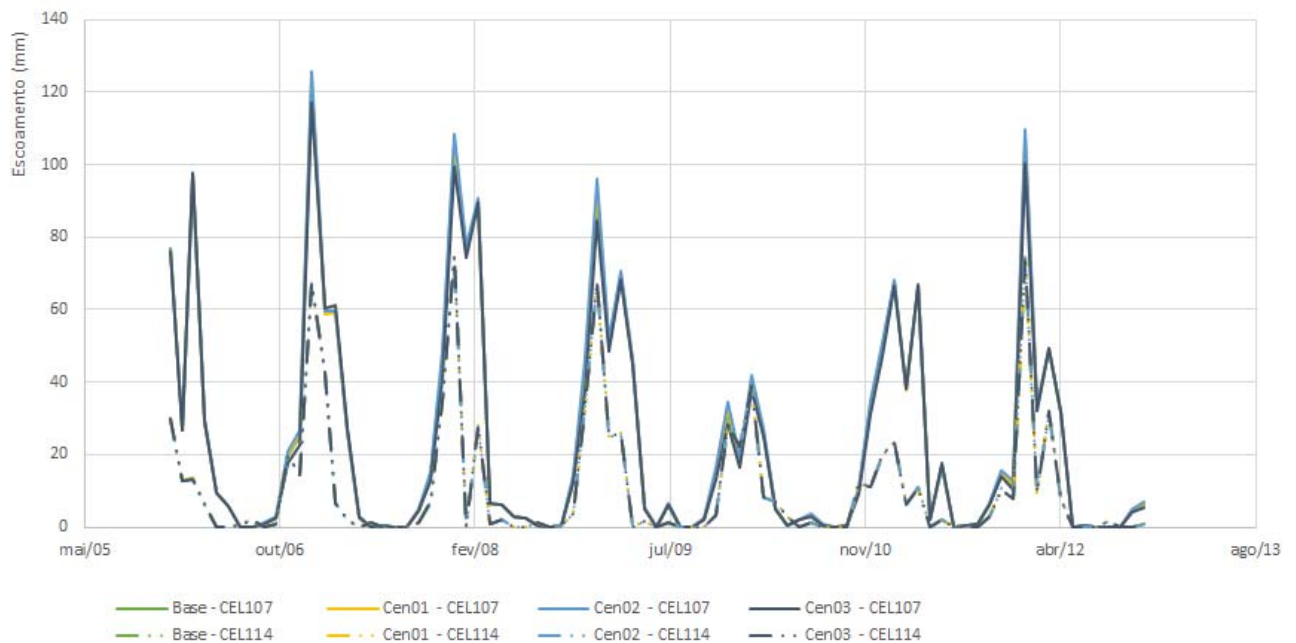


Figura 5.23 – Escoamento simulado para o cenário base, cenário 01, cenário 02 e cenário 03

O cenário 01 e o cenário 02 conduzem a um ligeiro aumento dos caudais máximos gerados na foz do rio Cuácua (CEL53) assim como no rio Zambeze na célula 59. As alterações do uso e cobertura da terra não produziram qualquer modificação no hidrograma gerado para as células 96 (rio Sangadeze) e 60 (rio Zangué).

A análise dos dados do Quadro 5.4 mostra ainda que os cenários 01 e 02 tendem a conduzir a ligeiro aumento dos caudais mínimos em consequência da diminuição da evapotranspiração que se faz sentir com mais significado na estação seca.

No cenário 03 a área florestal em toda a área de estudo é significativamente maior do que no cenário base o que se traduziu num aumento da evapotranspiração quer na estação húmida quer na estação seca e numa diminuição do escoamento em toda a área de estudo que se traduz numa pequena diminuição dos caudais máximos.

5.5 CONCLUSÕES

O modelo VIC depois de calibrado permitiu modelar com suficiente exactidão o processo hidrológico para as condições actuais de uso e coberto da terra. O desenvolvimento sócio-económico da região do Baixo Zambeze e em conjunto com a prática das queimadas tem-se traduzido numa mudança do coberto vegetal onde se verifica uma tendência para a diminuição das áreas florestais e um aumento da área agrícola e das áreas arbustivas e mato.

A avaliação dos impactos no regime hidrológico decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra foi efectuada através da modelação do ciclo hidrológico com o modelo VIC cuja concepção permite a descrição do coberto vegetal. Todas as simulações foram feitas com o mesmo conjunto de dados de entrada fazendo variar unicamente as fracções de cada classe de coberto vegetal. A situação actual foi comparada com três cenários. Os cenários 01 e 02 traduzem um agravamento da redução da área florestal e um aumento das classes de campos agrícola, áreas arbustivas e mato. O cenário 03 procura representar a ocupação de há 10 anos atrás do Baixo Zambeze, onde a floresta densa decídua era classe predominante.

Os regimes hidrológicos simulados para os cenários 01 e 02 comparativamente com o cenário base caracterizam-se por uma pequena diminuição da evapotranspiração e por um ligeiro aumento dos valores mensais máximos de caudal nos anos de elevada pluviosidade. Este aumento dos caudais máximos é devido fundamentalmente à menor capacidade do reservatório do coberto vegetal. Durante a estação seca, as mudanças de coberto projectadas exprimem-se numa diminuição do índice de área foliar e consequentemente na diminuição da evapotranspiração que associada à menor profundidade de solo explorada pelas raízes resulta na extracção de menos água do solo. Verificando-se uma pequena tendência para o aumento dos caudais mínimos.

A análise aqui efectuada é feita com base em valores mensais, que não traduzem os caudais máximos instantâneos do regime hidrológico. É de esperar que as alterações de coberto vegetal dos cenários 01 e 02, que se traduzem numa diminuição da capacidade de intercepção do coberto vegetal, conduzam a incrementos superiores aos medidos nos caudais máximos instantâneos, embora o volume anual de escoamento gerado seja praticamente o mesmo do produzido no cenário base.

No cenário 03 observa-se a inversão dos impactos hidrológicos identificados nos cenários 01 e 02. O aumento generalizado da área florestal em toda a área de estudo tem como consequências directas uma diminuição dos caudais máximos e mínimos em resultado da menor produção de escoamento superficial e de base e um aumento da evapotranspiração.

6 BIBLIOGRAFIA

- Liang X. e Lettenmaier D.P., (1994), A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415-14428.
- Liang X., E.F. Wood, e D.P. Lettenmaier, (1996), Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification, *Global Planet Change*, 13(1-4), 195-206.
- Liechti C.T., Matosm J.P., Boillat J.L. e Schleiss A.J., (2012), Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. *Hydrology Earth System Sciences*, 16, 489-500.
- Lohmann D., Holube R.N. e Raschke, E., (1996), A large scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes. *Tellus*, 48A, 708-721.
- Lohmann D., Raschke E., Nijssen B. e Lettenmaier D.P., (1998a), Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrologiques Sciences Journal*, 43(1), 131-141.
- Lohmann D., Raschke E., Nijssen B., Lettenmaier D.P., (1998b), Regional scale hydrology: II. Application of the VIC-2L model to the Weser River, Germany. *Hydrologiques Sciences Journal*, 43(1), 143-158.
- Marzoli A., (2007), *Relatório do inventário florestal nacional. Direção Nacional de Terras e Florestas*. Ministério da Agricultura. Maputo, Moçambique.
- Molnar, P., (2011), *Calibration. Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Munguambe P., Chilundo M., e Massingue F., (2009), *Diagnóstico dos estudos e das iniciativas de desenvolvimento no vale do Zambeze. Análise dos Conhecimentos e da Estratégias: Recomendações para Pesquisa Aplicada nos Distritos de Caia, Mopeia, Morrumbala e Tambara*. Save de Children, Maputo, Moçambique, 2009.
- Nijssen B., Lettenmaier, D.P. Liang, X., Wetzel, S.W., e Wood, E.F., (1997), Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resour. Res.*, 33, 711-724.
- Raposo, J. (2012), SolosBaixoZambeze_VIC.accdb. Lisboa. 1 arquivo (8 192 kb).
- Raposo, J., (2013), Parâmetros Hidrológicos.xlsx. Lisboa. 1 arquivo (52 kb) recebido por email.
- RURAL CONSULT, IUCN e RMSI, (2011), Zoneamento Agro Ecológico Nacional. Relatório Técnico. Uso e Cobertura da Terra. Moçambique: Ministério da Agricultura.