

EFEITOS DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA VAZÃO DE RIOS: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA.

Giovanna Orletti Del Rey¹ & Antônio Cosme Del Rey²

Resumo – O conhecimento da inter-relação entre os fluxos superficial e subterrâneo de águas é de grande importância na gestão dos recursos hídricos disponíveis em uma região. A forma de conexão entre esses dois sistemas pode gerar impactos importantes como, por exemplo, o bombeamento intensivo de água subterrânea em uma área pode causar, a curto prazo, a redução drástica do fluxo superficial interrompendo a perenidade dos cursos d'água. Visando estimar o efeito desta influência, foi desenvolvida uma metodologia baseada em filtros estatísticos nos dados de vazão diária de cursos d'água que drenam uma bacia hidrográfica. Estes filtros possibilitam a estimativa da contribuição das várias fontes de alimentação da descarga superficial. Para testar a aplicabilidade desta metodologia, utilizaram-se dados dos rios da bacia hidrográfica *Barwon Downs Graben*, localizado na porção sudoeste do estado de Victoria, Austrália que dispõe de um grande acervo de informações que possibilitaram a comprovação dos resultados.

Abstract – Knowledge of the connection between surface water and groundwater is of great importance for the management of the available water resources in a determined region. The way of how these two systems are connected can lead to considerable impacts, for example, the short-term effect due to groundwater pumping causing river flow depletion. A methodology was developed to estimate this effect groundwater pumping. Statistical filters were used on the daily discharge data from rivers aiming to estimate the contribution of different sources. To test the applicability, the data from the Barwon Downs Graben water catchment were used, which is located in the southwestern part of the state of Victoria, Australia. This area has an important amount of technical information, which allowed the confirmation of the results.

Palavras-Chave – Efeito do bombeamento. Filtragem estatística. Gestão integrada.

¹Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900. Telefone: (61) 99999-8654. E-mail: giovannaodelrey@gmail.com

²Petrobrás EDIVIT. Av. Nossa Senhora da Penha, 1688, Vitória – ES, CEP: 29057-550. Telefone: (27) 3325-4502. E-mail: delrey@petrobras.com.br

1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento da inter-relação entre os fluxos superficial e subterrâneo de águas é de grande importância na gestão dos recursos hídricos disponíveis em uma região (Chen e Shu, 2002). A forma de conexão entre esses dois sistemas pode gerar impactos importantes como, por exemplo, o bombeamento intensivo de água subterrânea em uma área pode causar, a curto prazo, a redução drástica do fluxo superficial interrompendo a perenidade dos cursos d'água (Nyholm, et al., 2002). Um exemplo deste efeito foi observado no Rio *Boundary* onde havia a captação de água subterrânea através de poços localizados a aproximadamente 5 km do curso do rio (Evans, 2007). Esse estudo de caso visou analisar a depleção do Rio *Boundary* quando comparado com o fluxo do Rio *Love*, os quais estão localizados na mesma bacia hidrográfica.

A metodologia desenvolvida se baseia no fato de que os fluxos no aquífero e na superfície se relacionam e o seu equilíbrio é definido pela cota do nível freático. Se este se encontra acima do leito do rio, o aquífero vai alimentar o fluxo superficial. Caso contrário o rio alimentará o aquífero mantendo assim o equilíbrio do sistema (Fitts, 2002). A outra fonte de alimentação é a precipitação pluviométrica que pode ser infiltrada, evaporada ou escoada superficialmente. A definição de escoamento superficial é de fundamental importância para a análise dos dados obtidos. Este pode ser definido como o fluxo de água não infiltrada no solo que escoar pela superfície após um evento de chuva (Fitts, 2002).

O tipo de aquífero associado a bacia hidrográfica também é importante para análise dos efeitos do bombeamento no fluxo dos rios que a compõe. Um aquífero é não-confinado quando o nível freático é o seu limite superior, o que implica em uma reação rápida ao bombeamento. Por outro lado, um aquífero é classificado como confinado quando existe uma camada menos permeável sobrepondo as camadas do aquífero, também denominada aquitarde (Fitts, 2002). Neste caso, o efeito do bombeamento será a longo prazo (Evans, 2007).

Tóth (1963) definiu três tipos diferentes de sistema de circulação em um aquífero: local, intermediário e regional. Estes sistemas são controlados por barreiras subhorizontais e subverticais. Os sistemas locais são os que mais afetam o fluxo superficial uma vez que entrada e saída de água são controladas e condicionadas à topografia. Os sistemas intermediários fazem a conexão entre a circulação local de curto prazo e a regional, sendo afetados pelas variações significativas do relevo da bacia. As linhas de fluxo regional em um aquífero não-confinado não são afetadas por estas altas elevações topográficas.

A metodologia proposta se baseia nas definições apresentadas acima, sendo escolhidos filtros para definir a contribuição do escoamento superficial e dos sistemas local, intermediário e regional

na vazão dos cursos d'água. Estas informações possibilitaram verificar nas séries históricas o quanto o bombeamento afetou a alimentação desses rios.

2 - METODOLOGIA

2.1 – Processo de Filtragem Estatística

Esta filtragem visa isolar dos dados de vazão, flutuações que, por sua frequência e amplitude, podem estar relacionadas a diferentes fontes as quais colaboram com a composição do fluxo superficial. Nesta abordagem, assume-se que a vazão do rio seja composta pela contribuição do escoamento superficial e dos sistemas de circulação local, intermediário e regional. Pode-se então, através dessa filtragem estatística, se isolar qual parcela da vazão medida nas estações de monitoramento provém da circulação profunda, ou seja, dos sistemas intermediários e regionais. A contribuição perene de água do aquífero é chamada de fluxo de base (Evans, 2007), e não está sujeita a flutuações devido a variações pluviométricas sazonais (Chen e Shu, 2002). Observações de séries históricas podem auxiliar na identificação de variações anômalas. Caso se constate que estas variações ocorram associadas a eventos de extração de água do aquífero, pode-se quantificar a sua magnitude.

2.1.1 – Efeito do Escoamento Superficial

A chuva é a principal fonte de entrada de água no sistema hídrico (Fitts, 2002). Esses eventos são caracteristicamente pontuais e irregularmente distribuídos durante o mês (Yan, et al., 2012). Isso significa que entrada de água no ciclo hidrológico é ocorre de forma pontual. Durante a chuva, há um aumento no nível do fluxo de base e uma contribuição mais intensa na vazão do rio (Fitts, 2002). Durante a chuva, o escoamento superficial pode aumentar até dez vezes a vazão do rio quando comparado com os períodos de seca. Durante esses eventos, uma fração da água infiltra no solo e a outra escoar pela superfície (Fitts, 2002). Visando identificar a parcela do fluxo superficial associada a chuva na vazão do rio, foi aplicada uma filtragem aos dados através da subtração dos dados originais da média móvel de 30 dias. Essa filtragem foi realizada quatro vezes de forma interativa, visando extrair de maneira mais precisa o efeito do escoamento superficial nos dados de vazão. A equação 1 foi utilizada para esta estimativa onde: Q_d é a vazão medida no dia a (ML/dia); e Q_r representa o efeito do escoamento superficial na vazão do rio no dia a (ML/dia). Considera-se que não há valores negativos para o escoamento superficial, assumindo então que todos estes serão iguais a zero. Assim, quando subtrai-se a soma das quatro interações dos dados de vazão diária do rio, tem-se um valor aproximado da contribuição da água subterrânea.

$$Qd_a - \frac{\sum_{a=29}^a Qd_a}{30} = Qr_a \quad (1)$$

2.1.2 – Contribuição do Sistema Local

A contribuição do aquífero pelo sistema local (Q_S) foi definida como a fração do fluxo de água subterrânea que está presente nas porções rasas do solo e nas fraturas dos aquíferos. A descarga hídrica deste sistema para o fluxo superficial ocorre mais rapidamente quando comparado com a circulação de água regional (Tóth, 1963; Tóth, 2009). O critério adotado para isolar o efeito dessa contribuição mais rasa foi baseado na estimativa de que o escoamento nesta porção do aquífero é reduzida de forma significativa após um período de dois ou três meses após a época chuvosa. Assim, os resultados obtidos na etapa anterior foram subtraídos da média móvel de 180 dias. Essa estimativa foi calculada com base na equação 2. Considera-se que não há valores negativos para esta contribuição, assumindo então que todos estes serão iguais a zero.

$$Qd_a - Qr_a - \frac{\sum_{a=179}^a (Qd_a - Qr_a)}{180} = Q_S \quad (2)$$

2.1.3 – Contribuição dos Sistemas Intermediário e Regional

A contribuição do aquífero pelos sistemas intermediário e regional (Q_D) é definida como a fração da água vinda da circulação hídrica subterrânea mais profunda que alimenta o escoamento superficial. É caracterizada por pequenas flutuações de baixa amplitude e frequência (Tóth, 1963). O tempo dos padrões de fluxo definidos por Tóth (1963) é dependente do tipo de sistema e da topografia local. A contribuição desses sistemas profundos na vazão diária foi calculada com base na equação 3:

$$Qr - Q_S = Q_D \quad (3)$$

2.1.4 – Estimativa do Efeito do Bombeamento na Vazão do Rio

Considerando a conexão entre os fluxos de água subterrânea e superficial, perturbações no balanço hídrico podem gerar consequências notáveis ou não em ambos. Sendo assim, o bombeamento de água subterrânea é um fator importante que pode ocasionar perturbação nos sistemas aquíferos e levar a depleção do fluxo superficial (Butler Jr., et al., 2001). O grau de conexão entre esses dois sistemas é o fator que definirá a magnitude do rebaixamento do nível freático e a consequente depleção de um rio (Nyholm, et al., 2002; Baalousha, 2012).

A estimativa do efeito do bombeamento de água subterrânea na vazão do rio foi realizada com os dados da alimentação do aquífero profundo obtida pelas filtragens. A identificação de variações anômalas da contribuição de água subterrânea pode ser facilitada ao se correlacionar os fluxos de base de dois rios: um que estava sofrendo a depleção no fluxo e outro, localizado próximo a este, no qual não teve seu fluxo alterado. Para esta análise, foi considerado que há uma correlação linear entre os valores de contribuição dos sistemas intermediário e regional dos rios da bacia hidrográfica. A equação resultante dessa correlação fornece a proporção aproximada entre os dois cursos d'água

No exemplo estudado, o valor resultante dessa proporção foi de 0,4749, o qual foi posteriormente utilizado para calcular a contribuição subterrânea esperada para o Rio *Boundary* (E_V). Multiplicando-se o valor da proporção pelos valores da contribuição dos sistemas intermediário e regional calculados para o Rio *Love* (rio com fluxo não alterado), obtiveram-se os valores esperados para Rio *Boundary* caso este não estivesse sendo afetado pelo bombeamento. Então, os valores esperados (E_V) foram subtraídos dos valores estimados pela equação 3 para o Rio *Boundary* ($Q_{D\text{Boundary}}$). Com esses valores, pôde-se estimar o déficit da contribuição subterrânea no Rio *Boundary*, o qual presume-se ser decorrente do bombeamento. Sendo assim, o déficit anual da contribuição aquífera profunda foi estimado com base na equação 4.

$$\sum_{a+365}^a (Q_{D\text{Boundary}} - E_V) = Ad; a \geq 1 \quad (4)$$

3 - ESTUDO DE CASO

A bacia hidrográfica *Barwon Downs* está localizada na porção sudoeste do estado de Victoria, Austrália, a aproximadamente 70 km sudoeste da cidade de Geelong (Petrides e Cartwright, 2006). O clima da região é mediterrâneo, caracterizado por verões secos e quentes e invernos frios e chuvosos (Petrides e Cartwright, 2006; Bush, 2009).

Durante os períodos de seca, o fluxo de água superficial diminui e o reservatório subterrâneo se torna uma alternativa para o abastecimento de água. Porém, dependendo de como esses dois sistemas hídricos estão conectados, a depleção dos rios pode ser ainda maior quando há um bombeamento intensivo de água subterrânea (Nyholm, et al., 2002). A principal área de recarga para os dois rios estudados, assim como para o aquífero em questão, é o Alto *Barongarook* e a direção do fluxo pluviométrico é demonstrada na Figura 1 (Gardiner, 2012). A água infiltrada no solo segue diferentes direções através das camadas geológicas e a permeabilidade de cada uma vai influenciar no padrão de fluxo subterrâneo (Tóth, 1963; Tóth, 2009). O mapa de superfícies potenciométricas da região (Figura 2) demonstra o fluxo radial da água subterrânea, partindo do Alto *Barongarook* e

indo em direção aos grabens *Barwon Downs* e *Carlisle River* (Petrides e Cartwright, 2006). Além disso, é possível notar um maior espaçamento entre as linhas potenciométricas na região do Rio *Boundary* enquanto que, na região do Rio *Love*, essas linhas estão mais próximas.

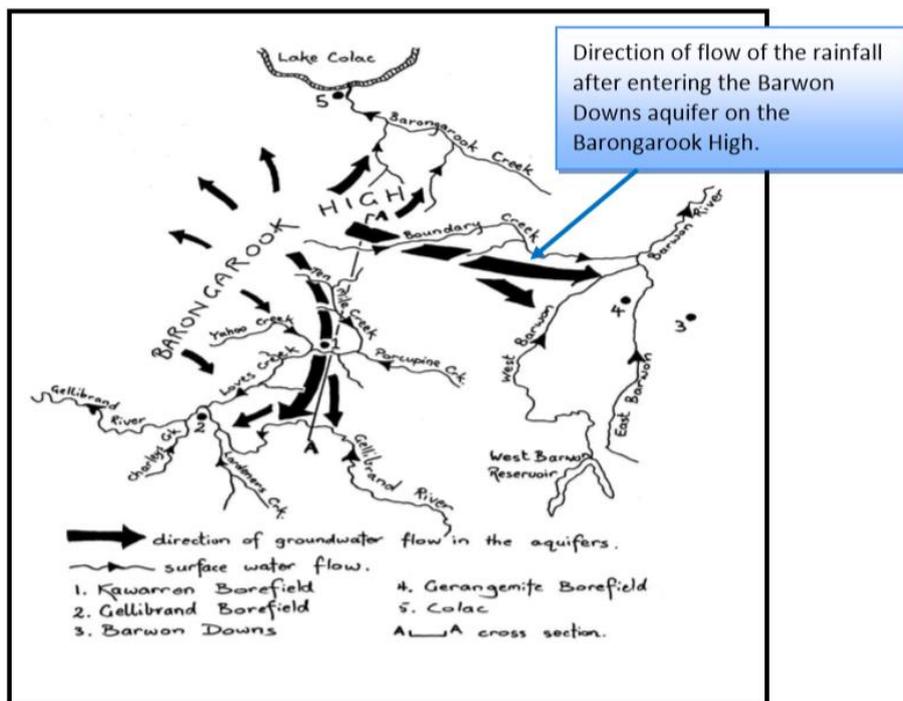


Figura 1. Área de recarga para os rios *Boundary* e *Love*. Fonte: (Gardiner, 2012)

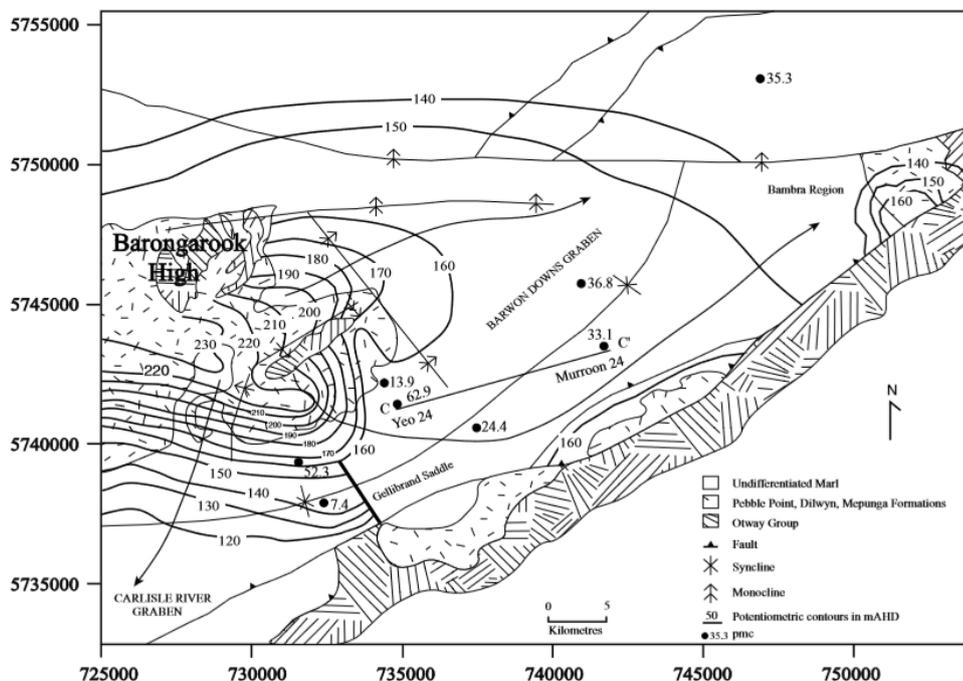


Figura 2. Mapa de superfícies potenciométricas. Fonte: (Petrides e Cartwright, 2006).

Os aquíferos e rios de *Barwon Downs* estão dispostos na Bacia de *Otway*. As formações *Pebble Point* e *Dilwyn* compõem as rochas do Paleoceno na sequência estratigráfica. A formação *Pebble Point* é uma unidade marinha composta principalmente por arenitos ferruginosos e conglomerados, com pequenas quantidades de argila (Bush, 2009). A Formação *Dilwyn* é formada principalmente por carbonatos, argilo-siltitos e finas camadas de arenitos de granulação média e grossa (Australian Government - Geoscience Australia, 2015). As formações *Pebble Point*, *Dilwyn* e *Mepunga* apresentam condutividade hidráulica suficientemente elevada e estão conectadas, formando assim o sistema aquífero do baixo Terciário (Petrides e Cartwright, 2006). A espessura deste aquífero atinge mais de 250 metros no Graben *Barwon Downs*, reduzindo no Alto *Barongarook* como resultado de uma erosão pós deposicional seguido por soerguimento (Petrides e Cartwright, 2006). A Formação *Narrawaturk Marl* é a responsável pelo confinamento local do sistema aquífero, composta por rochas e baixa condutividade hidráulica resultantes de uma transgressão marinha ocorrida entre o final do Eoceno ao final do Oligoceno (Petrides e Cartwright, 2006).

3.1 – Breve Histórico da Captação de Água Subterrânea na Região Estudada.

O estado de Victoria, assim como a Austrália como um todo, está sujeito a período de intensos períodos de escassez de água (Gardiner, 2007). Sendo assim, a busca por alternativas para o abastecimento de água nas proximidades da cidade de Geelong levaram a intensa extração de água subterrânea desde 1982-83 (Gardiner, 2009). Neste período, aproximadamente 8.000 ML de água foram extraídos, prevenindo a escassez completa de água para a região de Geelong (Gardiner, 2013). Em 1984, o Rio *Boundary* secou por quatro dias e depois, após uma intensa extração em 1985, o rio esteve seco outras sete vezes (Gardiner, 2012). Este total de dias de escassez no fluxo do Rio *Boundary* aumentou intensamente desde que o período de bombeamento foi se intensificando. Por outro lado, o fluxo superficial do Rio *Love* manteve-se contínuo (Gardiner, 2012).

O período selecionado para a realização deste estudo foi de 2004 a 2014. Em 2004, a zona de captação *Barwon Downs* renovou a licença permitindo a extração de 20.000 ML por ano, restringindo para não mais do que 80.000 ML em qualquer período de dez anos e não mais do que 400.000 ML em cem anos (Gardiner, 2013). A Figura 3 abaixo demonstra o volume de água aproximada extraída até julho de 2010 e número de dias em que o Rio *Boundary* teve o esgotamento do seu fluxo até julho de 2012. Os períodos de maior captação de água subterrânea são coincidentes com os períodos de seca históricos já relatados. A coincidência entre os períodos mais longos de

esgotamento do fluxo do Rio *Boundary* com os períodos de maior extração de água subterrânea leva a considerar a correlação entre esses dois reservatórios.

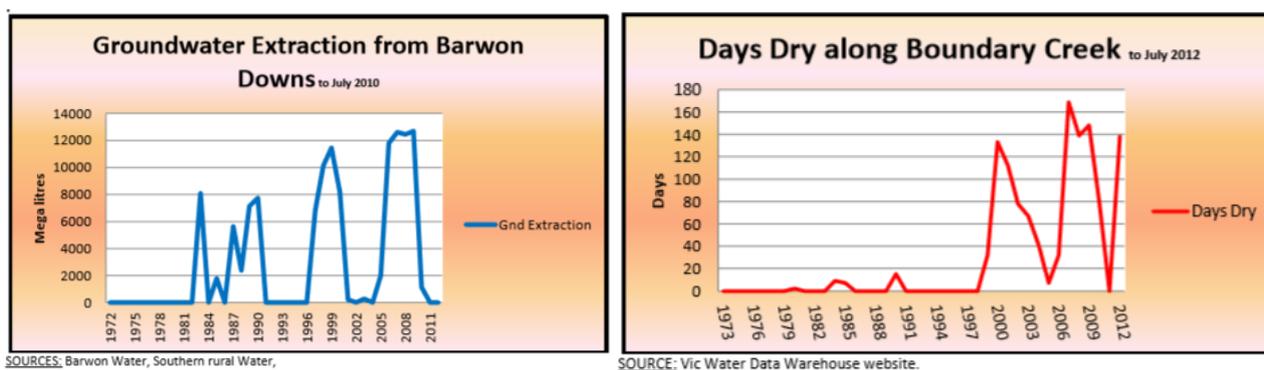


Figura 3. Extração de água subterrânea e total de dias seco do Rio *Boundary*. Fonte: (Gardiner, 2013).

3.2 – Aquisição dos Dados

Os dados de vazão diária foram baixados do *website* do Departamento de Meio Ambiente, Solo, Água e Planejamento do estado de Victoria. Esses dados foram organizados visando um melhor entendimento sobre o efeito do bombeamento subterrâneo na vazão do Rio *Boundary* quando comparado com os dados do Rio *Love*. As informações referentes as estações de monitoramento de ambos rios estão dispostas na tabela 1. O período escolhido para fazer a análise dos dados para essa pesquisa foi de 2004 a 2014. Todos os dados baixados para ambos rios foram organizados em tabelas no programa Excel e depois submetidos ao processo de filtragem estatística. Os resultados dessa filtragem visam ilustrar o efeito do bombeamento nos períodos chuvosos e secos na região.

Tabela 1. Informações das estações de monitoramento.

	Site Number	Site Name	Latitude	Longitude
<i>Boundary Creek</i>	233228	YEODENE	-38.42125009	143.7109799
<i>Love Creek</i>	235234	GELLIBRAND	-38.48316225	143.57179241

4 - RESULTADOS

4.1 – Processo de Filtragem Estatística

O processo de filtragem estatística dos dados de vazão resultaram em uma série de gráficos, os quais serão mostrados separadamente nesta seção.

4.1.1 – Efeito do Escoamento Superficial

No final deste procedimento foi possível estimar o efeito do escoamento superficial nos dados da vazão de ambos rios estudados e os resultados são demonstrados no gráfico abaixo (figura 4). O escoamento superficial ocorrido durante a chuva gera picos de vazão, os quais são registrados pelas estações de monitoramento. Analisando o gráfico, pode-se notar que esses picos de vazão episódicos por vezes atingem valores maiores que 100 mega litros por dia. Além disso, observa-se que a chuva é uniformemente distribuída na área estudada. Vale ressaltar o período compreendido entre o começo de 2006 até o começo de 2010, o qual compreende os menores valores de escoamento superficial presentes no gráfico, especialmente para o Rio *Boundary*.

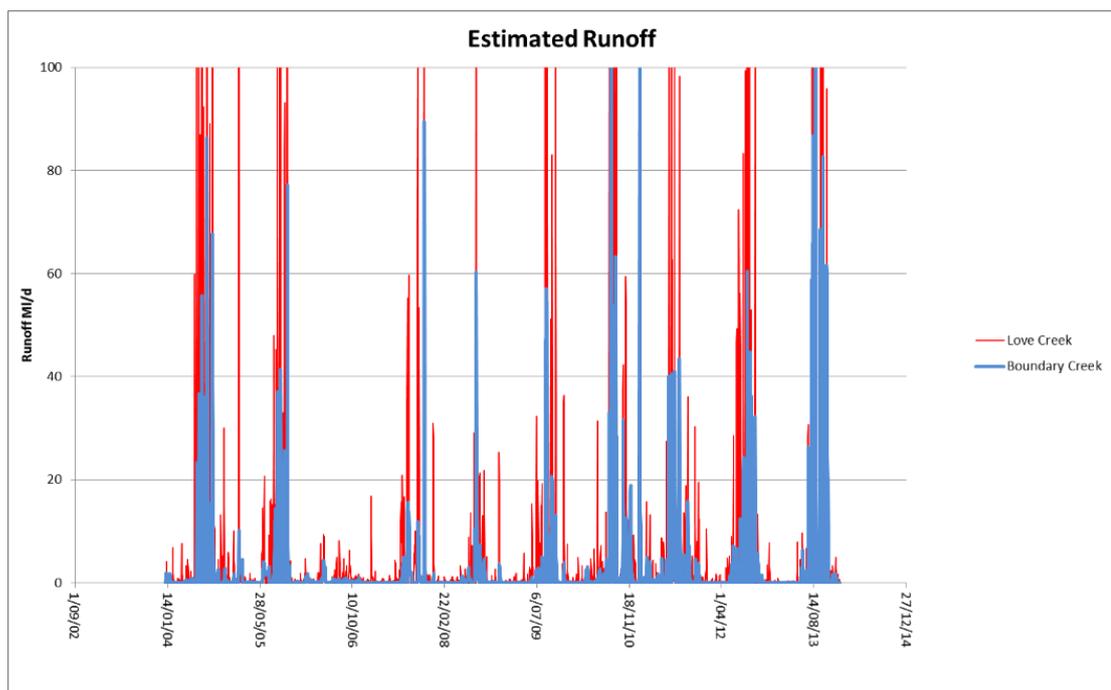


Figura 4. Escoamentos superficial estimado para ambos rios estudados.

4.1.2 – Contribuição do Sistema Local

Os resultados referentes à contribuição do sistema de circulação local são apresentados no gráfico abaixo (Figura 5). Similarmente aos resultados encontrados no gráfico do escoamento superficial, os picos estão compreendidos durante o inverno (período chuvoso). Além disso, o período entre o começo de 2006 e o começo de 2010 apresenta os menores picos de contribuição do aquífero raso, variando de 2 a 15 mega litros por dia, tendo aproximadamente os mesmos valores para ambos rios em 2006, 2007 e 2008. Em 2009, observa-se que a contribuição do sistema local para o Rio *Love* é aproximadamente duas vezes maior que a do Rio *Boundary*. Em 2010, tem-se um aumento de aproximadamente 50 mega litros por dia para o Rio *Love* e, para o Rio *Boundary*, esse aumento é de 25 mega litros por dia durante o período chuvoso.

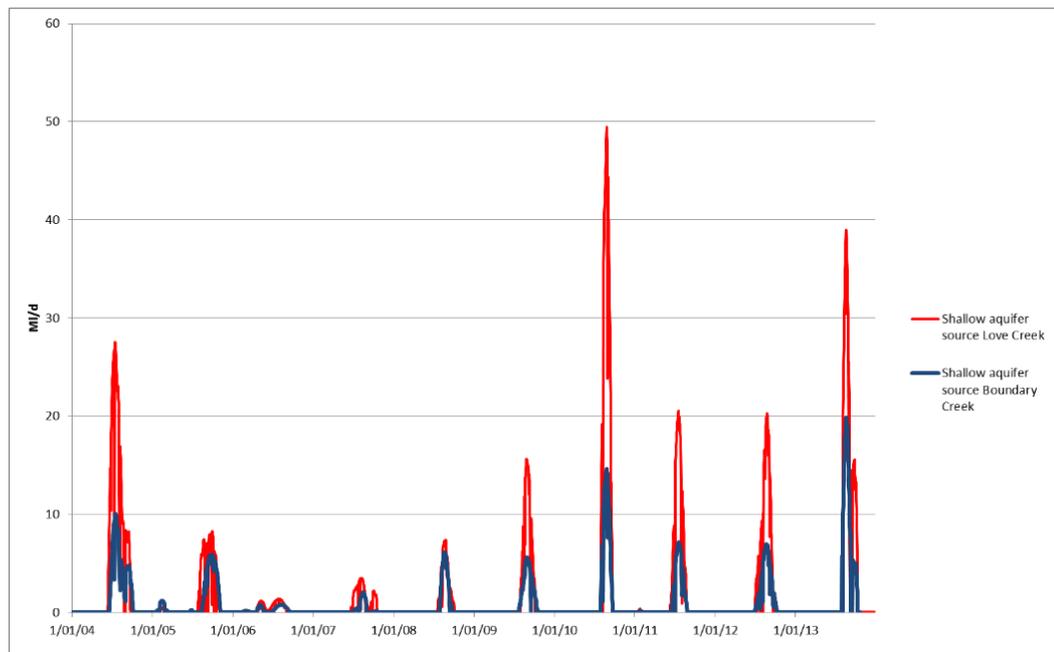


Figura 5. Contribuição do Sistema Local.

4.1.3 – Contribuição dos Sistemas Intermediário e Regional

As contribuições do aquífero profundo para ambos rios foram calculadas com base na equação 3 e os resultados são apresentados na figura 6. Novamente, os picos estão localizados durante os períodos chuvosos e a contribuição desta circulação mais profunda para o Rio *Love* é maior do que a do Rio *Boundary*. Uma importante observação acerca deste gráfico é a constante presença de valores nulos para o Rio *Boundary*, enquanto que, para o Rio *Love*, a contribuição do fluxo de base é constante.

Deep aquifer source

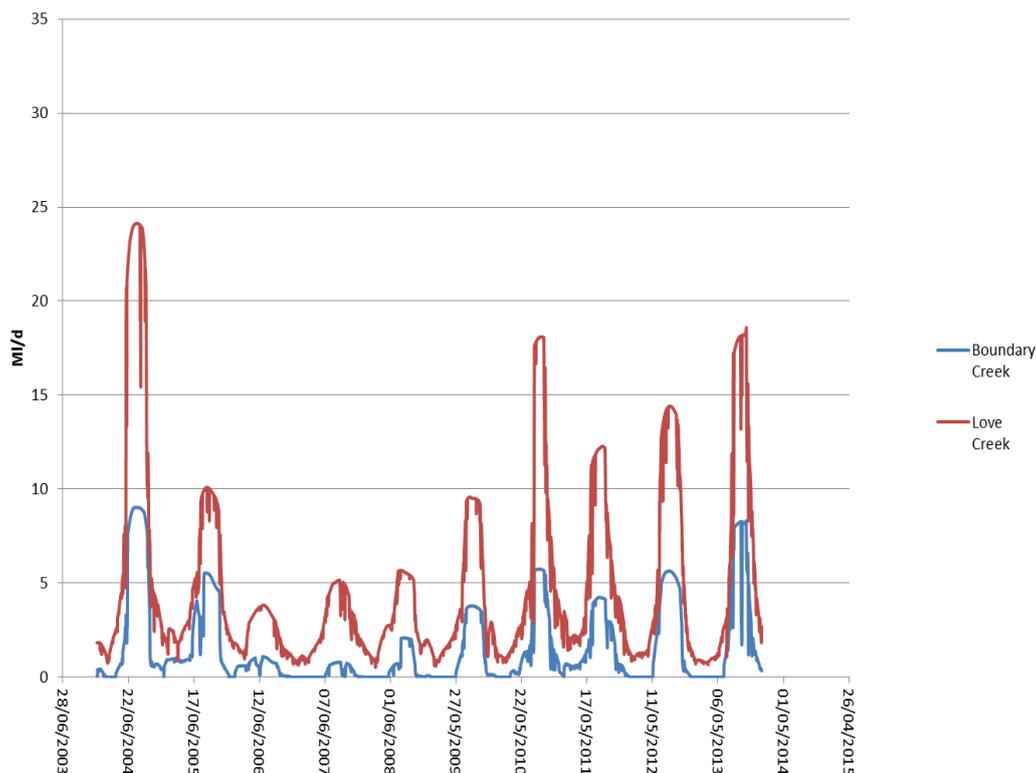


Figura 6. Contribuição dos Sistemas Intermediário e Regional.

4.1.4 – Estimativa do Efeito do Bombeamento na Vazão do Rio

O bombeamento de água subterrânea não afetará o fluxo de água subterrânea se estes estiverem desconectados hidráulicamente ou se a quantidade de água extraída do poço for inferior ao potencial de recarga do aquífero (Evans, 2007).

O gráfico de dispersão foi utilizado para ajudar na comparação entre os dados de contribuição aquífera profunda de ambos rios estudados (figura 7), considerando que o fluxo do Rio *Love* não está sendo afetado pelo bombeamento. A equação 5 foi obtida da correlação linear, sendo 0,4749 a proporção aproximada entre os dois rios. A razão entre os rios *Boundary* e *Love* varia de zero a aproximadamente 1,6. Q_{DB} refere-se aos dados de contribuição subterrânea profunda para o rio *Boundary* (MI/dia), e Q_{DL} refere-se aos dados de contribuição subterrânea profunda para o rio *Love* (MI/dia), ambos calculados pela equação 3.

$$Q_{DB} = 0,4092Q_{DL} - 0,4749 \quad (5)$$

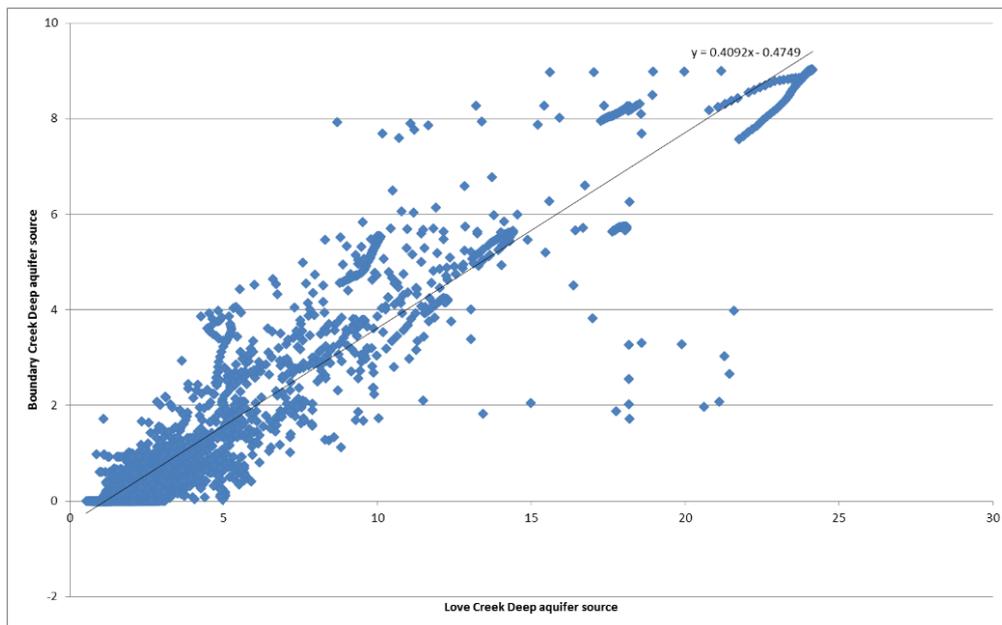


Figura 7. Correlação linear entre os rios estudados.

O gráfico abaixo (figura 8) apresenta o resultado do cálculo do déficit anual da contribuição aquífera profunda para o Rio *Boundary*, o qual foi calculado pela equação 4. Os dados de escoamento superficial para o Rio *Love* também estão dispostos no gráfico com o objetivo de melhor visualização os períodos chuvosos. Os valores positivos no gráfico representam os períodos nos quais o bombeamento não causou déficit no aquífero profundo. Esses valores estão posicionados nos períodos chuvosos e quando o fluxo do Rio *Boundary* não foi afetado. Já os valores negativos representam a quantidade de água que foi bombeada do aquífero que gerou um déficit no reservatório, ou seja, a chuva ocorrida durante esse período de extração subterrânea não foi capaz de repor a quantidade de água bombeada, gerando uma depleção no fluxo superficial.

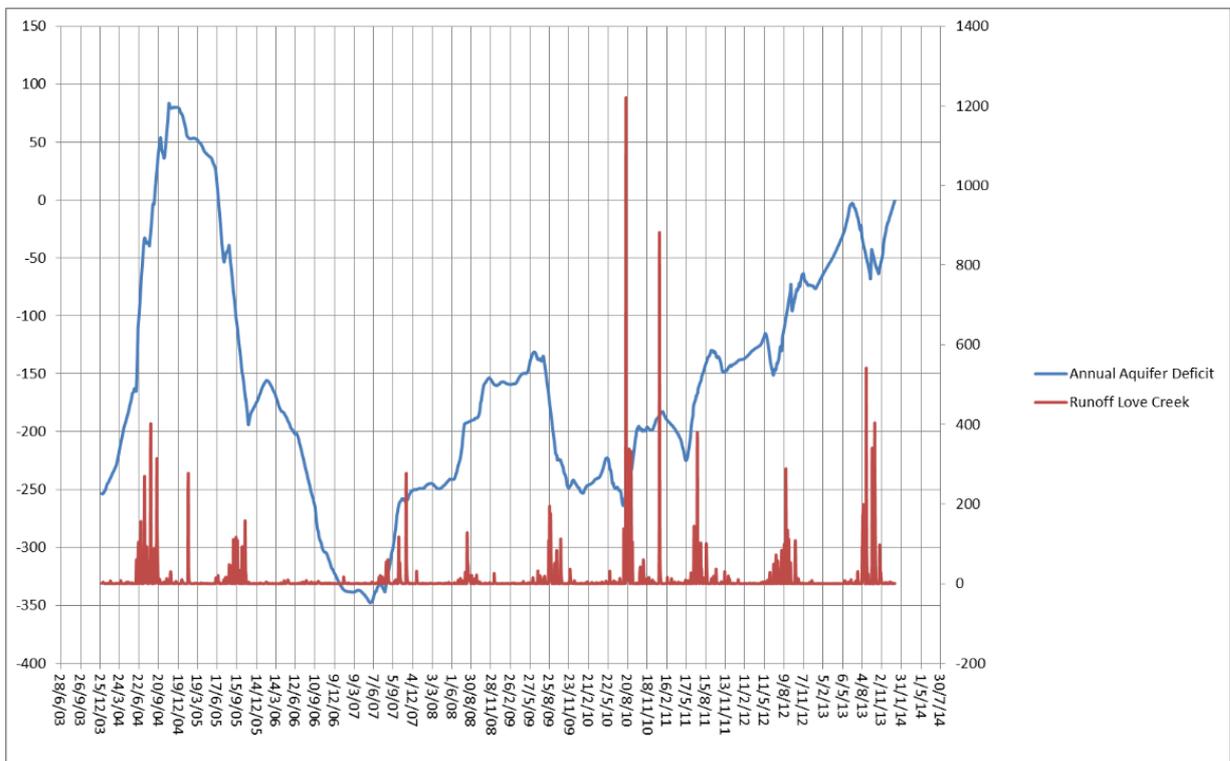


Figura 8. Déficit anual da circulação de água profunda.

5 - DISCUSSÃO

O entendimento de como as águas superficial e subterrânea estão conectadas é essencial para a análise do efeito do bombeamento (Baalousha, 2012). Neste estudo, considerou-se que esses dois sistemas estão conectados hidráulicamente e podem ser considerados como um único recurso. A subsidência do nível freático durante o bombeamento pode ocasionar uma mudança de comportamento do rio em relação ao aquífero, podendo passar de um rio que é alimentado pelo aquífero para um rio que alimenta o aquífero (Chen e Shu, 2002; Evans, 2007). O escoamento superficial assim como os padrões de fluxo subterrâneo descritos por Tóth (1963), compõem diferentes segmentos de descarga hídrica no fluxo superficial, os quais ocorrem em diferentes intervalos de tempo.

A recarga pluviométrica no balanço hídrico é pontual e irregularmente distribuída durante os meses (Yan, et al., 2012). Durante a chuva, o nível do fluxo de base pode aumentar em dez vezes ou mais (Fitts, 2002). A metodologia aplicada neste trabalho tornou possível o isolamento deste efeito de descarga pontual e rápida, aprimorando o entendimento do efeito do bombeamento nos sistemas de circulação intermediário e regional. Apesar de os rios *Boundary* e *Love* terem a mesma área de recarga (Figura 1), a resposta de ambos ao bombeamento é diferente.

O gráfico de escoamento superficial (Figura 4) indica que os episódios de chuva são periódicos em ambos rios, os quais estão concentrados no meio do ano. Já a variação de intensidade

desses picos varia em um ciclo de aproximadamente oito anos, gradualmente crescendo e diminuindo durante esse período. O escoamento superficial calculado neste estudo concorda com as médias do Escritório de Meteorologia da Austrália. Essa água proveniente do escoamento superficial não é estocada e seu efeito na vazão do rio pode ser distribuído durante o período de um mês. Assim, a filtragem através da subtração dos dados originais da média móvel de 30 dias foi a ferramenta utilizada para estimar a média mensal do efeito do escoamento superficial (equação 1).

Após a chuva, a água segue diferentes caminhos de fluxo, podendo escoar pela superfície ou infiltrar no solo. Essa infiltração rasa também compõe o processo de descarga hídrica rápida no fluxo de água superficial, a qual deve ser desconsiderada para avaliar o efeito do bombeamento. Essa contribuição local pode ser nula durante períodos sem chuva e ocorre, principalmente, durante um período de três meses. Para o cálculo deste efeito na vazão do rio, os resultados obtidos na etapa anterior foram subtraídos da média móvel de 180 dias.

Para um melhor entendimento sobre os efeitos da contribuição do escoamento superficial e do sistema local no fluxo do rio, estes dados foram organizados em conjunto no gráfico da Figura 9. Nota-se que os picos de contribuição do sistema local estão condizentes com os períodos chuvosos, quando há um elevado escoamento superficial. Durante os períodos de seca, as taxas de descarga são afetadas, além de ter um aumento na evapotranspiração (Nyholm, et al., 2002; Green, et al., 2011).

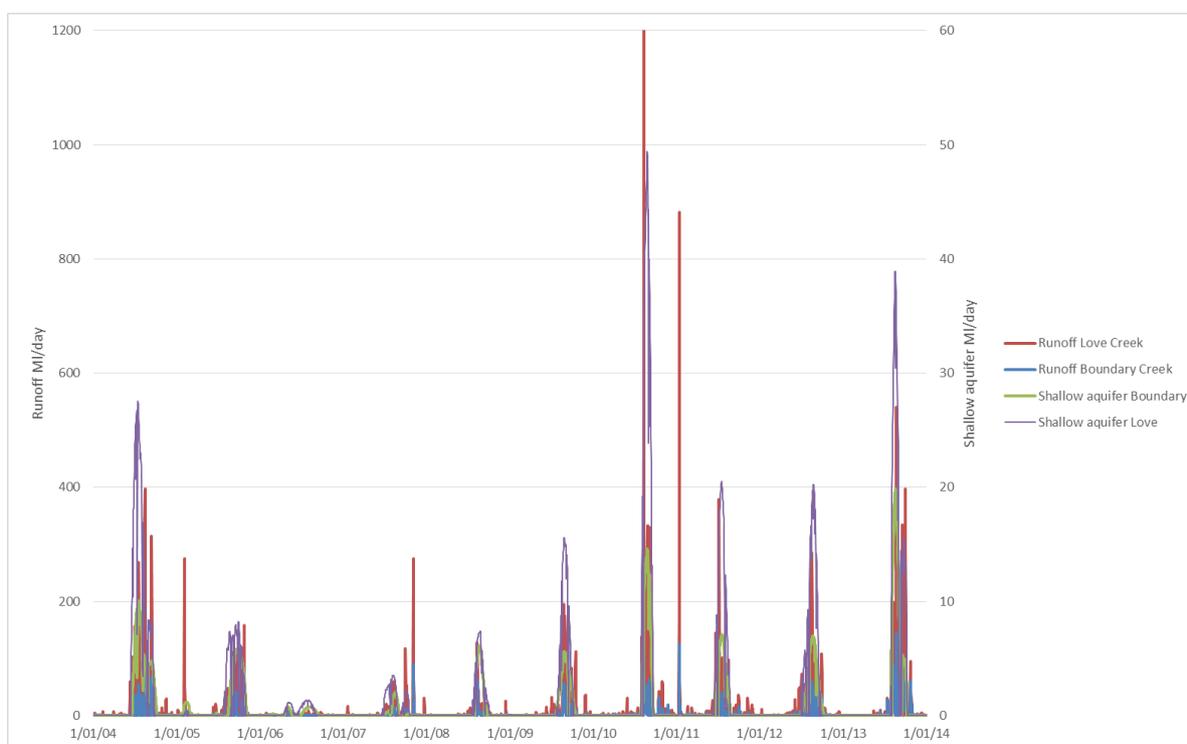


Figura 9 - Descarga dos sistemas de circulação local e escoamento superficial.

Na região estudada, a barreira hidráulica *Gellibrand Saddle* é a responsável pelo redirecionamento do fluxo através das unidades hidroestratigráficas (Petrides e Cartwright, 2006). Como citado anteriormente, a formação *Narrawaturk Marl* é responsável pelo confinamento local do sistema aquífero do baixo Terciário (Petrides e Cartwright, 2006; Bush, 2009). Este aquífero tem uma característica gotejante (Petrides e Cartwright, 2006) e sua espessura relativa na extensão do aquífero é variável, o que tem importante relação com a diferenciação do confinamento em diferentes porções (Bush, 2009). O mapa de superfícies potenciométricas (Figura 2) indica um baixo gradiente hidráulico lateral para o aquífero estudado. Além disso, observa-se um maior gradiente hidráulico e maior densidade de linhas seguindo para o lado do Graben *Carlisle River*, o qual o Rio *Love* está localizado. Essa configuração sugere uma maior pressão diferencial e, conseqüentemente, uma maior vazão. Por outro lado, o maior espaçamento entre as linhas potenciométricas para o Rio *Boundary* indica uma área de recarga mais ampla. A correlação linear obtida no gráfico da Figura 7 demonstra uma razão de aproximadamente 0,4 entre os rios *Boundary* e *Love*. Essa diferença é possivelmente relacionada com o maior fluxo subterrâneo para o lado do Graben *Carlisle River*, também exposto pelas linhas potenciométricas. Outra explicação possível seria a espessura do aquífero na zona de extração de água subterrânea, a qual pode ser suficientemente fina possibilitando que o bombeamento afete o sistema tal como um aquífero não-confinado.

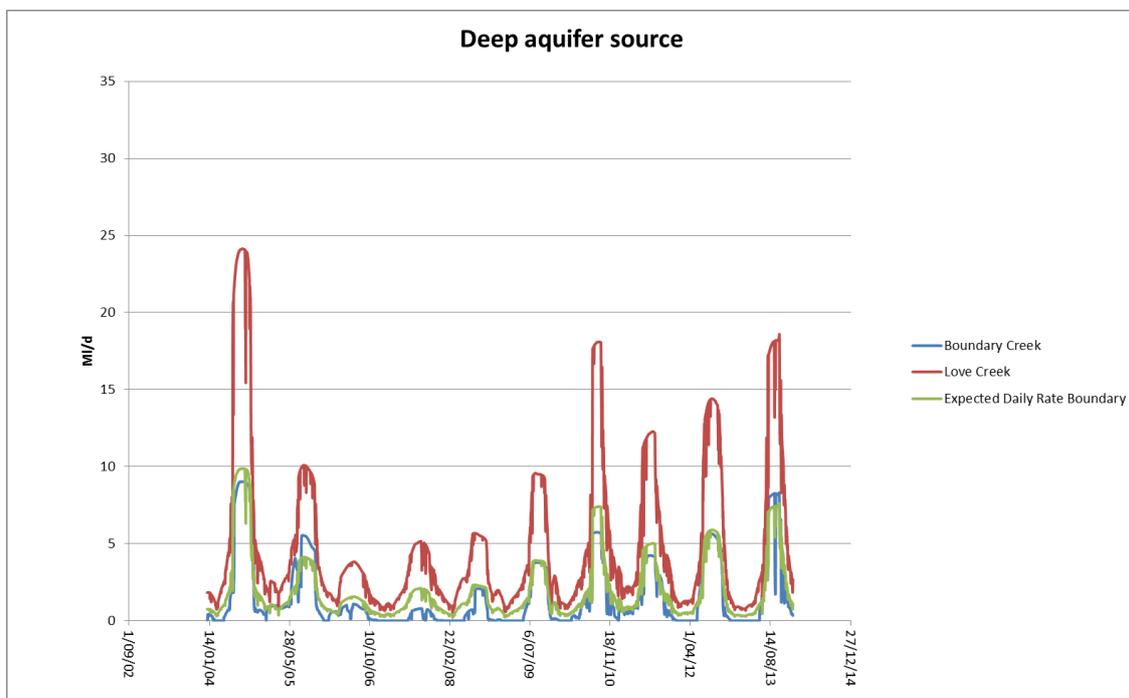


Figura 10 - Comparação entre as contribuições aquíferas profundas.

Quando se analisa o gráfico com as contribuições aquíferas profundas (Figura 10), observa-se que o período de 2006 a 2010 foi quando houve um maior efeito do bombeamento no sistema. Isto pode ser concluído devido à observação do espaço entre a linha verde (vazão estimada caso não estivesse sendo afetado pelo bombeamento) e a linha azul (contribuição aquífera profunda calculada para o Rio *Boundary*). Esses valores concordam com o volume de extração de água subterrânea de 2006 a 2010, o qual atingiu 52.684 mega litros (Gardiner, 2013). Esse período também é coincidente com os menores níveis de precipitação. Quando se observa o gráfico do déficit anual da contribuição da circulação de água profunda (Figura 8), a primeira grande queda nos valores está posicionada no começo de 2006. Já os períodos de valores positivos para o déficit estão localizados no período entre o final de 2004 ao começo de 2005, coincidindo com o período em que não houve esgotamento do fluxo do Rio *Boundary* demonstrado na Figura 3 (Gardiner, 2013). Os valores negativos no gráfico (Figura 8) representam os períodos quando há possibilidade de esgotamento do fluxo superficial. Observa-se que esses valores são frequentes inclusive em períodos chuvoso, o que demonstra que o bombeamento está de fato afetando o fluxo do rio. O maior déficit observado no gráfico foi durante o ano de 2007, o que condiz com o maior período de escassez do Rio *Boundary* (Figura 3).

6 - CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida neste estudo permitiu a observação não só do efeito do bombeamento como as variações pluviométricas durante o período estudado. Todas as estimativas corroboram com dados já encontrados na literatura.

No caso estudado, a metodologia da filtragem estatística auxiliou na comprovação de que o bombeamento tem contribuído para o processo de depleção do fluxo do Rio *Boundary* e este processo é agravado durante os períodos de seca. A análise da depleção do rio foi realizada a partir da comparação entre seus dados e os dados de um rio que não estava sofrendo alteração do seu fluxo (Rio *Love*). O isolamento dos efeitos de descarga rápida, como o escoamento superficial e do sistema local, foi de grande importância para o melhor entendimento sobre a magnitude do déficit causado nos sistemas de circulação profunda devido a extração de água subterrânea.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Australian Government - Geoscience Australia. Australian Stratigraphic Units Database. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/data-pubs/data-standards/reference-databases/stratigraphic-units>>. Acesso em: 18 de out. 2015.

BAALOUSHA, H.M., 2012. Drawdown and stream depletion induced by a nearby pumping well. *Journal of Hydrology*, vol.466-467, p. 47-59.

BUSH, A.L., 2009. *Physical and chemical hydrogeology of the Otway Basin, southeast Australia*. Tese (PhD), School of Earth Sciences, The University of Melbourne.

BUTLER JR., J.J., Klotnik, V.A. e Tsou, M.S., 2001. Drawdown and Stream Depletion Produced by Pumping in the Vicinity of a Partially Penetrating Stream. *Ground Water*, vol.39(5), p. 651-659.

CHEN, X. e Shu, L., 2002. Stream-Aquifer Interaction: Evaluation of Depletion Volume and Residual Effects from Ground Water Pumping. *Ground Water*, vol.40(3), p. 284-290.

Commonwealth of Australia. Bureau of Meteorology. Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/>>. Acesso em: 2 de nov. 2015.

State Government of Victoria, 2015. Department of Environment, Land, Water and Planning. Disponível em: <<http://data.water.vic.gov.au/monitoring.htm>>. Acesso em: 5 de ago. 2015.

EVANS, R., 2007. *The Impact of Groundwater Use on Australia's River: Technical Report*. Canberra: Land & Water Australia.

FITTS, C.R., 2002. *Groundwater Science*. San Diego: Academic Press.

GARDINER, M., 2012. *Otway Water Book 19: Groundwater Extraction and the Drying Out of the Big Swamp*. Otway Water.

GARDINER, M., 2013. *Otway Water Book 21: An Aquifer Divide Shift & Study of Observation Bore Hydro graphs of the East ern View Formation (EVF) Aquifers in the Gerangamete and Gellibrand Groundwater Management Areas*. Otway Water.

GREEN, T.R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H. e Aureli, A., 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, vol.405(3-4), p. 532-560.

NYHOLM, T., Christensen, S. e Rasmussen, K.R., 2002. Flow Depletion in a Small Stream Caused by Ground Water Abstraction from Wells. *Ground Water*, vol.40(4), p. 425-437.

PETRIDES, B. e Cartwright, I., 2006. The hydrogeology and hydrogeochemistry of the Barwon Downs Graben aquifer, southwestern Victoria, Australia. *Hydrogeology Journal*, vol.14(5), p. 809-829.

TÓTH, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, vol.68(16), p. 4795-4812.

TÓTH, J., 2009. *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press.

YAN, Z., Gottschalk, L., Leblois, E. e Xia, J., 2012. Joint mapping of water balance components in a large Chinese basin. *Journal of Hydrology*, vol.450-451, p. 59-69.