



Risco hidrológico e segurança de barragens existentes (Simulação Hidrológica de Eventos Extremos)

Walter Collischonn

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Risco

- Risco = probabilidade x prejuízo
- Se prejuízo potencial é grande, probabilidade deve ser baixa
- Tolerância ao risco
 - Riscos assumidos de forma voluntária costumam ser maiores
 - Riscos assumidos de forma compulsória tendem a ser menores



Risco hidrológico

- Risco hidrológico
- Produto da probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face à ocorrência de chuva, vazão ou nível da água superior àquela para a qual foi dimensionada e do prejuízo decorrente da falha.

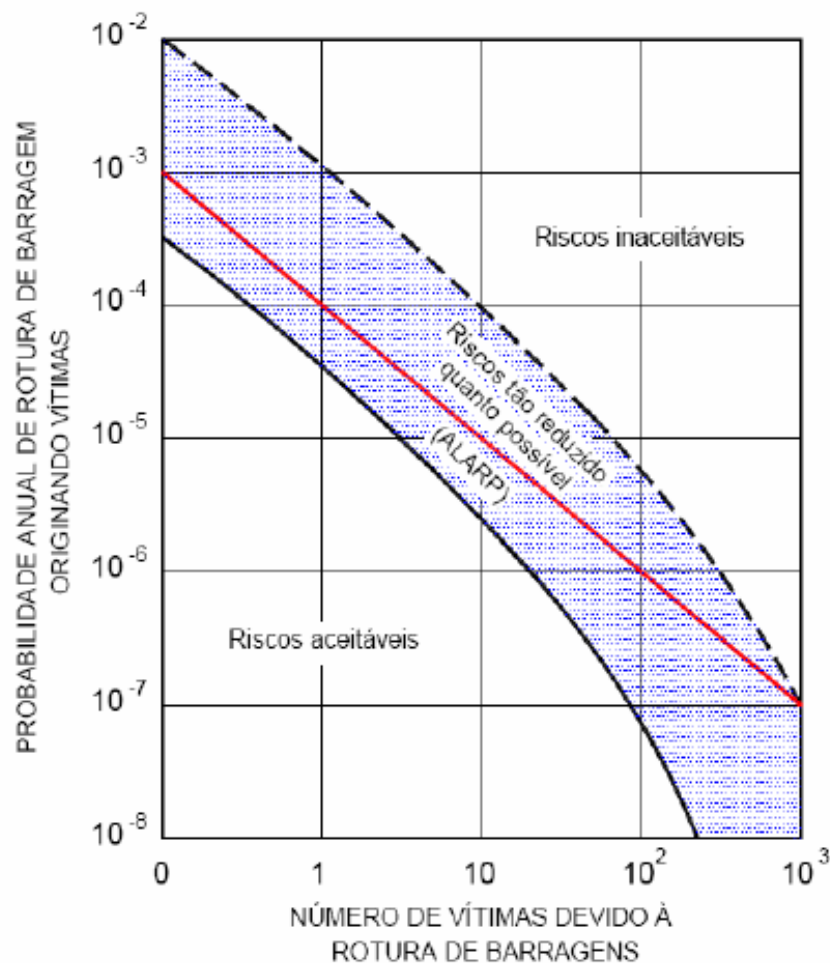




Risco hidrológico

- No caso de barragens, o principal risco hidrológico é o de rompimento por galgamento caso as estruturas de saída (vertedores) não tenham capacidade de descarga suficiente.

ACEITABILIDADE DO RISCO SOCIETAL



Tempo de retorno
(anos)

100
1000
10.000
100.000
1.000.000
10.000.000
100.000.000

Risco hidrológico em barragens

- Risco = probabilidade x prejuízo
- Se prejuízo potencial é grande, probabilidade deve ser baixa
- Tolerância ao risco

Limites de aceitabilidade e tolerabilidade

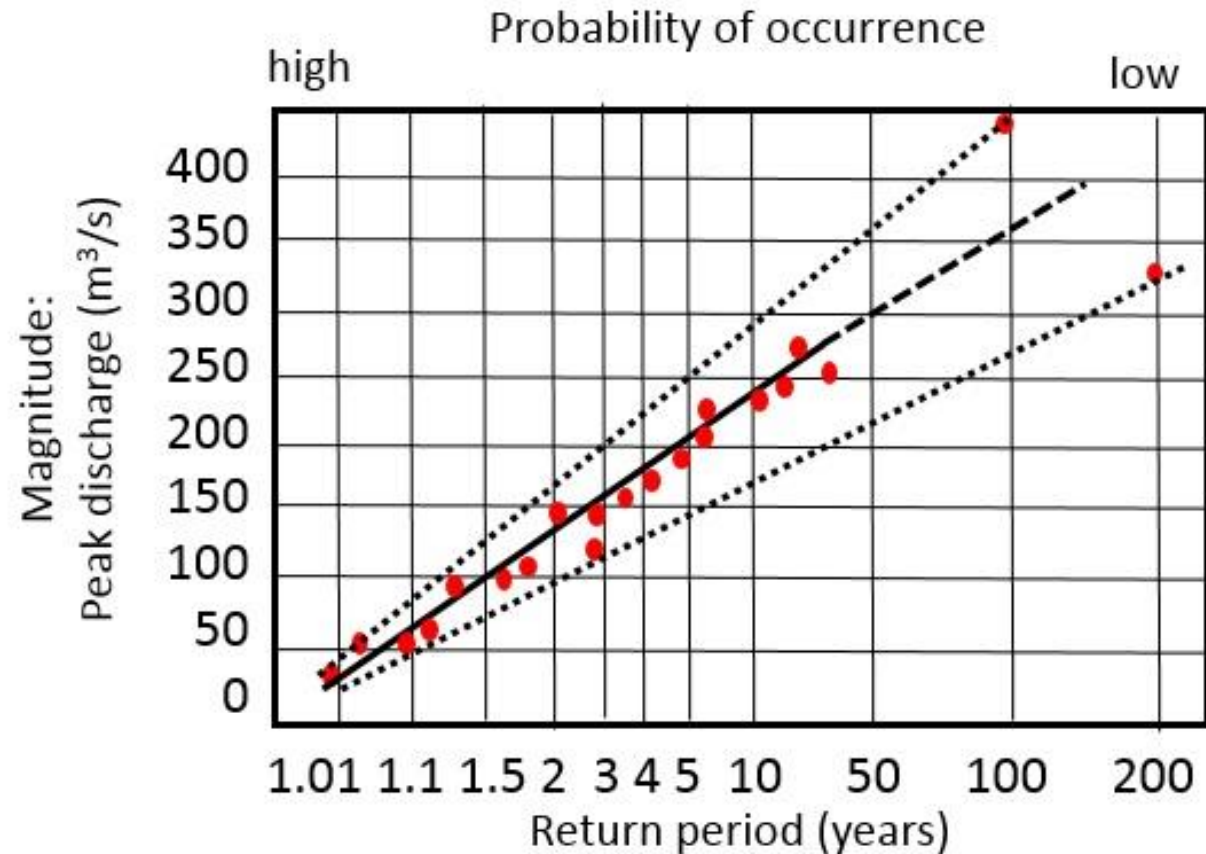
20

Fonte:

A. Veiga Pinto

Grandes estruturas

Adotar uma probabilidade muito baixa

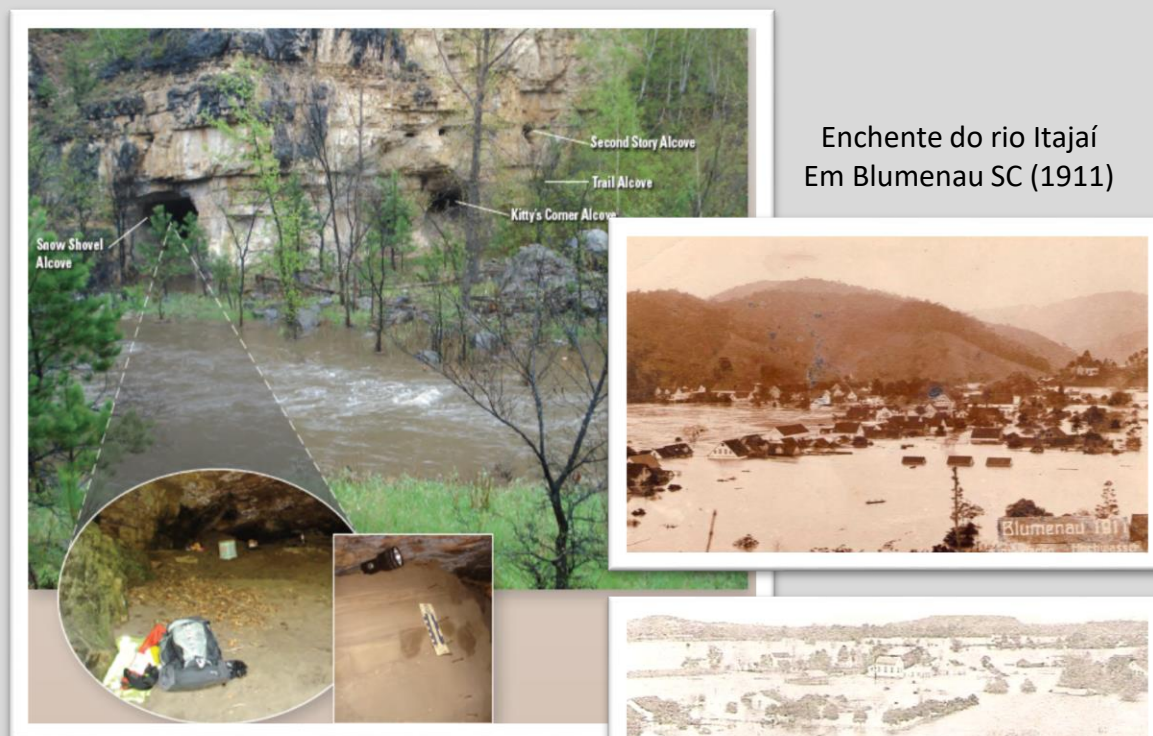


- Incerteza aumenta com o tempo de retorno
- Qual é a melhor distribuição?
- O passado representa o futuro?
- Questões éticas relacionadas à aceitabilidade da perda de vidas humanas

Abordagens alternativas e complementares à estatística de valores extremos

- Analisar eventos extremos do passado remoto
 - Retromodelling
- Estimar um limite físico superior para a chuva (PMP e EMP)
 - Definição da PMP
 - Métodos para estimar PMP
 - Novas tendências PMP
 - Transformar PMP em EMP
 - Modelo hidrológico
 - Simulação contínua x simulação de eventos
 - Física dos processos de propagação
- Avaliar o pior cenário hidráulico (rompimentos catastróficos a montante)
- Reduzir a probabilidade aprimorando a operação, utilizando previsão em tempo-real

Eventos extremos de passado remoto



Enchente do rio Itajaí
Em Blumenau SC (1911)



Enchente do rio Taquari
Em Lajeado – RS (1893)

- Eventos super-extremos que ocorreram no passado podem ocorrer no futuro.
- Observação hidrológica sistemática tem séries curtas.
- Existem dois tipos de informações não sistemáticas:
 - As históricas, referentes a eventos de cheia diretamente observados e, de algum modo, registrados por seres humanos;
 - As reconstruções das denominadas "paleocheias" (que deixaram evidências físicas mas não foram registradas por seres humanos).

USGS
Flood-Frequency Analyses from
Paleoflood Investigations for Spring,
Rapid, Boxelder, and Elk Creeks,
Black Hills, Western South Dakota

Ver: Fernandes, Naghettini e Loschi (2013)

Método para a Estimação de Quantis de Enchentes Extremas com o Emprego
Conjunto de Análise Bayesiana, de Informações não Sistemáticas e de
Distribuições Limitadas Superiormente — Parte 1: Desenvolvimento Teórico

Retromodelling historical floods

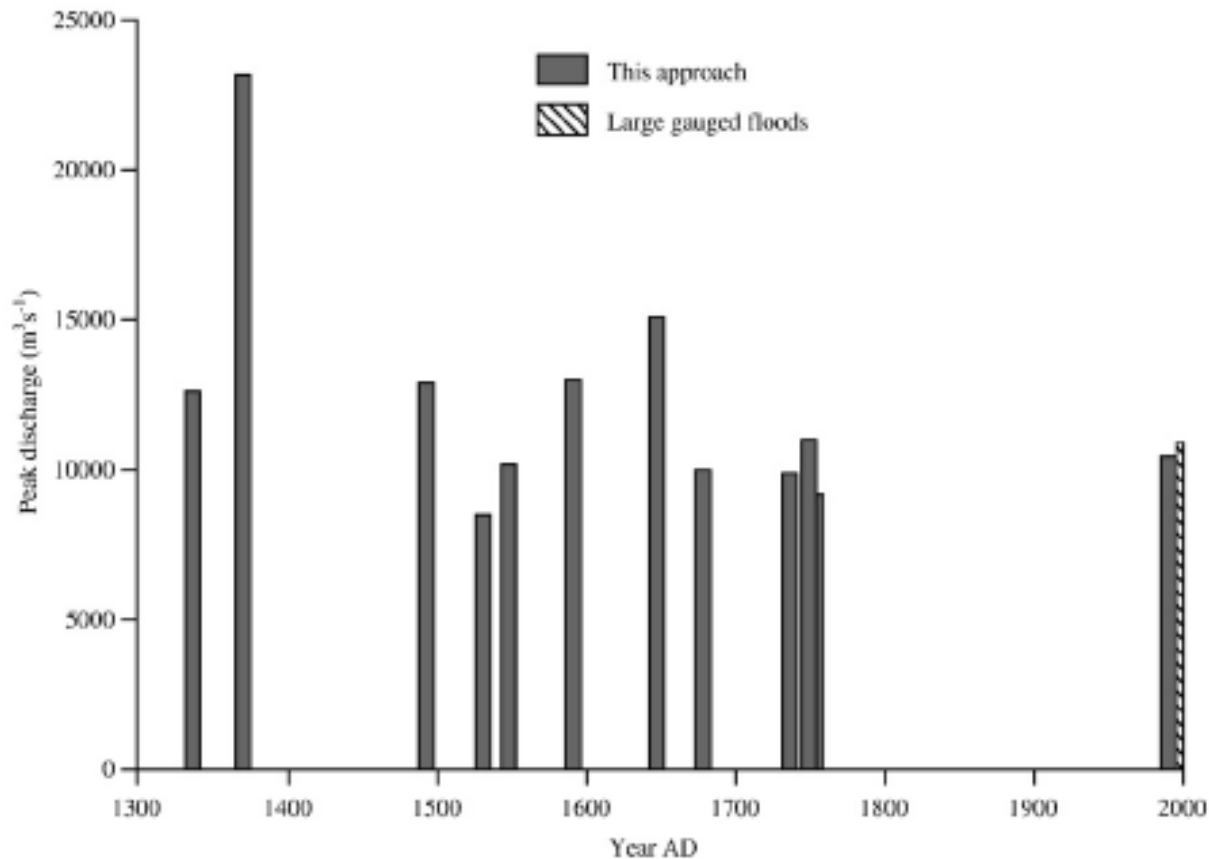


Fig. 6. Estimated peak discharges of historic floods compared with the 1993 and 1995 events.

Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany

Jürgen Herget^{*}, Hendrik Meurs¹

Historical, hydraulic, hydrological and meteorological reconstruction of 1874 Santa Tecla flash floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula)



Josep Lluís Ruiz-Bellet^{a,*}, Josep Carles Balasch^a, Jordi Tuset^{b,c}, Mariano Barriendos^d, Jordi Mazon^e, David Pino^{e,f}

Hydrometeorological reconstruction of the 1824 flood event in the Neckar River basin (southwest Germany)

KATRIN BÜRGER¹, PAUL DOSTAL², JOCHEN SEIDEL¹,

The great flood of 1726 at Bruton, Somerset

Colin Clark
CHRS, Bruton, Somerset

ing is the lack of detailed knowledge of the flood hydrology of small catchments. In the case of the upper Brue in Somerset, one at Plymouth (Devon) by John Huxham (1724–1726) and at Crane Court in London manned by Francis Hawksbee (Royal Society

The millennium flood of July 1342 revisited



Jürgen Herget^{a,*}, Alice Kapala^b, Maria Krell^a, Elke Rustemeier^b, Clemens Simmer^b, Adriana Wyss^b

Reconstruction of the 1784 flood hydrograph for the Vltava River in Prague, Czech Republic

L. Elleder

Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources

G. Pichard¹, G. Arnaud-Fassetta^{b,c}, V. Moron^{d,e} and E. Roucaute^{a,f}

Simulation of the great flood of December 1870 in Rome

G. Calenda, L. Calvani and C. P. Mancini

O que é a EMP?

Enchente Máxima Provável é a maior enchente que poderia ocorrer em um determinado local, geralmente estimada a partir da precipitação máxima provável (PMP), combinada com as mais severas condições antecedentes da bacia hidrográfica.



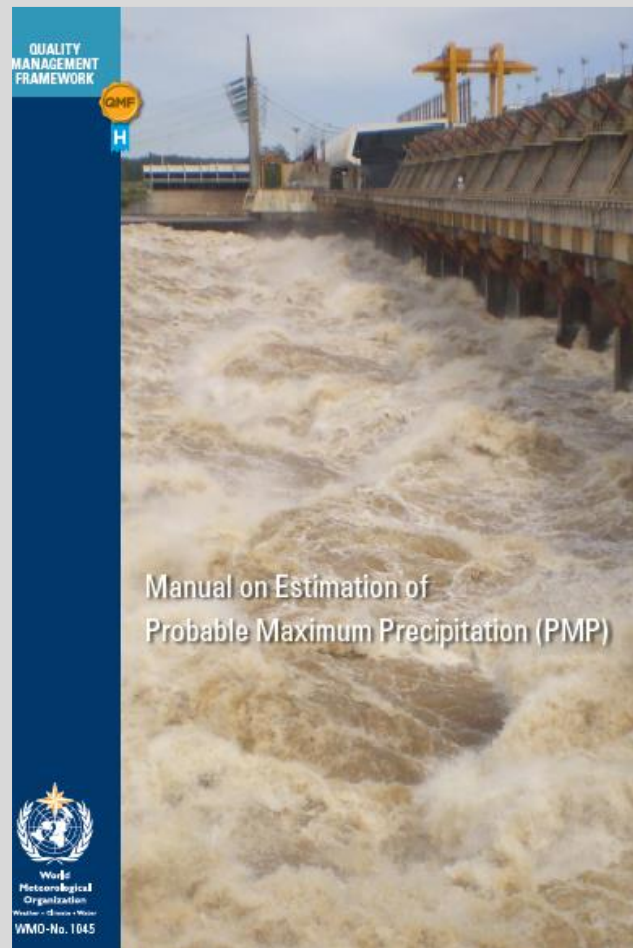
Por que EMP?

- Quando um grande número de vidas humanas está em jogo é difícil lidar com probabilidades reais de falha.
- Mesmo que as probabilidades sejam pequenas, elas são maiores do que zero.
- Por esse motivo, em alguns casos, busca-se o dimensionamento para o “pior caso possível”.



Métodos de estimativa da PMP

- Manual da WMO:
 - Estatístico
 - Hidrometeorológico



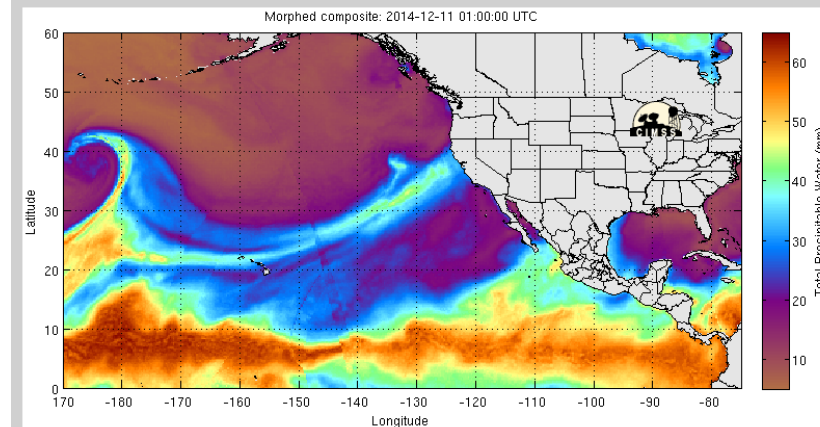
Novas propostas

Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over American River Watershed, California

N. Ohara, A.M.ASCE¹; M. L. Kavvas, F.ASCE²; S. Kure³; Z. Q. Chen, Ph.D., P.E., A.M.ASCE⁴; S. Jang⁵; and E. Tan, M.ASCE⁶

SSM/SSMIS/TMI-derived Total Precipitable Water - East Pacific

Current time: Thu, 11 Dec 2014 04:57:21 GMT



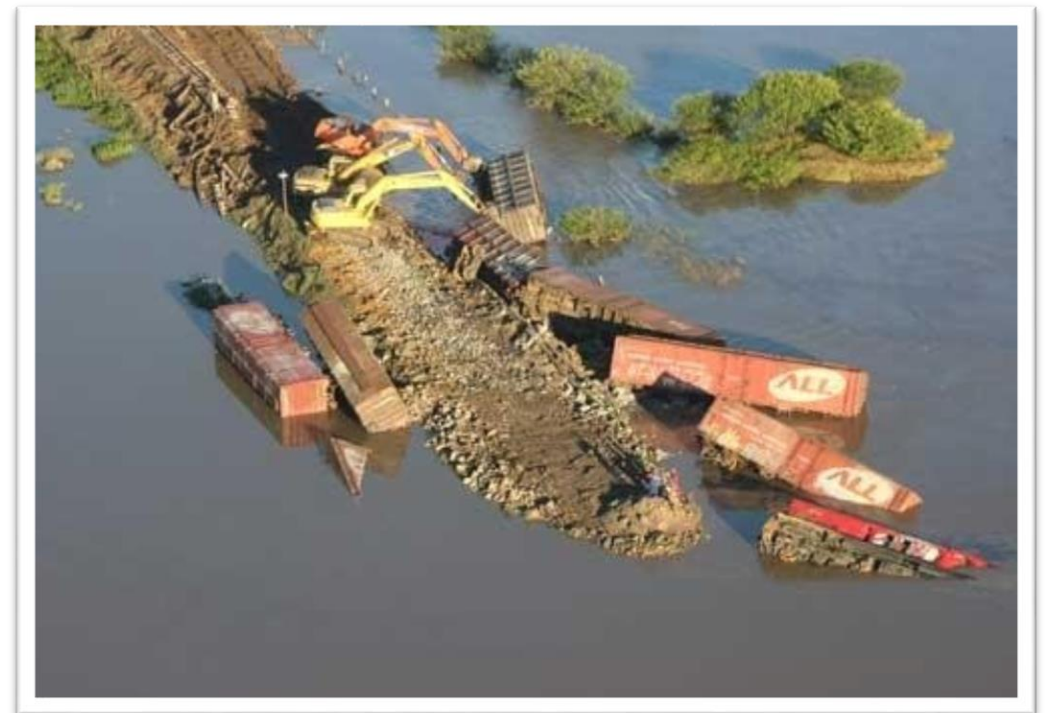
Método estatístico para PMP (resumido)

- Para uma dada duração, encontrar os maiores eventos de cada ano
 - Calcular média (MP_N)
 - Calcular desvio padrão (SP_N)
- Com este método, em várias aplicações no Brasil:
 - PMP = 500 a 600 mm em 1 dia
 - Pode parecer muito, mas já ocorreu!
 - Pelotas 2009 (ver Saldanha et al. 2012 – RBRH)

- PMP é calculada por:

$$PMP = MP_N + K \cdot SP_N$$

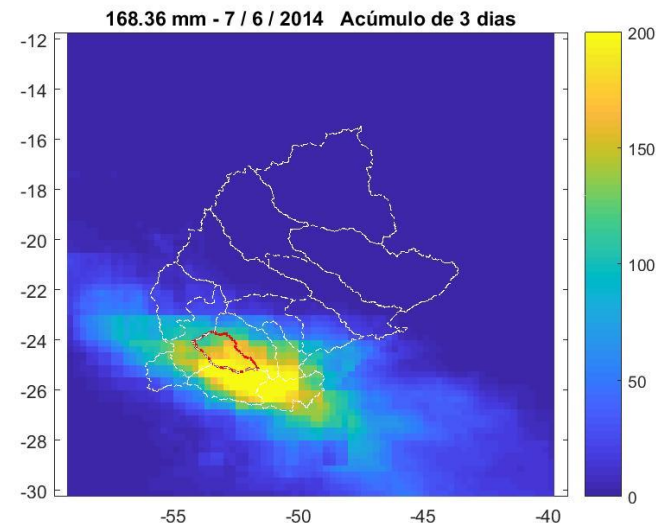
- Com $K = 15$ (segundo Hershfield)



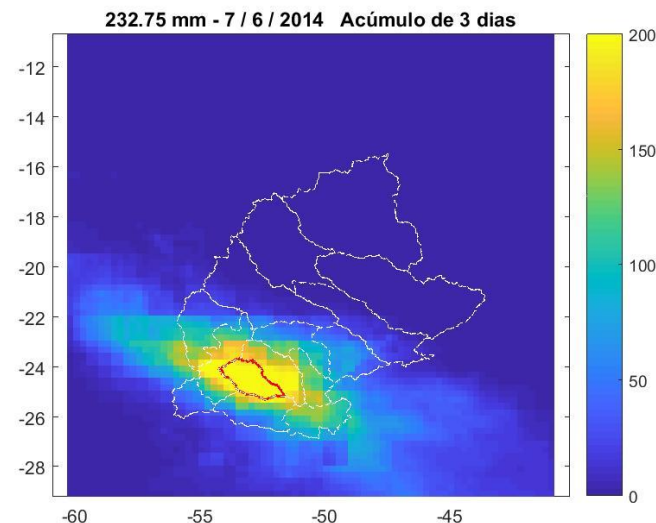
PMP pelo método hidrometeorológico

- Selecione o maior de todos os eventos na região
- Usando os dados disponíveis, estime a quantidade de água precipitável durante o evento
- Analise uma longa série temporal de valores de água precipitável e encontre o maior valor da série
- Estime PMP por:

$$PMP = P_{obs} \cdot \frac{W_{max}}{W_{obs}}$$



Maior evento de 1980 a 2014

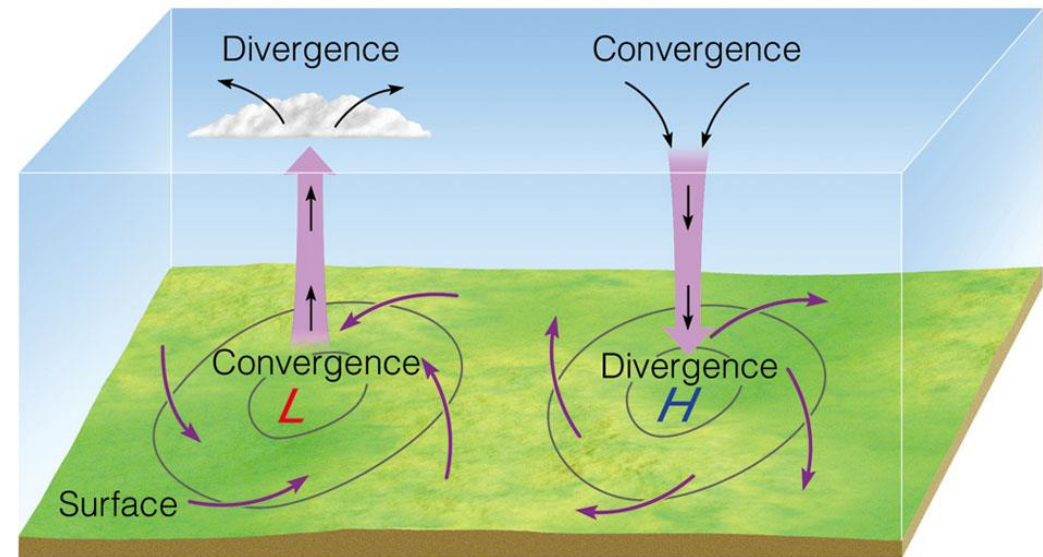


Campo de chuva deslocado
150 km para NW
Incremento de
38% na Precipitação

Críticas a PMP pelo método hidrometeorológico

- Valores típicos do fator de maximização (W_{max}/W_{obs}) estão próximos de 1,3 ou 1,5
- Raramente próximos de 2
- Isso significa que a PMP será menor do que o dobro da maior chuva observada na mesma região climática
- Maximiza água precipitável mas não maximiza convergência de umidade
- Eventos extremos de chuva são várias vezes maiores do que a água precipitável
- Possivelmente o controle do processo é a convergência de umidade

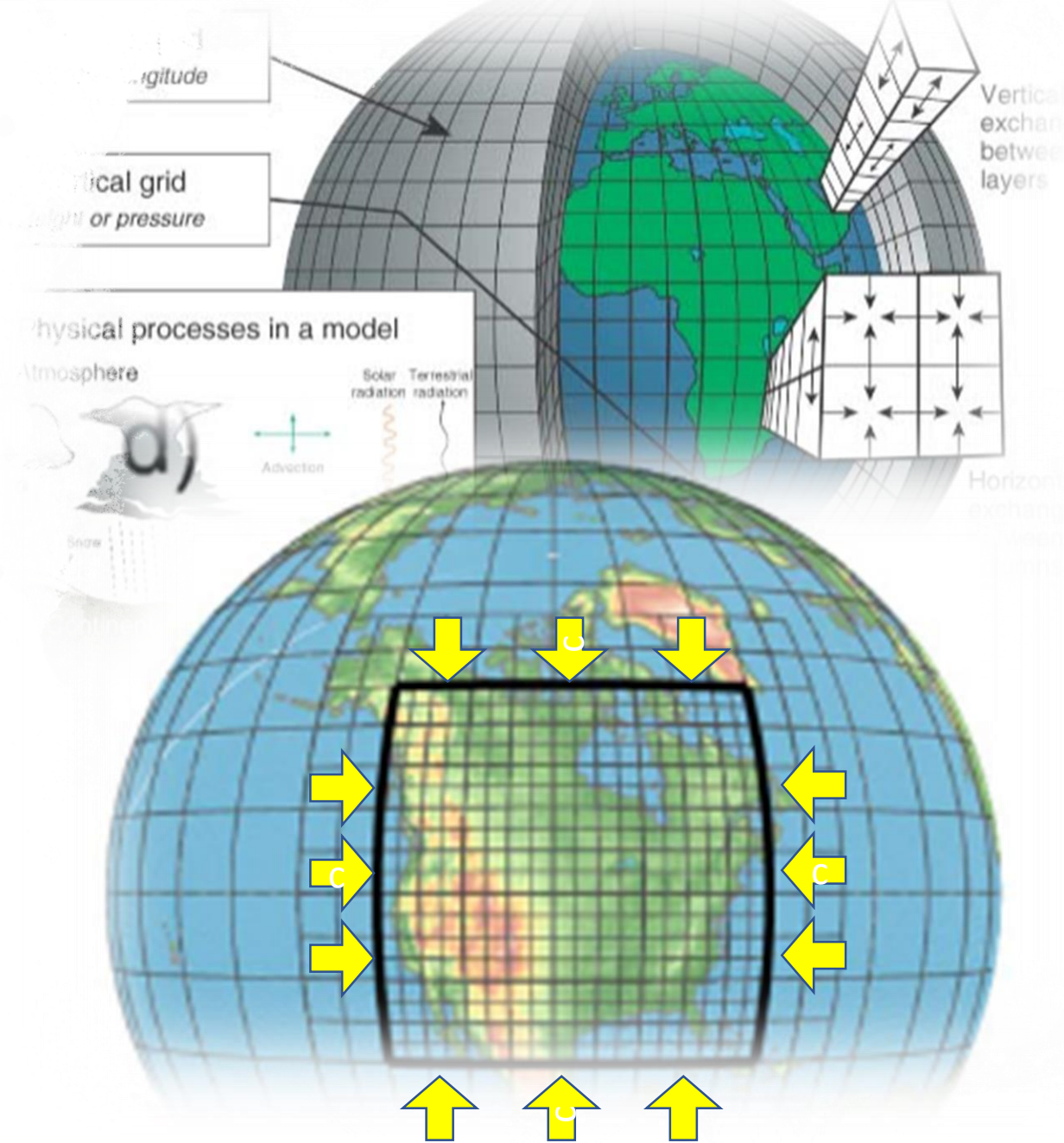
$$PMP = P_{obs} \cdot \frac{W_{max}}{W_{obs}}$$



Novas tendências PMP

(PMP estimada por modelo meteorológico)

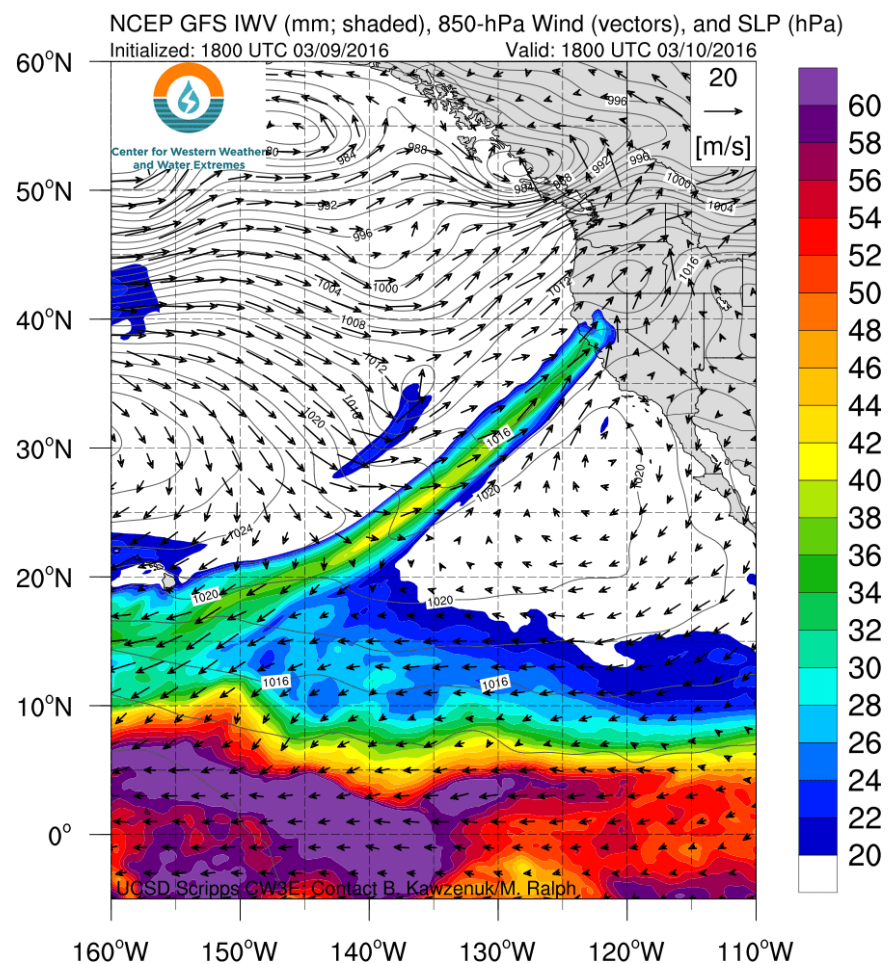
- Evento severo é simulado em um modelo global (reanálise).
- Condições de contorno nas fronteiras do modelo regional são modificadas, maximizando a umidade em todos os pontos.
- Vento também pode ser maximizado e reposicionado.
- Condições de contorno modificadas são utilizadas para rodar modelo regional.



PMP estimada por modelo meteorológico

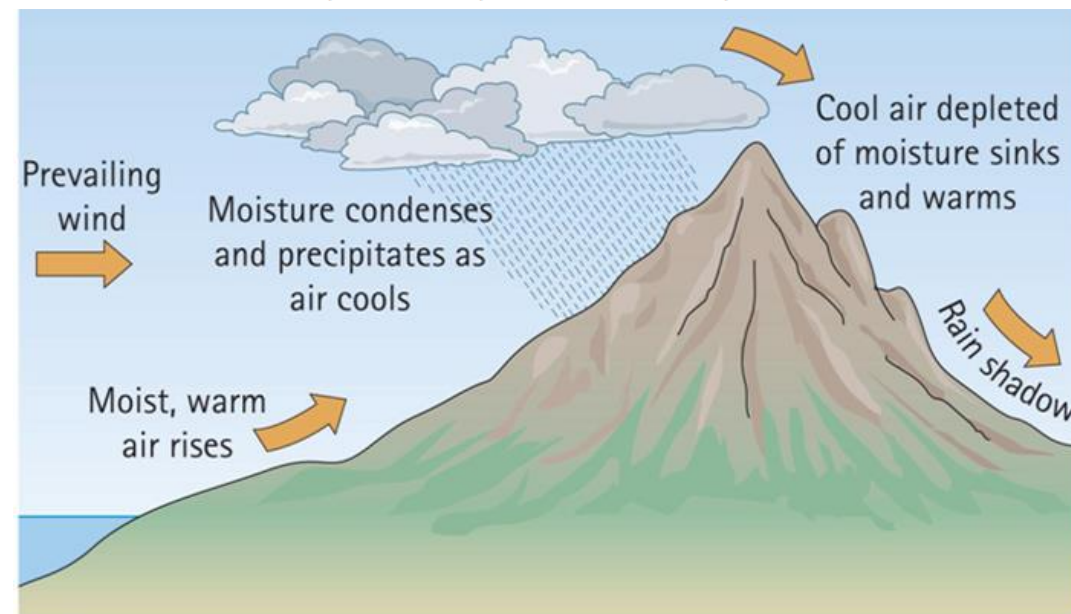
Particularmente interessante em bacias com efeito orográfico

“Rios voadores”



Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over Three Watersheds in Northern California: Relative Humidity Maximization Method

K. Ishida¹; M. L. Kawvas, F.ASCE²; S. Jang³; Z. Q. Chen, A.M.ASCE⁴; N. Ohara, A.M.ASCE⁵; and M. L. Anderson, A.M.ASCE⁶



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

PMP estimada por modelo meteorológico

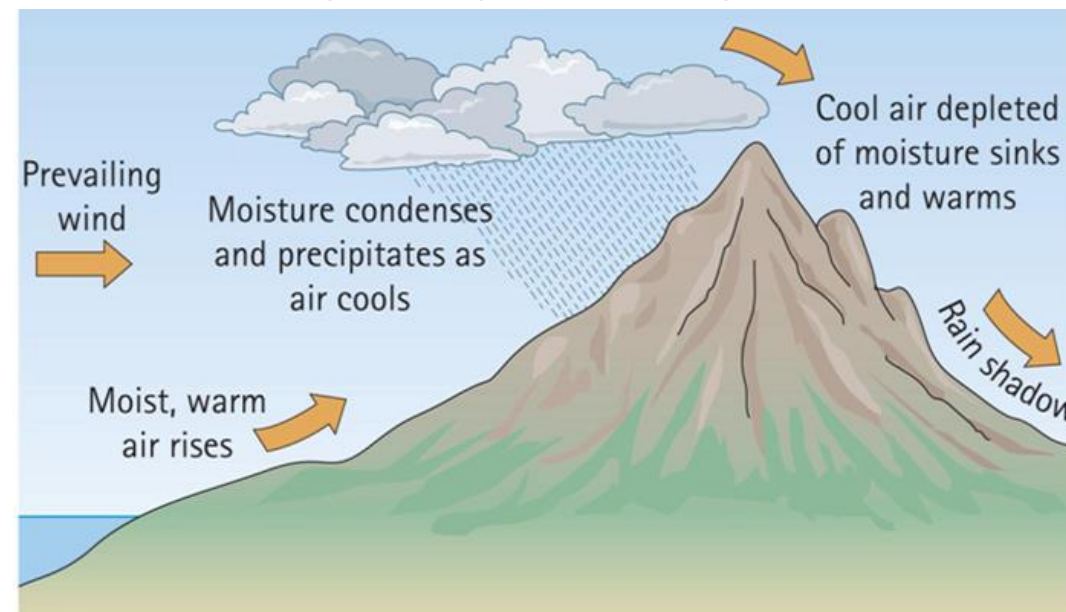
Particularmente interessante em bacias com efeito orográfico

PMP de 72 horas de duração encontrada pelo método:
738 mm no American River

Comparam com PMP estimada por outros métodos:
800 mm
726 mm
752 mm

Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over Three Watersheds in Northern California: Relative Humidity Maximization Method

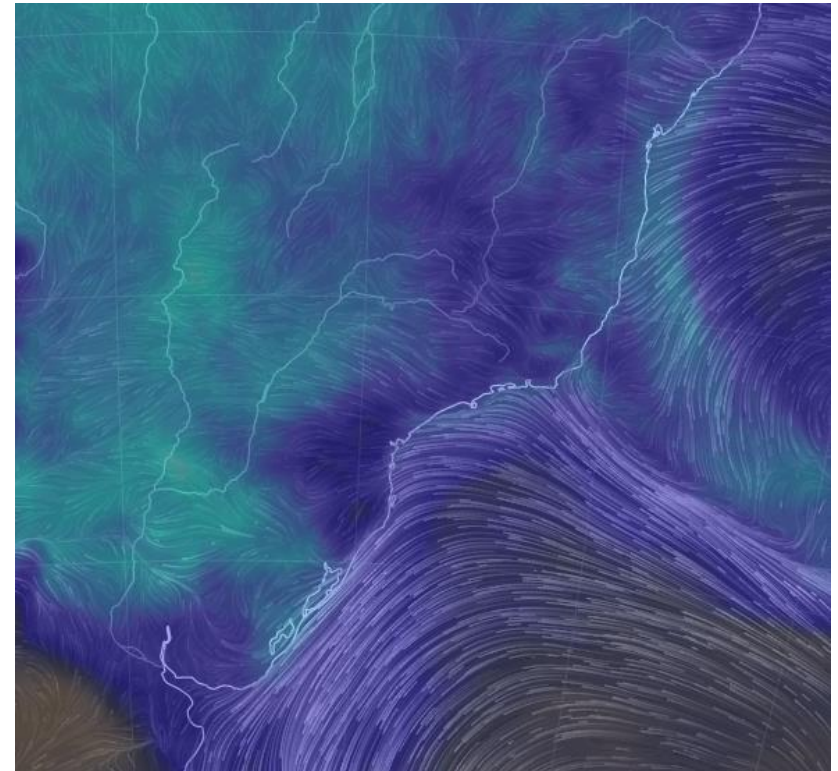
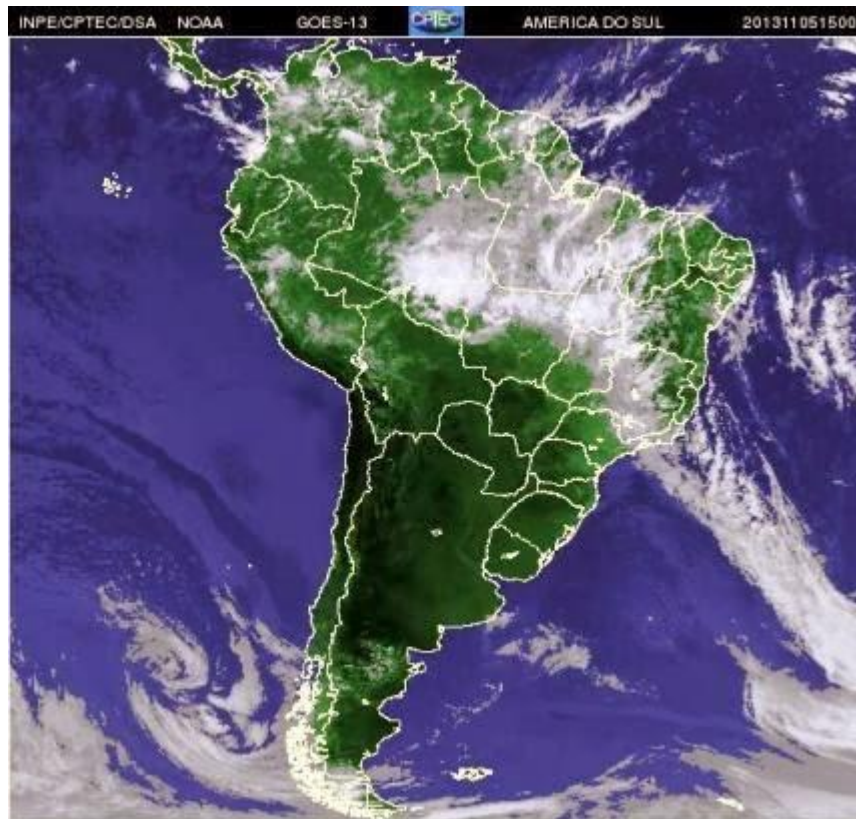
K. Ishida¹; M. L. Kavvas, F.ASCE²; S. Jang³; Z. Q. Chen, A.M.ASCE⁴;
N. Ohara, A.M.ASCE⁵; and M. L. Anderson, A.M.ASCE⁶



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

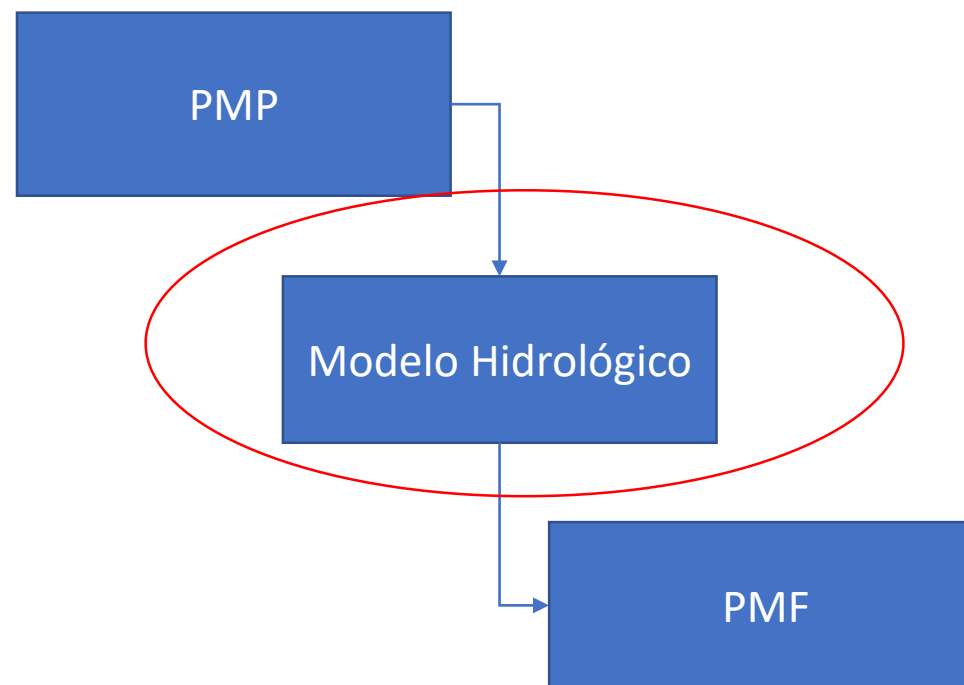
PMP estimada por modelo meteorológico

Potencial no Brasil?



Da PMP a EMP

- O modelo hidrológico é uma parte frágil do processo de estimativa de cheias extremas usando a PMP



Uma interessante análise crítica

RBRH

Revista Brasileira de Recursos Hídricos
Versão On-line ISSN 2318-0331
RBRH vol. 20 n. 4 Porto Alegre out./dez. 2015 p. 837 - 848

Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia

Evaluation of the SCS method for effective rainfall and flood hydrograph estimation

Stéphanie Fernandes Cunha, Francisco Eustáquio Oliveira e Silva, Tainá Ulhoa Mota e Mário Cicareli Pinheiro

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

stephaniefernandes@bottmail.com, feoentstauquo@gmail.com, tainamota@uol.com.br, mario.cicareli@potamos.com.br

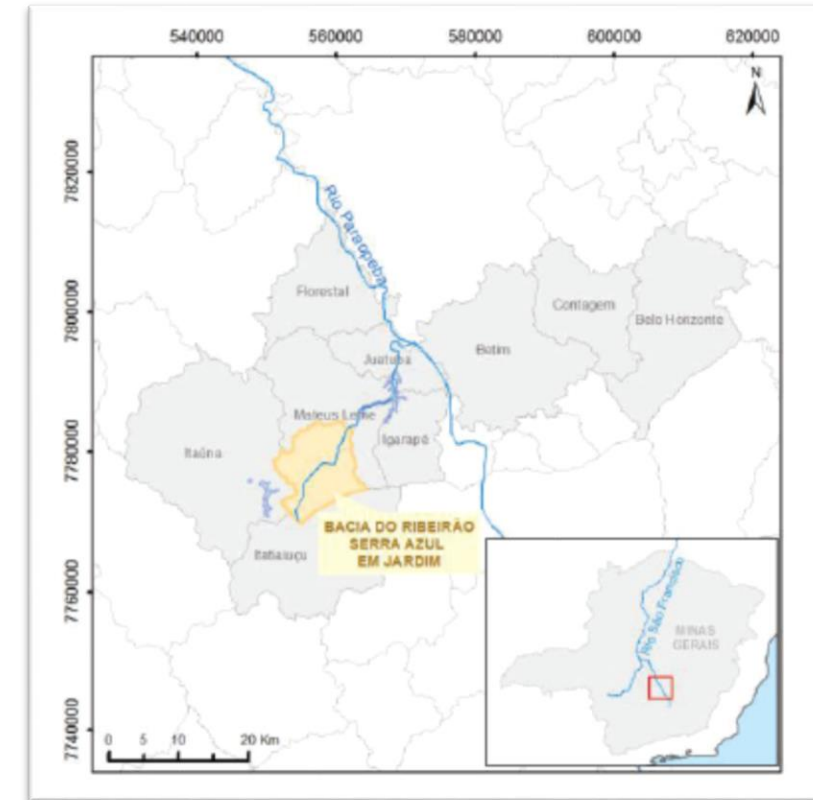
Recebido: 13/03/15 - Revisado: 04/05/15 - Aceito: 29/06/15

RESUMO

No Brasil, o método do SCS é tradicionalmente utilizado como modelo hidrológico de chuva-vazão. Entretanto, esse modelo foi formulado para bacias com características específicas de porte, tipos, usos e manejo do solo. O emprego generalizado do método SCS-CN, com base em valores de referência do parâmetro CN, tem conduzido a estimativas de vazões de cheia consideradas superestimadas por experientes engenheiros de recursos hídricos. Neste contexto, este trabalho avaliou e comparou a precipitação efetiva e os hidrogramas de cheia de projeto resultantes da aplicação da metodologia do SCS com eventos de chuva e vazão observados na bacia do ribeirão Serra Azul, Minas Gerais. Para tal, a bacia foi modelada segundo dois cenários. No primeiro, utilizou-se a metodologia do SCS para cálculo da precipitação efetiva, considerando o CN fornecido pelas tabelas do SCS, e o hidrograma unitário sintético proposto pela mesma instituição. No segundo cenário, aplicou-se a precipitação efetiva considerando valores de CN calibrados a partir de sua variação com a altura de chuva, e o hidrograma unitário derivado a partir de dados litográficos. Finalmente os eventos simulados foram comparados com os dados observados. Os resultados indicam que o método do SCS tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico, principalmente para eventos de maior magnitude, que são normalmente adotados nas condições de projeto. Em compensação, o modelo ajustado para cálculo do CN em função da chuva combinado com o hidrograma unitário médio da bacia forneceu resultados com menor erro percentual em relação aos eventos monitorados.

Palavras Chave: SCS Curve Number. Método de ajuste assintótico. Hidrograma unitário

- Ribeirão Serra Azul (MG)
- Usando SCS – CN
- Método comum na engenharia
- Péssimos resultados!



- Stéphanie Fernandes Cunha, Francisco Eustáquio Oliveira e Silva, Tainá Ulhoa Mota e Mário Cicareli Pinheiro
- Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia
- RBRH 2015

SCS – duas bacias, duas conclusões

Collischonn (1995) – Trabalho de disciplina
Rio Tainhas



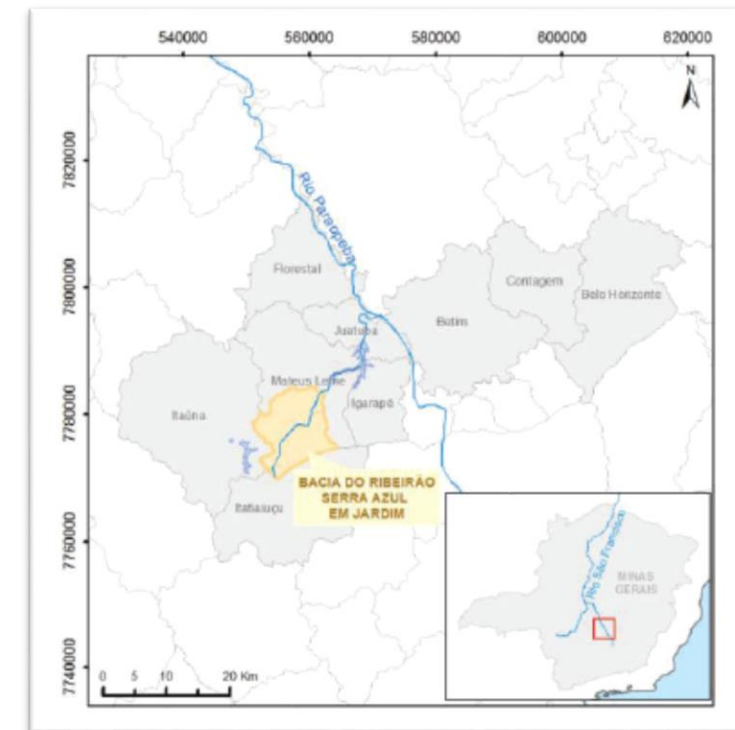
Bacia montanhosa, basalto

Vazões máximas estimadas
pelo SCS semelhantes
às vazões máximas observadas,
sem calibrar.

Stéphanie Fernandes Cunha, Francisco Eustáquio Oliveira e Silva, Tainá
Ulhoa Mota e Mário Cicareli Pinheiro – RBRH 2015

Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação
efetiva e hidrogramas de cheia

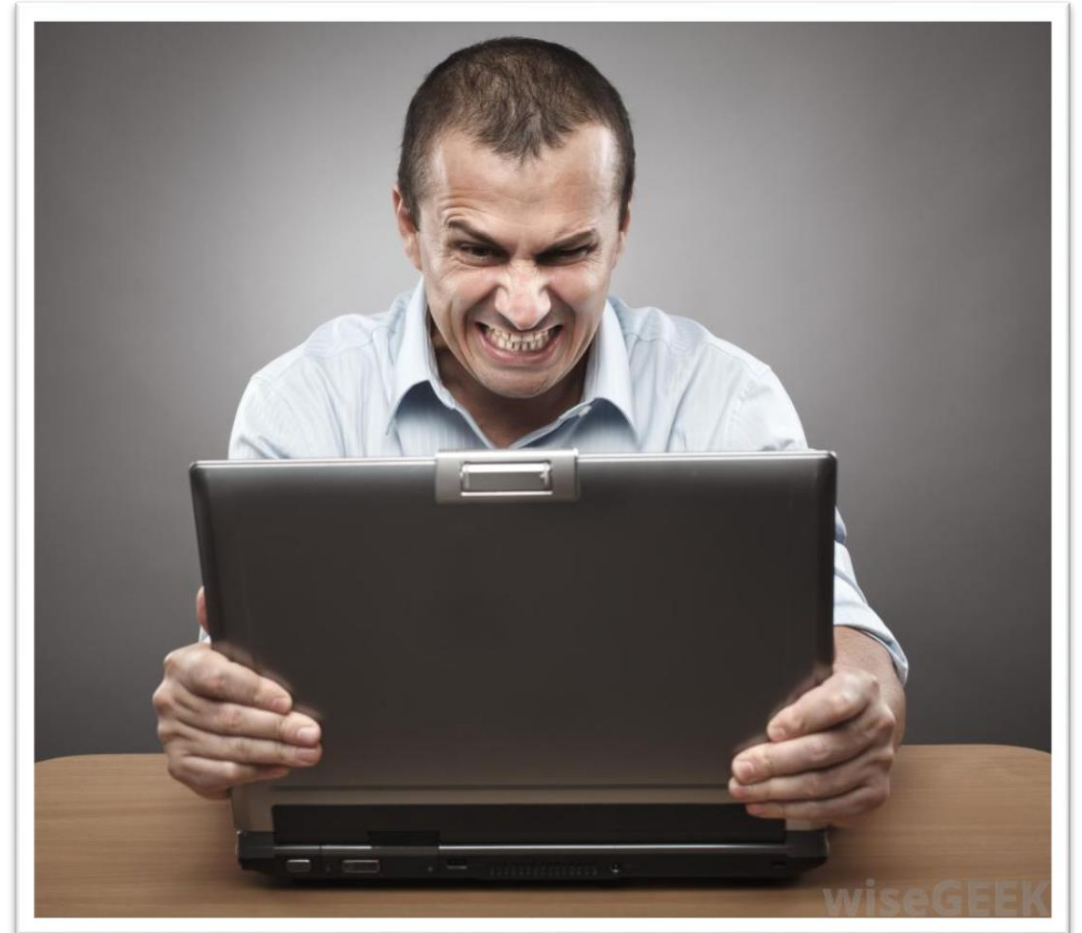
- Ribeirão Serra Azul
- Latossolos
- Argissolos



- “Os resultados indicam que o método do SCS tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico.”

Por que o modelo por vezes funciona tão mal?

- Geração de escoamento
 - Base de dados e tabelas geradas nos EUA são inadequados para o Brasil
 - Solos tropicais?
 - Macroporosidade?
 - Vegetação?
- Propagação do escoamento
 - Tempo de concentração
 - Hidráulica fluvial
 - Seção transversal
 - Planícies



Dois aspectos em que os modelos hidrológicos podem melhorar

Simulação contínua

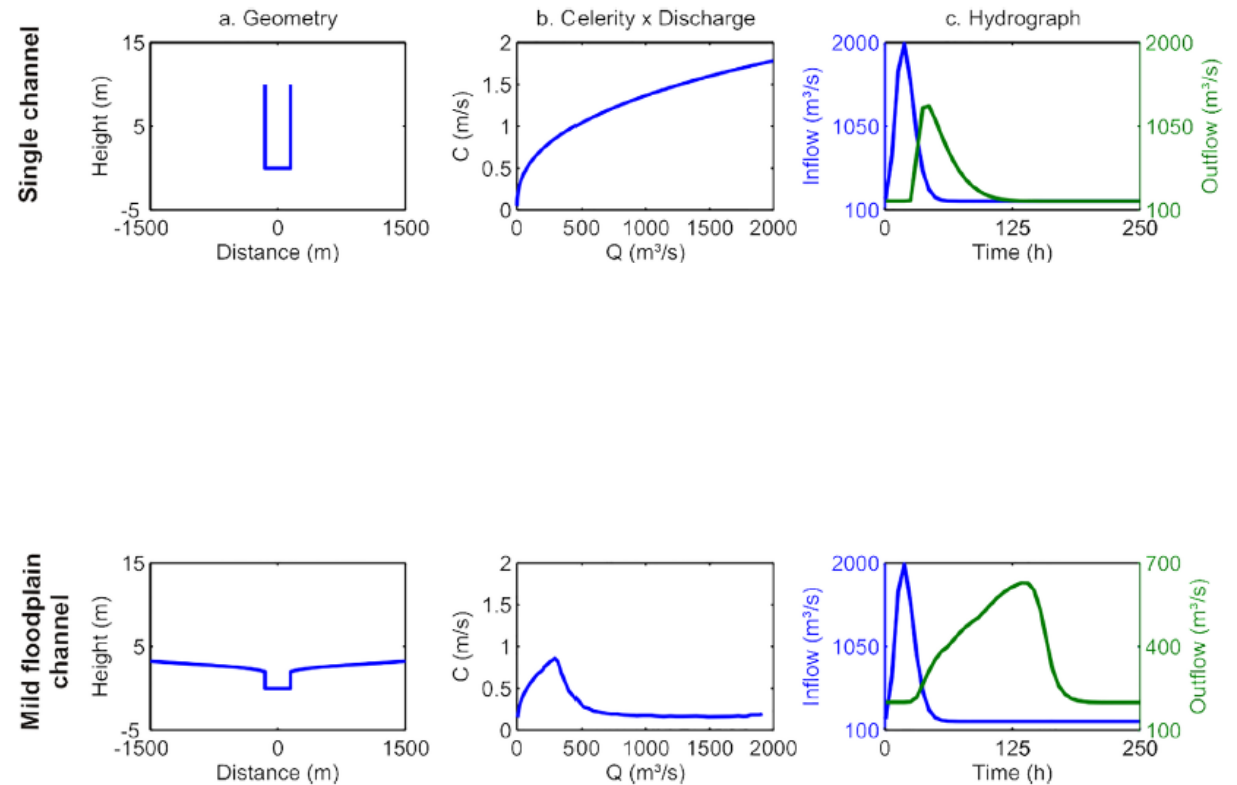
- Algumas vantagens interessantes:
 - Melhor para calibração
 - Melhor para condições iniciais
 - Menos sensível ao método de separação de escoamento
- Explico detalhes em uma próxima oportunidade!

Representação adequada de planícies



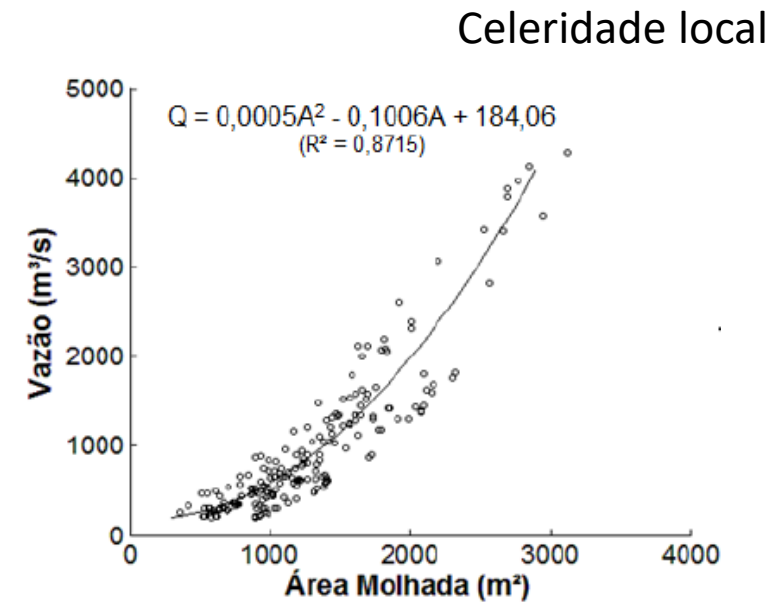
Representação das planícies

- Áreas inundáveis adjacentes aos rios alteram profundamente os hidrogramas.
- A velocidade de propagação das ondas de cheia se altera.
- Planícies de inundação impõe um limite para a condutância hidráulica.

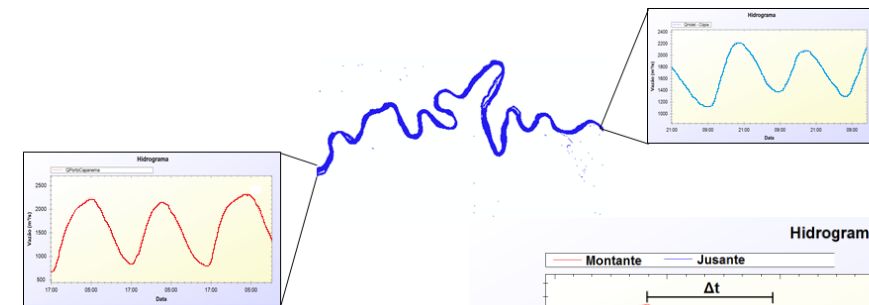


Celeridade
(velocidade de
propagação de
onda de cheia)

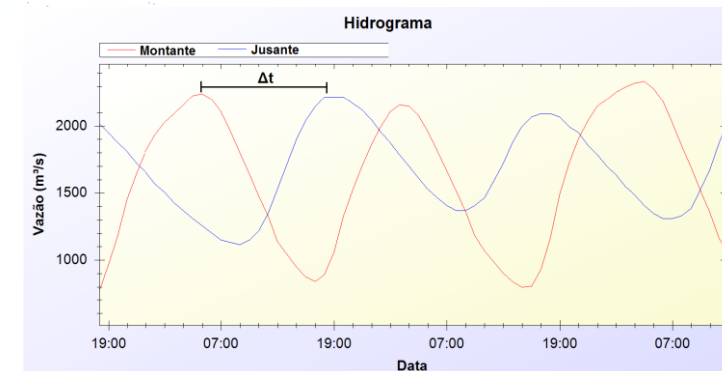
Pode ser estimada de duas
formas:



$$c = \frac{dQ}{dA}$$

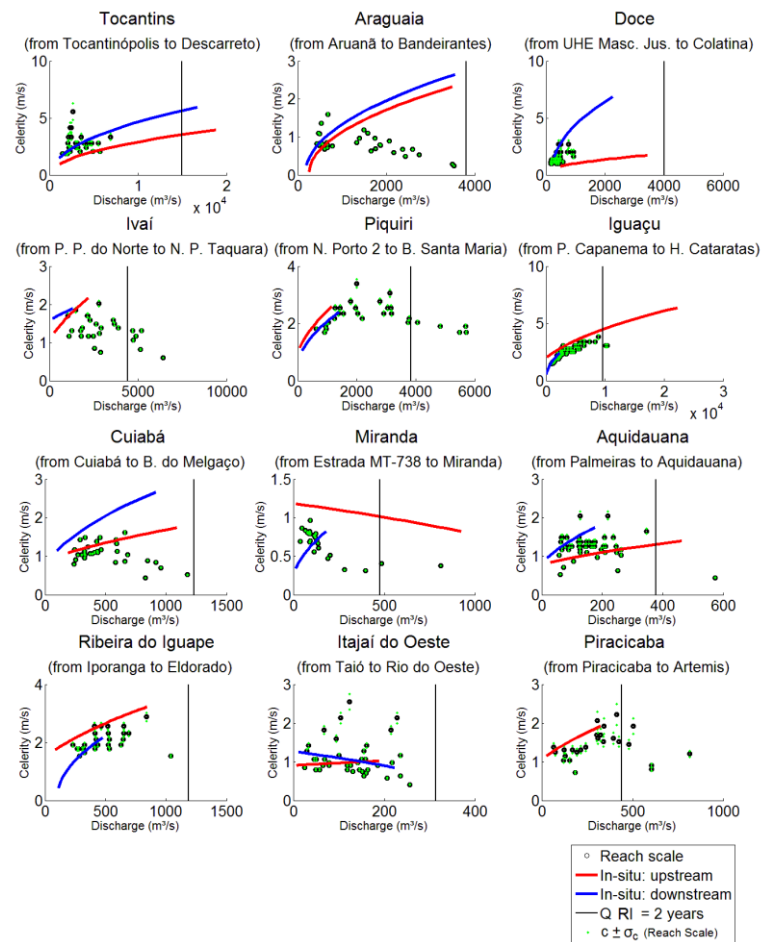


$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

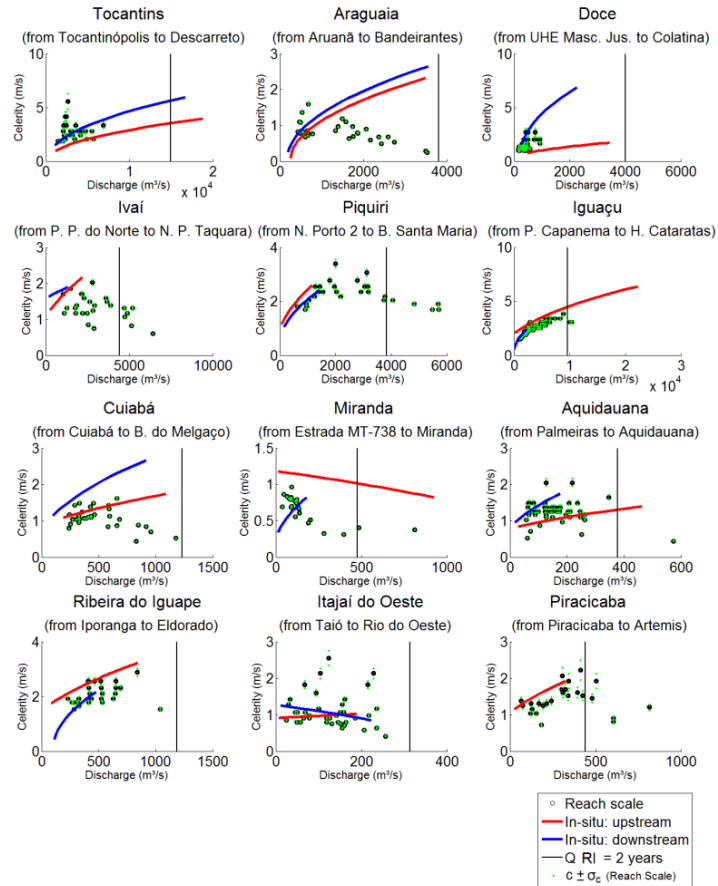


Celeridade no trecho

Avaliação empírica da relação $c \times Q$



Avaliação empírica da curva celeridade x vazão

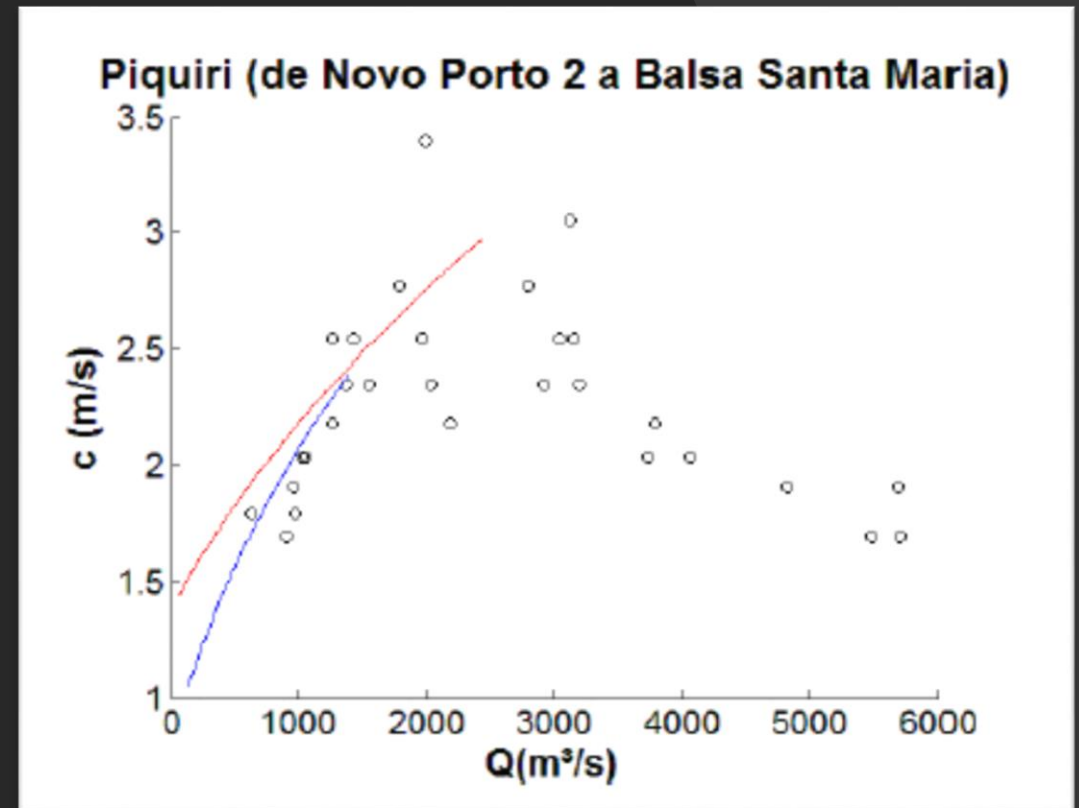


Meyer et al., in press *Journal of Hydrological Sciences*
 Empirical assessment of flood wave celerity-discharge
 relationships at local and reach scales

O efeito das planícies (empírico)

- Celeridade deixa de aumentar e até diminui com a vazão!
- Celeridade estimada com base nos dados das estações fluviométricas só aumenta com a vazão!
- Por que?
- Postos fluviométricos são instalados em seções relativamente encaixadas. Nem sempre são representativas do trecho de rio!

*Meyer et al., in press Journal of Hydrological Sciences
Empirical assessment of flood wave celerity-discharge
relationships at local and reach scales*

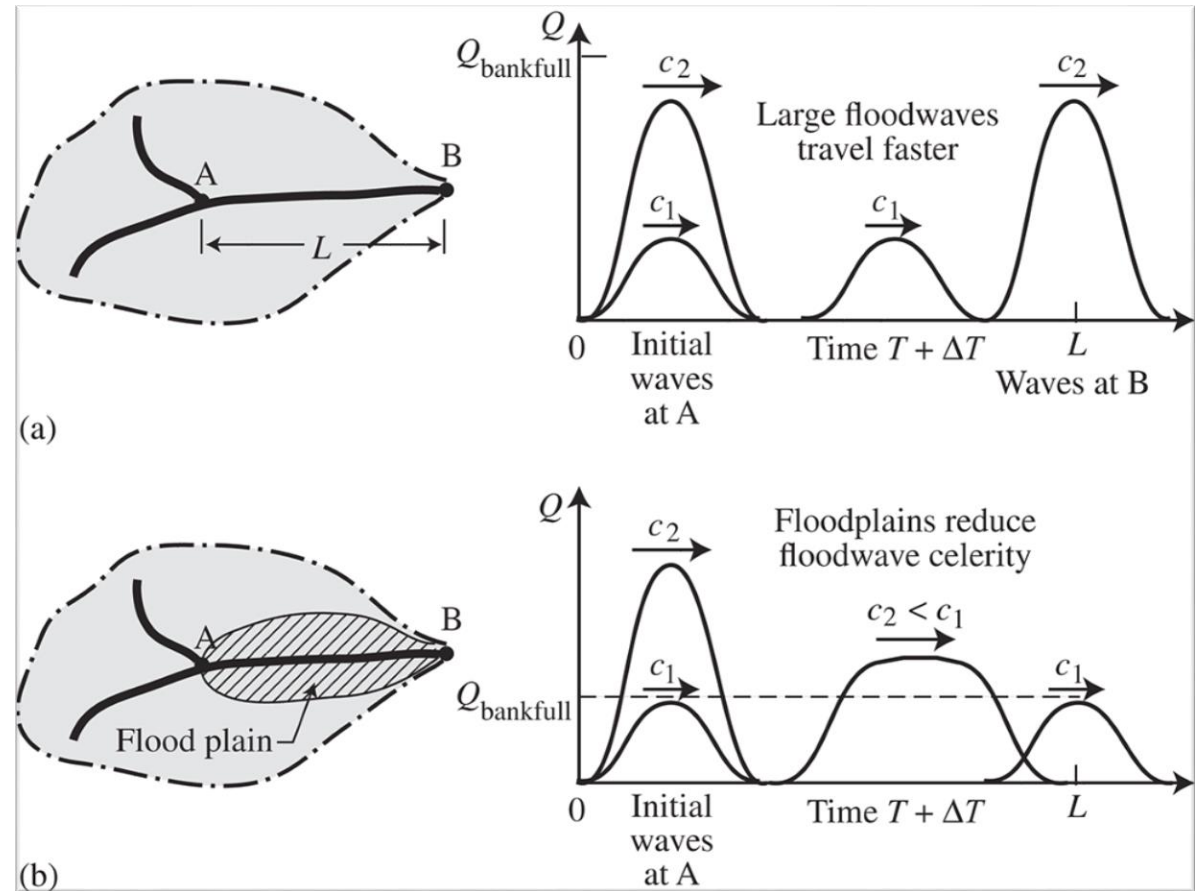


**COMPREENDENDO ONDAS DE CHEIA: ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE
CELERIDADE E VAZÃO EM RIOS BRASILEIROS**

Aline Meyer^{1} & Ayan Fleischmann² & Walter Collischonn³ & Rodrigo Paiva⁴*

O efeito das planícies

- Em rios com planície:
 - Grandes cheias se propagam mais lentamente do que pequenas cheias.
 - Atenuação do pico é intensa!



Onde estão as planícies inundáveis?

- Áreas inundáveis são típicas de grandes rios de planície como Paraguai e Araguaia.
- Mas planícies de inundação existem também em pequenas bacias
 - Até mesmo no Ribeirão Serra Azul
- Raramente são representadas de forma adequada nos modelos



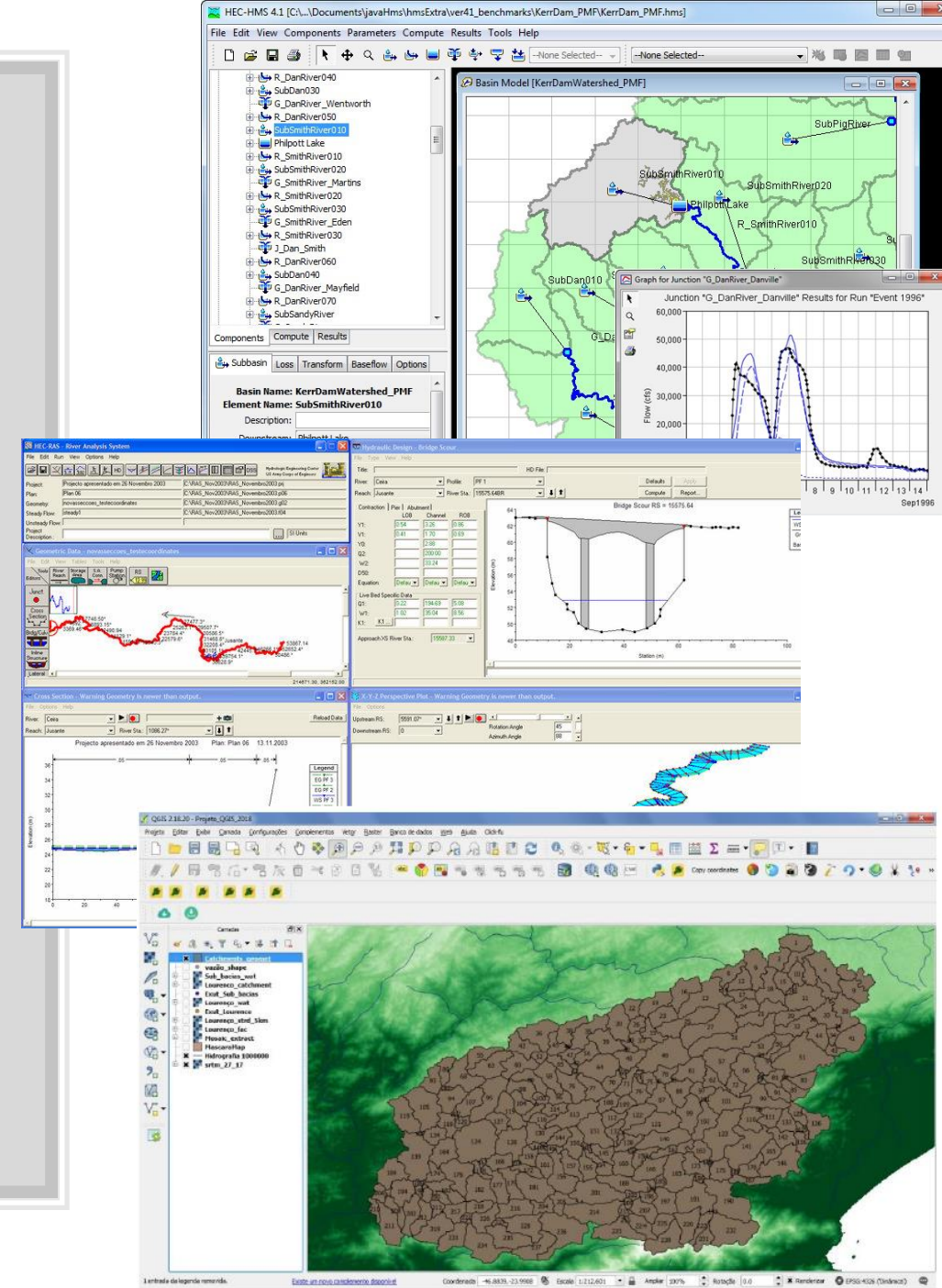
Como isso afeta a segurança de barragens?

- Muitos métodos utilizados em hidrologia são lineares
- Hidrograma unitário, por exemplo, é válido se a celeridade é constante, independentemente da vazão.
 - HU pode até estar certo em certos casos, mas em muitos casos não está!
- Outros métodos lineares:
 - Muskingum
- Métodos não lineares também podem estar errados, se os dados forem incompletos!

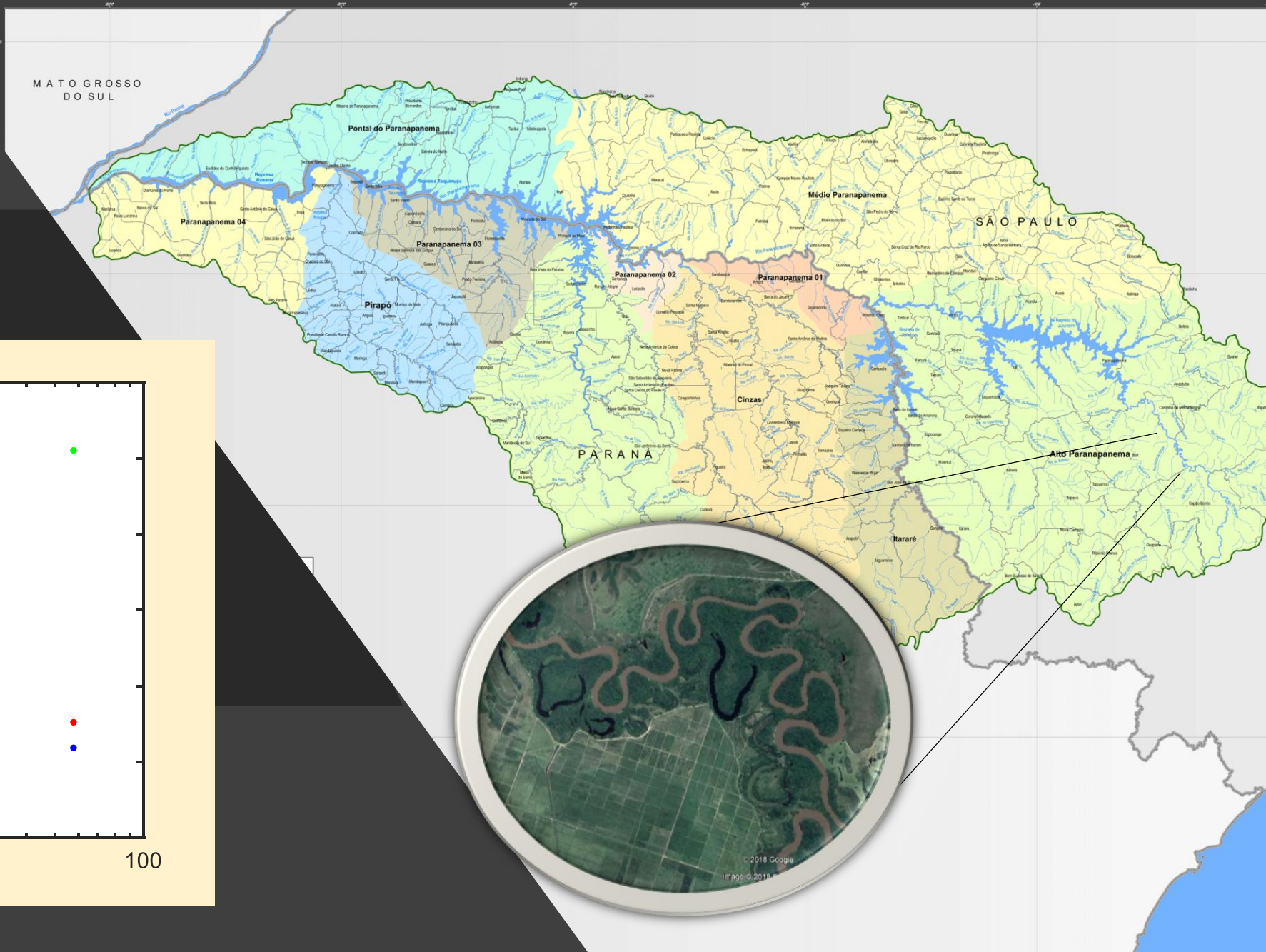


Como o efeito das planícies pode ser considerado?

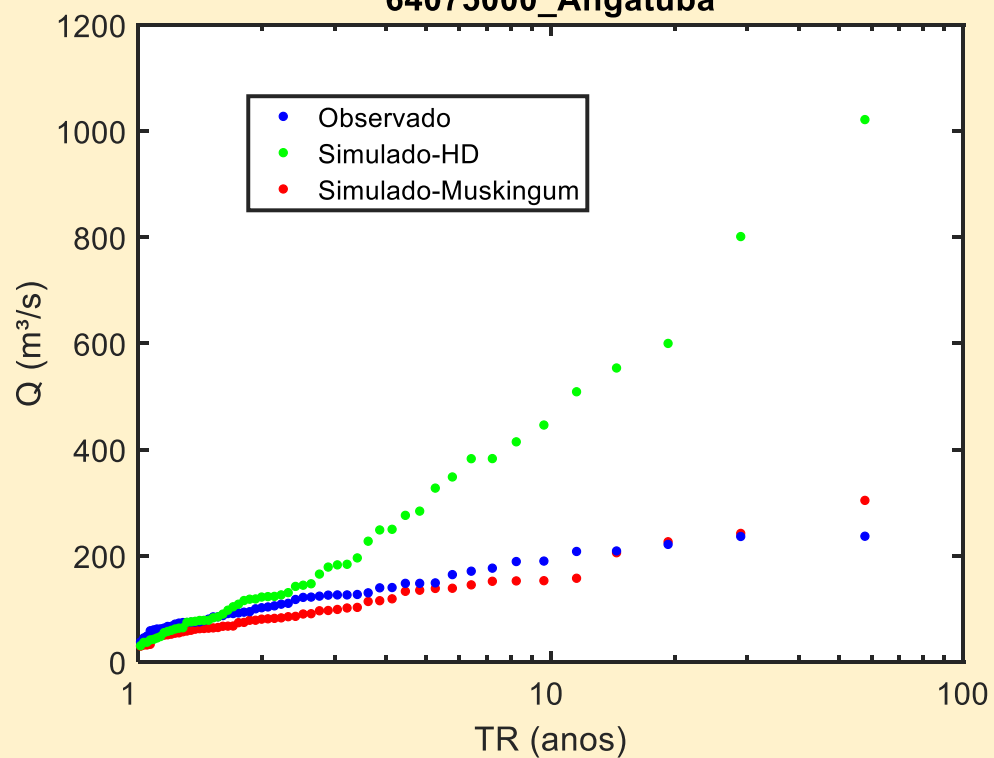
- Utilizar modulo de propagação adequado em modelo hidrológico
 - Muskingum Cunge não linear
 - MGB Inercial
- Modelo hidrodinâmico
 - HEC-RAS acoplado a modelo hidrológico



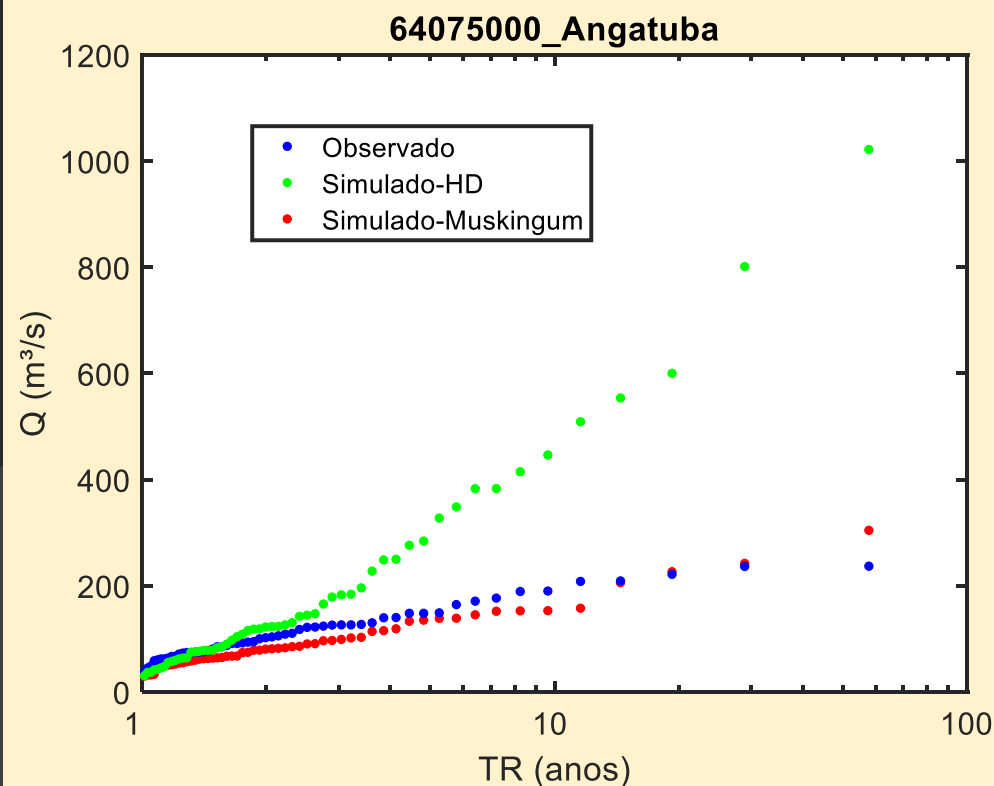
Um caso interessante no rio Paranapanema (modelo MGB)



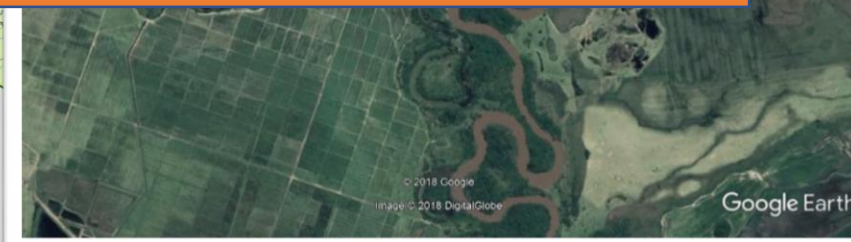
64075000_Angatuba



Um caso interessante no rio Paranapanema



Incluindo as planícies no modelo hidrológico MGB a curva de vazões máximas ficou mais próxima das observações! (especialmente para TR>2 anos)

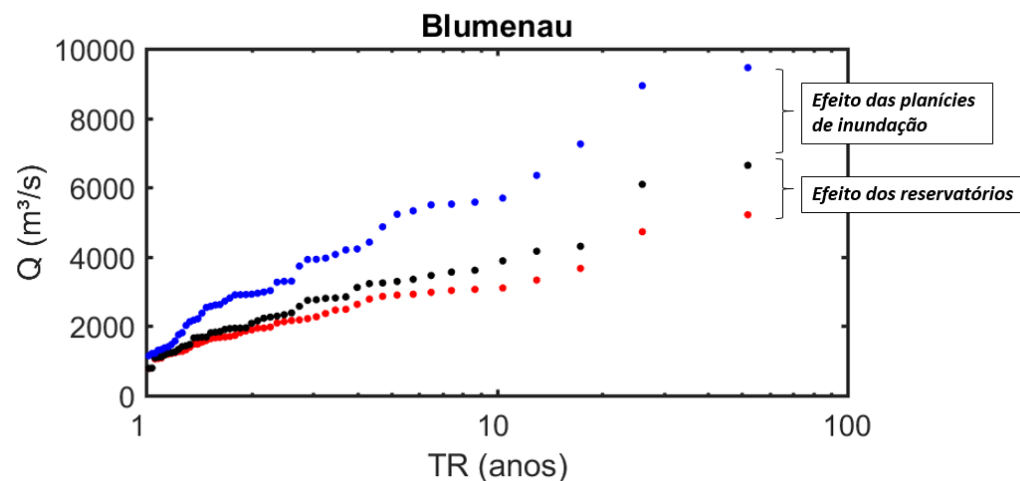


Outro exemplo interessante

- Bacia do rio Itajaí
- Reservatórios de controle de cheia
- Planícies naturais adjacentes ao rio



Papel relativo de planícies de inundação e reservatórios na atenuação de vazões máximas em Blumenau – bacia Itajaí-Açu

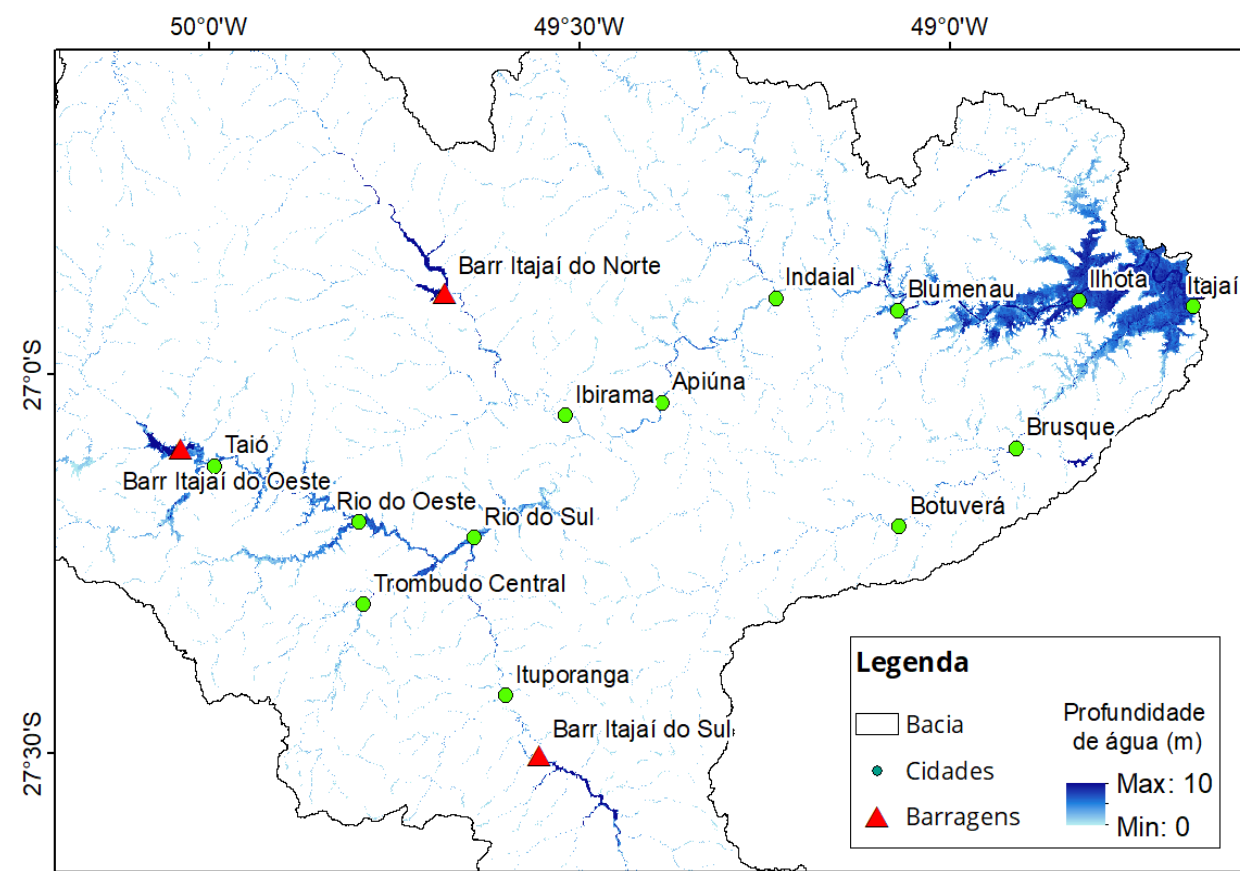


Legenda

- Com reservatórios e planícies (padrão)
- Sem reservatório e com planícies
- Sem reservatório e sem planícies

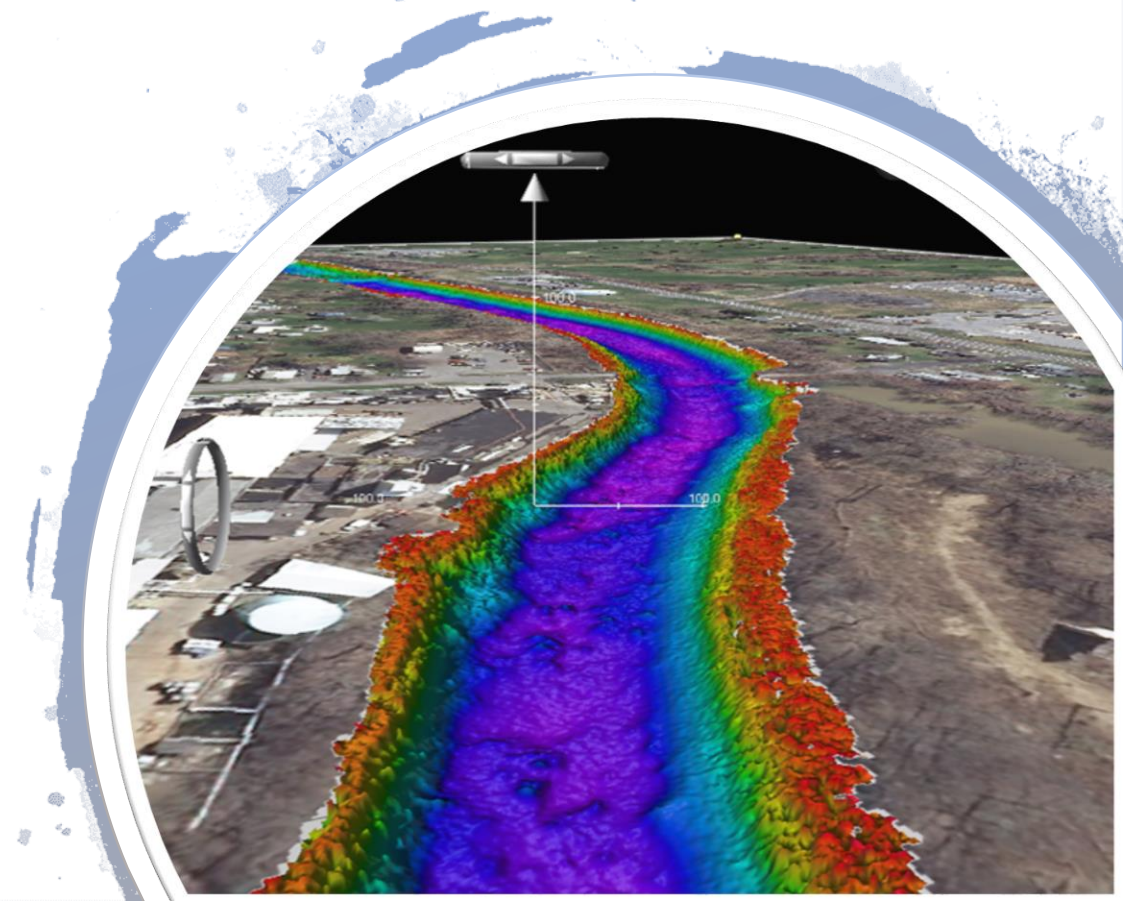
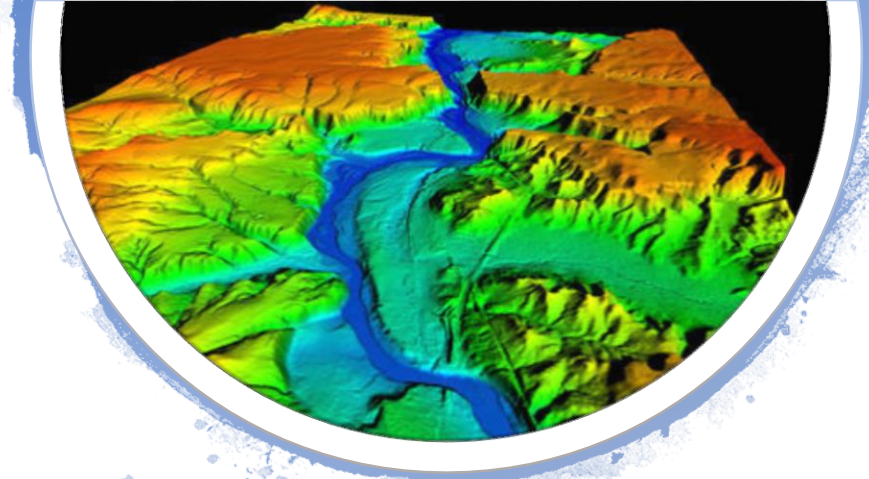
Planícies possivelmente provêm mais
 Proteção para Blumenau do que os três
 Reservatórios de controle de cheias existentes

Máxima área inundada e profundidade de água



De onde virão os dados necessários?

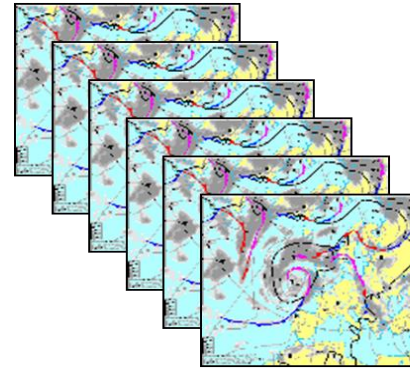
- Geometria hidráulica e forma da seção poderá ser melhor caracterizada em breve com:
 - Novos sensores em órbita
 - Drones
 - Batimetria multi-feixe



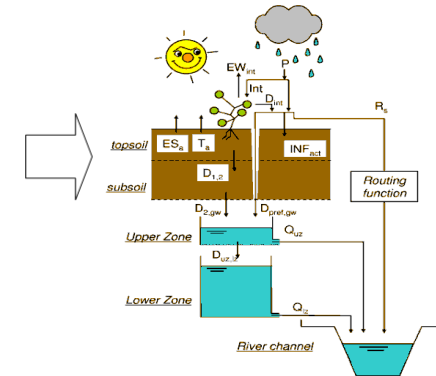
Aprimorando a operação

- Previsão por ensemble
- Previsão dinâmica do pior cenário meteorológico
 - Meteorologistas ainda resistem
 - PMP dinâmica?

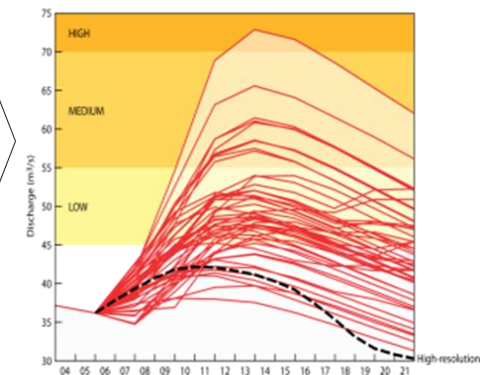
Conjunto de previsões meteorológicas



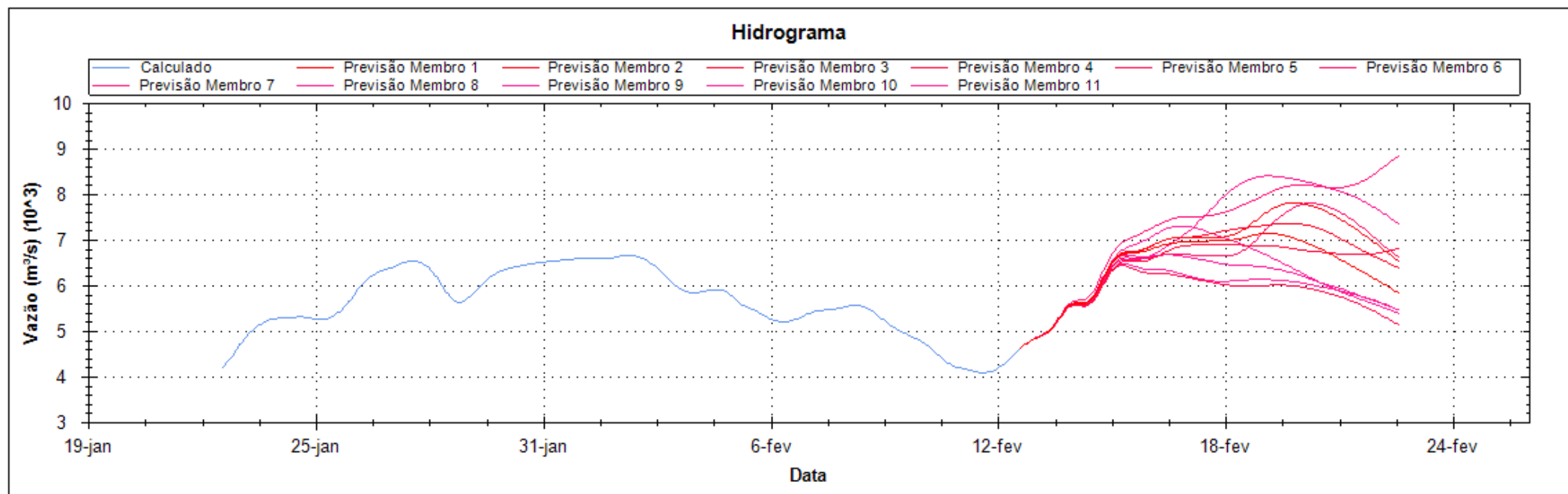
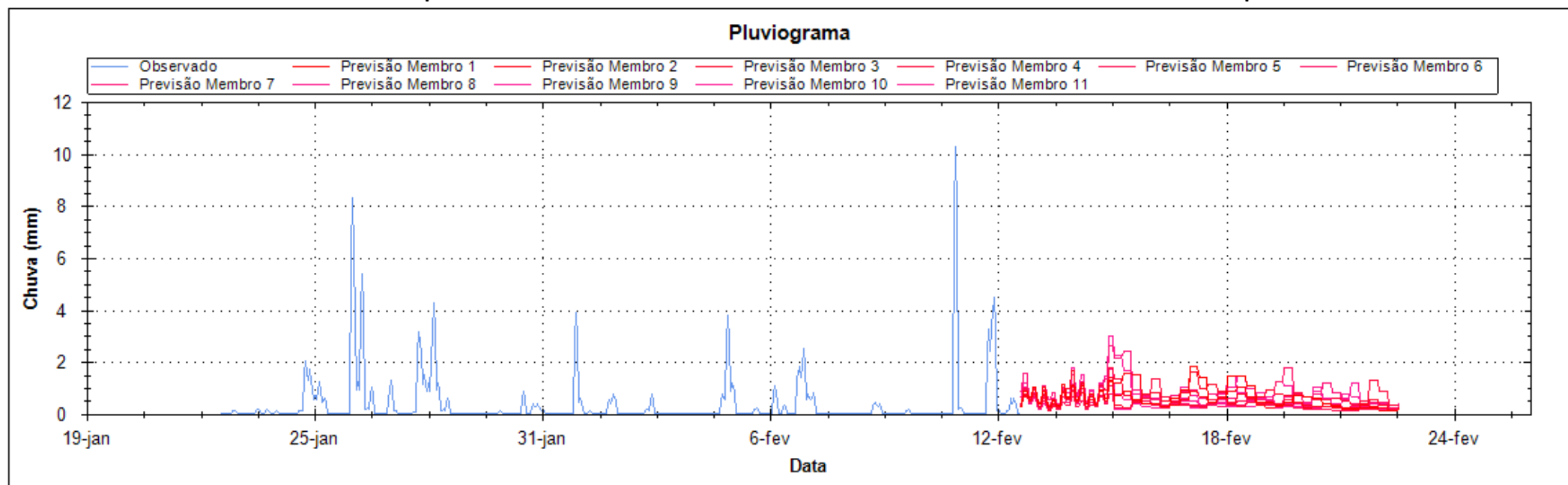
Modelo Hidrológico



Conjunto de previsões hidrológicas

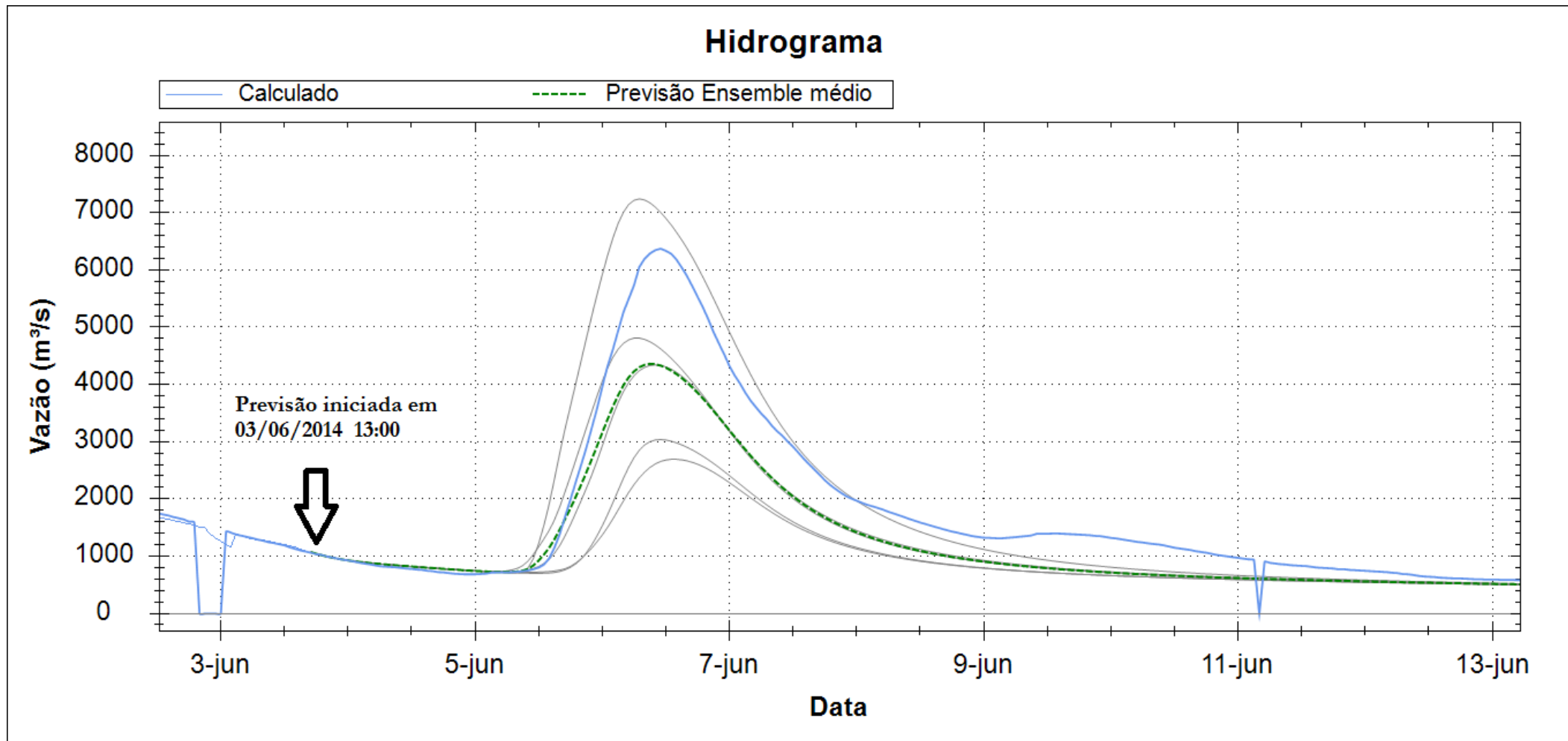


Previsão por ensemble – Trabalhos de Fernando Fan e Vinícius Siqueira



Previsão iniciada no dia
03 de junho de 2014 (13 h)

Linha azul – vazão observada
Linhas cinza – vazões previstas com cada um dos membros
Linha verde tracejada - média do ensemble



Doze horas depois, ainda no dia 03 de junho, a previsão mostrava que a cheia poderia ser da ordem de 7000 m^3/s . E o membro com menor precipitação levava a uma previsão de pico de vazão de mais de 2500 m^3/s .

Conclusão

Risco hidrológico e segurança de barragens existentes

Simulação Hidrológica de Eventos Extremos

Lições do passado

- Retromodelling

Oportunidades para melhor estimar os eventos super extremos

- Importância da base física de alguns processos fundamentais
- Propagação de cheias e a geometria hidráulica

Novas oportunidades de dados

Além de aprimorar o projeto, redução de risco hidrológico passa por melhorar a operação