

ESTUDO DE VAZÕES MÉDIAS MENSAIS E MÁXIMAS DIÁRIAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO OCOÑA, PERÚ

Clara Marina Farías Zegada de Reyes¹; Márian da Costa Rohn²; Edilaine dos Santos³

RESUMO – As bacias hidrográficas localizadas na costa oeste da América do Sul se apresentam moldadas pelas severas condições geográficas proporcionadas pela Cordilheira dos Andes e pelas marcadas influências do Oceano Pacífico. Essas condições de contorno fazem com que essas bacias, ainda que de pequeno porte, tenham uma significativa variabilidade hidrológica. Com isso, uma mesma bacia pode vir a apresentar ao longo de seu percurso desde características típicas de regiões nevadas a condições de clima desértico. Tal variabilidade exige uma interpretação e tratamento diferenciado das informações disponíveis, bem como gera a necessidade de se impor ao modelo adotado essas características, de maneira a que resultados obtidos possam refleti-las adequadamente. O presente trabalho apresenta os estudos hidrológicos desenvolvidos para a bacia do rio Ocoña, localizada na costa sul do Peru, a qual apresenta totais precipitados anuais superiores a 1.000 mm na região das nascentes e próximos a zero junto à foz. Tal característica, aliada a escassez de registros fluviométricos, levou à necessidade de aplicação de diversas ferramentas que possibilitassem a adequada modelagem dessa bacia – curvas duplo-acumulativas e padrões de precipitação acumulada, superfícies multi-quadráticas, propagação de Muskingum, regionalização de vazões a partir de chuvas médias – e a conseqüente obtenção dos valores desejados com suficiente robustez e confiabilidade.

ABSTRACT – The watersheds located on the western coast of South America present themselves molded by the severe geographical conditions provided by the Andes mountain range, as well as considerable influences by the Pacific Ocean. These delineation conditions make these watersheds, though of small size, display a significant hydrological variability. Considering this, one single watershed could exhibit, along its course, typical features ranging from snowy regions to desert climates. Such variability requires differentiated interpretation and treatment of available information, and also generates the need to enforce these features in the adopted model, in a way that the results obtained are able to reflect these characteristics adequately. The present paper presents hydrological studies developed for the Ocoña watershed, located on the Southern coast of Peru, which exhibits annual precipitation totals exceeding 1,000mm in the headwater regions, and close to zero at the mouth. Such feature, coupled with the scarcity of streamflow records, led to the need for the application of several tools which could make the adequate modelling of this watershed possible – Double-accumulative curve and accumulated precipitation patterns, multiquadratic surfaces, Muskingum propagation, hydrologic regionalization from average rainfall – and the subsequent obtaining of desired values with enough strength and reliability.

Palavras-Chave – Hidrologia andina, regionalização hidrológica, propagação de vazões.

¹ Eng^a Civil, M.Sc. Hidrologia. Professora do IHHS da Universidad de Piura, Av. Ramón Mugica 131, Urb. San Eduardo, Piura, Perú, 51 73 284520, marina.farias@udepe.pe

² Eng^a Civil M.Sc. do Departamento de Hidrologia da Intertechne Consultores Associados S.A. Av. João Gualberto, 1259, 16º andar, Alto da Glória, Curitiba, Brasil, 55 41 3219-7634, mcr@intertechne.com.br

³ Eng^a Civil M.Sc. do Departamento de Hidrologia da Intertechne Consultores Associados S.A. Av. João Gualberto, 1259, 16º andar, Alto da Glória, Curitiba, Brasil, 55 41 3219-7270, es@intertechne.com.br

1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se o estudo hidrológico realizado para o Proyecto Hidroeléctrico Ocoña (PH Ocoña), no Peru. Os objetivos desse estudo são a obtenção das vazões médias mensais no local do aproveitamento para a estimativa da capacidade de geração de energia e as vazões de cheia para dimensionamento das estruturas de vertimento.

Para se alcançar os objetivos propostos a análise se dividiu em quatro etapas: análise espacial, análise pluviométrica, análise hidrológica e análise probabilística.

2. ANÁLISE ESPACIAL

A bacia hidrográfica do rio Ocoña se localiza na costa sul do Peru. Até a estação fluviométrica Ocoña, localizada próximo a foz no Oceano Pacífico e a 782 km ao sul de Lima, possui uma área de drenagem de 15.696 km². Até o local do barramento do PH Ocoña a bacia hidrográfica conta com uma área de 10.944 km² (Figura 1).

A bacia do rio Ocoña possui duas estações hidrométricas: a estação Ocoña (1971-2008), localizada no curso principal, e a estação Salamanca (1997-2009), localizada no rio Arma ou Chichas, tributário do rio Ocoña. Ambas as estações apresentam grande quantidade de falhas em suas séries de vazões médias diárias e não foi possível a obtenção dos registros de cotas ou medições de descarga líquida.

A partir da localização das estações hidrométricas e do local do aproveitamento foram definidas as sub-bacias que condicionam a determinação das vazões objetivo (Tabela 1).

De acordo com a disponibilidade de informações fluviométricas e pluviométricas diárias, se decidiu por trabalhar com o período 1971-2008.

3. ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA

3.1. Objetivo

O objetivo dessa análise foi a obtenção de uma base de dados pluviométricos completa e consistente, a qual possibilitasse a avaliação da precipitação média e, finalmente (1) o preenchimento das falhas de observação existentes nas séries das estações fluviométricas Ocoña e Salamanca e (2) a regionalização das informações hidrométricas das estações disponíveis até os pontos de interesse do projeto.

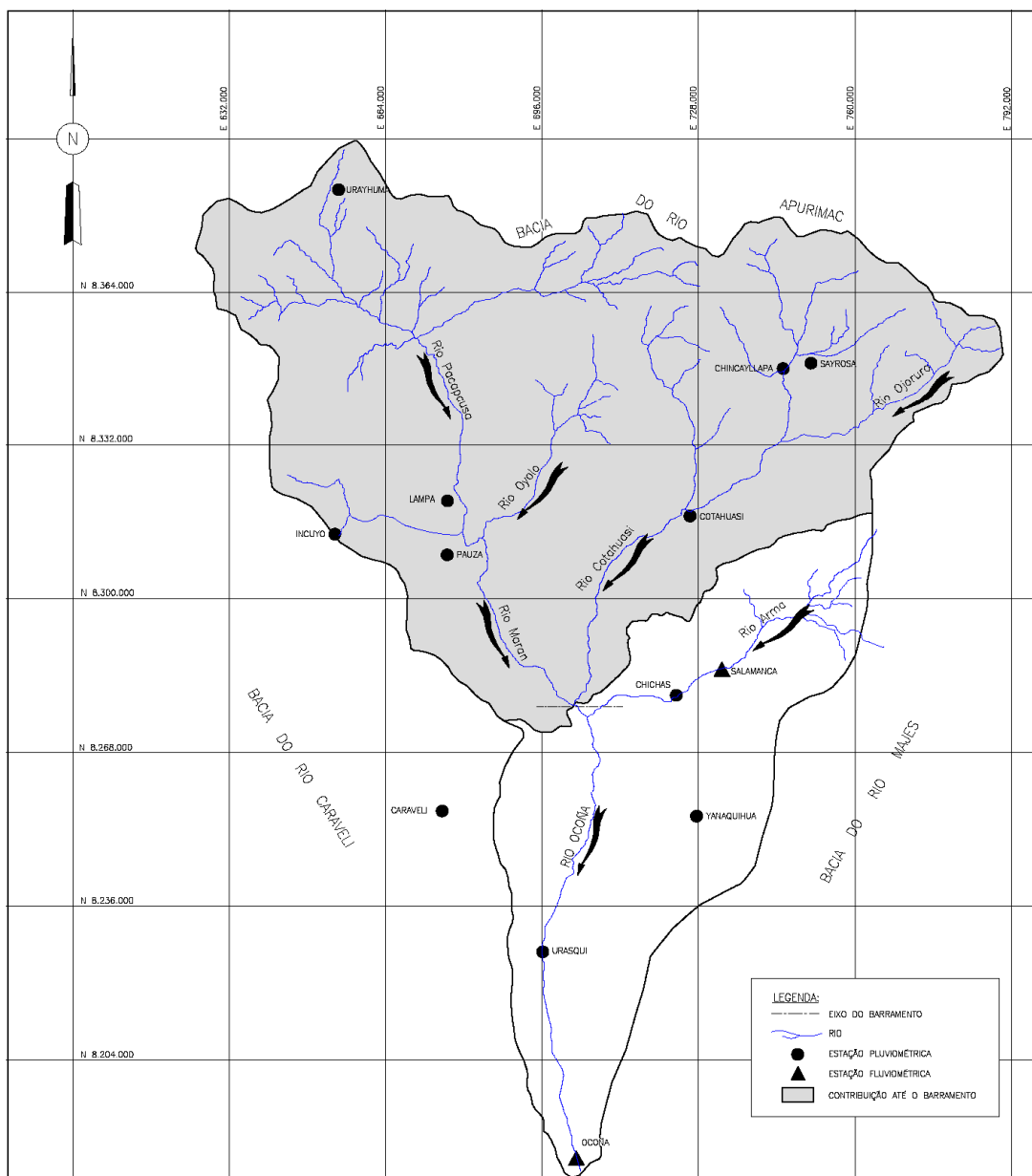


Figura 1 - Bacia Hidrográfica do rio Ocoña e localização das estações pluviométricas e fluviométricas na bacia e cercanias

Tabela 1 - Características geomorfológicas das sub-bacias do rio Ocoña

Tramo	L (km)	H (m)	Tempo de concentração		Áreas (km ²)	
			tc (min)	tc (h)	Parcial	Total
Nascentes do rio Marán até montante do barramento	170,1	2.612	1.039	17,3	10.944	10.944
Nascentes do rio Cotahuasi até montante do barramento	143,0	2.662	844	14,1		
Nascentes do rio Chichas até a estação Salamanca	41,7	1.420	259	4,3	888	888
Estação Salamanca até jusante do barramento	34,2	2.050	179	3,0	774	1.663
Jusante do barramento até a estação Urasqui	48,8	1.050	349	5,8	2.234	14.840
Estação Urasqui até a estação Ocoña	44,0	300	502	8,4	856	15.696

3.2. Metodologia

A pluviometria na bacia do rio Ocoña é muito heterogênea. Enquanto a montante do barramento se encontra a região com os maiores aportes e altas precipitações, entre esse ponto e a estação Urasqui as chuvas diminuem drasticamente, apresentando-se daí até a foz valores de precipitação praticamente nulos.

Partindo-se da informação disponível foi efetuado o preenchimento das falhas em duas etapas, para então se passar à análise de consistência e avaliação da precipitação média nas sub-bacias.

A Tabela 2 apresenta a informação pluviométrica originalmente disponível. Nela, os valores representam o número de meses em que os registros estão completos.

Tabela 2 - Resumo da informação pluviométrica originalmente disponível

Estação	Ano (1971 a 2008)																																Total meses							
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02		03	04	05	06	07	08	
Urasqui	12	12	12	12	12	12	9																																81	
Yanaquihua	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	455
Chichas	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	455
Lampa	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	452
Caraveli	12	10	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	435	
Chincayllapa	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	7	4	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	437	
Pauza	12	12	12	8	1	12	12	11	12	12	12	12	12	12	10	11	12	12	10	12	12	12	7	11	10	11	12	8	7	12	12	11	12	12	12	12	12	415		
Cotahuasi	12	12	12	12	12	9	12	12	10	12	11	8	12	11	12	12	9																						374	
Paico	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		12	12	12		6	12	12	12	12	12	4									298			
Paucaray	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	8																12	9	9	12	12	11				7	10	11	12	232
Incuyo	12	11	12	11	11	12	12	12	12	12	11	12																											140	
Urayhuma	12	12	12	12	12	11	12	12	12																														107	
Sairoza	12	12																																					24	
																																							300	

3.2.1 Primeiro preenchimento pluviométrico

Em uma primeira etapa de preenchimento, dada a distribuição espacial da precipitação, se decidiu pela adoção de precipitação nula (zero) para as falhas existentes na estação pluviométrica Urasqui, devido à mesma ter, de acordo com seu histórico, total anual precipitado médio próximo a zero. Com base na sazonalidade da região o mesmo procedimento foi aplicado às estações Caraveli, Pauza, Incuyo e Cotahuasi, que apresentaram períodos curtos com informação faltante em épocas de precipitação escassa ou nula.

Por outro lado, a estação Sayrosa foi eliminada da análise por ter um período muito curto de informações e pela existência de registros na estação Chincayllapa, bastante próxima a Sayrosa, os quais possibilitam a obtenção da informação necessária nessa região da bacia.

Com esse procedimento foi possível aumentar de 300 para 383 a quantidade média de meses com registros completos por estação.

3.2.2 Segundo preenchimento pluviométrico

A segunda etapa de preenchimento se baseou na correlação entre os totais mensais das estações pluviométricas (Tabela 3). Seu início foi efetuado a partir das estações com menor

quantidade de meses faltantes (Yanaquihua, Chichas, Lampa, Caraveli etc), baseando-se em cada caso nas estações que apresentaram maior correlação, mediante a seguinte expressão:

$$\frac{X_{mês}^{ano}}{\bar{X}_{mês}} = \frac{1}{n} \left(\frac{A_{mês}^{ano}}{\bar{A}_{mês}} + \frac{B_{mês}^{ano}}{\bar{B}_{mês}} + \dots + \frac{N_{mês}^{ano}}{\bar{N}_{mês}} \right) \quad (1)$$

onde:

$X_{mês}^{ano}, A_{mês}^{ano}, B_{mês}^{ano}, N_{mês}^{ano}$ = precipitação do mês e ano faltante na estação X e conhecida nas estações A, B, ..., N.

$\bar{X}_{mês}, \bar{A}_{mês}, \bar{B}_{mês}, \bar{C}_{mês}$ = precipitação média do mês faltante no período comum conhecido das estações X, A, B, ..., N.

n = número de estações que dispõem da informação: A, B, ..., N

Tabela 3 - Matriz de coeficientes de correlação entre as estações pluviométricas após o primeiro preenchimento

	Pauza	Incuyo	Caraveli	Urayhuma	Urasqui	Yanaquihu	Chichas	Cotahuasi	Paico	Chincaylla	Sairoza	Lampa	Paucaray
Pauza	1,000	0,730	0,541	0,412	0,254	0,697	0,678	0,771	0,403	0,557	0,767	0,641	0,378
Incuyo		1,000	0,525	0,407	0,427	0,600	0,524	0,659	0,584	0,571	0,796	0,620	0,580
Caraveli			1,000	0,395	0,191	0,657	0,637	0,565	0,296	0,460	0,790	0,502	0,327
Urayhuma				1,000	0,212	0,543	0,542	0,628	0,637	0,676	0,904	0,495	0,573
Urasqui					1,000	0,255	0,143	0,236	0,165	0,111	0,662	0,226	0,315
Yanaquihua						1,000	0,841	0,826	0,574	0,704	0,754	0,742	0,519
Chichas							1,000	0,852	0,555	0,757	0,700	0,692	0,495
Cotahuasi								1,000	0,648	0,855	0,909	0,818	0,601
Paico									1,000	0,640	0,701	0,598	0,752
Chincayllapa										1,000	0,869	0,712	0,622
Sairoza											1,000	0,852	0,826
Lampa												1,000	0,560
Paucaray													1,000

Em algumas situações em que não se dispunha de informação suficientemente consistente, se trabalhou com a média mensal de longo termo, $\bar{X}_{mês}$. Com esse preenchimento as séries ficaram completas para 100% das estações pluviométricas.

3.2.3 Análise de consistência

A consistência do preenchimento da informação pluviométrica foi analisada através de curvas duplo-acumulativas (CDA). Do grupo de doze estações que tiveram seus registros preenchidos não foram incluídas nessa análise as estações Caraveli e Urasqui que, por não estarem localizadas na costa Pacífico, apresentam um regime bastante diferenciado, bem como as estações Paico e Paucaray que se encontram na vertente atlântica. Inicialmente as análises foram efetuadas tendo-se como padrão de precipitações acumuladas (PPA) as CDA das oito estações. A partir disso observou-se serem mais consistentes os registros das estações Yanaquihua, Chincayllapa e Cotahuasi sendo, portanto, os mesmos adotados como PPA definitivo. Definido o PPA foram

efetuadas as correções nas demais estações. A estação Lampa foi eliminada do estudo por apresentar inúmeras mudanças de inclinação na CDA.

3.2.4 Relação altitude *versus* precipitação

Após o preenchimento e consistência das séries pluviométricas se chegou a uma relação precipitação – altitude. (Figura 2).

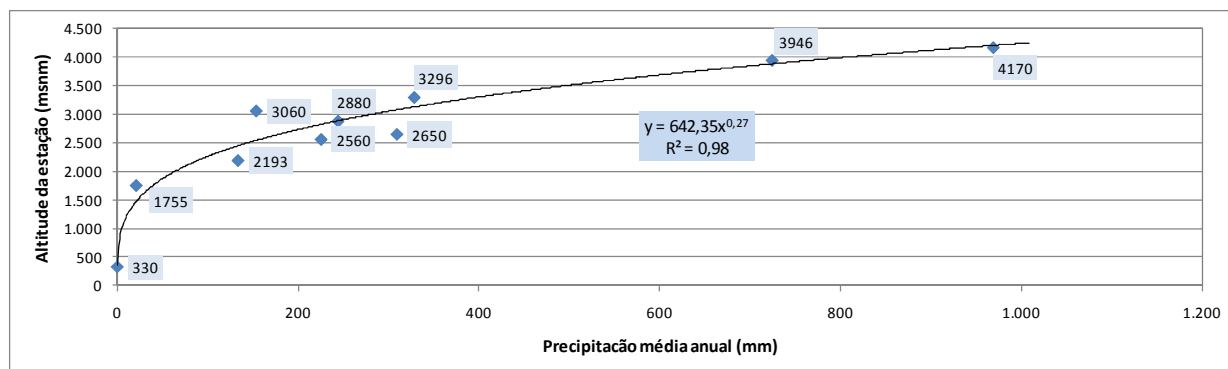


Figura 2 - Relação precipitação – altitude dentro da bacia hidrográfica do rio Ocoña

3.2.5 Precipitação média nas sub-bacias

A partir da precipitação mensal de cada estação foi calculada a precipitação mensal média para cada uma das sub-bacias de interesse. Devido às diferentes condições topográficas que se verificam na bacia hidrográfica do rio Ocoña, para a definição da série de totais precipitados mensais foi utilizado um modelo que considera não somente a distribuição espacial da precipitação, mas também sua variação em função da altitude. Para isso, tendo-se como dados de entrada uma matriz compreendendo as coordenadas da área em estudo e suas respectivas altitudes e a localização das estações pluviométricas com suas respectivas séries de totais mensais, foi efetuado o ajuste de uma superfície matemática empregando o método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância, onde o valor estimado de uma grandeza para um determinado ponto com coordenadas x, y, z, é calculado em função das distâncias desse ponto aos demais pontos com dados observados. Nesse modelo, as coordenadas x, y e z representam, respectivamente, a longitude, a latitude e a altitude desses pontos.

Para o cálculo da precipitação média em um determinado mês e ano foi calculada a média das estimativas de precipitação feitas em cada célula de 0,01 km² que compõe as sub-bacias. Repetido este algoritmo para todo o histórico considerado, se obteve a série de totais precipitados médios mensais sobre as sub-bacias de interesse.

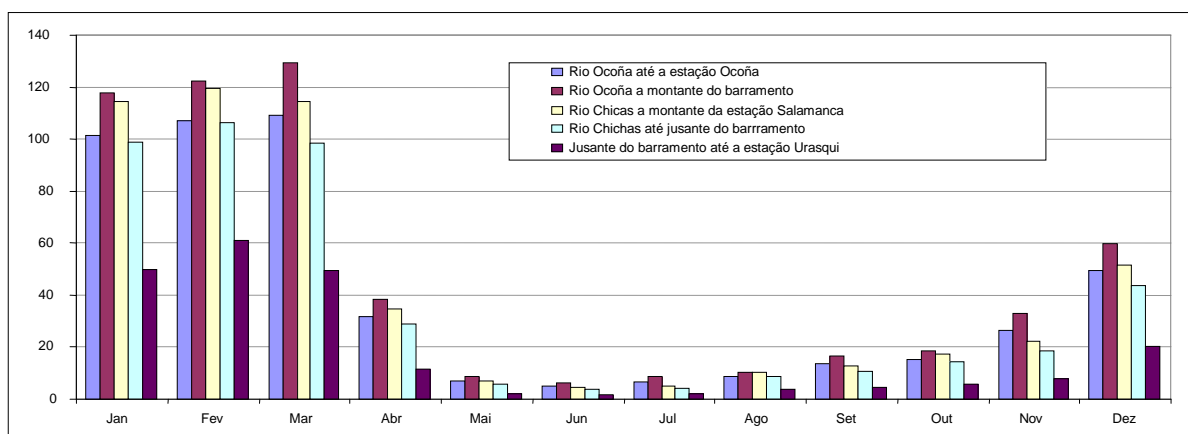


Figura 3 - Precipitação média mensal (mm) nas sub-bacias analisadas

Tabela 4 - Precipitação média (mm) nas sub-bacias analisadas

Tramo	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Nascentes do rio Ocoña até montante do barramento	117,8	122,2	129,5	38,2	8,7	6,0	8,5	10,2	16,6	18,5	33,0	59,6	568,8
Nascentes do rio Ocoña até a estação Ocoña	101,2	107,0	109,3	31,7	7,1	4,9	6,7	8,6	13,5	15,4	26,4	49,6	481,4
Nascentes do rio Chicas até a estação Salamanca	114,3	119,2	114,4	34,8	7,0	4,6	4,9	10,3	12,8	17,3	22,1	51,6	513,3
Nascentes do rio Chicas até jusante do barramento	98,7	106,1	98,6	28,6	5,7	3,8	4,2	8,5	10,6	14,2	18,6	43,6	441,2
Jusante do barramento até a estação Urasqui	46,9	60,8	49,5	11,6	2,3	1,7	2,0	3,6	4,3	5,8	8,0	20,0	216,5

4. ANÁLISE HIDROMÉTRICA

4.1. Objetivo

Os objetivos dessa análise foram simular a série de vazões médias mensais e a série de vazões máximas instantâneas anuais no local da barragem do PH Ocoña.

Para isso foi necessário completar as séries de vazões diárias das duas estações fluviométricas, Salamanca e Ocoña, que apresentam uma grande quantidade de informação faltante. Com elas foi efetuada uma regionalização para estimar as vazões médias e máximas no local do barramento.

4.2. Obtenção das vazões em Salamanca e Ocoña

As séries originais de vazões diárias das estações Salamanca e Ocoña apresentam, respectivamente, 53% e 47% de falhas. Em nível mensal, obtendo-se esse valor apenas para os meses em que a informação diária se apresentava completa, esses índices de falhas ficam em 96% e 100%, respectivamente. Ou seja, as séries diárias disponíveis não apresentam informação suficiente para a obtenção de séries mensais representativas.

As análises a seguir apresentam a metodologia e critérios utilizados para o preenchimento das séries de vazões das estações fluviométricas Salamanca e Ocoña.

4.2.1 Primeiro preenchimento de informação diária

Dado que alguns dos dados diários faltantes em ambas as estações correspondiam a períodos curtos, e dada a regularidade observada nas precipitações, os períodos de até 6 dias de falhas foram preenchidos interpolando-se linearmente entre os dias com vazões observadas. Com isso foi possível completar alguns meses, para assim avaliar a vazão média mensal e a vazão máxima diária anual. A Tabela 5 apresenta a disponibilidade original de vazões mensais nas estações Ocoña e Salamanca, assim como após o primeiro preenchimento. Deve-se atentar para o fato de que o total mensal é calculado apenas quando as informações diárias estão disponíveis para o mês inteiro.

Tabela 5 - Disponibilidade de vazões mensais nas estações Ocoña e Salamanca – dados originais e após o primeiro preenchimento

Est. Fluviométrica		1972												1973												1974												1975												1976												1977												1978																																																																							
Salamanca	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
Ocoña	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															

Est. Fluviométrica		1979												1980												1981												1982												1983												1984												1985												1986																																																											
Salamanca	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
Ocoña	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															

Est. Fluviométrica		1987												1988												1989												1990												1991												1992												1993												1994																																																											
Salamanca	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
Ocoña	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															

Est. Fluviométrica		1995												1996												1997												1998												1999												2000												2001												2002																																																											
Salamanca	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
Ocoña	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															

Est. Fluviométrica		2003												2004												2005												2006												2007												2008												2009																																																																							
Salamanca	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
Ocoña	Original	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															
	Corrigido	[Grid with data availability markers]																																																																																																																																															

4.2.2 Preenchimento final de vazões em Salamanca

As vazões mensais da estação Salamanca foram preenchidas através de uma regressão linear múltipla, tendo como variáveis explicativas as precipitações médias na bacia hidrográfica da estação Salamanca obtidas segundo descrito no item 3.2.5. O melhor ajuste foi obtido considerando-se as precipitações de até doze meses anteriores à vazão observada em um determinado mês. Desta forma esta regressão considera, indiretamente, o efeito do regime da neve em Coropuna, localizada nas regiões mais altas da bacia do rio Chichas.

O coeficiente de correlação R^2 resultante dessa regressão é igual a 0,9. A equação utilizada é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned}
Q_t = & 0.03656P_t + 0.02128P_{t-1} + 0.01588P_{t-2} + 0.01312P_{t-3} + 0.01221P_{t-4} + \\
& + 0.01277P_{t-5} + 0.01097P_{t-6} + 0.01152P_{t-7} + 0.01272P_{t-8} + 0.01335P_{t-9} + \\
& + 0.00796P_{t-10} + 0.00648P_{t-11} + 0.01242P_{t-12}
\end{aligned} \tag{2}$$

onde:

Q_t = Vazão média mensal da estação Salamanca no mês “t”;

P_t = Precipitação média mensal da bacia da estação Salamanca no mês “t”;

P_{t-i} = Precipitação média mensal da bacia da estação Salamanca no mês “t-i”;

Com a regressão ajustada foi possível completar a série de vazões médias mensais na estação Salamanca entre os anos 1971 e 2008.

4.2.3 Preenchimento final das vazões em Ocoña

As vazões mensais da estação Ocoña foram estendidas e preenchidas através de uma regressão linear múltipla, tendo como variáveis explicativas a vazão observada na estação Salamanca em um mesmo mês, além das precipitações médias na bacia da estação Ocoña para o mesmo mês e o mês anterior (item 3.2.5). Foram utilizados os logaritmos neperianos das variáveis com o objetivo de impor à análise uma característica não-linear, procedimento esse que melhorou a aderência do ajuste. A equação utilizada encontra-se apresentada a seguir. O coeficiente de correlação R^2 resultante dessa regressão é igual a 0,99.

$$\ln Q_{Ocoña_t} = 2 \ln Q_{Salamanca_t} + 0,0477 \ln P_{Ocoña_t} + 0,1946 \ln P_{Ocoña_{t-1}} \tag{3}$$

Com a regressão ajustada foi possível completar a série de vazões médias mensais na estação Ocoña entre os anos 1971 e 2008.

4.3. Simulação de vazões no local do barramento

4.3.1 Vazões médias mensais junto ao barramento do PH Ocoña

As vazões médias mensais no local de interesse foram obtidas regionalizando-se a informação da estação Ocoña, o que foi feito relacionando-se as vazões em nível mensal às áreas de drenagem, bem como a precipitação média em cada sub-bacia. Considerou-se a variação da precipitação entre a estação Ocoña e o local da barragem devido aos diferentes padrões de precipitação observados nesses dois locais.

A equação utilizada na transferência das vazões da estação Ocoña para o eixo da barragem é apresentada abaixo.

$$Q_{Barragem,t} = Q_{Ocoña,t} * \left(\frac{A_{Barragem} \cdot P_{Barragem,t}}{A_{Ocoña} \cdot P_{Ocoña,t}} \right) \quad (4)$$

onde:

- $Q_{Barragem,t}$ = vazão média mensal na barragem no mês “t”;
 $Q_{Ocoña,t}$ = vazão média mensal na estação Ocoña no mês “t”;
 $P_{Barragem,t}$ = precipitação média na bacia da barragem no mês “t”;
 $P_{Ocoña,t}$ = precipitação média na bacia da estação Ocoña no mês “t”.
 $A_{Barragem}$ = área de drenagem da barragem = 10.943,5 km²;
 $A_{Ocoña}$ = área de drenagem da estação Ocoña = 15.695,8 km².

A partir das séries de vazões determinadas no item 4.2 e da expressão (4), foram obtidas as vazões médias mensais no local do barramento que permitiram, na sequência, a estimativa da capacidade de geração hidroenergética.

A Tabela 6 apresenta os valores médios característicos da série resultante.

Tabela 6. Valores característicos da série de vazões médias mensais (m³/s) no eixo do barramento do PH Ocoña (jan/1971-dez/2008)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Mín.	28,5	29,9	58,9	40,6	2,7	9,7	9,1	7,9	7,3	12,8	26,6	29,0	-
Média	251,8	408,2	452,3	232,5	118,3	83,6	77,4	73,8	76,4	87,5	90,7	122,2	172,9
Máx.	650,0	1368,2	1254,8	740,5	245,1	223,3	200,4	171,0	163,7	215,0	206,2	332,2	-

4.3.2 Vazões máximas no barramento do PH Ocoña

A área com produção hídrica mais significativa da bacia do rio Ocoña se localiza na região a montante do local do barramento, enquanto que a jusante até a estação pluviométrica Urasqui, a precipitação diminui significativamente com a consequente redução da vazão específica. A jusante da estação Urasqui a precipitação é praticamente nula, o que conduziu a consideração de que essa área incremental não apresenta contribuição hídrica. Com isso, as vazões foram modeladas da seguinte maneira: a vazão que chega até o local do barramento, proveniente dos tributários Marán e Cotahuasi, se une a vazão do rio Chichas, medida na estação Salamanca, e juntas continuam seu curso recebendo o aporte da sub-bacia localizada entre o barramento e a estação Urasqui. Desse ponto, as águas continuam seu curso até a estação Ocoña, onde é registrada antes de desaguar no Oceano Pacífico.

Assim, como se conta com vazões máximas nas estações Salamanca e Ocoña e se necessita das vazões máximas no local do barramento, se procedeu da seguinte maneira:

- Foi estimada a vazão que chega a confluência do rio Chichas com o rio Ocoña regionalizando-se a vazão da estação Salamanca a partir da base de precipitações médias e áreas de drenagem.
- A vazão de Chichas foi propagada até Urasqui com o método de Muskingum.
- Foi estimado o aporte da sub-bacia formada pela área a jusante do barramento até Urasqui, a partir da base de precipitações médias e áreas de drenagem com as vazões de Salamanca.
- A soma de vazões de Chichas e contribuição da bacia incremental até Urasqui foi transferida até a estação Ocoña através de propagação com o método de Muskingum.
- Dado que a vazão que passa na estação Ocoña é formada pela somatória da água drenada até o local do barramento mais a água de Chichas e contribuição incremental que chega até Urasqui, ambas propagadas até Ocoña, se estima a vazão junto ao barramento propagada até Ocoña pela diferença entre os hidrogramas.
- Com a vazão do barramento em Ocoña se estima a vazão a montante, junto ao barramento, pelo método de Muskingum.

Da base de dados preenchida conforme exposto anteriormente, se obtém 317 meses completos com vazões diárias. Para a vazão média diária máxima de cada mês foram estimados os valores máximos instantâneos através do método de Sangal, a seguir descrito:

$$Q_{\max inst} = \frac{(4Q_{\max dia} - Q_{dia post} - Q_{dia ant})}{2} \quad (5)$$

Dos valores obtidos foi estimada a relação entre as vazões médias mensais e as vazões médias diárias máximas mensais (Figura 4), e entre as vazões médias diárias máximas mensais e as correspondentes vazões máximas instantâneas (Figura 5), que permitiram estimar as 139 vazões máximas instantâneas faltantes a partir das vazões médias mensais preenchidas com os totais pluviométricos mensais, conforme descrito anteriormente (item 4.3.1).

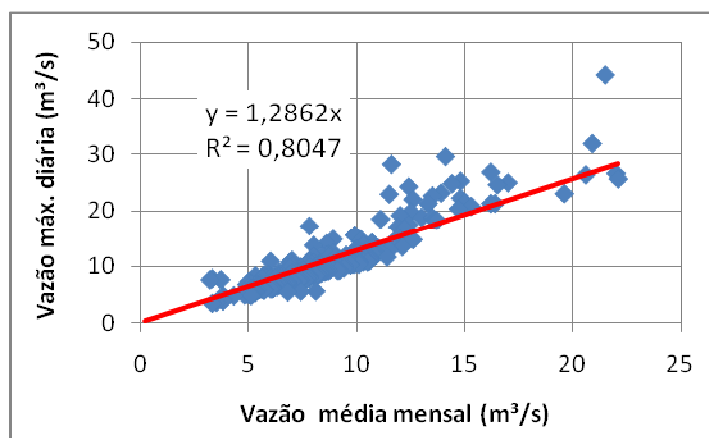


Figura 4. Relação entre vazões médias mensais e vazões médias diárias máximas mensais na Estação Salamanca

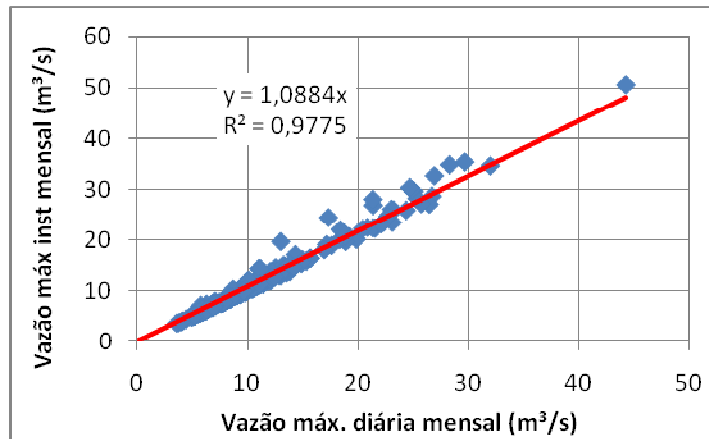


Figura 5. Relação entre as vazões médias diárias máximas mensais e correspondentes máximas instantâneas na Estação Salamanca

Contando com as vazões máximas instantâneas mensais, foram selecionadas as vazões máximas instantâneas anuais apresentadas na Tabela 7.

Vazões máximas do rio Chichas a jusante do barramento

Estas vazões foram obtidas pela regionalização das vazões máximas da estação Salamanca, obtidas conforme exposto no item anterior, com base nas áreas de drenagem e nas precipitações médias mensais respectivas.

$$\frac{Q_{Chichas}}{A_{Chic} P_{Chic}} = \frac{Q_{Salamanca}}{A_{Sal} P_{Sal}} \quad (6)$$

onde:

$$Q_{Chichas} = Q_{Salamanca} \frac{A_{Chic}}{A_{Sal}} \frac{P_{Chic}}{P_{Sal}} \quad (7)$$

As áreas de drenagem são apresentadas na Tabela 1 e as vazões resultantes na Tabela 7.

Vazões máximas do rio Chichas em Urasqui

Por não se contar com informação hidrométrica detalhada, foi efetuada a simulação do trânsito de uma cheia típica desde o ponto de confluência de Chichas com Ocoña até a estação Urasqui, baseada em um hidrograma típico do *Soil Conservation Service* - SCS (atual *Natural Resources Conservation Service* - NRCS).

Considerando o tempo de concentração da bacia igual a 7,3 horas (Tabela 1) e a duração de uma chuva típica de 12 horas, se obteve um tempo de pico (T_p) igual a 10,4 horas.

O método de Muskingum requer a especificação do tempo de trânsito da onda desde o ponto inicial até o ponto final, valor esse dado pelo tempo de concentração, $k = 5,8$ horas (Tabela 1).

A Figura 6 apresenta o hidrograma típico proveniente da sub-bacia Chichas em sua confluência com o rio Ocoña. A vazão de pico adotada foi de 100 m³/s, resultando em um tempo de pico de 10,4 horas. Esse hidrograma foi propagado até Urasqui, obtendo-se uma vazão de pico de 72,0 m³/s às 15 horas (Tp). A partir da constatação de que esse trecho proporciona um abatimento de 72% na vazão de pico do hidrograma, as vazões de Chichas foram simuladas em Urasqui considerando-se esse mesmo abatimento (72%). As vazões máximas assim estimadas são apresentadas na Tabela 7.

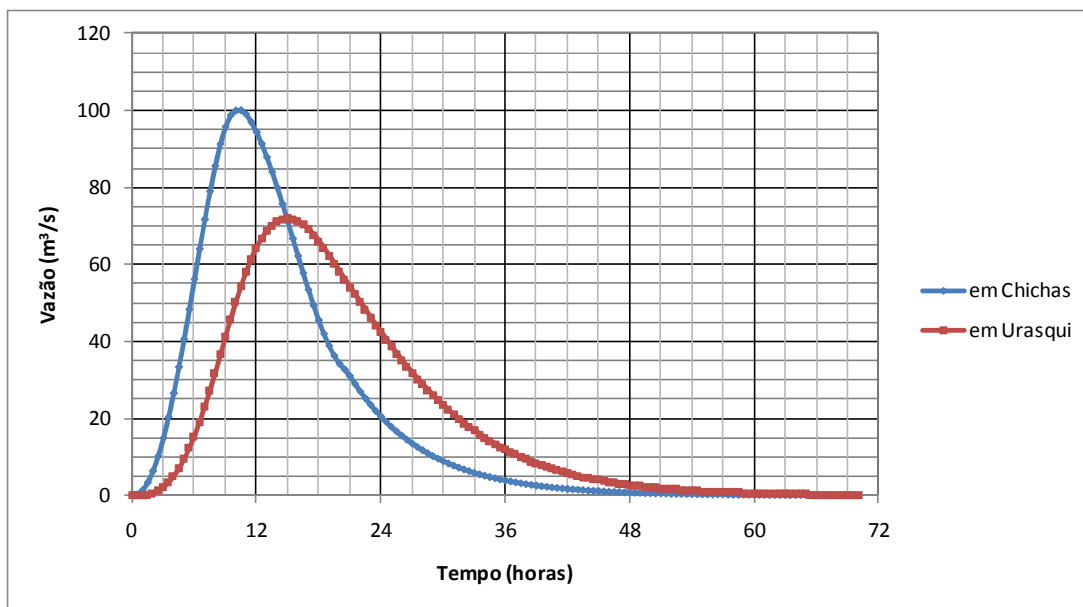


Figura 6 - Hidrograma na confluência Chichas-Ocoña e hidrograma propagado até Urasqui

Vazões máximas na bacia incremental entre o barramento e Urasqui

Estas vazões foram obtidas por regionalização das vazões máximas da estação Salamanca, com base nas áreas de drenagem e nas precipitações médias mensais respectivas, segundo a expressão:

$$Q_{Urasqui} = Q_{Salamanca} \frac{A_{Uras} P_{Uras}}{A_{Sal} P_{Sal}} \quad (8)$$

As áreas de drenagem são apresentadas na Tabela 1 e as vazões resultantes são apresentadas na Tabela 7.

Além dos valores de vazões máximas foi também simulado um hidrograma sintético típico. Partindo do tempo de concentração desta sub-bacia, de 5,8 horas, e com uma duração de uma chuva típica de 12 horas, se obteve um tempo de pico de 9,5 horas. A Figura 7 apresenta, a título de exemplo, o hidrograma correspondente à cheia de 2008.

Vazões máximas em Chichas e na bacia incremental até Urasqui

Os hidrogramas simulados de Chichas propagados até Urasqui e o aporte incremental em Urasqui foram somados e propagados até Ocoña. A Tabela 7 apresenta as vazões máximas obtidas em Urasqui com um tempo de pico de 11,5 horas. A Figura 7 apresenta, a título de exemplo, o hidrograma correspondente à cheia de 2008.

Vazões máximas do rio Chichas e bacia lateral em Ocoña

Os hidrogramas simulados e somados em Urasqui foram propagados até Ocoña. A Tabela 7 apresenta as vazões máximas obtidas em Ocoña provenientes da sub-bacia Chichas e da bacia incremental entre o barramento e Urasqui, com tempo de pico de 18 horas. A Figura 7 apresenta, a título de exemplo, o hidrograma correspondente à cheia de 2008.

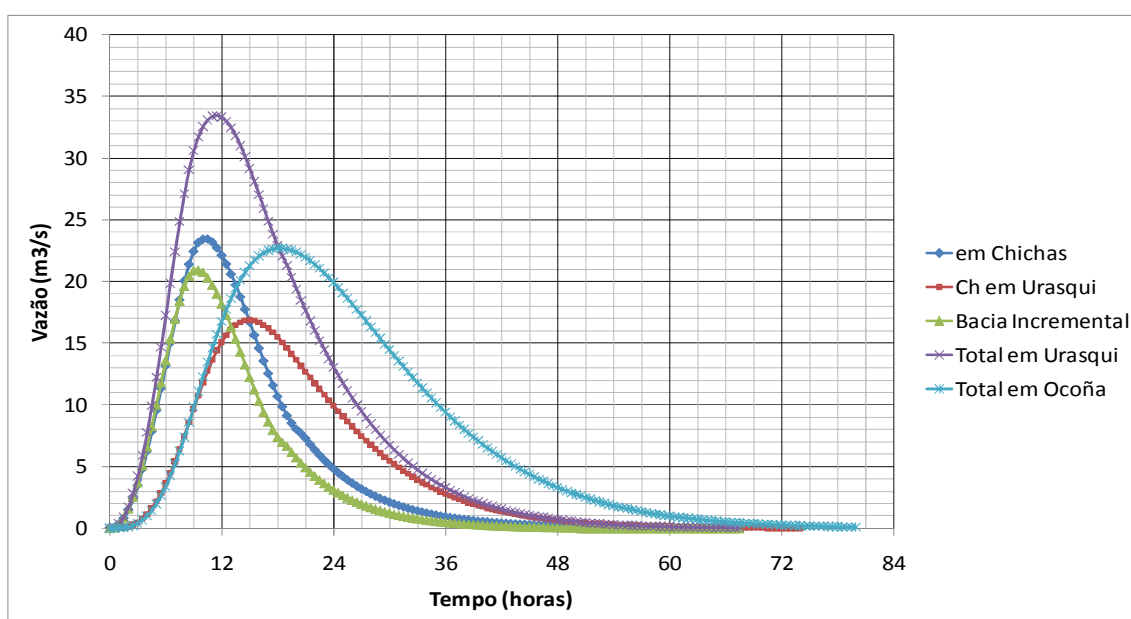


Figura 7 - Exemplo dos hidrogramas simulados para a cheia de 2008

Tabela 7 - Vazões em Chichas e vazões incrementais de Urasqui propagadas até Ocoña

Año	Salamanca				Chichas		Chichas em Urasqui	Bacia Incremental até Urasqui		Chichas e Urasqui, Qpico m ³ /s	
	Qmens m ³ /s	Qdiário m ³ /s	Qpico m ³ /s	P med mm	P med mm	Qpico m ³ /s	Qpico m ³ /s	P med mm	Qpico m ³ /s	em Urasqui	em Ocoña
1971	15,2	19,5	21,3	108,6	92,5	34	24,5	43,4	21,4	41,2	28
1972	20,9	32	34,8	196,2	181	60,1	43,3	117,6	52,5	84,7	57,5
1973	15,7	20,2	22	152,5	136,8	36,9	26,6	77,1	28	48,6	33
1974	11,6	28,3	30,8	72,1	62,7	50,1	36,1	30,7	33	62	42,1
1975	15	21,5	23,4	133,7	111,7	36,6	26,4	47,4	20,9	42,9	29,1
1976	13,4	17,2	18,7	115,6	98,1	29,7	21,4	42,8	17,4	35,1	23,8
1977	14,8	22,3	24,3	181,6	169	42,3	30,5	112	37,7	60,3	40,9
1978	11,6	13,8	15	36,5	37,9	29,2	21	31,8	32,9	47,1	32
1979	5,3	6,8	7,4	159,3	134	11,7	8,4	63,2	7,4	14,1	9,6
1980	9,3	12	13	102,3	91,8	21,8	15,7	50,7	16,2	28,4	19,3
1981	11,5	14,8	16,1	173,4	158,3	27,5	19,8	100,7	23,5	38,3	26
1982	9,9	12,7	13,9	96,7	85,9	23,1	16,6	49,3	17,8	30,6	20,8
1983	8,6	9,9	10,8	71,2	55,9	15,9	11,4	17,1	6,5	16,6	11,3
1984	20,6	26,4	28,8	140,6	125,8	48,2	34,7	77,2	39,8	66	44,8
1985	21,5	44,2	48,1	156	137,9	79,6	57,3	76,8	59,6	104,2	70,7
1986	16,2	26,9	29,3	180,5	153,3	46,6	33,5	71,9	29,4	56,6	38,4
1987	16,1	20,7	22,5	174	147,9	35,8	25,8	72,4	23,6	44,3	30,1
1988	14,1	29,7	32,3	91,1	79,5	52,7	38	43,1	38,4	68,2	46,3
1989	17	25,1	27,3	179,3	171	48,7	35,1	120,6	46,2	71,6	48,6
1990	9,4	11,4	12,3	110,4	88,3	18,4	13,3	30,8	8,6	20	13,6
1991	14,8	25,3	27,5	53,8	54,8	52,4	37,7	43	55,3	81,6	55,4
1992	8	10,8	11,8	3,5	2,7	17	12,2	0,7	6	17,1	11,6
1993	12,4	17,6	19,1	102,3	82,2	28,7	20,7	29,7	13,9	31,7	21,5
1994	14,4	24,9	27,1	219,7	195,2	45,1	32,5	111,9	34,7	59,8	40,6
1995	11,2	14,4	15,7	103,6	101,1	28,7	20,7	83,5	31,8	46	31,2
1996	12,6	22,1	24	74	64,1	38,9	28	31,8	26	48,5	32,9
1997	16,5	24,7	26,9	165,9	140,9	42,8	30,8	66,7	27,2	52,2	35,4
1998	8,9	14,9	16,3	221,6	193,6	26,7	19,2	103,4	19,1	34,2	23,2
1999	19,2	24,7	26,9	232	198,4	43,1	31	96,2	28,1	53	36
2000	10,2	14,8	16,1	92,6	82,7	26,9	19,4	46	20,1	35,2	23,9
2001	13,5	18,8	20,5	188,5	165,2	33,6	24,2	91,8	25,1	43,9	29,8
2002	13,3	21,3	23,2	162,7	141,9	37,9	27,3	73,6	26,4	48	32,6
2003	8	13,8	15,1	68,3	57,2	23,7	17	24,4	13,6	27,7	18,8
2004	7,8	17,3	18,8	94	84,2	31,5	22,7	47,1	23,7	41,2	28
2005	7,6	10,3	11,2	83,8	72	18	13	35,7	12	22,4	15,2
2006	12,2	16,9	18,4	127,5	114,2	30,9	22,2	67,3	24,4	41,4	28,1
2007	12,8	16,5	17,9	125,2	105,7	28,3	20,4	48	17,3	34	23,1
2008	10,1	12,4	13,5	171,2	158,9	23,5	16,9	105,6	21	33,4	22,7

Vazões máximas do rio Ocoña na estação Ocoña

Estes valores correspondem aos registrados na estação Ocoña, cuja série foi completada por apresentar dados faltantes.

Como nos casos anteriores, foi simulado o hidrograma típico na estação partindo do tempo de concentração de toda a bacia, de 31,5 horas, e com duração de chuva típica de 12 horas. O tempo de pico do hidrograma resultou em 25 horas.

Vazões máximas no barramento de Ocoña propagados até a estação Ocoña

Dado que a vazão de Ocoña foi modelada como proveniente de duas fontes: a montante do local do barramento e a jusante do mesmo, ao se conhecer o aporte de águas a jusante e a vazão total é possível se estimar, pela diferença, o aporte proveniente da área a montante do barramento propagada até a estação Ocoña.

Vazões máximas no barramento de Ocoña

Foi simulada uma cheia típica até o local do barramento do PH Ocoña, com um tempo de pico de 16,4 horas, e se propagou esse hidrograma até a estação Ocoña através do método de Muskingum, resultando em uma vazão de pico de 60,1% do pico inicial às 26 horas, o que concorda com o cálculo anterior dos picos em Ocoña às 25 horas. Com isso, considerou-se adequadamente calibrado o modelo (Figura 8).

A estimativa das vazões máximas no local do barramento foi então efetuada pela aplicação do efeito de amortecimento de Muskingum de maneira inversa.

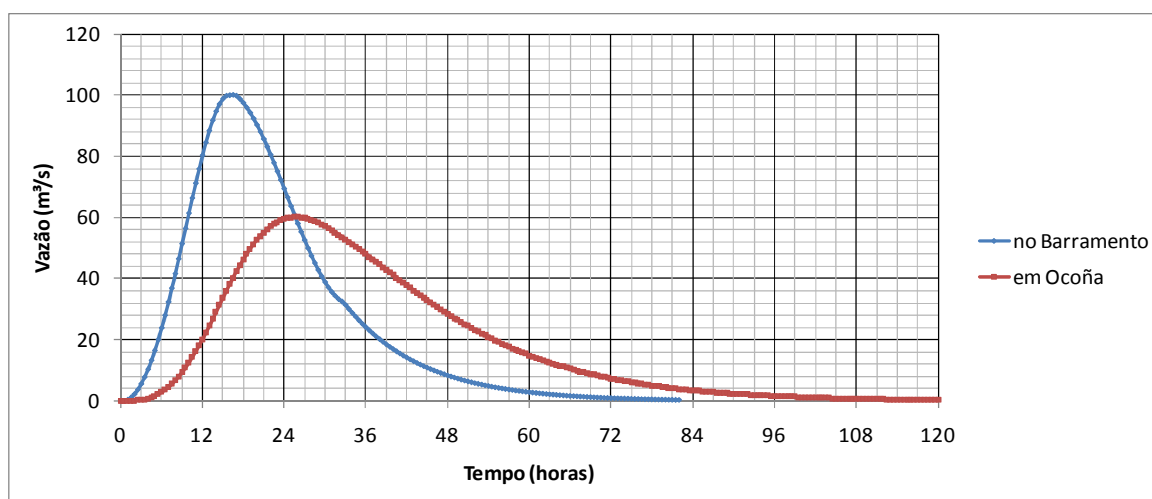


Figura 8. Hidrograma típico no local do barramento e hidrograma propagado até Ocoña

A Figura 9 apresenta, a título de exemplo, o hidrograma correspondente à cheia de 2008.

A Figura 10 apresenta as vazões máximas anuais obtidas para o local do PH Ocoña.

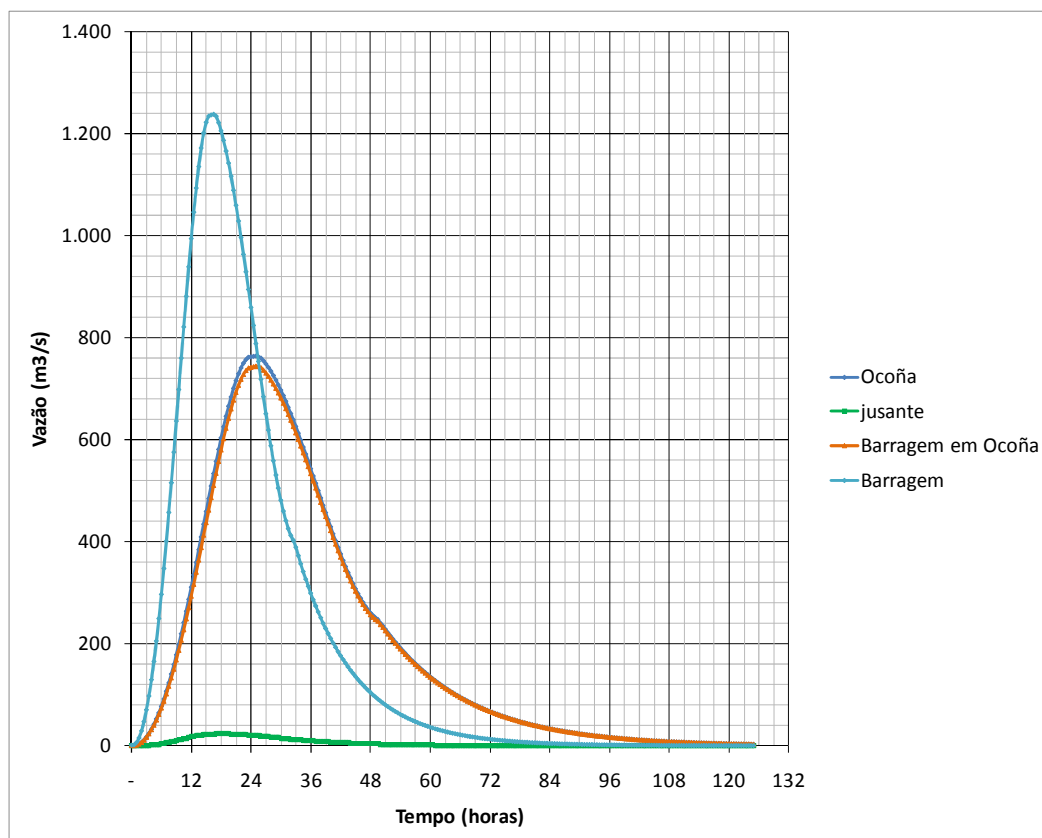


Figura 9 - Exemplo de hidrogramas simulados correspondentes à cheia de 2008

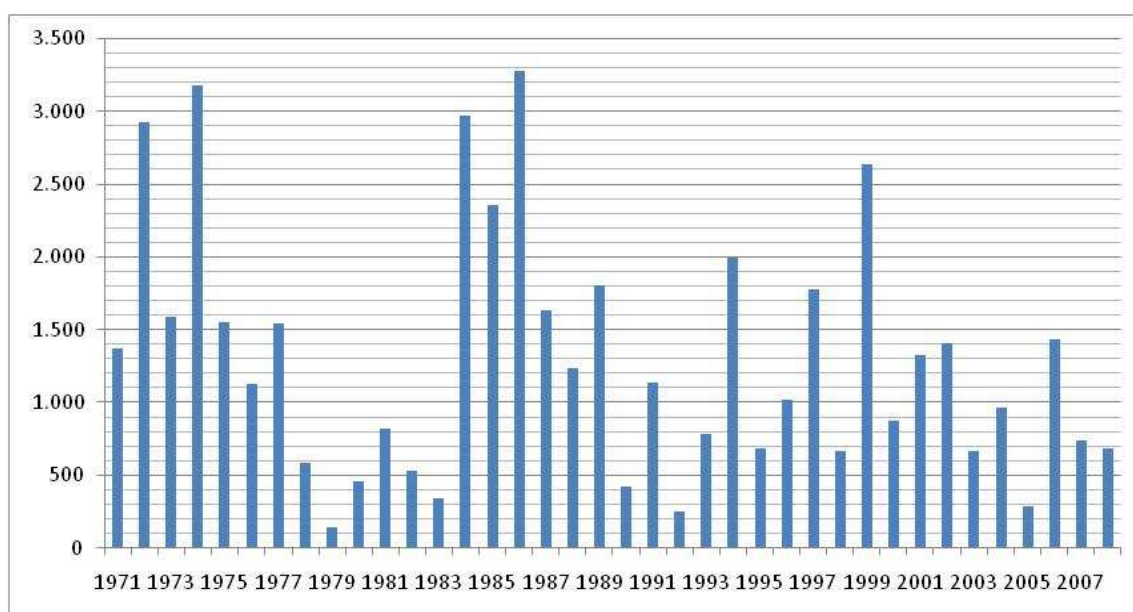


Figura 10 - Vazões máximas (m^3/s) simuladas no PH Ocoña.

5. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE VAZÕES MÁXIMAS NO PH OCOÑA

5.1. Serie analisada

Trabalhou-se com a série de vazões máximas instantâneas simuladas para o local do barramento (Figura 10) obtida para o período 1971-2008. A Tabela 8 apresenta as principais características da série estudada.

Tabela 8 - Principais características da série analisada

Parâmetro	Valor
Média	2.152,4
Mediana	1.876,9
Desvio Padrão	1.414,1
Variância	1.999.783,4
Curtose	0,1
Coefficiente de assimetria	0,9088
Intervalo	5.214,2
Mínimo	237,8
Máximo	5.452,1
Somatório	81.790,1
Extensão da série	38

5.2. Modelos ajustados

À série de vazões junto ao barramento do PH Ocoña foram ajustados diversos modelos probabilísticos, entre os quais figuram: Log-Normal de 2 parâmetros, Log-Normal de 3 parâmetros, Gumbel, Exponencial, Gamma de 2 parâmetros, Gamma de 3 parâmetros ou Pearson III, bem como Log-Pearson III.

5.3. Seleção do modelo

Para a definição do modelo a ser adotado para a estimativa das vazões máximas, a aderência dos ajustes foi verificada através dos testes de Smirnov-Kolmogorov, obtendo-se um delta máximo de 0,042 frente ao delta crítico de 0,221. Foram também analisados os erros quadráticos padrões de cada uma das funções, sendo o menor igual a 0,123.

Em ambos os casos o modelo que apresentou a melhor aderência foi o Log-Pearson III.

5.4. Estimativa das vazões máximas

Com o modelo ajustado foram estimadas as vazões para diferentes períodos de retorno. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9 e na Figura 11.

Tabela 9 - Vazões máximas instantâneas no barramento do PH Ocoña

TR (anos)	Q max (m ³ /s)
2	1.819
5	3.215
10	4.178
25	5.387
50	6.265
100	7.115
200	7.939
500	8.989
1.000	9.754
2.500	10.728
5.000	11.436
10.000	12.121

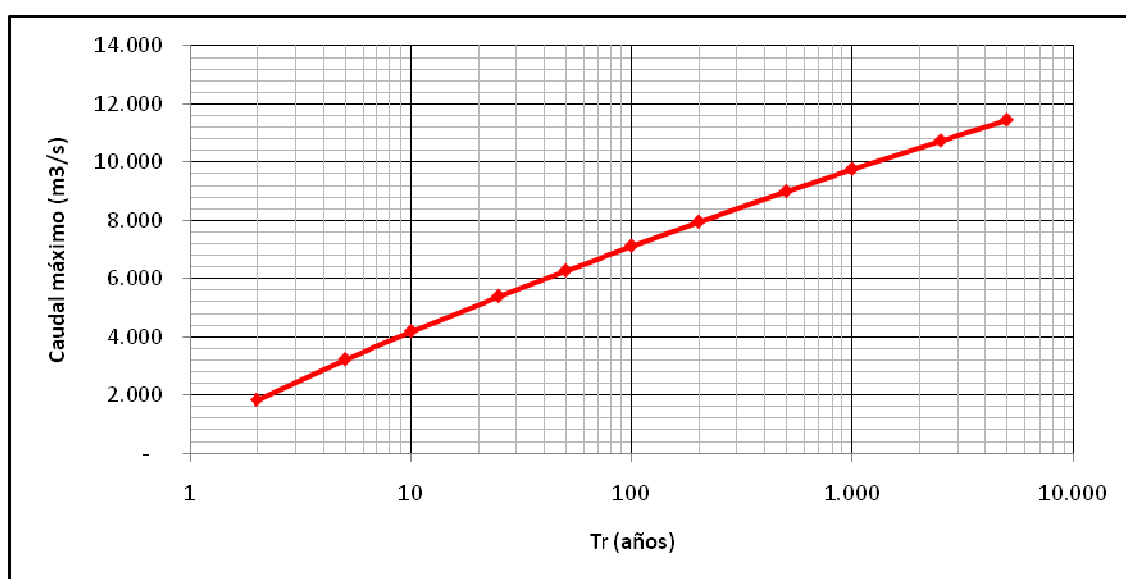


Figura 11 - Vazões máximas instantâneas no barramento do PH Ocoña

6. CONCLUSÕES

A bacia do rio Ocoña apresenta uma grande variabilidade hidrológica ao longo do seu desenvolvimento. Essa variabilidade, entretanto, se apresenta bastante regular e definida, seja espacial ou temporalmente.

Essa característica, aliada a uma considerável disponibilidade de informações pluviométricas, possibilitou uma razoável modelagem da bacia a qual permitiu, por sua vez, suprir as deficiências quanto à disponibilidade de registros fluviométricos necessários para se alcançar os objetivos propostos: determinação da série de vazões médias mensais e estimativa das vazões de cheia.

Nesse contexto, a análise de consistência e preenchimento das falhas das séries pluviométricas se baseou, fortemente, no conhecimento dessas características, e permitiu obter da aplicação de ferramentas como curvas duplo-acumulativas uma alta eficiência nessa etapa dos estudos. Com isso foi possível a determinação do padrão de chuvas na bacia.

Na continuação, a determinação do padrão de chuvas na bacia do rio Ocoña possibilitou um seguro preenchimento das falhas nas séries de vazões médias mensais e a correta transferência das mesmas para o local de interesse.

Para a estimativa das vazões de cheia junto ao eixo do barramento, o objetivo proposto foi alcançado pela aplicação do modelo de propagação de Muskingum de maneira inversa, de jusante para montante, às vazões registradas na estação Ocoña. Isso foi necessário devido à heterogeneidade da bacia, que apresenta uma zona de produção hídrica na região a montante do barramento e uma zona árida a jusante, a qual praticamente não apresenta contribuição.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a caracterização da pluviometria se apresentou eficiente para retratar a variabilidade hidrológica da bacia, bem como para incorporar aos resultados esperados as influências dessa variabilidade. Da mesma forma, a aplicação do modelo de propagação propiciou uma estimativa mais adequada das vazões de cheia, eliminando das mesmas o efeito de amortecimento existente entre a seção do barramento e a estação fluviométrica que dispõe dos registros.

BIBLIOGRAFIA

UNESCO (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Montevideo, ROSTLAC, 130 p.

TUCCI, C. (2001). *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Segunda edição. Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 4. Ed. Universidade/UFRGS. 943 p.