



SLY WONGCHUIG CORREA

**EROSÃO HÍDRICA DO SOLO PARA A BACIA
DO RIO MANTARO, PERU, CONSIDERANDO
POSSÍVEIS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

LAVRAS – MG

2015

SLY WONGCHUIG CORREA

**EROSÃO HÍDRICA DO SOLO PARA A BACIA DO RIO MANTARO,
PERU, CONSIDERANDO POSSÍVEIS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

Coorientadora

Dra. Sin Chan Chou

LAVRAS – MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Wongchuig Correa, Sly.

Erosão hídrica do solo para a bacia do rio Mantaro, Peru,
considerando possíveis mudanças climáticas / Sly Wongchuig
Correa. – Lavras : UFLA, 2015.

184 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador(a): Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. Balanço hídrico vertical. 2. Potencial erosivo da chuva. 3.
Concentração da precipitação. 4. Equação Universal de Perda de
Solos Revisada - 3D (EUPSR-3D). 5. Cordilheira dos Andes. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

SLY WONGCHUIG CORREA

**EROSÃO HÍDRICA DO SOLO PARA A BACIA DO RIO MANTARO,
PERU, CONSIDERANDO POSSÍVEIS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de janeiro de 2015.

Dr. Marcelo Ribeiro Viola	UFLA
Dra. Sin Chan Chou	CPTEC/INPE
Dr. Júnior César Avanzi	USP

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

LAVRAS – MG

2015

À minha família e em especial ao meu pai, Raul e à minha mãe, Alejandra que me motivaram e incentivaram a pesar da distância.

Ao meu querido país do Peru por ter me ensinado o significado de humildade.

Ao país do Brasil por ter me dado a oportunidade de realizar meus estudos de pós-graduação.

Ao povo brasileiro pela acolhida e pelas boas amizades que eu pude fazer.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela formação acadêmica e profissional oferecida durante o período de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo amparo no fornecimento da bolsa de estudos durante o período de formação acadêmica através do Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação, PEC-PG.

Ao meu orientador, Dr. Carlos Rogério de Mello, pelo exemplo de profissionalismo, constante orientação em todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho, ensinamentos, tolerância e pela convivência e amizade.

À equipe de pesquisa do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por cederem os resultados da simulação do cenário climático futuro SRES A1B projetados pelo modelo climático regional Eta-CPTEC/HadCM3. Em especial à minha coorientadora, Dra. Sin Chan Chou, ao Adan Juliano de Paula Silva e ao André Lyra pela recepção no INPE-CPTEC, preparação e envio dos pontos do *downscaling* sobre a região estudada.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação e, sobre tudo, ao prof. Gilberto Coelho e ao Matheus Durães pela orientação e conselhos ao longo do desenvolvimento do trabalho, que de alguma maneira colaboraram com o encaminhamento e conclusão desta dissertação.

Aos bons amigos que eu fiz durante a minha estadia em Lavras, particularmente ao Adriano, e aos meus amigos colombianos, em especial à Yuly pela grande companhia e amizade.

RESUMO

As alterações das possíveis mudanças climáticas sobre o aumento na perda de solo por erosão hídrica significa um grande problema ambiental na agricultura, o qual é de grande importância no contexto do manejo estratégico de bacias em médio e longo prazo, sobretudo em locais cuja atividade produtiva agrícola depende dos recursos naturais superficiais. Estes impactos podem ser avaliados através de modelos paramétricos como a Equação Universal de Perda de Solos Revisada-3D (RUSLE-3D, pela sigla em inglês). A bacia estudada, do rio Mantaro, abrange as regiões de Junín, Pasco, Lima, Huancavelica e Ayacucho, localizados no Peru, na parte central da cordilheira dos Andes. A bacia do rio Mantaro possui 34.543,79 km², tem uma grande importância na região por ser a geradora de quase 35% da energia elétrica do Peru, com produção agrícola que fornece alimentos à cidade capital, Lima, além de ser a bacia com maior densidade populacional da Serra do Peru. Diversos autores e estudos sinalizam a alta vulnerabilidade da região dos Andes frente a possíveis mudanças climáticas futuras, porém a importância das projeções futuras em relação ao comportamento da chuva, tanto na sua variação temporal como espacial, qual é o fator ativo no processo de erosão hídrica, o que tem sido pouco avaliado. Nesse contexto, objetivou-se avaliar mediante o uso do cenário de mudanças climáticas SRES A1B projetado pelo modelo climático regional Eta-CPTEC e acoplado ao Modelo Climático de Circulação Global (MCG) HadCM3, em primeiro lugar, a variabilidade climática na bacia do rio Mantaro a partir das variáveis precipitação e evaporação, até o final do século XXI. Além disto, foi estimada a variação temporal do potencial erosivo da chuva, mediante o Índice Modificado de Fournier (IMF) e Concentração da Precipitação (ICP). Na segunda parte da avaliação, simularam-se os possíveis impactos, nos solos, da erosão hídrica associada ao mesmo cenário climático futuro SRES A1B através de mapas de vulnerabilidade, mediante o uso da Equação RUSLE-3D. Para um maior entendimento do comportamento climático, dividiu-se a bacia do rio Mantaro em seis regiões agroecológicas diferenciadas pelas características fisiográficas e faixas de altitudes. Segundo o comportamento climático simulado ao longo do cenário avaliado, em relação ao balanço hídrico vertical estimou-se um aumento no déficit hídrico até o final do cenário avaliado. Em relação à variação temporal do potencial erosivo da chuva, o índice IMF anual, na média,

apresentou uma tendência estatística negativa para todas as regiões do local de estudo, indicando provável diminuição do potencial erosivo da chuva, embora existam espacialmente áreas que apresentam aumento do IMF anual, e temporalmente constatou-se anos com valores máximos, sobretudo no início da década dos anos 2020, 2050, 2080 e 2090. Enquanto o ICP anual amostrou tendência estatística positiva, sinalizando um aumento na irregularidade das chuvas até o final do século XXI. Finalmente a estimativa do potencial erosivo da chuva demonstrou que espacialmente, em todos os “time slices”, os maiores valores ocorrem na parte leste da bacia que pertence à região agroecológica “Selva Alta”, assim a tendência temporal, na média, foi de diminuição, embora apresentando áreas com incremento deste potencial. Em relação à perda média anual do solo, também houve diminuição na média, embora no contexto do manejo de bacias se diferenciou a Bacia do rio Mantaro em sub-bacias. Assim, apresentaram-se algumas áreas cujos valores de perda média anual de solos aumentarão de maneira progressiva até o final do cenário avaliado, na parte Central e Noroeste da Bacia do rio Mantaro, abrangendo principalmente as sub-bacias Vilca, Yauli, Santa Ana e Atoc Huarco.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Balanço hídrico vertical. Bacia hidrográfica do rio Mantaro. Erosão hídrica. Manejo de bacias.

ABSTRACT

The impacts from climate change on soil erosion behavior have great environmental concern to society, which are significant on the context of strategic management of basins at medium and long terms, mainly for places whose agriculture activities depend on exclusively of the natural resources. These impacts can be evaluated through parametric models like Revised Universal Soil Loss Equation – 3D (RUSLE-3D) forced with climate change simulation outputs. The studied basin was Mantaro river, that covers the “Junin”, “Pasco”, “Lima”, “Huancavelica” and “Ayacucho” regions, located in Peru, specifically in the “Central of the Cordilheira dos Andes” region. The Mantaro river basin has an area about 34,543.79 km², and has great importance due to its electrical energy capacity production, which corresponds to almost 35% of all electric energy supply of Peru. In addition, the basin supplies the Lima city (Peru’s capital) with food, and has the greatest population density of the “Cordilheira dos Andes” in Peruvian territory. Several authors and studies have shown the high vulnerability of the Andes region associated to possible climate changes. However, the impacts on rainfall regime behavior, both in temporal and spatial scales, and on rain power erosion, have been scarce. In this context, this study aimed to evaluate the climatic variability in the Mantaro river basin, analyzing the precipitation and evaporation elements and the water budget throughout XXI century. Besides that, it was estimated the temporal variation of rain power erosion taking into account the indicators Modified Fournier Index (MFI) and Precipitation Concentration Index (PCI). For this study, the Eta-CPTEC HadCM3 model was run over the basin, in spatial and temporal scales of, respectively, 20 km and 3 hours, having as reference the climate change scenario SRES A1B. In second part of the study, it was simulated possible impacts over soil erosion due to the climate change impacts simulated, using RUSLE-3D model to generate soil erosion risk maps. To better understanding of the climate behavior, the Mantaro river basin was shared into six agro-ecological regions differentiated according to their physiographical features and altitude strips. The results have shown for A1B scenario significant increases in water deficit over the basin, with decrease in precipitation and increase in evaporation throughout the century. Regarding the temporal variation of the rain power erosion, MFI index, on average, has presented a significant negative trend given by the Mann-Kendall statistical test for all the agro-ecological regions, indicating possible reduction on the rainfall erosion capacity, although the existence of areas with slightly increase on MFI values. It also could find out a high variability of MFI throughout the century, highlighting in the beginning of the decades of 2020, 2050 and 2090. In other hand, the PCI has presented a significant positive trend, showing an increase on the seasonality pattern of the

precipitation in end of the century. Finally, the rainfall erosivity has demonstrated that spatially, for all time slices, the largest values were found to the east part of the basin, highlighting the agro-ecological region "Selva Alta". Over the century, a temporal trend of reduction on rainfall erosivity was noticed, however, in some sub-basins this indicator has presented increase. In the context of the annual average soil erosion rate, it was verified reduction in the basin as a whole, although in sub-basins located in the north and in the middle-south regions, like "Vilca", "Yauli", "Santa Ana" and "Atoc Huarco", increases were estimated for consecutive time slices.

Keywords: Climate change. Vertical hydric balance. Mantaro river basin. Rainfall erosivity. Management of basins.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1	Localização da bacia do rio Mantaro na América do Sul (a) e Peru (b).....	51
Figura 2	Localização da bacia do rio Mantaro em relação ao Amazonas.....	52
Figura 3	Sub-bacias do rio Mantaro, Peru.	53
Figura 4	Fisiografia da bacia do rio Mantaro, Peru	55
Figura 5	Regiões agroecológicas da BRM, Peru.	57
Figura 6	Hidrografia da bacia do rio Mantaro, Peru.....	58
Figura 7	Distribuição média da precipitação mensal para a bacia do rio Mantaro (Período 1960 – 2002).....	61
Figura 8	Média histórica (1960-2002) da precipitação anual superposta com do Modelo Digital de Elevação.....	62

CAPÍTULO 2

Figura 1	Modelo Digital de Elevação (a) e regiões agroecológicas (b) da BRM, Peru.....	80
Figura 2	Caixas de grade e respectivos pontos centrais do modelo Eta-CPTEC/HadCM3 sobre a BRM, Peru.....	81
Figura 3	Valores do erro padrão da média na validação cruzada gerada pelos modelos geoestatísticos ajustados para dados de Precipitação mensal (a. 1961-1990; b. 2011-2040; c. 2041-2070 e d. 2071-2098).	86
Figura 4	Valores do erro padrão da média na validação cruzada gerada pelos modelos geoestatísticos ajustados para dados de Evaporação mensal (a. 1961-1990; b. 2011-2040; c. 2041-2070 e d. 2071-2098).	88
Figura 5	Precipitação média mensal (coluna esquerda) para o clima presente (1961-1990) e para os “time slices” futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098 e sua variação em relação ao clima presente (coluna direita) para o cenário de mudanças climáticas	

	A1B (a. BRM; b. Selva Alta; c. Yunga fluvial; d. Quechua; e. Suni; f. Puna; g. Janca).....	93
Figura 6	Varição da precipitação anual (%) em relação ao clima presente (a), e em relação ao período anterior (b), por regiões agroecológicas, na BRM, Peru.	95
Figura 7	Evaporação média mensal (coluna esquerda) para o clima presente (1961-1990) e para os “time slices” futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098 e sua variação em relação ao clima presente (coluna direita) para o cenário de mudanças climáticas A1B (a. BRM; b. Selva Alta; c. Yunga fluvial; d. Quechua; e. Suni; f. Puna; g. Janca).....	100
Figura 8	Varição da evaporação anual (%) em relação ao clima presente (a), e em relação ao período anterior (b), por regiões agroecológicas, na BRM, Peru.	101
Figura 9	Balanço hídrico vertical anual (a), variação em relação ao clima presente (a), e em relação ao período anterior (b), por regiões agroecológicas, na BRM, Peru.	103
Figura 10	Mapa da variação do Balanço hídrico vertical anual em relação ao clima presente, na BRM, Peru.	104
Figura 11	Comportamento temporal dos índices IMF anual e ICP anual para a BRM e as seis regiões agroecológicas (a. BRM; b. Selva Alta; c. Yunga fluvial; d. Quechua; e. Suni; f. Puna; g. Janca).	110
Figura 12	Valores do Grau de dependência espacial (a) e do erro padrão da média (b) na validação cruzada dos modelos geoestatísticos da krigagem ordinária para dados de IMFm.	112
Figura 13	Valores do Grau de dependência espacial (a) e do erro padrão da média (b) na validação cruzada dos modelos geoestatísticos da krigagem ordinária para dados de ICPm.	113
Figura 14	Mapas com os índices IMF anual (Figura a) e supra-sazonais (úmido - c e seco - e), e suas variações em relação ao período anterior (IMF anual - b, úmido - d e seco - f), para a BRM.	120
Figura 15	Mapas com os índices ICP anual (Figura a) e supra-sazonais (úmido - c e seco - e), e suas variações em relação ao período anterior (ICP anual - b, úmido - d e seco - f), para a BRM.	127

CAPÍTULO 3

Figura 1	Mapa de solos detalhado em grupos e subgrupos do Vale Agrícola do rio Mantaro (a) e mapa de solos final para a BRM (b), Andes Peruanos.	145
Figura 2	Modelo Digital de Elevação (MDE) (a) e mapas de declividade (%) (b) e de fluxo acumulado (c) para a BRM, Andes Peruanos...	150
Figura 3	Mapa de uso do solo da BRM, Andes Peruanos.	152
Figura 4	Distribuição espacial do fator R no clima presente (a) e os valores de variação em relação ao período anterior (b, c, d), ao longo do século XXI para a BRM, Andes.	156
Figura 5	Distribuição do potencial erosivo da chuva (fator R) para as zonas agroecológicas da BRM, Andes Peruanos, ao longo do século XXI (a), variação deste em relação ao período anterior (b), e variação em relação ao clima presente (c).	157
Figura 6	Distribuição do potencial erosivo da chuva (fator R) para as sub-bacias da BRM, Andes Peruanos, ao longo do século XXI (a), variação deste em relação ao período anterior (b).	159
Figura 7	Distribuição temporal do potencial erosivo da chuva (fator R) para a BRM, Andes Peruanos, ao longo do século XXI.	160
Figura 8	Mapas do fator LS (a), erodibilidade do solo (BRM - b e vale do Mantaro - c) e fator CP (cobertura vegetal e manejo do solo) (d) para a BRM, Andes Peruanos.	162
Figura 9	Mapas da distribuição espacial do risco à erosão do solo na BRM e o vale do Mantaro, para o clima presente (a) e para os “times slices” futuros (2011-2040 - b; 2041-2070 - c; 2071-2098 - d).	168
Figura 10	Mapas da distribuição espacial da variação do risco à erosão do solo na BRM em relação ao período anterior, para os “times slices” futuros (2011-2040 - a; 2041-2070 - b; 2071-2098 - c).	170
Figura 11	Distribuição da perda anual média de solo para as zonas agroecológicas (a) e sub-bacias (c), e respectivas variações em relação ao “time slice” anterior (b e d).	173

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1	Classificação do Índice Modificado de Fournier (IMF).....	47
Tabela 2	Classificação do Índice de Concentração da Precipitação (IMF)	48

CAPÍTULO 3

Tabela 1	Classificação do risco à erosão associadas às perdas de solos (LI; FAN; MAO, 2014).....	140
Tabela 2	Valores de % Textura e %MO no vale do rio Mantaro.....	146
Tabela 3	Códigos de permeabilidade do solo.	147
Tabela 4	Códigos de estrutura do solo.	148
Tabela 5	Coberturas vegetais e as referências do cálculo do fator C.	153

LISTA DE SIGLAS

A1B	Cenário climático A1B
AGCM	Atmosphere General Circulation Model
ALOS	Advanced Land Observation Satellite
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model
CAN	Comunidad Andina de Naciones
CCSM2	Community Climate System Model 2
CENAGRO	Censo Nacional Agropecuario
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
Eta-CPTEC	Modelo climático regional Eta modificado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GCM	General Circulation Model
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gas
HadCM3	Hadley Centre Global Coupled-Ocean Model
IGP	Instituto Geofísico del Perú
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JALDA	Japan Agricultural Land Development Agency
JMA	Japan Meteorological Agency
MAREMEX	Manejo de Desastres ante Eventos Meteorológicos Extremos

MDE	Modelo Digital de Elevação
MFI	Modified Fournier Index
MINAM	Ministerio del Ambiente del Perú
MINAG	Ministerio de Agricultura y Riego del Perú
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
ONERN	Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales del Perú
PCI	Precipitation Concentration Index
PEA	Población Económicamente Activa
PRAA	Proyecto Regional Andino de Adaptación al Cambio Climático
PROCLIM	Programa de Fortalecimiento de Capacidades Nacionales para manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire
RCMs	Regional Climate Models
RegCM2	Second-Generation Regional Climate Model
RUSLE-3D	Revised Universal Soil Loss Equation – 3D
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRES	Special Report Emission Scenarios
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
WBGU	German Advisory Council on Global Change

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 Introdução Geral	20
1	INTRODUÇÃO	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Erosão do solo	22
2.1.1	Definições	22
2.1.2	Métodos de quantificação e estimativa da erosão hídrica do solo ..	25
2.2	Mudanças Climáticas.....	26
2.2.1	Definições	26
2.2.2	Visão regional	28
2.2.3	Principais causas.....	30
2.2.4	Modelo Global HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, versão 3).....	31
2.2.5	Modelo Regional Eta-CPTEC	34
2.2.6	Cenários futuros de mudanças climáticas (SRES).....	37
2.2.7	Incertezas dos modelos climáticos e cenários de emissões	38
2.3	Avaliações anteriores das Mudanças Climáticas na Bacia do rio Mantaro, Peru.....	40
2.4	Índice Modificado de Fournier (IMF).....	45
2.5	Índice de Concentração da Precipitação (ICP).....	47
2.6	Mapeamento com base na Geoestatística.....	49
3	CONTEXTUALIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MANTARO, PERU.....	50
3.1	Fisiografia	53
3.2	Hidrografia	57
3.3	Clima.....	59
	REFERÊNCIAS.....	63

	CAPÍTULO 2 Tendências climáticas na bacia hidrográfica do rio Mantaro, Andes Peruanos, para o cenário de mudanças climáticas A1B	73
1	INTRODUÇÃO	76
2	MATERIAL E MÉTODOS	79
2.1	Mapa base e classificação das regiões agroecológicas da BRM	79
2.2	Cenário futuro de mudanças climáticas SRES A1B	80
2.3	Índice Modificado de Fournier (IMF) e Índice de Concentração de Precipitação (ICP).....	82
2.4	Análise de tendência dos índices IMF e ICP	84
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
3.1	Comportamento da precipitação e evaporação mensais simuladas para as mudanças climáticas A1B.....	85
3.2	Comportamento dos índices IMF e ICP simulado para o cenário de mudanças climáticas A1B na BRM, Andes Peruanos	105
4	CONCLUSÕES.....	129
	REFERÊNCIAS.....	130
	CAPÍTULO 3 Risco do solo à erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do rio Mantaro, Andes Peruanos, associado às mudanças climáticas	134
1	INTRODUÇÃO	136
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	139
2.1	Equação Universal de Perda de Solos Revisada-3D (RUSLE-3D) 139	
2.1.1	Comportamento da erosividade da chuva ao longo do século XXI na bacia do rio Mantaro, Andes Peruanos	141
2.1.2	Mapa de Solos para determinação do fator K para a BRM, Andes Peruanos.....	143
2.1.3	Fator Topográfico LS para a BRM, Andes Peruanos.....	148
2.1.4	Determinação dos fatores C e P para a BRM, Andes Peruanos ...	151

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	154
3.1	Comportamento espacial e temporal da erosividade média anual da chuva (fator R) na BRM, Andes Peruanos.....	154
3.2	Distribuição espacial dos fatores passivos da RUSLE-3D para BRM, Andes Peruanos.....	160
3.3	Análise espacial do risco dos solos à erosão hídrica na BRM, Andes Peruanos.....	164
4	CONCLUSÕES.....	176
	REFERÊNCIAS.....	178

CAPÍTULO 1

Introdução Geral

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de uma região ou de um país está diretamente relacionado com a disponibilidade dos recursos naturais. Porém, no contexto do desenvolvimento sustentável, é necessário manter a integridade física da terra e sua capacidade produtiva, embora a atividade humana e os fatores naturais tenham alterado o ambiente nas últimas décadas. Em relação aos alimentos, é amplamente conhecido que a produção futura destes dependerá da manutenção das condições de produtividade da terra, as quais estão sujeitas aos processos erosivos. Segundo Suarez (2001), as regiões com solos com maior potencial erosivo são aquelas com alta declividade, clima seco, ventos fortes e chuvas ocasionais, porém, com alta intensidade, as quais coincidem com as condições típicas da região andina do Peru. Além disto, tem-se o fator relacionado com a atividade humana a qual intensifica o processo erosivo, como o desmatamento ou a remoção da cobertura vegetal do solo.

Nos últimos anos, estudos científicos têm colocado em evidência a importância dos possíveis impactos oriundos das mudanças climáticas, em diferentes atividades econômicas e do desenvolvimento do homem. Estas alterações progressivas nas condições climáticas em nível global têm como principal consequência, o aumento na frequência e a severidade dos fenômenos climáticos, tais como as precipitações extremas, as quais têm maior potencial erosivo, extensos períodos de seca, dentre outros, ou seja, as mudanças

climáticas têm um papel muito importante sobre os recursos hídricos, especialmente na sua variabilidade espacial e temporal.

Todos os aspectos mencionados condicionam o desaparecimento acelerado do solo agrícola, o que no contexto do manejo das bacias hidrográficas, fazem-se necessárias estimativas do potencial erosivo atual e futuro, usando modelos e cenários simulados de previsão climática. Tais informações permitem aos tomadores de decisões locais e regionais disporem de uma ferramenta ou ponto de partida para o planejamento no processo de controle da erosão do solo.

Nesse sentido, na atualidade é necessária a realização de estudos na área dos recursos hídricos, tendo em conta os impactos das mudanças climáticas globais. Assim, considerando os Andes tropicais como um dos locais mais vulneráveis às possíveis mudanças climáticas futuras, a presente pesquisa, objetivou desenvolver o estudo na Bacia do rio Mantaro, localizada nos Andes centrais do Peru e que abrange uma área de 34.543,79 km². Esta bacia é considerada como uma das mais importantes dos Andes do Peru pelo fornecimento, na geração de energia elétrica, ao sistema elétrico nacional (35%) e o alto potencial agrícola. Na avaliação, foi usado um cenário climático simulado até final do século XXI, projetados pelo Modelo Climático Regional Eta-CPTEC acoplado ao Modelo de Circulação Global HadCM3, para o cenário climático SRES A1B. A análise realizada na bacia do rio Mantaro foi diferenciada por regiões agroecológicas as que possuem principalmente diferentes faixas de altitude, devido que esta variável se encontra estreitamente relacionada com o regime hídrico segundo estudos de séries históricas em nível local.

Assim, a presente dissertação foi dividida em três capítulos. O Capítulo 1 tem por objetivo apresentar um referencial teórico dos principais tópicos do

estudo, já no Capítulo 2, objetivou-se identificar a tendência do clima ao longo do século XXI, diferenciados por regiões agroecológicas, nas variáveis hidrológicas tais como a precipitação e evaporação. Além, estimaram-se indicadores do regime de precipitação, tais como o Índice de Concentração da Precipitação (ICP) e o indicador de erosividade da chuva, o Índice Modificado de Fournier (IMF), também se avaliou, para estes índices, a tendência temporal mediante o teste estatístico de Mann Kendall. Finalmente, no Capítulo 3, identificaram-se os locais de vulnerabilidade atual e futura à erosão hídrica superficial, diferenciados por regiões agroecológicas e as sub-bacias pertencentes à bacia do rio Mantaro, mediante o uso do modelo RUSLE-3D através de mapas desenvolvidos com suporte dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelos geoestatísticos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Erosão do solo

2.1.1 Definições

A erosão do solo é definida como o processo de degradação, transporte e deposição de materiais de solo por agentes erosivos (ELLISON, 1947). A comunidade científica internacional reconhece que a erosão é um grave problema, em que segundo Almorox, López e Rafaelli (2008), a consciência da gravidade do problema somente aconteceu na década de 30 do século XX, depois de ter ocorrido alguns anos de seca no meio-Oeste dos Estados Unidos, o que derivou numa perda das safras, e originou as condições de solos sem cobertura. Além disto, resultou em uma estrutura muito degradada pelo preparo excessivo do solo, com a ação dos ventos desprendendo grandes quantidades de solo, provocando o empobrecimento deste e o conseqüente abandono das terras

agrícolas pelos agricultores. A partir daqueles acontecimentos, foi criado o *U.S. Soil Conservation Service*, instituição que teve um grande impacto no desenvolvimento de métodos de uso do solo de maneira sustentável, que na atualidade são usadas na agricultura conservacionista.

Segundo a Food and Agricultural Organization of the United Nations - FAO (1980), a erosão do solo representa um problema severo, já que mais de 80,5% (106.440.000 km²) da superfície do planeta apresentam consequências deste fenômeno, originado tanto por causas naturais como por causas antropogênicas. A erosão hídrica do solo é um dos maiores problemas ambientais e da agricultura no mundo, sendo responsável pelo transporte de sedimentos que poluem corpos d'água e assoreiam reservatórios, rios, lagos, etc. A erosão pode causar a perda de grandes quantidades de nutrientes, matéria orgânica, defensivos agrícolas e sementes, carregados juntamente com os sedimentos removidos pelo escoamento superficial, causando prejuízos diretos à produção agropecuária. Segundo Pruski (1997), a erosão também causa problemas na qualidade e disponibilidade de água, decorrentes da poluição e do assoreamento dos mananciais, favorecendo a ocorrência de enchentes no período chuvoso e aumentando a escassez de água no período de estiagem.

Entretanto, é muito difícil precisar qual a magnitude com que esta ocorre, além de sua extensão e taxa, e do seu impacto econômico e ambiental. Segundo Lal (1994), estima-se que as áreas afetadas por erosão acelerada pela influência humana atingem 12% na América do Norte, 18% na América do Sul, 19% na Oceania, 26% na Europa, 27% na África e 31% na Ásia. Segundo Zarate e Anaya (1992), a avaliação do risco de erosão tem como objetivo identificar aquelas áreas onde a produtividade sustentável de um uso específico da terra é ameaçada pela perda excessiva de solo, assim como será avaliada nesta pesquisa na bacia do rio Mantaro, no Peru.

Segundo Amezquita et al. (1998), o Peru é um dos países andinos que têm diferentes estados do problema de erosão. A primeira tentativa para avaliar as taxas de erosão dos solos do Peru foi feita por Felipe-Morales et al. (1977). Desde então, tem sido poucas as pesquisas voltadas para a erosão do solo. Segundo Stroosnijder (1997), as principais causas de erosão no Peru são o uso intensivo da terra, sobre pastoreio, cultivos anuais em áreas muito íngremes, desmatamento, novas áreas de edificação, estradas e áreas abandonadas; em consequência, a erosão está afetando as áreas agrícolas nas partes altas pela perda de solo, nos vales baixos pelo assoreamento dos reservatórios, obras hidráulicas que são afetadas pelos sedimentos, sistemas de irrigação pressurizada por gotejamento pela obstrução dos emissores, turbinas das centrais hidrelétricas são danificadas pelo efeito de corrosão causada pelos sedimentos, e as estações de tratamento de água potável requerem maior quantidade de aditivos (coagulantes e floculantes) para processar a água para uso doméstico.

A erosão hídrica é o processo de desagregação e transporte de partículas geradas pela ação da água. Segundo a FAO (1990), este é um processo natural, embora devido ao uso intensivo dos solos agrícolas e o manejo inadequado, tem sido acelerado como consequência daquelas atividades. Segundo Morgan (1986), as gotas de chuva desagregam as partículas do solo desprotegido e o escoamento superficial as transporta até distâncias consideráveis, causando sedimentação em rios, represas, lagos e até áreas do mar na foz dos rios.

A erosão do solo analisada nesta pesquisa é aquela produzida pelo impacto das gotas de chuva, porém, é muito importante a análise desta variável num cenário de possíveis mudanças climáticas. Segundo Llosa (2009), as chuvas têm mudado seu padrão de comportamento associado à frequência como também à sua intensidade nos últimos anos. Para o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), as mudanças climáticas são uma realidade, e seus

impactos sobre o padrão das precipitações podem afetar o potencial erosivo das chuvas (NEARING; PRUSKI; O'NEAL, 2004).

2.1.2 Métodos de quantificação e estimativa da erosão hídrica do solo

Segundo Oyarzún (1993), para fins práticos, tais como a planificação do uso do solo e o desenvolvimento de estratégias de conservação, é necessário estimar as taxas de erosão do solo e identificar situações especialmente vulneráveis para as perdas de solo por erosão hídrica. Segundo León (2010), de forma geral, os métodos para quantificar a erosão hídrica se dividem em dois tipos, diretos e indiretos. Os primeiros são aqueles que permitem a geração de informações baseadas em observações de campo, como por exemplo, a medição das variações de nível superficial do solo, estacas de erosão, parcelas de escoamento e perdas de solo, caixas Gerlach, dentre outras, embora estas medições requeiram muito tempo, recursos e esforço. No entanto, segundo Morgan (1979), os métodos indiretos são estimativas das perdas do solo, e podem se dividir em determinísticos e paramétricos. Os primeiros estão baseados em equações matemáticas com o objetivo de descrever os processos envolvidos no modelo, tendo em consideração as leis de conservação de matéria e energia. Por outro lado, os modelos do tipo paramétrico, estão baseados na identificação de relações estatisticamente significativas entre variáveis, que são adotadas sempre que se tem uma razoável base de dados. Como exemplo deste modelo, destaca-se a Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) ou USLE desenvolvida com dados de mais de 10.000 parcelas experimentais nos Estados Unidos.

2.2 Mudanças Climáticas

2.2.1 Definições

Segundo Moos et al. (2010), o Clima ou Sistema Climático apresenta cinco principais componentes que interagem entre si: a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a biosfera e a litosfera. Este sistema é vulnerável à modificação com o tempo pela influência de sua própria dinâmica interna e por causa de fatores externos naturais e antropogênicos.

As mudanças climáticas referem-se à mudança no estado do clima, e podem ser identificadas pela mudança na média e, ou, na variação das suas propriedades, e que são persistentes durante um longo período de tempo, geralmente décadas ou séculos. Estas mudanças podem estar associadas à variabilidade natural ou como resultado da atividade humana (antropogênica). Contudo, segundo a Convenção Marco das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (CMNUMC ou UNFCCC nas siglas em inglês), as mudanças climáticas são atribuídas direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera no globo e que é adicionada à variabilidade natural do clima (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007b).

Segundo Zapata et al. (2011), o mundo tem sido surpreendido pelo comportamento do clima nas últimas décadas. Tal comportamento é consequência do aumento e acumulação de emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE ou GHG nas siglas em inglês) na atmosfera, principalmente no século XX. Este fato tem colocado a humanidade num problema para o qual não estava preparada ou consciente. É por isso que, na atualidade, as mudanças climáticas consistem de uma temática de grande relevância para o futuro da humanidade.

Nesse contexto, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (PIMC ou IPCC nas siglas em inglês) foi estabelecido pela Organização

Meteorológica Mundial e pelo Programa Ambiental das Nações Unidas, em 1988, e tem como missão oferecer à comunidade mundial as mais atualizadas informações científicas, técnicas e socioeconômicas globais sobre as mudanças climáticas. As avaliações de vários volumes do IPCC vêm, desde então, a desempenhar um papel importante para motivar os governos a adotarem e programarem políticas para responder às alterações climáticas, incluindo o UNFCCC e o Protocolo de Quioto (IPCC, 2007c).

A variação acelerada do clima foi registrada nas últimas décadas. Segundo o IPCC (2013), cada um dos três últimos decênios do final do século XXI tem sido sucessivamente mais quente em relação à temperatura média global da superfície. Por exemplo, no que se refere à temperatura média anual no hemisfério norte, é muito provável que o período de 1983-2012 tenha sido o período mais quente registrado nos últimos 800 anos (com alto nível de confiança), isto baseado nas comparações de temperaturas instrumentais com várias reconstruções feitas a partir de dados indiretos e métodos estatísticos. Assim, segundo o IPCC (2007b), o aumento de temperatura é comum em todo o planeta e tem sido maior em latitudes mais altas do Hemisfério Norte, sendo que, as temperaturas médias do Ártico aumentaram quase duas vezes a taxa média global nos últimos 100 anos. Esta tendência de aquecimento linear ao longo dos anos, de 1956 a 2005 (0,13 [0,10-0,16] °C por década) é quase o dobro do apresentado nos últimos 100 anos (1906-2005). Isso indica uma clara tendência de aumento na temperatura nas últimas décadas.

Como atribuição às mudanças climáticas, o IPCC (2013), indica a influência do homem no aquecimento da atmosfera e do oceano, nas alterações do ciclo global da água, nas reduções da quantidade de neve e gelo, na elevação média global do nível do mar e nas mudanças de alguns fenômenos climáticos extremos.

Finalmente, os especialistas do IPCC concluíram em relatórios de vários anos que:

O relatório do IPCC AR4, publicado em 2007, sobre a base científica das mudanças climáticas, concluiu, com nível de confiança superior a 90%, que o aquecimento global detectado ao longo dos últimos 50 anos é em grande parte devido às atividades humanas (IPCC, 2007a, p. 9).

Contudo, no último informe do IPCC AR5 (IPCC, 2013), este aumenta a responsabilidade do aquecimento global à atividade humana num nível de confiança de 95%.

2.2.2 Visão regional

Existe uma crescente preocupação no tocante às mudanças climáticas também na região do América do Sul, a qual tem sido de interesse para os pesquisadores de diversas áreas, bem como de tomadores de decisões que procuram entender suas causas e seus efeitos. Segundo as conclusões da *X Conferencia do Clima das Nações Unidas* (INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ - IGP, 2005b, p. 1) realizada em Buenos Aires, Argentina, “os efeitos das mudanças climáticas na América Latina estão sendo refletidos nas chuvas mais intensas, tempestades e secas, sendo que a diminuição na produção agrícola ainda é uma ameaça constante”.

Segundo Vergara (2005), na América do Sul, os impactos nas mudanças climáticas são muito significativos e podem afetar de forma irreversível os principais ecossistemas desta região. Segundo Vuille et al. (2008), o recuo das geleiras é um dos indicadores mais visíveis e irrefutáveis dos impactos das mudanças climáticas.

As mudanças climáticas estão provocando maior aquecimento nas regiões mais altas do que nas mais baixas, devido à perda de cobertura de

neve, o que a leva a uma redução do albedo e aumento da absorção da radiação solar sobre a superfície (GIORGI et al., 1997). Assim, segundo Bradley et al. (2006) e Ramirez et al. (2001), vários estudos de modelagem e projeções indicam que muitas geleiras de altitudes mais baixas na Cordilheira dos Andes poderiam desaparecer completamente durante os próximos 10 a 20 anos. Esta situação coloca o Peru numa condição vulnerável, tendo em consideração que a maioria das geleiras de montanhas tropicais do mundo estão localizadas em países como o Peru (70%), a Bolívia (20%) e o Equador (4%).

Segundo Llosa (2009), os testemunhos das comunidades, ambientalistas e agricultores andinos, em relação ao regime de chuvas anormais, revelam a gravidade da situação. Os chamados "veranillos" (verões de curta duração) são longos períodos de seca na época de chuvas, e que promovem a perda de todas as sementes utilizadas no plantio ou na melhor das situações, as colheitas ficam reduzidas, comprometendo a segurança alimentar dos agricultores e suas famílias. As estimativas de menor produção vão desde a perda total da safra até taxas médias de 30 a 50%. Outros testemunhos de conservacionistas, comunidades andinas e agricultores relatam que "as culturas estão subindo" devido às chuvas mais frequentes nas áreas de maior altitude, conhecida como região Puna, e são mais escassas na região Quechua (Puna e Quechua são regiões agroecológicas do Peru). Isto indica que o aumento da temperatura e da presença de chuvas mais irregulares, alteram as culturas (milho, grãos como a quinoa e feijão, tubérculos andinos como batata, olluco, mashua, dentre outros), que antes somente prosperavam na zona Quechua agora têm sido deslocados para a zona da Puna, gerando conflitos com os agricultores nesta região, os quais só tinham bovinos, ovinos e camélidos sul-americanos domesticados (a alpaca e a lhama). Isto porque antes da manifestação mais forte das mudanças climáticas, ali prosperou principalmente gramíneas naturais (alimentos destes animais) as quais têm sido substituídas.

Em caso mais particular, o Peru possui aproximadamente 4% dos recursos hídricos renováveis anuais do mundo (WORLD BANK, 2006). A maior parte (mais de 98%) está localizada ao Leste dos Andes, onde a densidade populacional é baixa e a atividade agrícola é marginal, enquanto a maioria da população e a atividade econômica estão localizadas ao longo das planícies costeiras do Pacífico e encostas ocidentais da Cordilheira dos Andes, onde o clima é tipicamente seco e depende do escoamento das Cordilheiras (PERU, 2005). E quando as geleiras de montanhas tropicais, que estão em risco de desaparecimento, deixam de atuar como reguladores de escoamento, a água sazonal e o fornecimento de energia são afetados, a não ser que medidas alternativas sejam rapidamente implementadas. Segundo Baettig, Wild e Imboden (2007), o índice de vulnerabilidade à mudança climática para a América do Sul mostra o Peru como um dos países mais vulneráveis na região às mudanças climáticas.

2.2.3 Principais causas

Entre os principais gases que contribuem para o efeito estufa, Gases de efeito Estufa (GEE), está o dióxido de carbono (CO_2) que é o GEE antropogênico mais importante. Segundo IPCC (2007b), as emissões anuais de CO_2 cresceram entre 1970 e 2004 em cerca de 80%, de 21 para 38 gigatoneladas (Gt). Enquanto a taxa de crescimento das emissões de CO_2 -eq, ou seja, dos GEE que têm o mesmo potencial de aquecimento global baseado na quantidade equivalente de CO_2 , foi muito maior durante o recente período de 10 anos (1995-2004) (0,92 GtCO_2 -eq por ano) do que durante o período anterior (1970-1994) (0,43 GtCO_2 -eq por ano).

Segundo IPCC (2013), as concentrações atmosféricas globais dos principais gases de efeito estufa tais como o CO₂, CH₄ e N₂O aumentaram acentuadamente como resultado das atividades humanas desde 1750 e agora excedem em muito os valores pré-industriais determinados a partir de amostras de gelo que abrangem muitos milhares de anos. As concentrações atmosféricas de CO₂ e CH₄ em 2005 excedem em muito a faixa natural ao longo dos últimos 650.000 anos. Os aumentos globais na concentração de CO₂ são devidos principalmente ao uso de combustíveis fósseis. Contudo, o aumento observado na concentração de CH₄ é predominantemente devido à agricultura e à utilização de combustíveis fósseis, enquanto que o aumento da concentração de N₂O é principalmente devido à agricultura.

2.2.4 Modelo Global HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, versão 3)

O avanço no conhecimento da dinâmica do clima terrestre é um dos principais desafios da ciência atual. Não somente porque é provavelmente o sistema dinâmico mais complexo conhecido até agora, mas também pelas evidências de que algumas atividades do homem estão modificando a evolução natural do clima e poderiam causar significativas alterações ao longo das próximas décadas (IPCC, 2007d). Segundo McGuffie e Henderson-Sellers (2005), a melhor ferramenta disponível para o estudo da dinâmica do clima são os modelos climáticos, os quais são capazes de reproduzir matematicamente e de maneira adequada os principais processos que ocorrem nos cinco componentes do sistema climático: atmosfera, hidrosfera, criosfera, geosfera e biosfera. Estes modelos climáticos são programas computacionais executados em supercomputadores, os quais resolvem numericamente um conjunto grande de equações que expressam as leis e princípios físicos que governam o sistema do

clima terrestre e para grandes áreas. Segundo Achutarao et al. (2004) e IPCC (2007c), os modelos climáticos globais são capazes de reproduzir razoavelmente bem a distribuição em grande escala das principais variáveis climáticas e que simulam de maneira aceitável as mudanças climáticas observadas. Além disto, grande parte destes modelos coincide quantitativamente com vários aspectos das mudanças climáticas futuras. Segundo IPCC (2013), estes modelos simulam as mudanças baseadas num conjunto de cenários de forçamentos antropogênicos. Além disso, segundo Knutti (2008), apesar da complexidade envolvida na simulação do sistema climático, em grandes escalas espaciais, e em escalas temporais decenais ou mais longas, estima-se ser possível simular o clima de forma razoável e com certa confiabilidade.

Entretanto, segundo Collins (2007), em escalas espaciais pequenas é possível ocorrer alguma diferença entre as observações e os resultados, assim como discrepâncias entre modelos globais. Isso é atribuído principalmente à baixa resolução espacial, o que é mitigado com a aplicação de modelos climáticos regionais mais detalhados.

As pesquisas do IPCC têm sido apoiadas por modelos climáticos globais que melhoraram com o tempo da seguinte maneira (GROSSO, 2011):

1970s. Modelos climáticos iniciais limitados. Apenas incluíam CO₂, radiação e precipitação, mas sem nuvens.

1980s. Nuvens, cobertura terrestre e gelo foram adicionados. Diferentes tipos de cobertura terrestre têm um comportamento diferenciado, desertos e gelo refletem mais radiação e florestas absorvem mais.

1990 – 1º relatório do IPCC. Modelo simplificado dos oceanos é adicionado. Apenas a camada superficial dos oceanos é modelada.

1996 – 2º relatório do IPCC. Modelos mais sofisticados dos oceanos são incorporados. Vulcões também são considerados. As suas erupções libertam partículas na atmosfera que podem bloquear a luz solar temporariamente e reduzir temperaturas globais.

2001 – 3º relatório do IPCC. O ciclo do carbono é incorporado nos modelos. Diferentes formas de armazenamento e liberação do CO₂ trazem um realismo maior aos modelos climáticos. Conhecimento dos oceanos é aprofundado.

2007 – 4º relatório do IPCC. Reações químicas na atmosfera são adicionadas aos modelos climáticos. Os modelos são produzidos por computadores 256 vezes mais rápidos que os de 1970s.

Existem vários modelos climáticos globais, embora na presente pesquisa tenha sido usado o modelo global UK Hadley Centre Model, HadCM3. Segundo o Global Change Master Directory da NASA, o modelo HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, versão 3), que foi desenvolvido no ano 1999, e é um dos principais modelos utilizados, forneceu informações para o Terceiro, Quarto e Quinto Relatório de Avaliação do IPCC. Segundo Stott et al. (2000), o modelo HadCM3 também tem a capacidade de capturar a impressão digital dependente do tempo da mudança do clima histórico em resposta a forças naturais e antrópicas, o que o tornou uma ferramenta especialmente útil nos estudos relativos à detecção e atribuição das mudanças climáticas do passado. Como antecedente, os Modelos de Circulação Geral (GCM) são modelos matemáticos da Atmosfera (AGCM) planetária ou do Oceano (OGCM), cuja grande melhora foi introduzida em 1969 pelos aportes dos cientistas Syukuro Manabe e Kirk Bryan do Laboratório Geofísico de Dinâmica de Fluidos da Universidade de Princeton, através de um modelo que interagiu entre o oceano e a atmosfera assim como acontece na natureza, denominado Modelo Climático Global

Acoplado (AOGCM), sendo um deles, o Modelo HadCM3, o qual tem sido amplamente empregado para a predição e outros estudos de sensibilidade do clima.

Quanto aos aspectos técnicos, o modelo HadCM3 tem no componente atmosférico, 19 níveis com uma resolução horizontal de 2,5 graus de latitude por 3,75 graus de longitude, o que produz uma rede global de 96 x 73 células na quadrícula (ORTEGA, 2013). Isto é equivalente a uma resolução de superfície de aproximadamente 417 km x 278 km no equador, que se reduz em 295 km x 278 km a 45 graus de latitude. O componente oceânico tem 20 níveis com uma resolução horizontal de 1,25 x 1,25 graus. Nesta resolução, é possível representar detalhes importantes nas estruturas oceânicas atuais.

2.2.5 Modelo Regional Eta-CPTEC

Segundo IPCC (2000), os Modelos Climáticos Globais (GCMs) são as principais ferramentas para o estudo da variabilidade do clima no longo prazo. Estes modelos têm uma resolução bastante grosseira, apresentando limitações já que não seria possível representar ou simular explicitamente detalhes que caracterizam uma região em particular, como processos ao nível de mesoescala, como a topografia, uso do solo, ou a distribuição de terra-mar, com a finalidade de usá-lo nos estudos de impactos e avaliação de vulnerabilidade. Assim, o IPCC recomenda que os cenários de mudanças climáticas globais não sejam usados diretamente nos estudos de impacto em escala regional pela baixa resolução espacial.

É por isso que para ter um modelo com melhor resolução é necessário realizar o processo chamado “downscaling” (regionalização) com a finalidade de melhorar a resolução espacial dos modelos globais, para serem úteis nos estudos

de impactos e vulnerabilidade em nível regional. O *downscaling* consiste basicamente em conectar as previsões em escala global com a dinâmica da região para gerar previsões regionais específicas. O “downscaling dinâmico” utiliza um Modelo Climático Regional (RCM) geralmente com resolução espacial de dezenas de quilômetros (ou mais fina), com um domínio espacial focado na região de interesse. Para cada GCM e cenário de emissão, o clima simulado por este, é utilizado para definir o clima na fronteira da região, e portanto, serve como condição de fronteira lateral para o RCM. Como os RCMs possuem uma melhor resolução espacial que os GCMs, eles podem resolver processos locais mais adequadamente, contribuindo para as projeções de mudanças climáticas sobre aquela região (MAURER, 2006). Embora este processo requeira recursos computacionais significativos, já que depende da utilização de modelos físicos e matemáticos complexos.

Também é possível realizar o *downscaling* através do uso de regressões estatísticas, também conhecido como “downscaling estatístico”, tendo várias formas que vão desde regressões múltiplas que relacionam as variáveis locais aos GCM, ou também métodos mais complexos como o uso de redes neurais. O objetivo geral deste método é estabelecer a relação entre as variáveis de grande escala como os fatores derivados dos GCM, nas condições climáticas em nível regional.

No presente estudo, serão utilizados dados do processamento do Modelo Regional Eta-CPTEC, que deriva do modelo Eta, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado conjuntamente com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, tornando-se operacional no National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Este Modelo Regional foi instalado, segundo Chou (1996), no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), em 1996, para complementar a previsão numérica do tempo que vinha sendo realizada pelo modelo de circulação geral atmosférica (GCM), recebendo o nome Eta-CPTEC.

Segundo Chou (1996), o Modelo Regional Eta-CPTEC tem como objetivo prever com maiores detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima, tempestades severas, dentre outros, ou seja, sistemas organizados em mesoescala cuja previsibilidade é menor nessa escala. O modelo Eta-CPTEC abrange a maior parte de América do Sul. Segundo Chou et al. (2012), este modelo também foi executado como parte da análise de impacto e avaliações de vulnerabilidade necessárias para a Segunda Comunicação Nacional de Mudança Climática na Convenção Marco das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (UNFCCC).

Segundo Chou et al. (2012), o modelo Eta, acoplado ao modelo global HadCM3, foi inicialmente configurado para uma resolução horizontal de 40 km. Para o presente estudo, foram utilizados cenários de emissões gerados através do modelo regional Eta-CPTEC, a partir do *downscaling* dinâmico do modelo HadCM3, com uma resolução espacial de 20 km e temporal de 3h, gerando previsões climáticas para até o ano de 2098. O modelo Eta-CPTEC/HadCM3 está baseado nos dados hidrológicos observados do clima presente (1961 a 1990), que segundo Chou et al. (2012) e Marengo e Chou (2011), serviu também para comparação e validação com dados simulados no mesmo período. Além disto, os cenários futuros foram divididos em períodos ou “time slices” de aproximadamente 30 anos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098.

O modelo regional Eta-CPTEC foi escolhido principalmente porque utiliza as coordenadas verticais do modelo Eta, e que devido às características destas coordenadas verticais, o modelo é apropriado para ser utilizado em regiões íngremes tais como a Cordilheira dos Andes (MESINGER, 1984), além da recomendação de Marengo e Chou (2011) para este tipo de ambiente.

2.2.6 Cenários futuros de mudanças climáticas (SRES)

As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) futuro são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por variáveis dinâmicas tais como o desenvolvimento demográfico, socioeconômico, e avanço tecnológico, sendo que sua evolução futura é altamente incerta. Os denominados cenários são imagens alternativas de como o futuro pode se desdobrar e constituem uma ferramenta adequada com a qual é possível analisar como estas variáveis podem influenciar nos resultados das emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas. Estes cenários também ajudam na análise de alterações climáticas, incluindo modelagem climática e avaliação de impactos, adaptação e mitigação (IPCC, 2000).

Os cenários de emissões usados na atualidade para realizar projeções com modelos de clima ao longo do século 21 são conhecidos como SRES (do inglês “Special Report on Emission Scenarios”) e descritos no Relatório Especial do IPCC sobre Cenários de Emissões (IPCC, 2000). Segundo IPCC (2000), estes cenários foram elaborados por um grupo mundial de especialistas dentro do IPCC. Constituíram-se 40 hipóteses diferentes, agrupadas em quatro famílias de cenários (A1, A2, B1 e B2) que exploram caminhos alternativos de desenvolvimento, cobrindo uma ampla gama de forças demográficas, econômicas e tecnológicas, resultantes das emissões de GEE. Segundo o IPCC (2007a), as projeções de emissões são amplamente utilizadas nas avaliações das futuras mudanças climáticas, e suas hipóteses subjacentes, no que diz respeito às mudanças demográficas, tecnológicas e socioeconômicas, podem servir como entradas para muitas avaliações de vulnerabilidade e impacto das mudanças climáticas recentes.

Segundo o IPCC (2000), o cenário **A1** assume um mundo de crescimento econômico muito rápido, uma população global que atinge o pico em meados do século e rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. **A1** é dividido em três famílias que descrevem direções alternativas tecnológicas: fósseis intensivas (**A1FI**), recursos não fósseis de energia (**A1T**) e um equilíbrio entre todas as fontes (**A1B**). **B1** descreve um mundo convergente com a mesma população global, como **A1**, mas com mais mudanças rápidas nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informação. **B2** descreve um mundo com população intermediária e crescimento econômico, enfatizando soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. **A2** descreve um mundo muito heterogêneo com o crescimento populacional elevado, desenvolvimento econômico lento e mudanças tecnológicas lentas.

Neste estudo, foram analisadas as projeções climáticas do modelo Eta-CPTec/HadCM3 para o cenário de emissões **A1B**, uma vez que, segundo Marengo (2007b), neste cenário ocorre equilíbrio entre a utilização de combustíveis fósseis e outras fontes de energia, podendo ser considerada uma abordagem intermediária entre os cenários **A2** e **B2**, que são caracterizados por alta emissão de gases de efeito estufa e baixa emissão, respectivamente. Segundo o IPCC (2000), o cenário de emissões **A1B** tem como característica especial o fornecimento de alternativas tecnológicas no sistema de energia, havendo neste caso, um uso equilibrado das fontes de energia, ou seja, que não vai depender de maneira excessiva somente de uma fonte de energia.

2.2.7 Incertezas dos modelos climáticos e cenários de emissões

Segundo Marengo (2007a), existem fontes de incerteza na modelagem de clima para obter projeções do clima futuro a nível global ou regional na atual

geração de modelos usados pelo IPCC. O IPCC (2005) considera três tipos de fontes de incerteza nos modelos climáticos numéricos:

- **Imprevisibilidade**

Esta fonte de incerteza tem a ver com as projeções do comportamento do homem, o qual não é facilmente previsível, como por exemplo, a evolução dos sistemas políticos e ou, econômicos. Esta se refere a pequenas diferenças no estado inicial do sistema que podem resultar em evoluções deste, mas muito diferentes.

- **Incerteza estrutural**

Segundo Kuhn (1962), refere-se às limitações ou erros de como os fenômenos funcionam, isto é, os modelos ou os sistemas de estudo podem ser conceitualmente inadequados, gerando impactos significativos nos resultados.

- **Incerteza de valores**

Esta é uma das fontes de incerteza mais comuns na maioria dos casos, já que muito tem a ver com a limitação de dados, o que restringe uma adequada estimação dos valores ou parâmetros. Esta limitação de dados é devido ao fato de que os parâmetros amostrados são contínuos, o que faz, na prática, impossível amostrar na superfície do planeta dados contínuos no espaço e no tempo, uma vez que a amostragem é feita em locais dispersos e em períodos limitados de tempo. Isto está em contínua melhora devido ao uso de novas ferramentas de amostragem como, por exemplo, o uso de satélites.

2.3 Avaliações anteriores das Mudanças Climáticas na Bacia do rio Mantaro, Peru.

Os Andes centrais do Peru têm sido considerados em diversos estudos como um dos locais no mundo com condições ambientais extremas e, de maneira recorrente numa maior vulnerabilidade frente às mudanças climáticas. Segundo Brooks e Adger (2003), o Peru é o terceiro país com mais riscos climáticos no mundo, depois de Honduras e Bangladesh. Ainda, segundo os autores, o Peru é uns dos países onde tem ocorrido a maior aceleração do risco climático entre as décadas dos anos mil novecentos e setenta e noventa.

Segundo a “Segunda Comunicação Nacional do Peru à Convenção Marco das Nações Unidas” (UNFCCC pelas siglas em inglês) (PERU, 2010), apresentada no ano 2012, os estudos que envolvem mudanças climáticas na bacia do rio Mantaro são os seguintes:

- *Avaliação local integrada na bacia do rio Mantaro (“Evaluación local integrada en la cuenca del rio Mantaro PROCLIM”. 2003-2005.)*

Segundo Yamina et al. (2005), foi avaliada a Bacia do rio Mantaro através de cenários climáticos futuros com base no modelo Climático Global CCSM2 (Climatic Community System Model 2); (BUJA; CRAIG, 2002), produzidos pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR), em Boulder, Colorado, para os cenários de emissões de gases de efeito estufa A1 e B2. Foi realizado um *downscaling* dinâmico e um *downscaling* estatístico, com base no Modelo regional RegCM2, para os períodos 1990-1999, que foi o período controle, e para o período projetado 2045-2054; com uma resolução espacial de 80 km. Finalmente, foi usado o *downscaling* estatístico uma vez que o *downscaling* dinâmico apresentou inconsistências em relação ao modelo

global. Como conclusão daquele estudo, a precipitação apresentou uma diminuição entre 19% e 14% na parte média da bacia e na parte baixa da bacia, respectivamente, isto para o período 2045-2054 em relação ao período controle, no verão. Assim, as tendências nas estações climatológicas na bacia do rio Mantaro, no período de controle, indicam que, na média, a precipitação teve uma diminuição próxima a 3% por década.

- *Subprojeto, Prognóstico estacional do clima para a aplicação na agricultura no vale do rio Mantaro (“Sub proyecto, Pronóstico estacional del clima para su aplicación en la agricultura en el valle del Mantaro INCAGRO”, 2007 – 2010.)*

O principal objetivo deste subprojeto foi gerar e usar prognósticos climáticos para a agricultura na bacia no rio Mantaro. Como resultados do projeto PROCLIM (“Programa de Fortalecimiento de Capacidades Nacionales para manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire”), foram verificados que eventos extremos como secas, geadas e deslizamentos são os principais perigos para as atividades da população, em especial para a agricultura. Daí a necessidade de se obter informações climáticas no médio prazo para que os agricultores possam planejar suas atividades com antecedência.

- *Adaptação ao impacto do Retrocesso Acelerado das Geleiras nos Andes Tropicais (“Adaptación al impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales - PRAA BM/CAN”, 2007 – 2013.)*

O projeto PRAA teve como objetivo integrar os impactos do recuo das geleiras de montanha no planejamento regional, local e setorial, assim como gerar informações sobre a dinâmica das geleiras de montanha. Este projeto foi estruturado em três principais componentes: clima, adaptação e glaciologia, que consiste na geração de cenários climáticos para a Bolívia, Equador, Peru e

Colômbia, assim como, a implementação de estações climatológicas de monitoramento glacial.

Em escala regional, os resultados foram:

- Medidas de adaptação, melhorando o manejo dos recursos hídricos para uso na agricultura, desde a implementação de irrigação tecnificada até a implementação de novas práticas agrícolas e “colheita de água” (medidas para recarga do lençol freático).
- Monitoramento glacial, mediante oito estações instaladas nos países do CAN (Bolívia, Equador, Peru e Colômbia), gerando uma base de dados regional. Assim, foram usadas imagens ALOS para o monitoramento e inventário das geleiras de montanha.
- Cenários de mudanças climáticas, em nível nacional com resoluções de 20 km a partir de dados do modelo japonês MRI/JMA-TL959, com projeções até o ano 2039.

- *Cenários 2100 SENAMHI (“Escenarios 2100 SENAMHI”, 2008 -2009)*

Este estudo foi desenvolvido com a finalidade de fornecer esforços regionais (Equador, Bolívia e Peru) para definir medidas de adequação e alternativas para enfrentar os impactos das mudanças climáticas na região, no contexto do “Projeto de Adaptação ao Impacto do Retrocesso Acelerado das Geleiras nos Andes Tropicais”. No caso do Peru, a área de interesse correspondeu às bacias dos rios Mantaro e Urubamba.

Para isso, foi construído um cenário de mudanças climáticas associadas à precipitação e temperaturas máximas e mínimas baseadas nas saídas do modelo japonês de alta resolução (20 km), TL959L60/MRI-JMA, do Instituto de Pesquisa Meteorológica do Japão (MRI, na sigla em inglês) e a da Agência Meteorológica Japonesa (JMA, na sigla em inglês), no contexto do cenário de emissão A1B, descrito no IPCC (2000). Previamente, foram determinados os

índices climáticos, como temperatura e precipitação, e tendências atuais com dados climáticos observados de quatro estações climatológicas e uma média de 40 anos de informação. A partir do modelo climático no cenário A1B ao longo do século XXI, na bacia do rio Mantaro, tem-se o seguinte: um progressivo aumento das temperaturas máximas e mínimas em toda a bacia, em relação ao clima presente, com valores na média de 2,7 °C e 2,3 °C respectivamente. Assim, há redução das precipitações no período de verão e inverno nos setores Norte e centro, principalmente, assim como um incremento generalizado na primavera, embora em maior quantidade, no Sul da bacia.

- *ANDESPLUS Perú (2011 – 2012)*

O projeto ANDESPLUS foi desenvolvido no contexto do projeto de “Adaptação ao Impacto do Retrocesso Acelerado das Geleiras nos Andes Tropicais” (“Adaptación al impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales”), no qual foi proposto um guia metodológico com as bases científicas que sejam úteis na implementação de medidas de adaptação sustentável nas regiões de montanha do Peru, Bolívia, Equador e Colômbia. No Peru, o projeto foi desenvolvido na bacia do rio Mantaro com ênfase no rio Shullcas.

- *MAREMEX (“Manejo de desastres ante-eventos meteorológicos extremos”, 2010 – 2011.)*

O projeto MAREMEX teve como objetivo fortalecer a capacidade de manejo dos riscos frente a eventos meteorológicos extremos (secas, geadas e chuvas intensas) para diminuir a vulnerabilidade e melhorar a capacidade de adaptação da população urbana e rural, no Vale do rio Mantaro, frente às mudanças climáticas (IGP, 2010, 2012a, 2012b).

- *Fortalecimento das capacidades para a Adaptação às Mudanças Climáticas na região Junín (“Fortalecimiento de capacidades para la adaptación al CC en la región Junín SNIP 75193 GORE Junín”, 2012 – 2014.)*

Este projeto teve como objetivo principal aumentar a capacidade de enfrentar as mudanças climáticas na região Junín, que forma parte da bacia do rio Mantaro, baseada principalmente em três componentes:

- Programar estratégias de divulgação da informação nas áreas rurais e urbanas em nível regional;
- Fortalecer espaços de gestão regional sobre mudanças climáticas;
- Gerar e sistematizar informações sobre as mudanças climáticas no local de estudo, assim como fortalecer a rede de observação hidrometeorológica.

- *Sustentabilidade Futura da Água na Sub-bacia do rio Shullcas com Degelo Acelerado do Nevado Huaytapallana (“Sostenibilidad Futura del Agua en la Subcuenca del Rio Shullcas con Derretimiento Acelerado del Nevado Huaytapallana”)*

Este projeto foi desenvolvido no contexto da diminuição da disponibilidade de água doce que é a principal fonte de consumo para a população, para as atividades agrícolas e para a geração de energia elétrica, e que tem sido agravado pelo incremento da população. Tendo o Peru a maior quantidade de geleiras tropicais no mundo, e sendo esta uma das principais fontes de água doce junto à precipitação, foi importante estabelecer um seguimento do processo de derretimento de glaciares que está acontecendo como produto dos processos de mudanças climáticas. O estudo concluiu, com base em fotografias aéreas e imagens de satélite Landsat e QuickBird entre os anos 1976 e 2006, que para o nevado Huaytapallana, que abastece o rio Mantaro, houve uma redução de 59,4% da superfície de gelo e com uma estimativa em base

numa regressão linear que o desaparecimento do nevado será, aproximadamente, no ano 2030.

Em geral, todos os estudos na bacia do rio Mantaro, apresentados até esta data, envolvem diversos modelos e cenários de mudanças climáticas. Como resumo, segundo Yamina (2013), a tendência atual da precipitação é de uma diminuição aproximada de 3 a 5% por década, mas com um baixo incremento na parte Sul da bacia, ou seja, os cenários climáticos desenvolvidos na bacia do rio Mantaro mostram em geral uma redução das precipitações. Além das incertezas existentes, estes estudos ainda têm algumas limitações na praticidade dos mesmos.

2.4 Índice Modificado de Fournier (IMF)

Segundo Laflen e Moldenhauer (2003), a erosividade ou capacidade da chuva de gerar a erosão do solo está expressa pelo fator EI_{30} , originalmente definido por Wischmeier e Smith em 1958, relacionando dados de perda de solo e água a partir de parcelas padrão nos Estados Unidos. Outros autores verificaram que o produto da Energia cinética e a Intensidade máxima num período consecutivo de 30 minutos (EI_{30}), expressa a capacidade da chuva de gerar erosão. Segundo Paulet (1973), os dados devem ser obtidos de pluviogramas de registro diário em que possam se identificar períodos contínuos de 30 minutos. No entanto, segundo Gabriels et al. (2003), em muitos países, os registros de chuva a partir de pluviogramas para calcular o índice de erosividade são escassos, tornando-se um parâmetro de difícil estimação. Em consequência, segundo Mello et al. (2013), sua aplicação em modelos empíricos de predição da erosão, tais como USLE e RUSLE, é desenvolvida tendo-se como base seu valor médio anual extraído de uma série histórica com pelo menos 15 anos, e sua

estimativa para locais desprovidos de dados de precipitação com resolução temporal necessária tem sido um desafio em países em desenvolvimento. Nestes modelos, o fator erosividade de chuva consiste de um parâmetro conhecido como fator R, obtido a partir da média de vários anos de dados de chuva. Com este objetivo, diversos autores têm tentado relacionar o fator R com parâmetros mais fáceis de obter, calculados a partir de registros pluviométricos, tais como precipitação média mensal e anual. Segundo Pascual et al. (2001), entre as metodologias mais conhecidas, destacam-se o Índice de Fournier, o Índice de Fournier Modificado e o Índice de Concentração da Precipitação.

O Índice Modificado de Fournier foi proposto por Arnoldus (1977). Baixas correlações entre o fator R e o Índice de Fournier (IF) foram obtidas devido ao fato de que além dos meses de maior precipitação, há meses de menores quantidades de precipitação que também ocasionam erosão. Segundo Gabriels et al. (2003), este índice foi utilizado no ano 1992 no Projeto CORINE da União Europeia, para determinar os riscos de erosão nos países do Mediterrâneo através de mapas. O principal indicador desenvolvido é conhecido como “Modified Fournier Index” (MFI), cuja estimativa média anual é dada por:

$$IMF_m = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\sum_{i=1}^{12} p_i} \quad (1)$$

Nesta equação, obtém-se o IMF médio (IMF_m) para o local de interesse com base na precipitação média mensal de cada mês (p_i), dispondo-se de pelo menos 15 anos consecutivos de dados (GABRIELS, 2001; MELLO et al., 2013). Contudo, segundo Lujan e Gabriels (2005), o IMF pode ser trabalhado para anos específicos, gerando uma série temporal deste, visando avaliar possíveis oscilações e tendências do potencial erosivo ao longo do tempo. Também é

possível calcular o IMF associado às estações do clima, especialmente para regiões com regime sazonal, calculando-se da seguinte maneira:

$$IMF_{m-ss} = \frac{\sum_{i=1}^6 p_i^2}{\sum_{i=1}^6 p_i} \quad (2)$$

Observa-se na Tabela 1 a classificação do Índice Modificado de Fournier desenvolvida pelo Projeto CORINE da União Europeia, no ano de 1992.

Tabela 1 Classificação do Índice Modificado de Fournier (IMF)

Classe	Intervalo do IMF (mm)	Descrição
1	< 60	Muito baixo
2	60 – 90	Baixo
3	90 – 120	Moderado
4	120 – 160	Alto
5	> 160	Muito Alto

Fonte: Commission of the European Communities - CEC (1992)

2.5 Índice de Concentração da Precipitação (ICP)

O Índice de Concentração da Precipitação (PCI pelas siglas em inglês) foi proposto por Oliver (1980), na tentativa de definir a variabilidade temporal da distribuição das chuvas durante o ano. Os limites teóricos vão desde 8,3 se as chuvas em cada um dos meses do ano são semelhantes, até 100, se todas as precipitações se concentrassem apenas num mês. Segundo Jordán e Bellinfante (2000), o cálculo do ICP é de grande interesse, tendo em conta a implicação da precipitação na erosão do solo, que tem um efeito dinâmico mais ativo enquanto

maior sua concentração no tempo. Este indicador é conhecido como “Precipitation Concentration Index” (PCI) e seu valor médio é calculado por:

$$ICP_m (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} P_i\right)^2} \times 100 \quad (3)$$

Além do ICP_m , de forma semelhante ao IMF, o ICP pode ser trabalhado para anos específicos, gerando uma série temporal deste. É ainda comum o uso e aplicação do ICP tendo-se como referência seu comportamento médio associado a épocas (ou estações) importantes e específicas do ano, denominado como ICP supra-sazonal (ICP_{m-ss}) (LUIS et al., 2011). Sua formulação é a seguinte:

$$ICP_{m-ss} (\%) = \frac{\sum_{i=1}^6 P_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 P_i\right)^2} \times 50 \quad (4)$$

Observa-se na Tabela 2 a classificação do Índice de Concentração da Precipitação desenvolvida por Michiels e Gabriels (1996).

Tabela 2 Classificação do Índice de Concentração da Precipitação (IMF)

Intervalo do ICP (%)	Descrição
8,3 - 10	Uniforme
11 - 15	Sazonal Moderada
16 - 20	Sazonal
21 - 50	Fortemente Sazonal
51 - 100	Isolada

Fonte: Michiels e Gabriels (1996)

2.6 Mapeamento com base na Geoestatística

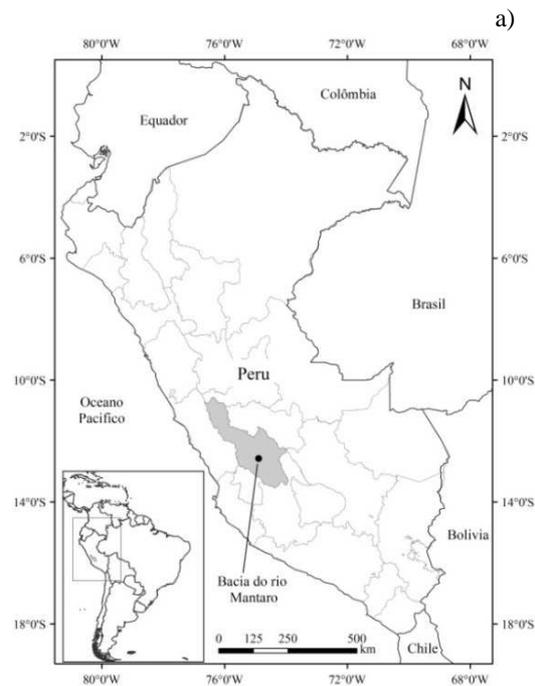
Segundo Melo (2012), a estatística espacial tem crescido em diferentes áreas do conhecimento nos últimos anos, desenvolvendo a partir daí, a geoestatística. A geoestatística desenvolve métodos que permitem modelar as estruturas de correlação espacial em funções chamadas variogramas ou covariogramas para logo, com a informação daquelas funções, realizar as interpolações nos métodos denominados “krigagem”.

Segundo Cressie (1993), a modelagem de variáveis medidas em diferentes locais de uma região com continuidade espacial e que apresenta alguma estrutura de correlação espacial tem sido desenvolvida desde os anos sessenta, com o desenvolvimento das análises geoestatísticas por Matheron (1962), aumentando sua aplicação em diferentes áreas da ciência e engenharia como a mineração, geologia, ecologia, ciências ambientais, saúde pública e climatologia.

Uma das maneiras de avaliar a capacidade preditiva do modelo teórico do semivariograma selecionado é mediante a técnica da validação cruzada, que consiste na predição de um ponto amostrado pela krigagem dos pontos restantes sem tomar em consideração o ponto predito. Se o modelo escolhido descreve bem a estrutura de correlação espacial, o erro entre o valor observado e o valor predito será pequeno. A escolha do melhor modelo de semivariograma pode se basear em estatísticas de precisão geradas pela validação cruzada. Assim, também é possível avaliar os modelos mediante o grau de dependência espacial (GDE) das características, baseada a partir do percentual de variação da contribuição em relação ao patamar (BIONDI; MYERS; AVERY, 1994).

3 CONTEXTUALIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MANTARO, PERU

A bacia do rio Mantaro (BRM) está localizada no centro do Peru, entre os paralelos $10^{\circ}34'30''\text{S}$ e $13^{\circ}35'30''\text{S}$ de latitude e os meridianos $73^{\circ}55'00''\text{W}$ e $76^{\circ}40'30''\text{W}$ de longitude, sendo que grande parte de sua área está inserida nos Andes Peruanos (Figura 1). Apresenta área total de 34.544 km^2 , sendo a bacia com maior densidade populacional da “Serra do Peru” (IGP, 2005a, 2005b). O rio Mantaro tem grande importância para o país uma vez que produz 35% de toda a energia elétrica, além de boa capacidade para produção agrícola.



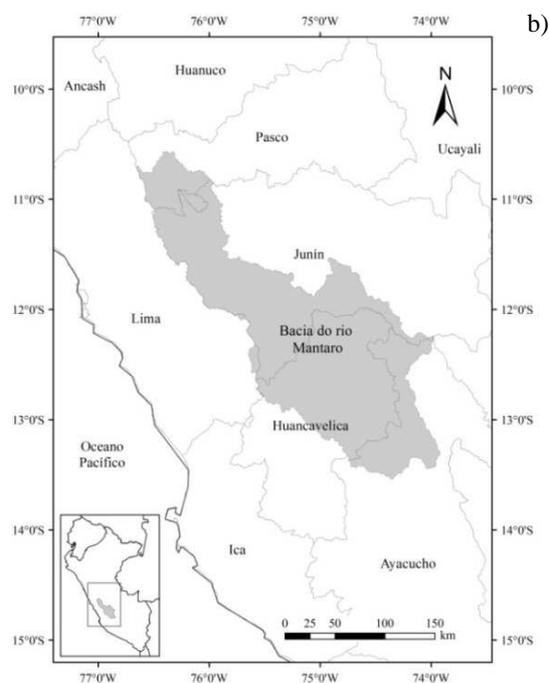


Figura 1 Localização da bacia do rio Mantaro na América do Sul (a) e Peru (b)

A BRM como sendo parte da bacia do rio Amazonas (Figura 2), cuja nascente principal se encontra no Lago Junín. A primeira seção do rio compreende desde o lago Junín até o Pongo de Pahuanca. A segunda seção vai de Pahuanca até a foz com o rio Apurímac, formando o rio Ene. Nesta seção tem-se o principal aproveitamento hidrelétrico da BRM, o Complexo Mantaro, constituído pelas usinas hidroelétricas “Santiago Antunez de Mayolo” e “Restitución”.

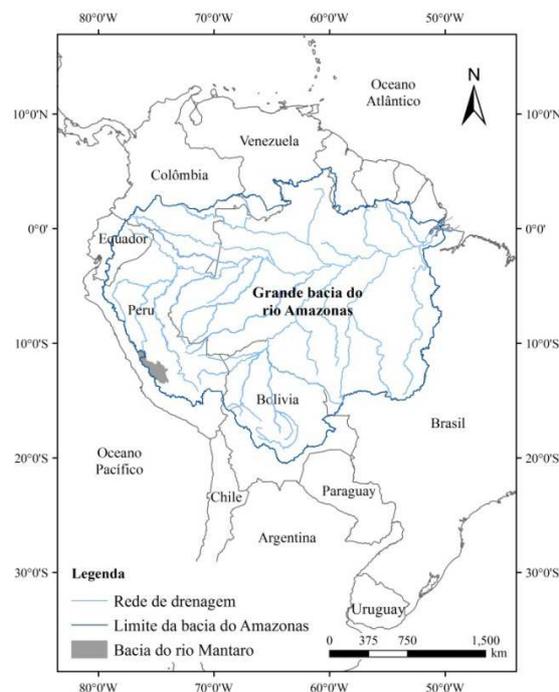


Figura 2 Localização da bacia do rio Mantaro em relação ao Amazonas

O vale do rio Mantaro, está localizado na parte central da bacia do rio Mantaro e representa o principal local de produção agrícola da bacia. A parte de menor altitude do vale do rio Mantaro é um local bastante fértil, onde convivem pequenos comerciantes junto com produtores medianos; os primeiros estão articulados com os grandes mercados na cidade de Huancayo e Lima (capital do Peru), enquanto os segundos lograram articular-se na agroindústria e na agroexportação. No entanto, nas partes altas existem famílias rurais que diversificam as fontes de renda entre a agricultura e pecuária, sendo ambas de subsistência.

Na Figura 3, observa-se a distribuição espacial das 24 sub-bacias do rio Mantaro (IGP, 2005a), cujas áreas variam entre 223,5 km² para a sub-bacia do

rio Shullcas, até 9.769,13 km² na sub-bacia do curso d'água principal, e que engloba diversas sub-bacias ao longo do seu trecho, chamada “Microcuencas”.

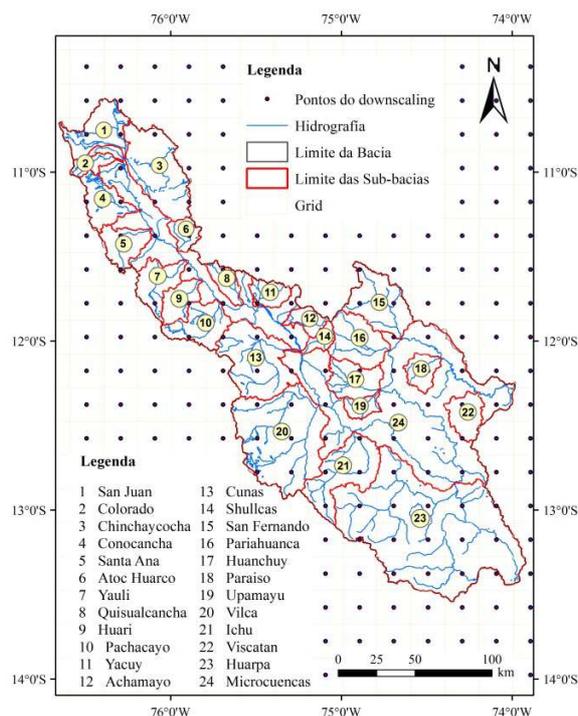


Figura 3 Sub-bacias do rio Mantaro, Peru

Fonte: IGP (2005b)

3.1 Fisiografia

Tradicionalmente o território do Peru tem sido dividido em três grandes regiões geográficas denominadas como Costa, Serra e Selva. A primeira região está localizada ao Oeste da Cordilheira dos Andes e está caracterizada pelas condições desérticas. A região Serra está localizada na Cordilheira dos Andes e que pode atingir uma altitude de 6.768 metros na montanha denominada “Huascarán”. Finalmente a região Selva está localizada ao Leste da Cordilheira

dos Andes e está distinguida pelas suas condições de alta umidade características da região amazônica. Segundo o IGP (2005b), a classificação da fisiografia da bacia do rio Mantaro, apresenta as seguintes descrições:

- a. Serra Alto-andina – Planalto: Planície de 0 a 4% de declividade, formada por acumulação de “morrena” (pilha de pedras, areia, lama e outros materiais erodidos, transportados e acumulados por uma geleira).
- b. Serra Alto-andina - Planalto ondulado a particionado: Planície de 4 a 15% de declividade com frequentes acidentes topográficos, formado pela acumulação fluvioglacial e “morrenas”. Assim, apresenta outra zona de 15 a 25% de declividade.
- c. Serra Alto-andina - Colina e Montanha: Existem elevações de 0 a 1.000 metros de altitude, e declividade predominante de 25 a 50%. Assim, apresenta outra zona com declividade maior a 50% e superfície, maiormente conformada de rocha.
- d. Serra Mesoandina – Planalto: Apresenta acumulação fluvial recente, com declividades entre 0 a 4%.
- e. Serra Mesoandina - Planalto ondulado a particionado: Apresenta uma superfície de erosão local no fundo do vale e declividade predominante de 4 a 15% com acumulação colúvio-aluvial. Assim, existem zonas com declividade entre 15 a 25% com acumulação coluvial.
- f. Serra Mesoandina – Montanha: Existem elevações de 300 a 1.000 metros de altitude e uma declividade predominante entre 25 a 50%. Assim apresenta outra zona com declividade maior a 50% e topografia íngreme.
- g. Serra Baixo-andina – Planalto: Apresenta acumulação fluvial e torrencial recente.
- h. Serra Baixo-andina – Montanha: Existem elevações de 300 a 1.000 metros de altitude.

- i. Selva – Borda da Selva – Montanha: Existem elevações de 300 a 1.000 metros de altitude e declividade maior a 50%, apresenta topografia íngreme e arborizada.
- j. Selva - Selva Alta – Montanha: Existem elevações de 300 a 1.000 metros de altitude e declividade entre 15 a 75%.
- k. Selva - Selva Baixa – Planície: Apresenta acumulação fluvial recente.

Assim, observa-se na Figura 4 a distribuição espacial da fisiografia na bacia do rio Mantaro.

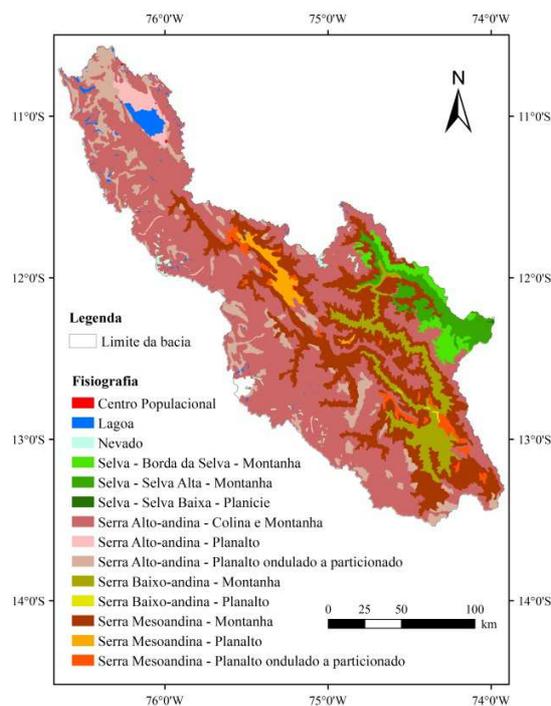


Figura 4 Fisiografia da bacia do rio Mantaro, Peru
Fonte: IGP (2005b)

Para o presente estudo, a bacia do rio Mantaro foi dividida segundo as regiões agroecológicas do Peru proposto pelo Dr. Javier Pulgar Vidal em 1940

(PULGAR, 1981). Observam-se na Figura 5 as divisões destas regiões ou andares ecológicos que são áreas geográficas nas quais existem fatores comuns como o relevo, o clima, a flora, a fauna ou a paisagem, e, sobretudo porque fatores do ciclo hidrológico como a precipitação têm uma relação estreita com a altitude.

Destas oito regiões agroecológicas, seis delas pertencem à área do presente estudo da bacia do rio Mantaro:

Selva alta: É uma região com clima considerado quente e muito úmido; está constituída pela cadeia oriental dos Andes. Possui uma temperatura média anual de 22 a 25 °C. Está localizada entre 400 até 1.000 metros de altitude.

Yunga fluvial: Região muito acidentada e com vales estreitos. Possui uma temperatura média anual entre 20 e 27 °C. Está localizada entre 1.000 e 2.300 metros de altitude.

Quechua: Englobado pelos vales interandinos, com clima considerado como temperado. Possui uma temperatura média anual entre 11 e 16 °C, com máximas entre 22 e 29 °C e atinge temperaturas mínimas entre 7 e 4 °C. Está localizada entre 2.300 e 3.500 metros de altitude.

Suni: Tem relevo rochoso e clima considerado temperado-frio, possui uma temperatura média anual de 7 a 10 °C, com máximas de 20 °C e mínimas de -1 a -16 °C. Está localizada entre 3.500 e 4.000 metros de altitude.

Puna: Tem um relevo ondulado com grande presença de lagoas aos sopés das montanhas; o clima é considerado frio e possui grande oscilação térmica entre o sol e a sombra, assim como entre o dia e a noite. A temperatura média anual varia de 0 a 7 °C, as máximas entre 15 a 22 °C e as mínimas de -9 a -25 °C. Está localizado entre 4.000 e 4.800 metros de altitude.

Janca: O relevo é constituído por colinas íngremes onde estão estabelecidas as geleiras de montanha, as quais são importantes reservas de água doce. O clima é considerado como muito frio-gelado, caracterizado pelas precipitações sólidas. Está localizada acima de 4.800 metros de altitude.

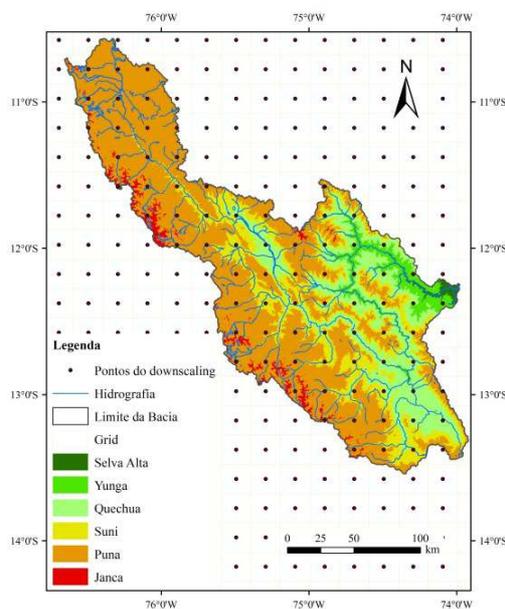


Figura 5 Regiões agroecológicas da BRM, Peru

3.2 Hidrografia

Em relação à hidrografia, a vazão do rio Mantaro depende das precipitações em toda a bacia, dos níveis do lago Junín, das lagoas localizadas na parte baixa das geleiras da Cordilheira Ocidental e também da geleira Huaytapallana. O rio Mantaro tem um comprimento de 724 km, e nasce na Cordilheira Ocidental dos Andes, nas geleiras que estão localizadas ao norte da

Mina Ragra, a Oeste do “departamento” (estado) de Pasco (Figura 1b) e que concentra as águas na lagoa de Atacocha. A água que escoar a partir desta lagoa tem o nome de rio “San Juan” e vai no sentido Oeste-Leste, até receber as águas que vêm da lagoa de Acacocha. Nesse ponto, altera sua direção para o sentido Norte-Sul para atravessar o planalto de Junín e recebe as águas efluentes do Lago Junín (4.100 m de altitude), ponto em que recebe o nome de rio Mantaro, até atingir (na foz) a confluência com o rio Apurimac, a 480 metros de altitude, formando o rio Ene (Figura 6b), ao Sul do “departamento” de Junín. Na Figura 6a, observa-se a distribuição hidrográfica da bacia do rio Mantaro.

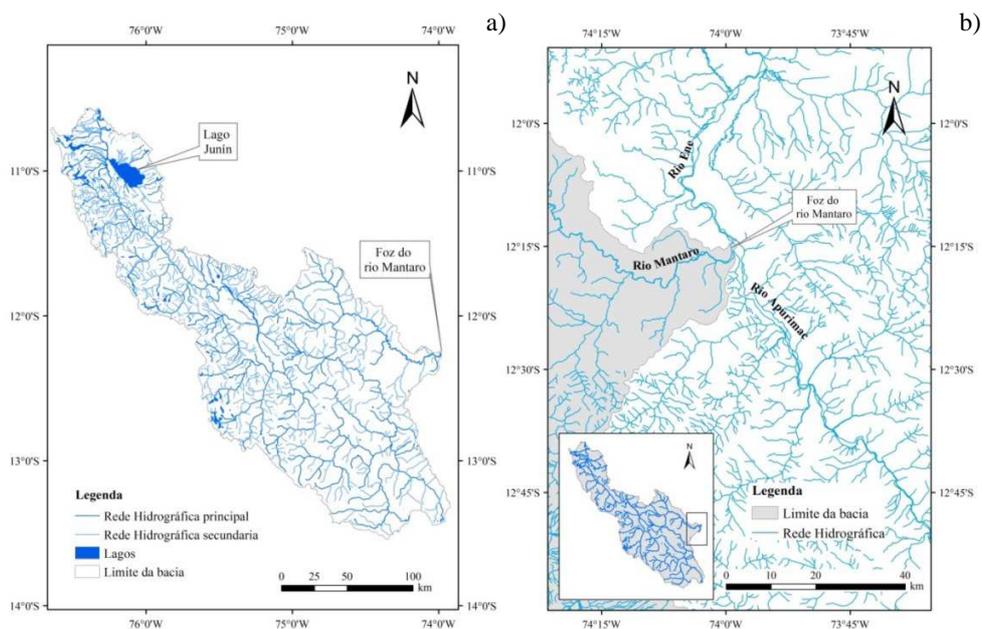


Figura 6 Hidrografia da bacia do rio Mantaro, Peru

O aproveitamento dos recursos hídricos compreende várias lagoas naturais cuja cota do corpo da barragem natural é acrescentada no nível, com a finalidade de fornecer um maior volume regulado. O uso pode se diferenciar como consultivo e não consultivo: o primeiro, segundo sua ordem de importância, é destinada ao uso agrícola, populacional, pecuário, industrial e na mineração, sendo a agricultura o principal setor econômico da bacia. O uso não consultivo supõe a geração de energia hidrelétrica, de grande importância em escala nacional no Peru. O Complexo Hidroelétrico do Mantaro possui duas usinas hidrelétricas, com uma capacidade instalada de 1.008 MW, sendo o principal centro de geração de energia elétrica do Peru e que fornece 34,3% da demanda do Sistema Elétrico Interconectado Nacional (SEIN), segundo estatísticas do Instituto Nacional de Estadística e Informática do Peru - INEI (2003).

Finalmente, a vazão média superficial disponível na foz da bacia do rio Mantaro, foi estimada a partir de três estudos, realizado nos anos 1975 (ElectroPerú), 1980 (ONERN - Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales) e 1992 (CEDEX - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España), a média destes estudos retorna uma vazão média de longo termo de $429,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ou em termos de rendimento específico $12,45 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

3.3 Clima

A informação meteorológica apresentada neste item, como a precipitação, foi obtida do IGP (2005b) sobre a base de dados históricos de 86 estações para as precipitações no período de 1960 a 2002. Estas estações pertencem, ao SENAMHI (29 estações climatológicas ordinárias), ELECTROPERU (21 estações pluviométricas), ELECTROANDES (cinco estações pluviométricas), INIA-SENAMHI (uma estação agrometeorológica

principal) e ao IGP (uma estação de climatologia principal). Além destas estações, o IGP usou 29 estações obtidas da base de dados do International Research Institute for Climate Change (IRI).

Na Figura 7, observa-se as precipitações totais mensais médias da bacia do rio Mantaro, compreendendo dois períodos bem definidos no ano. Em geral, as precipitações iniciam-se em toda a bacia, no mês de julho, e vão incrementando-se nos meses de agosto e setembro, sendo mais significativo este incremento em outubro até atingir valores máximos no mês de fevereiro. Os meses de maior precipitação são janeiro, fevereiro e março, enquanto em abril diminui abruptamente até atingir os valores mínimos no mês de junho. Na média, 83% da precipitação total anual acontecem entre os meses de outubro e abril, dos quais 48% estão distribuídos quase equitativamente entre janeiro e março. Este padrão é igual em quase todas as estações da bacia. Em termos de acúmulo de precipitação em cada estação, esta varia espacialmente, observando-se que existe um pequeno aumento naquelas estações localizadas na parte Norte e Oeste da bacia. Assim, existe uma relação direta da precipitação com a altitude, de forma que as estações localizadas nas partes mais altas da bacia, os acúmulos são maiores do que aquelas localizadas nos vales.

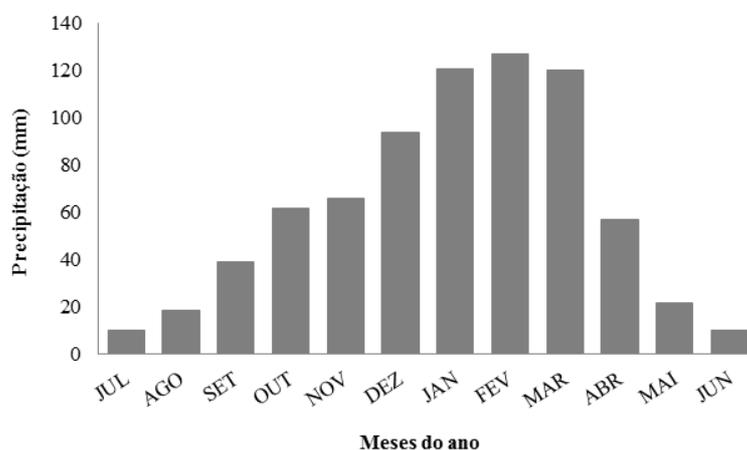


Figura 7 Distribuição média da precipitação mensal para a bacia do rio Mantaro (Período 1960 – 2002)

Fonte: IGP (2005b)

A distribuição espacial da precipitação pode ser observada na Figura 8, que apresenta no Oeste da bacia valores que superam os 1.000 mm/ano, assim como nos extremos Norte e Sul, que conformam as cabeceiras de algumas sub-bacias. Na parte centro ocidental, as precipitações anuais são ligeiramente menores que 700-800 mm, enquanto no extremo leste da bacia, na foz, a precipitação anual pode atingir 1.600 mm.

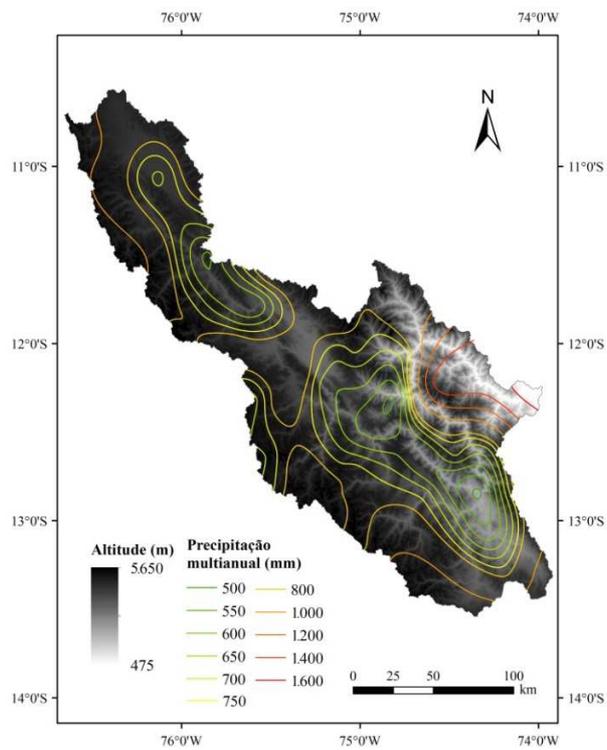


Figura 8 Média histórica (1960-2002) da precipitação anual superposta com do Modelo Digital de Elevação
Fonte: IGP (2005a)

REFERÊNCIAS

ACHUTARAO, K. et al. **An appraisal of coupled climate model simulations**. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2004. 197 p.

ALMOROX, A. J.; LÓPEZ, B. F.; RAFAELLI, S. La degradación de los suelos por erosión hídrica. In: _____. **Métodos de estimación**. Murcia: Universidad de Murcia, 2008. p. 11-12.

AMÉZQUITA, E. et al. CIAT's strategic research for sustainable land management on the steep hillsides of Latin America. In: DE VRIES, P.; AGUS, F. W. T. F.; KERR, J. (Ed.). **Soil erosion at multiple scales**. Wallingford: CAB International, 1998. p. 121-132.

ARNOLDUS, H. M. J. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. **FAO Soils Bulletin**, Rome, v. 34, p. 39-51, 1977.

BAETTIG, M. B.; WILD, M.; IMBODEN, D. M. A climate change index: where climate change may be most prominent in the 21st century. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, n. 1, p. 1-6, Sept. 2007.

BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, 1994.

BRADLEY, R. M. et al. Threats to water supplies in the tropical Andes. **Science**, New York, v. 312, p. 17-55, June 2006.

BROOKS, N.; ADGER, W. N. Country level risk measures of climate-related natural disasters and implications for adaptation to climate change. **Tyndall Working Paper**, Norwich, n. 26, p. 1-25, Jan. 2003.

BUJA, L.; CRAIG, T. **CCSM2 user's guide**. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2002. 95 p.

CHOU, S. C. Regional ETA model. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Cachoeira Paulista, v. 11, n. 1, p. 1-27, 1996.

CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, n. 3/4, p. 635-653, Feb. 2012.

COLINS, M. Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, London, v. 365, n. 1857, p. 1957-1970, June 2007.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community**. Luxembourg, 1992. 97 p.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 928 p.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies: partII, soil detachment hazard by raindrop splash. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 28, p. 197-201, 1947.

FELIPE-MORALES, C. et al. Losses of water and soil under different cultivation systems in two Peruvian locations: Santa Ana (Central Highlands) and San Ramon (Central High Jungle). In: LAL, R.; GREENLAND, D. (Ed.). **Soil physical properties and crop production in the tropics**. Chichester: Wiley, 1977. p. 489-499.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Guidelines for soil descriptions**. Rome, 1990. 69 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos**, Roma, 1980. 86 p.

GABRIELS, D. et al. Assessment of rain erosivity and precipitation concentration in Europe. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM 25 YEARS OF ASSESSMENT OF EROSION, 2003, Ghent. **Proceedings...** Ghent: Ghent University, 2003. p. 87-92.

GIORGI, F. et al. Elevation dependency of the surface climate change signal: a model study. **Journal of Climate**, Boston, v. 10, n. 2, p. 288-296, Feb. 1997.

GROSSO, N. Adaptar o ciclo urbano da água a cenários de alterações climáticas: perspectivas futuras. In: WORKSHOP OF THE PROJECT ADAPTA CLIMA - EMPRESA PORTUGUESA DAS ÁGUAS LIVRES, SYSTEMS, INSTRUMENTATION AND MODELING, CENTRE FOR CLIMATE CHANGE IMPACTS ADAPTATION & MODELING, 1., Lisboa, 2011. **Proceedings...** Lisboa: EPAL, 2011. 1 CD-ROM.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en la cuenca del río Mantaro**. Lima, 2005a. 107 p.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Cambio climático en la Cuenca del Río Mantaro: balance de 7 años de estudio**. Lima, 2010. 260 p.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro, bajo la visión del cambio climático**. Lima, 2005b. 90 p.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Eventos meteorológicos extremos (sequías, heladas y lluvias intensas) en el valle del Mantaro**. Lima, 2012a. 168 p.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Manejo de desastres ante eventos meteorológicos extremos en el Valle del Mantaro**. Lima, 2012b. 195 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA.
Compendio Estadístico. Lima, 2003. 924 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, 2007a. 976 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report: contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva, 2007b. 73 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2013: the physical science basis: IPCC Working Group I Contribution to AR5.** Geneva, 2013. 1535 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidance Notes for Lead Authors of the IPCC Fourth Assessment Report on Addressing Uncertainties.** Geneva, 2005. 4 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC special report: emissions scenarios: a special report of IPCC Working Group III.** Geneva, 2000. 21 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **The physical science basis: WGI Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, 2007c. 996 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: mitigation, contribution of working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, 2007d. 851 p.

JORDÁN, A.; BELLINFANTE, N. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de registros pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). **Edafología**, Recife, v. 7, n. 3, p. 83-92, 2000.

KNUTTI, R. Should we believe model predictions of future climate change? **Philosophical Transaction of the Royal Society A**, London, v. 366, n. 1885, p. 4647-4664, Dec. 2008.

KUHN, T. **The structure of scientific revolutions**. Chicago: University of Chicago, 1962. 264 p.

LAFLEN, J. M.; MOLDENHAUER, W. C. **Pioneering soil erosion prediction: the USLE story**. Bangkok: World Association of Soil and Water Conservation, 2003. 54 p.

LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: _____. **Soil erosion research methods**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994. Disponível em: <http://books.google.cl/books?id=1TK7dEOIM4gC&printsec=frontcover&dq=lal&ei=zOg6SPzIL5zkyASX8qGYCg&sig=v4wpxuYnznTOo5mPCGyUei_Jjo#PPR7,M1>. Acesso em: 4 abr. 2014.

LEÓN, P. J. D. **Métodos experimentales para el seguimiento y estudio de la erosión hídrica**. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2010. 23 p.

LLOSA, L. J. **El cambio climático, de lo global a lo Andino: un ecodidio anunciado**. Lima: Consultoría en Desarrollo Rural, 2009. 11 p.

LUIS, M. et al. Precipitation concentration changes in Spain 1946-2005. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Perugia, v. 11, n. 5, p. 1259-1265, May 2011.

LUJAN, D. L.; GABRIELS, D. Assessing the rain erosivity and rain distribution in different agro-climatological zones in Venezuela. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 16-29, maio 2005. Número especial.

MARENGO, J. A. **Caracterização do clima no século XX e cenários no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos modelos de clima do IPCC**: projeto mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade, relatório nº 1. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007a. 185 p.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a biodiversidade**: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 2007b. 212 p. (Series Biodiversidade, 26).

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, n. 9/10, p. 1829-1848, Aug. 2011.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Paris: Technip, 1962. 172 p.

MAURER, E. P. **Downscaling climate models**: access science. New York: McGraw-Hill, 2006. Disponível em:

<<http://www.accessscience.com/content/Downscaling%20climate%20modelsYB061910>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS A. **A climate modelling primer**. 3rd ed. New York: J. Wiley, 2005. 280 p.

MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202/203, p. 88-102, 2013.

MELO, M. C. **Análisis geoestadístico espacio tiempo basado en distancias y splines con aplicaciones**. 2012. 253 p. Tesis (Doctorado en Estadística) - Universidad de Barcelona, Barcelona, 2012.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, Rome, v. 44, n. 1/4, p. 195-202, 1984.

MICHIELS, P.; GABRIELS, D. Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean region. In: RUBIO, J. L.; CALVA, A. (Ed.). **Soil degradation and desertification in Mediterranean environments**. Logroño: Geofoma, 1996. p. 49-70.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. New York: Longman, 1986. 298 p.

MORGAN, R. P. C. **Topics in applied geography: soil erosion**. London: Longman, 1979. 113 p.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, n. 7282, p. 747-756, Feb. 2010.

NEARING, M. A.; PRUSKI, F. F.; O'NEAL, M. R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 59, n. 1, p. 43-50, 2004.

OLIVER, J. E. Monthly precipitation distribution: a comparative index. **The Professional Geographer**, Indiana, v. 32, n. 3, p. 300-309, Aug. 1980.

ORTEGA, E. **Contribuciones a la adaptación del sector agua frente al cambio climático: programa de medidas de adaptación al cambio climático**. México: OMM/PREMIA, 2013. 203 p. (Informe, 221).

OYARZÚN, C. **Estimación de los procesos de erosión en un ambiente montañoso en la cuenca del río Bío-Bío, IX región, Chile**. 1993. 150 p. Tesis (Doctorado en Ciencias Ambientales) - Escuela Graduados de la Universidad de Concepción, Concepción, 1993.

PASCUAL, A. J. A. et al. Valoración de la idoneidad de los índices PCI y MFI para estimar la concentración y agresividad de las precipitaciones en la comunidad valenciana. **Cuaternario y Geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario**, Ávila, v. 15, n. 3/4, p. 77-84, 2001.

PAULET, I. M. **Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvia del Perú**: programa de conservación de suelos. Lima: Universidad Agraria La Molina, Lima, 1973. 54 p. (Publicación, 3).

PERU. Ministerio de Agricultura. **Anuario estadístico**. Lima, 2005. Disponível em:
<<http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/publicaciones/anuario2005/anuario.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2014.

PERU. Ministerio de Ambiente. **El Perú y el cambio climático**: segunda comunicación nacional del Perú a la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático 2010. Lima, 2010. 204 p.

PRUSKI, F. F. Aplicação de modelos físicos-matemáticos para a conservação de água e solo. In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. (Ed.). **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília: MMA-SRH-ABEAS, 1997. p. 129-171.

PULGAR, V. J. **Geografía del Perú**: las ocho regiones naturales del Perú. 8. ed. Lima: Universo, 1981. 313 p.

RAMÍREZ, E. et al. Small glaciers disappearing in the Tropical Andes: a case study in Bolivia: the Chacaltaya Glacier (16° S). **Journal of Glaciology**, Cambridge, v. 47, n. 157, p. 187-194, 2001.

STOTT, P. A. et al. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. **Science**, New York, v. 290, n. 5499, p. 2133-2137, Dec. 2000.

STROOSNIJDER, L. **Andean erosion control: a science perspective**. Lima: International Potato Center, 1997. 60 p.

SUAREZ, D. **Control de erosión en zonas tropicales**. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamiento, 2001. 555 p.

VERGARA, W. **Adapting to climate change: lessons learned, work in progress and proposed next steps for the World Bank in Latin America**. Washington: World Bank Latin America Region, 2005. 56 p. (Sustainable Development Series, 25).

VUILLE, M. et al. Climate change and tropical andean glaciers: past, present and future. **Earth-Science Reviews**, New York, v. 89, n. 3/4, p. 79-96, Aug. 2008.

WORLD BANK. **World development indicators**. Washington, 2006.
Disponível em: <<http://devdata.worldbank.org/wdi2006/contents/index2.htm>>.
Acesso em: 5 maio 2014.

YAMINA, S. **Diagnóstico del clima, variabilidad y cambio climático en la sub cuenca del río Mantaro**. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 2013.
Disponível em: <http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_forstwissenschaften/institute/inter/tropen/forschung/INCA/workshops/pres2013/Silva-IGP.pdf>. Acesso em: 20 maio 2014.

YAMINA, S. et al. Variability and climate change in the Central Peruvian Andes. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO, 1., 2005, Bogotá. **Proceedings...** Bogotá: IDEAM, 2005. p. 1-12.

ZAPATA, C. E. et al. **Impacto del cambio climático en cultivos andinos**. Lima: CONDESAN, SGCAN, 2011. 69 p.

ZARATE, Z. R.; ANAYA, G. M. Evaluación y cartografía del riesgo a la degradación del suelo por erosión hídrica en el estado de Tlaxcala. **Terra. SMCS**, Barcelona, v. 10, n. 1, p. 3-14, 1992.

CAPÍTULO 2

Tendências climáticas na bacia hidrográfica do rio Mantaro, Andes Peruanos, para o cenário de mudanças climáticas A1B

RESUMO

As projeções do comportamento climático ao longo do século XXI são fundamentais para subsidiar cientificamente planos de desenvolvimento sustentável nos países andinos, em especial o Peru, que tem parte importante de seu desenvolvimento centrado no potencial agrícola e hidrelétrico. Diversos estudos têm sinalizado a alta vulnerabilidade da região dos Andes, em que está localizada a maior parte da Bacia do rio Mantaro (BRM), uma das mais importantes do Peru, frente às mudanças climáticas futuras. Neste contexto, objetivou-se neste estudo estimar a variabilidade temporal e espacial da precipitação e evaporação mensais, do potencial erosivo e da concentração da chuva, considerados, respectivamente, pelos indicadores “Modified Fournier Index” (MFI) e “Precipitation Concentration Index” (PCI), para o clima presente e para três períodos (“time slices”) futuros até o final do século XXI, para a bacia do rio Mantaro, Peru. O cenário de mudanças climáticas A1B foi simulado pelo modelo de circulação global (GCM) HadCM3, com “downscaling” pelo modelo regional Eta-CPTEC, para os “time slices” 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098 e para o período observado entre 1961-1990 (clima presente). Verificou-se uma diminuição da precipitação total mensal para a bacia do rio Mantaro em relação ao clima presente, com maior destaque para o período chuvoso (fevereiro a abril), atingindo valores de até 45% no final do século XXI para o mês de março em relação ao clima presente. Em algumas regiões da BRM foi verificada redução da precipitação mensal superior a 50% no mês de março para o “time slice” 2071-2098. Além disto, observou-se um aumento progressivo na evaporação mensal em relação ao clima presente, variando de 12 a 20% nos meses de outubro e junho, respectivamente. O indicador do potencial erosivo IMF mostrou tendência estatística significativa de redução para todas as regiões da BRM, demonstrando, de forma geral, uma possível redução no potencial erosivo das chuvas. No entanto, foi observada significativa variabilidade temporal deste índice, atingindo valores máximos no início da década dos anos

2020, 2050, 2080 e 2090. O indicador de concentração de chuvas (ICP) amostrou tendência estatística significativa de acréscimo, com valores que indicam chuvas cada vez mais irregulares até o final do século XXI. Os resultados deste estudo permitem concluir que, no cenário simulado de possíveis mudanças climáticas, existirá um gradativo aumento do déficit hídrico e da concentração de chuvas, podendo comprometer a agricultura, a geração de energia e o abastecimento na BRM, Peru.

Palavras-chave: Precipitação. Evaporação. Potencial erosivo da chuva. Concentração da precipitação. Mudanças climáticas. Cordilheira dos Andes.

ABSTRACT

Projections of climate behavior over the twenty-first century are fundamental to support sustainable development plans in the Andean countries, especially Peru, which has its development centered on agricultural and livestock activities. This study aimed to estimate the temporal and spatial variability of monthly rainfall and potential evaporation, rain erosive and concentration, which were studied based on, respectively, the "Modified Fournier Index" (MFI) and "Precipitation Concentration Index" (PCI) indicators for the present climate and simulated throughout XXI century, for Mantaro River Basin (MRB), Peru. The A1B climate change scenario was simulated by the HadCM3 global circulation model (GCM) with downscaling by the regional Eta-CPTEC model, for 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2098 time slices and for the observed period 1961-1990. There was a decrease in monthly rainfall for MRB in relation to present climate, most notably for the rainy season (February to April). In some basin's regions, a reduction of monthly rainfall exceeding 50% in March for the "time slice" 2071-2098 was noticed. In addition, there was a progressive increase in the monthly evaporation for the present climate, ranging from 12 to 20% in October and June, respectively. MFI indicator showed a statistically significant downward trend for all regions of the MRB, demonstrating, in general, a possible reduction in the rainfall erosive potential. However, there was significant temporal variability of this index. The precipitation concentration index (PCI) showed a statistically significant trend towards increase, with values that indicate increasingly more irregular rainfall until the end of the twenty-first century. The results of this study allow us to conclude that in the possible climate change simulated by A1B scenario, there will be a gradual increase in water deficit and rainfall concentration, which can negatively affect agriculture, power generation and water supply in MRB, Peru.

Keywords: Precipitation. Evaporation. Rainfall erosive potential. Precipitation concentration. Climate change. Andes mountains.

1 INTRODUÇÃO

O presente século tem experimentado alterações no clima por vezes mais intensas do que se projetava, tanto pelos efeitos da variabilidade natural do clima quanto pelas possíveis mudanças climáticas associadas com o aumento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. Essas mudanças representam ameaças significativas para as sociedades que dependem do uso dos recursos naturais, especificamente para a agricultura, sobretudo quando estas alterações se apresentam como eventos extremos (THOMAS et al., 2007).

A alteração acelerada do clima tem sido registrada nas últimas décadas. Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2013), cada um dos três últimos decênios do século XXI, tem sido sucessivamente mais quente em relação à temperatura média global da superfície. No que se refere à temperatura média anual no hemisfério norte, é muito provável que o período de 1983-2012 tenha sido o período mais quente já registrado nos últimos 800 anos (com alto nível de confiança), isto baseado nas comparações de temperaturas instrumentais com várias reconstruções feitas a partir de dados indiretos e métodos estatísticos (MARCOTT et al., 2013). Segundo o IPCC (2007), o aumento da temperatura tem sido comum em todo o planeta, contudo, maior em latitudes mais altas do Hemisfério Norte, sendo que, as temperaturas médias do Ártico aumentaram quase duas vezes a taxa média global nos últimos 100 anos. Esta tendência de aquecimento linear ao longo dos anos, de 1956 a 2005 (0,13 [0,10-0,16] °C por década) é quase o dobro apresentado nos últimos 100 anos (1906-2005). Isso indica que o aquecimento global é uma realidade incontestável.

Segundo Vergara (2005), na América do Sul, os impactos das mudanças climáticas serão muito significativos e podem afetar de forma irreversível os principais ecossistemas desta região. Para Vuille et al. (2008), o recuo das

geleiras é um dos indicadores mais visíveis e irrefutáveis dos impactos das mudanças climáticas.

Na região dos Andes, as mudanças climáticas estão provocando maior aquecimento nas regiões mais altas do que nas mais baixas, devido à perda de cobertura de neve, o que leva a uma redução do albedo e aumento da absorção da radiação solar sobre a superfície (GIORGI et al., 1997). Assim, segundo Bradley et al. (2006) e Ramirez et al. (2001), vários estudos de modelagem e projeções indicam que muitas das geleiras de altitudes mais baixas na Cordilheira dos Andes poderiam desaparecer completamente durante os próximos 10 ou 20 anos. Esta situação coloca o Peru numa condição de alta vulnerabilidade, uma vez que a maioria das geleiras de montanhas tropicais do mundo está localizada neste país (70%).

Com referência às mudanças climáticas, o Peru é particularmente vulnerável devido ao seu grau de diversidade ecológica (com 84 das 104 zonas de vida, 28 dos 32 climas existentes, 11% da fauna e 8% da flora, 70% das geleiras de montanha tropical do mundo) e pela escassez de recursos econômicos e tecnológicos (PERU, 2010b). Esta situação é muito sensível nos Andes peruanos, como consta no IV Censo Nacional Agropecuário (PERU, 2012), no qual 51% das áreas agrícolas são irrigadas exclusivamente pelas chuvas. A agricultura é um setor estratégico para o Peru uma vez que envolve 31% da PEA (População Economicamente Ativa) nacional e 65% da PEA rural (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA - INEI, 2011).

Diferentes estudos advertem que a produtividade agrícola diminuirá entre 10 e 20% no presente século devido aos impactos das mudanças climáticas (REMIGIO, 2009). No Peru, 81% da produção dos oito principais cultivos alimentares apresentam vulnerabilidade muito crítica frente às secas (SEMINARIO PERMANENTE DE INVESTIGACION AGRARIA - SEPIA,

2010). Existe uma grande dependência na disponibilidade hídrica com fins agrícolas em bacias cujo escoamento é alimentado, em grande parte, por geleiras de montanha. Segundo Peru (2010b), nos últimos 35 anos, as áreas dos glaciares de montanha do Peru diminuíram 22%, equivalente ao consumo de água na cidade de Lima em 10 anos.

A bacia do rio Mantaro (BRM), localizada na Cordilheira dos Andes peruanos, não foge desta realidade, na qual a agricultura constitui a principal atividade econômica, pois envolve 54,6% da PEA e 71% das áreas agrícolas recebem água exclusivamente das chuvas (INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ - IGP, 2005a), portanto, altamente dependente das condições climáticas. A agricultura está relacionada diretamente com a segurança alimentar, tanto em quantidade quanto em qualidade, e as mudanças climáticas têm efeitos diretos e indiretos na produção de alimentos devido às variações de temperatura, irregularidade das precipitações e presença de fenômenos climáticos extremos. Além disto, o Peru depende em grande medida dos recursos hídricos para a geração de energia elétrica, uma vez que, segundo Peru (2010b), aproximadamente o 59% da energia elétrica do país provém das usinas hidrelétricas.

Assim, dentro deste contexto, objetivou-se sistematizar o entendimento do comportamento das possíveis mudanças climáticas na alteração do regime climático na BRM, Andes Peruanos, assim como os possíveis impactos que estas ocasionariam em diferentes regiões da bacia. Para isto, foram analisados os comportamentos da precipitação e evaporação mensais e dos indicadores IMF e ICP, respectivamente, associados ao comportamento erosivo e concentração da chuva, ao longo do século XXI, simulados para o cenário de mudanças climáticas A1B pelo modelo global de circulação (GCM) HadCM3 com *downscaling* pelo modelo Eta-CPTEC.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Mapa base e classificação das regiões agroecológicas da BRM

Na Figura 1a, apresenta-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir de informações geoespaciais obtidas junto à NASA pelo projeto Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), com uma resolução espacial de 90 metros e que tem a característica de baixo erro vertical. Porém, não foram usadas imagens do mapa ASTER GDEM que mesmo ainda possuindo uma melhor resolução espacial de 30 m, apresentam interferência pelas nuvens na parte Leste da bacia do rio Mantaro. Observa-se uma grande variação de altitude entre a cabeceira e a foz, com uma diferença aproximada de 5.175 metros. O limite geográfico da BRM, assim como os limites políticos dos distritos que este abrange, foram disponibilizados pelo Ministério do Meio Ambiente do Peru (MINAM), numa escala de 1:100.000. A partir do MDE, foram reclassificadas as áreas da bacia conforme intervalos de altitudes baseadas nas regiões agroecológicas do Peru (PULGAR, 1981). Na Figura 1b, observam-se as regiões agroecológicas Selva Alta, Yunga Fluvial, Quechua, Suni, Puna e Janca, as quais representam, em porcentagem da área total da BRM, respectivamente 0,75%, 4,8%, 17,9%, 19,0%, 54,6% e 2,85%.

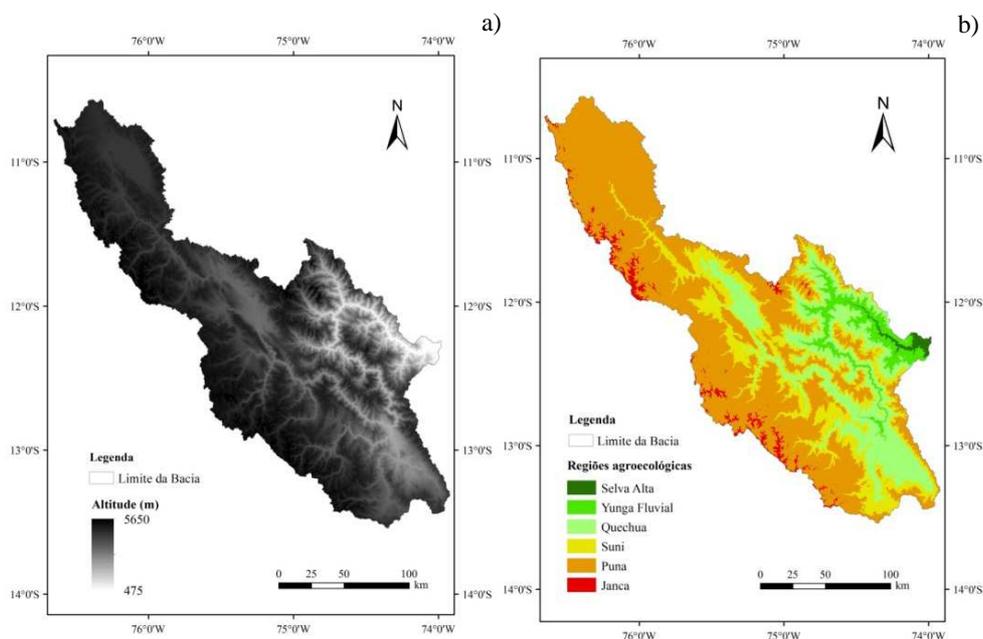


Figura 1 Modelo Digital de Elevação (a) e regiões agroecológicas (b) da BRM, Peru

2.2 Cenário futuro de mudanças climáticas SRES A1B

Os cenários A1 se diferenciam pela sua orientação tecnológica: utilização intensiva de combustíveis fósseis (A1F1), utilização de fontes de energia de origem distintas das fósseis (A1T), ou a utilização equilibrada de todos os tipos de fontes (A1B). Segundo IPCC (2000), o cenário SRES A1B adota um crescimento econômico rápido, pequeno desenvolvimento demográfico, com a população mundial atingindo valores máximos em meados do presente século, assim como o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes.

No estudo, foram aplicadas informações do clima presente (1960 a 1990) e do cenário climático futuro SRES A1B projetados pelo modelo climático regional Eta-CPTEC acoplado ao Modelo de Circulação Global HadCM3 para três “time slices”: 2011 a 2040, 2041 a 2070 e de 2071 a 2098. As simulações climáticas foram desenvolvidas com uma resolução espacial e temporal, respectivamente, de 20 km e 3 horas. Na Figura 2, estão apresentados os pontos para os quais as simulações climáticas foram geradas. O estudo foi desenvolvido com base nas séries históricas de precipitação e evaporação mensais para cada ponto da figura.

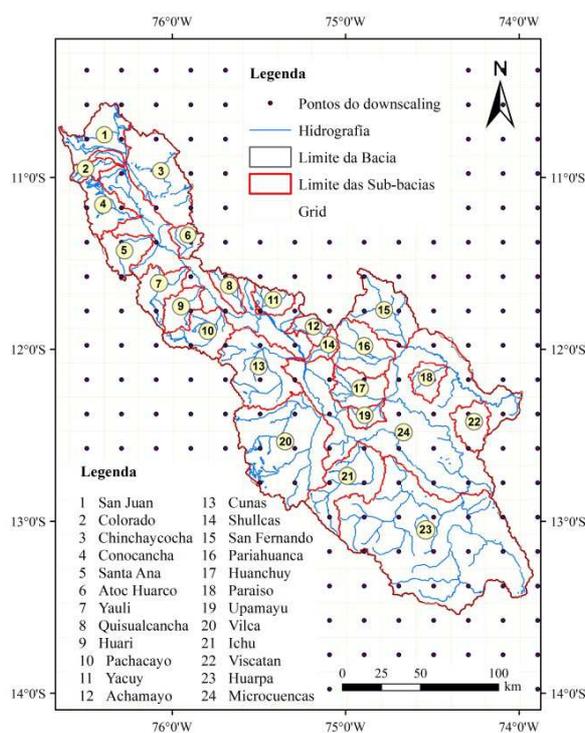


Figura 2 Caixas de grade e respectivos pontos centrais do modelo Eta-CPTEC/HadCM3 sobre a BRM, Peru

2.3 Índice Modificado de Fournier (IMF) e Índice de Concentração de Precipitação (ICP)

Para a estimação do potencial erosivo da chuva, foi desenvolvido o Índice Modificado de Fournier em base na informação de Precipitação mensal e anual para os *time slices* simulados no clima presente (1961 – 1990) e futuro (2011 – 2040, 2041 – 2070 e 2071 – 2098) para o cenário de mudanças climáticas A1B do modelo Regional Eta-CPTEC/HadCM3. E cuja estimativa média anual é dada por:

$$IMF_m = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\sum_{i=1}^{12} p_i} \quad (1)$$

Em que p_i representa a precipitação média mensal, para cada *time slice*.

Também foi calculado o IMF associado às estações do clima, especialmente para regiões com regime sazonal, calculando-se da seguinte maneira:

$$IMF_{m-ss} = \frac{\sum_{i=1}^6 p_i^2}{\sum_{i=1}^6 p_i} \quad (2)$$

O cálculo do ICP também é de grande interesse, tendo em consideração a implicação da precipitação na erosão do solo, que tem um efeito dinâmico mais ativo enquanto maior sua concentração no tempo, além que a área de estudo apresenta um regime sazonal e segundo os estudos, as possíveis mudanças climáticas podem modificar a frequência temporal das chuvas. Seu valor médio é calculado por:

$$ICP_m(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} p_i\right)^2} \times 100 \quad (3)$$

Em que p_i representa a precipitação média mensal, para cada *time slice*.

Assim, devido ao que a BRM apresenta, segundo o histograma médio no período de 1960-2002, períodos seco (abril a setembro) e úmido (outubro a março), foi avaliado o ICP supra-sazonal (ICP_{m-ss}). Sua formulação é a seguinte:

$$ICP_{m-ss}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^6 p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 p_i\right)^2} \times 50 \quad (4)$$

Desta forma, para cada ponto da grade de simulação apresentado na Figura 2, foi gerada uma série histórica dos indicadores IMF e ICP, possibilitando identificar seu valor médio para cada “time slice”. A partir deste cálculo, mapas destes indicadores, para cada um dos “time slices”, foram desenvolvidos com base na geoestatística, pelo interpolador da krigagem ordinária, e que contemplam uma série de passos, que iniciam na análise estrutural, em que é realizada a análise do variograma experimental, obtendo-se um ajuste deste com base em um modelo teórico dos quais foram avaliados os modelos esférico, exponencial e gaussiano por serem os que mais se ajustaram aos modelos experimentais. A escolha do melhor modelo foi baseada nos critérios do menor erro padrão da validação cruzada e no grau de dependência espacial do modelo.

O desenvolvimento da análise geoestatística e a geração dos mapas de interpolação de dados foram mediante o auxílio dos SIGs. Assim, os valores

médios para a BRM e as regiões agroecológicas, foram calculados com base na ponderação dos valores dos *pixels* de saída dos mapas em formato *raster*.

2.4 Análise de tendência dos índices IMF e ICP

Segundo a United States Geological Survey - USGS (2004, 2006), o teste de Mann-Kendall (MK), proposto por Kendall e Stuart (1967) e Mann (1945), é um teste não paramétrico estatisticamente baseado no número de ordem de duas variáveis, e pode ser usado para análise da tendência em séries temporais de dados hidrológicos e climáticos. A aplicação do teste de Mann-Kendall, para uma série de dados (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) independentes e identicamente distribuídos, supõe a aceitação prévia da hipótese nula H_0 , que indica a não existência de tendência. A estatística “T” do teste é obtida comparando todos os pares de elementos da série e somando 1, 0 ou -1, segundo a ordem crescente ou decrescente.

$$T = \sum_{j < i} \text{sinal}[Z_i - Z_j] \quad (5)$$

$$\text{para: } \text{sinal}(Z_i - Z_j) = \begin{cases} 1; \text{ para } Z_i - Z_j > 0 \\ 0; \text{ para } Z_i - Z_j = 0 \\ -1; \text{ para } Z_i - Z_j < 0 \end{cases}$$

Foi empregado um nível de significância recomendado por autores como Marengo et al. (2007) e Mello et al. (2015) de $p = 0,05$ para a condução desse teste, o que retorna a um valor de z igual a 1,96. Adotando esse mesmo nível de significância, H_0 não será rejeitada sempre que z for, em valor absoluto, menor que 1,96. Tendências de elevação ou queda resultam em valores positivos ou

negativos do MK, respectivamente. Assim, o desenvolvimento do teste estatístico de Mann-Kendall foi auxiliado mediante o *software* “XLStat”.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento da precipitação e evaporação mensais simuladas para as mudanças climáticas A1B

Observa-se nas Figuras 3 e 4 os resultados da validação dos modelos geoestatísticos mediante o critério dos erros padrões da média na validação cruzada, após a interpolação dos pontos do *downscaling* usando o método da krigagem ordinária. No caso da precipitação mensal usou-se a co-krigagem ordinária com a altitude como segunda variável espacial devido ao alto grau de influência desta na precipitação (IGP, 2005b). Tanto para a precipitação quanto a evaporação, o modelo que melhor se ajustou foi o esférico com um grau de dependência espacial de 100%. Este modelo foi, portanto, escolhido devido ao maior Grau de Dependência Espacial (GDE) e ao menor erro padrão da média.

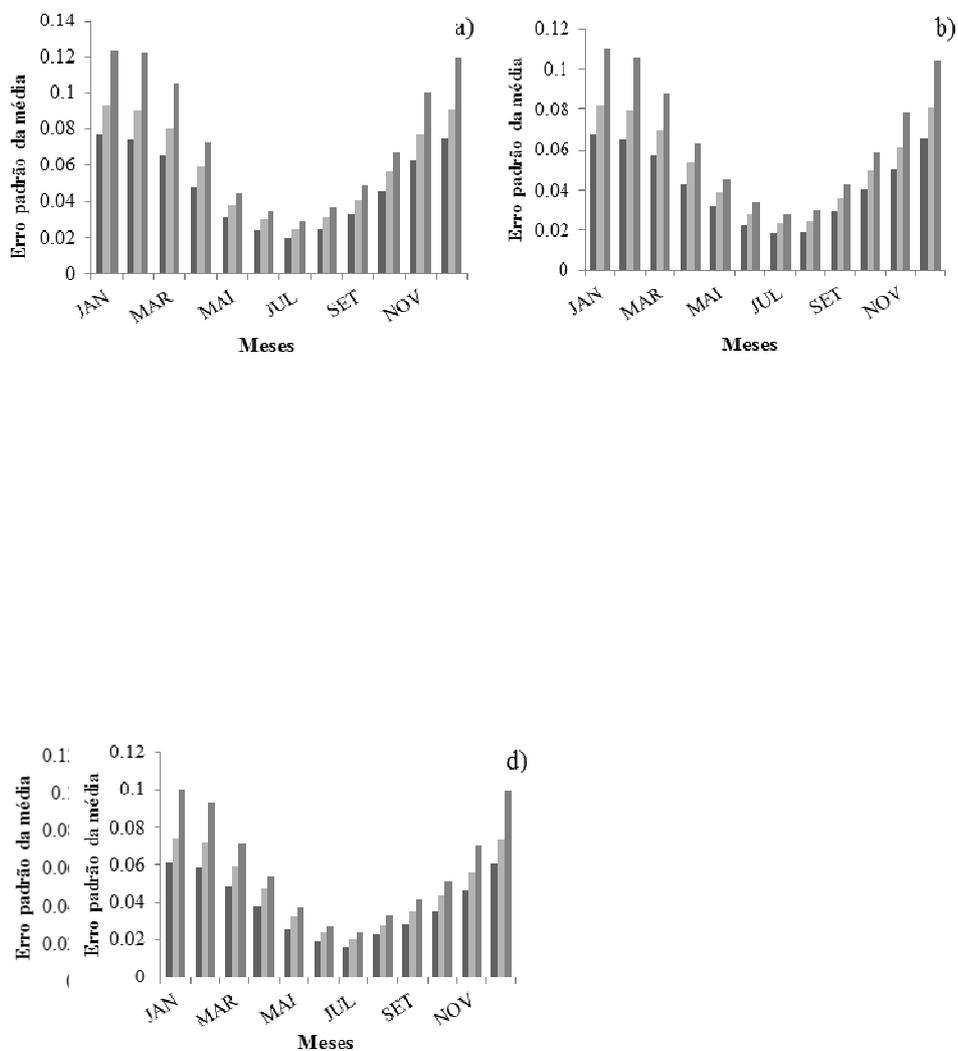


Figura 3 Valores do erro padrão da média na validação cruzada gerada pelos modelos geoestatísticos ajustados para dados de Precipitação mensal (a. 1961-1990; b. 2011-2040; c. 2041-2070 e d. 2071-2098)

No caso da evaporação mensal, o modelo usado em todos os casos também foi o Esférico, mesmo não apresentando o menor erro padrão da média

na validação cruzada para todas as situações, mas com o maior Grau de Dependência Espacial (GDE), o qual foi de 100%.

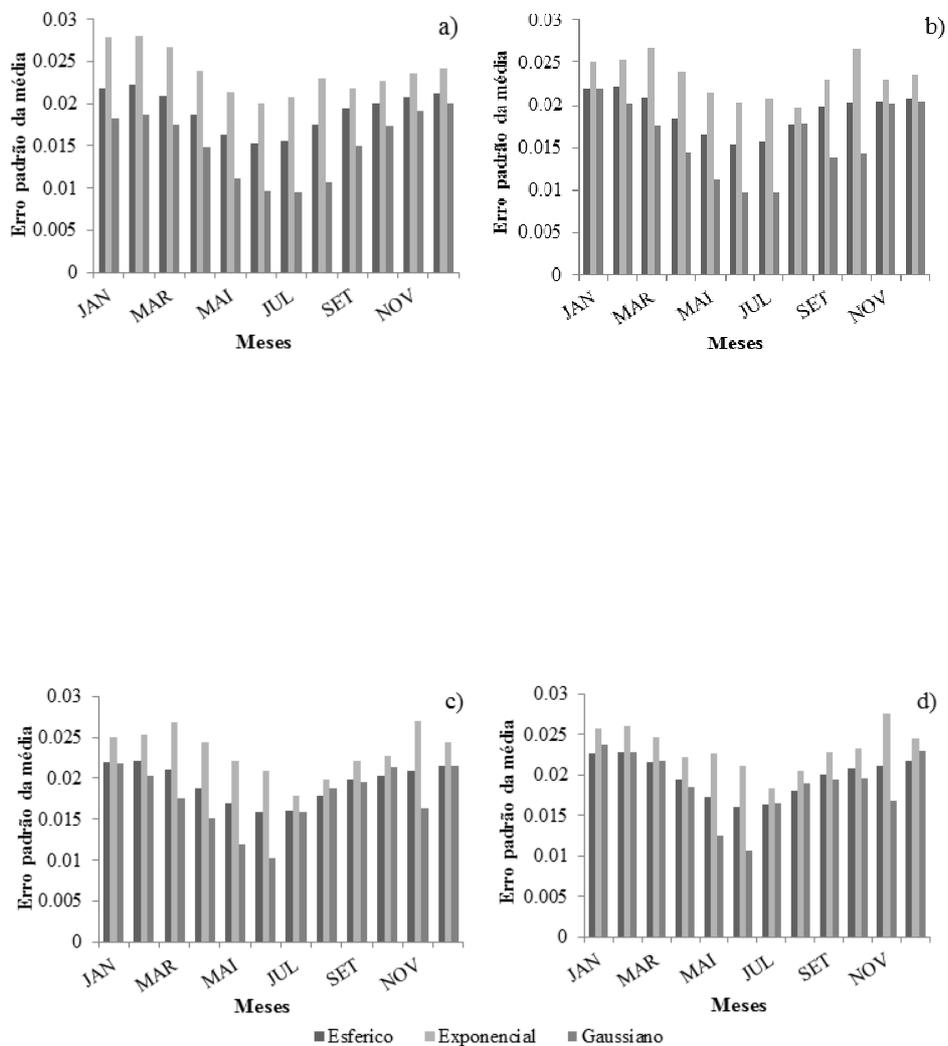
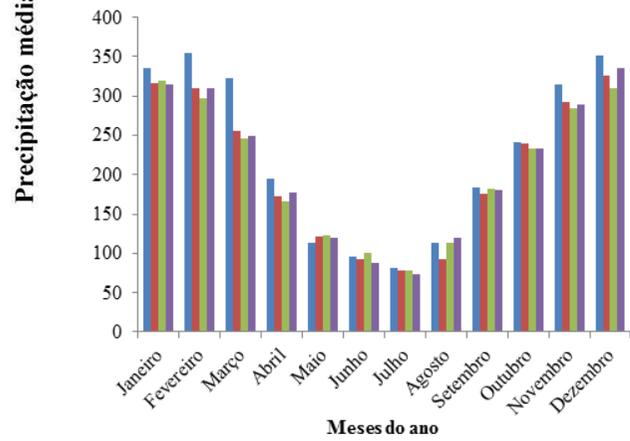
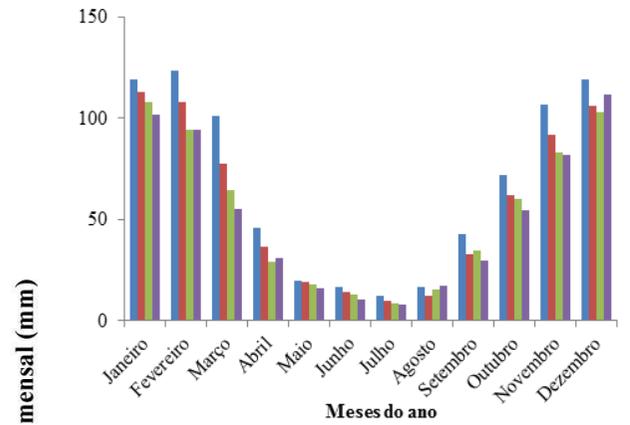


Figura 4 Valores do erro padrão da média na validação cruzada gerada pelos modelos geoestatísticos ajustados para dados de Evaporação mensal (a. 1961-1990; b. 2011-2040; c. 2041-2070 e d. 2071-2098)

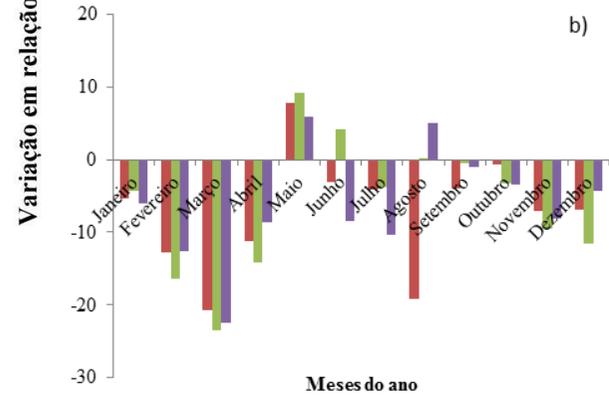
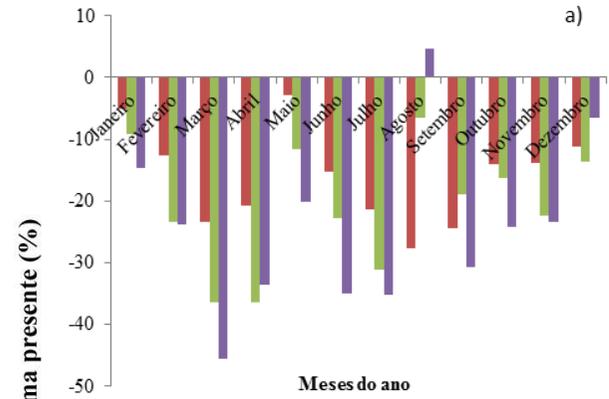
Observa-se na Figura 5, os gráficos em colunas do comportamento médio das precipitações e variações (desvios percentuais) em relação ao clima presente para a BRM como um todo e para cada uma das seis regiões agroecológicas (Figura 1b), para o clima presente (1961-1990) e para os três “time slices” futuros. Para toda a bacia bem como para suas divisões agroecológicas, observou-se um comportamento padrão semelhante, de redução das precipitações mensais, com exceção da região “Selva Alta”. Esta região agroecológica está localizada na parte mais úmida da Cordilheira oriental dentro da BRM, encontrando-se sob influência das condições mais quentes e úmidas da região amazônica. Destaca-se na Figura 5b que no período seco, na região “Selva Alta”, há precipitações mensais de aproximadamente 80 mm, valor este acima da média mensal de toda a BRM (66 mm), na condição do clima presente. Esta diferença no padrão das variações da precipitação para a região “Selva Alta” em relação à bacia do rio Mantaro é ainda mais relevante para o mês de maio, onde se verificou um incremento da precipitação em todos os “time slices”, com valores de até 9% para o “time slice” de 2041-2070 em relação ao clima presente, o que não é observado nas outras regiões agroecológicas.

Para toda a BRM, observa-se que até o final do século XXI e em relação ao clima presente, os períodos que tiveram maior redução da precipitação mensal foram os meses de março e abril (período chuvoso), com valores de 45% e 33%, respectivamente, e nos meses de junho e julho (período seco), com reduções de 35% nos dois citados meses. O mês de agosto apresenta um padrão similar em todas as regiões agroecológicas, que é de uma diminuição inicial no

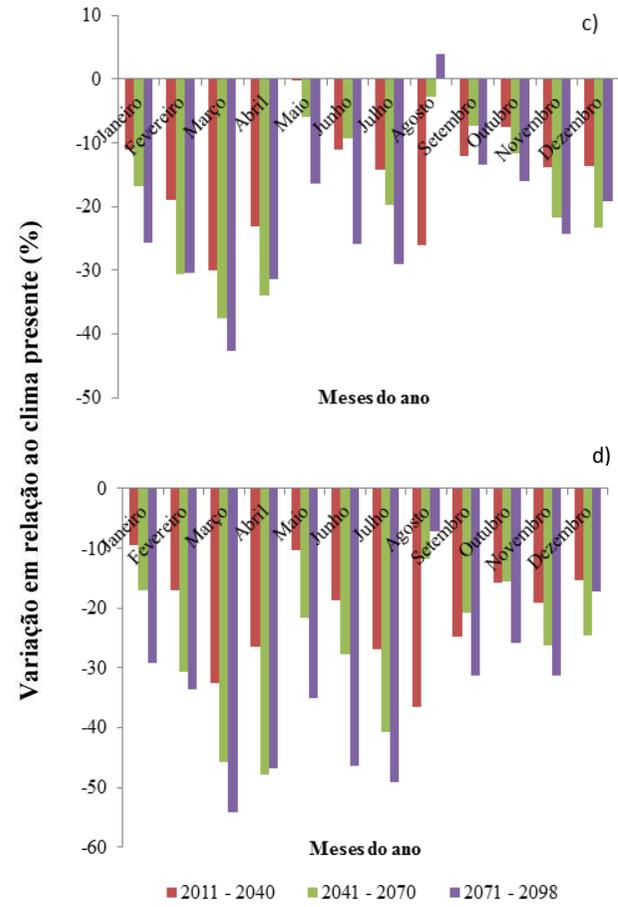
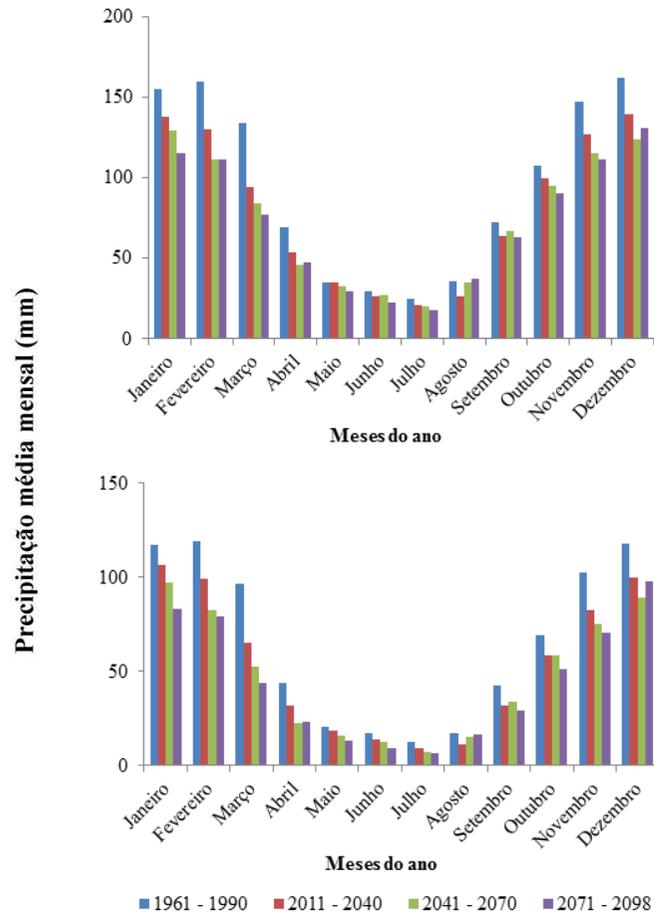
primeiro “time slice”, embora um pequeno incremento positivo tenha sido observado para o citado mês nos “times slices” seguintes, atingindo 4% no final do século XXI em relação ao clima presente.

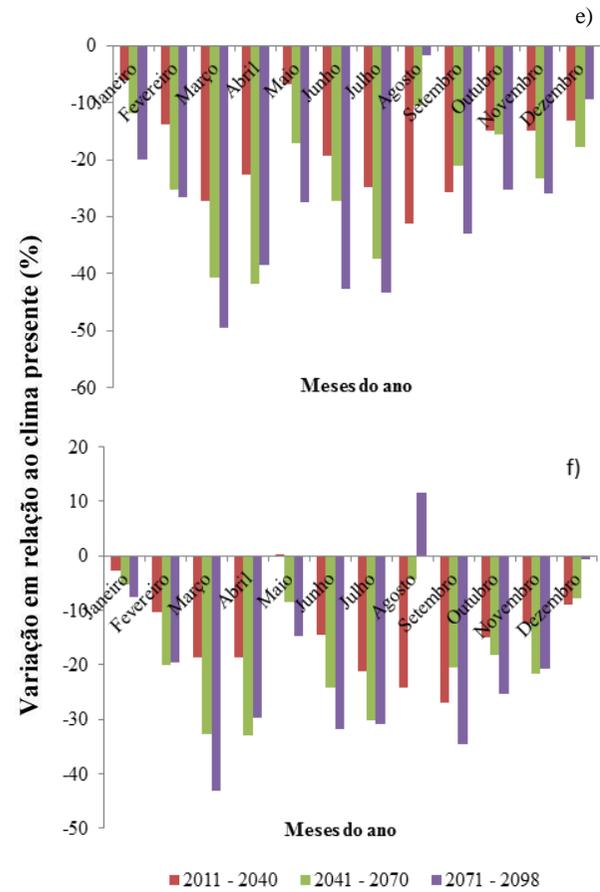
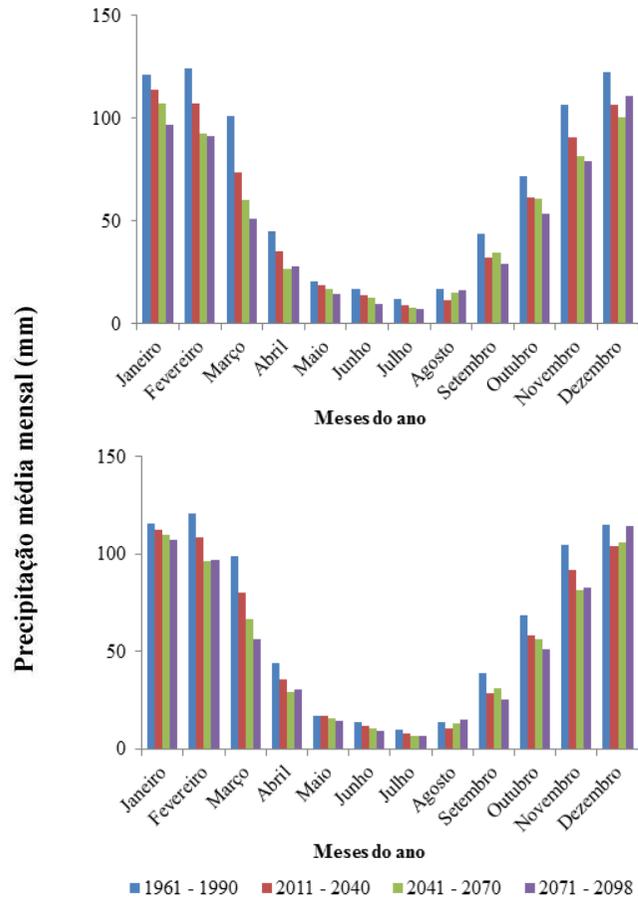


■ 1961 - 1990 ■ 2011 - 2040 ■ 2041 - 2070 ■ 2071 - 2098



■ 2011 - 2040 ■ 2041 - 2070 ■ 2071 - 2098





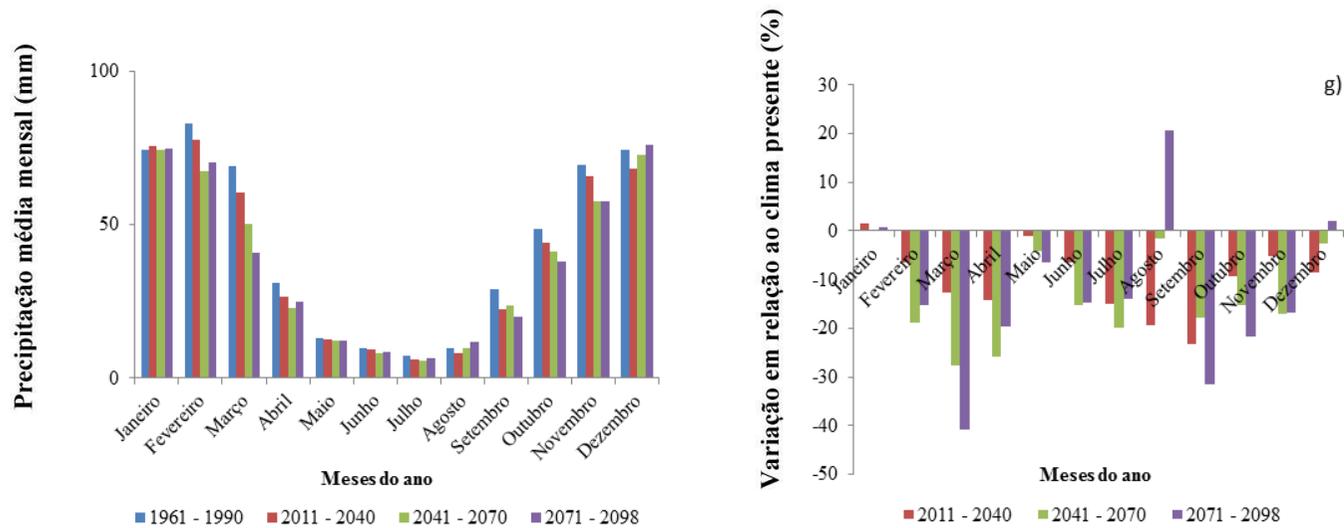


Figura 5 Precipitação média mensal (coluna esquerda) para o clima presente (1961-1990) e para os “time slices” futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098 e sua variação em relação ao clima presente (coluna direita) para o cenário de mudanças climáticas A1B (a. BRM; b. Selva Alta; c. Yunga fluvial; d. Quechua; e. Suni; f. Puna; g. Janca)

Para a precipitação total anual, observou-se na Figura 6a, redução gradual em relação ao clima presente, diminuindo em média 14, 20 e 23%, respectivamente, para os “time slices” 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098. As regiões agroecológicas Quechua, Suni e Yunga apresentam as maiores diminuições da precipitação total anual, observando-se reduções de 32%, 27% e 25% até o final do presente século, em relação ao clima presente.

Buja e Craig (2002) simularam os cenários A1 e B2 de emissões de gases de efeito estufa para a BRM com o GCM CCSM2 (“Climatic Community System Model 2”), aplicando um *downscaling* dinâmico e outro estatístico, com base no modelo regional RegCM2, para os períodos de 1990-1999 (período controle), e para o período projetado de 2045-2054, com resolução espacial de 80 km. Como conclusão, os autores observaram que a precipitação apresenta uma diminuição entre 19% e 14% para a média e baixa bacia do rio Mantaro, respectivamente, para o período de 2045-2054 em relação ao período controle, no verão. Foi observado também que as tendências nas estações climáticas na BRM, no período controle, indicam que, em média, a precipitação teve uma diminuição próxima de 3% por década. Tais resultados corroboram os encontrados neste estudo, que é de uma redução gradual das precipitações mensais ao longo do século XXI para a região dos Andes tropicais.

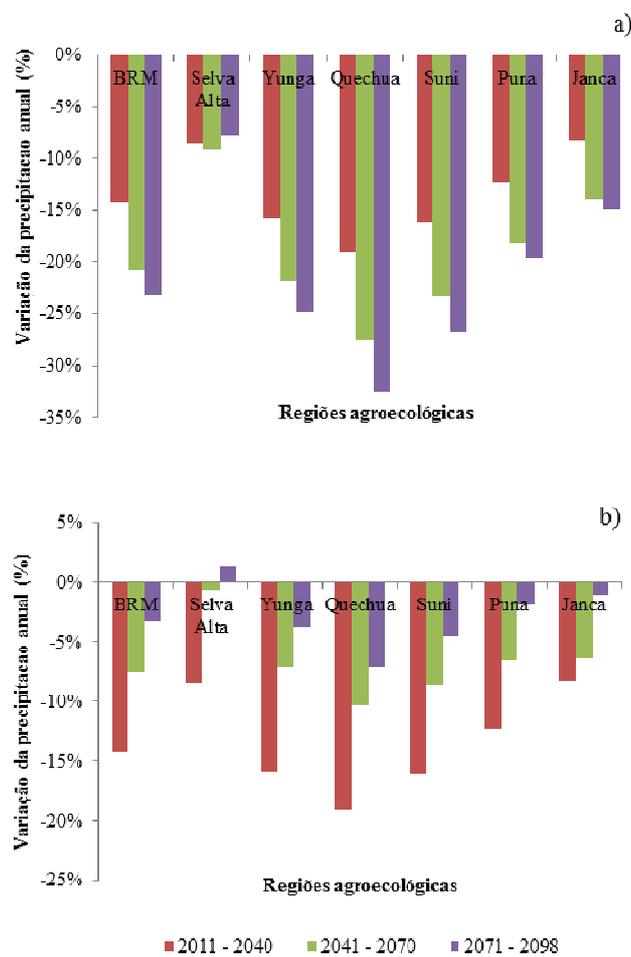
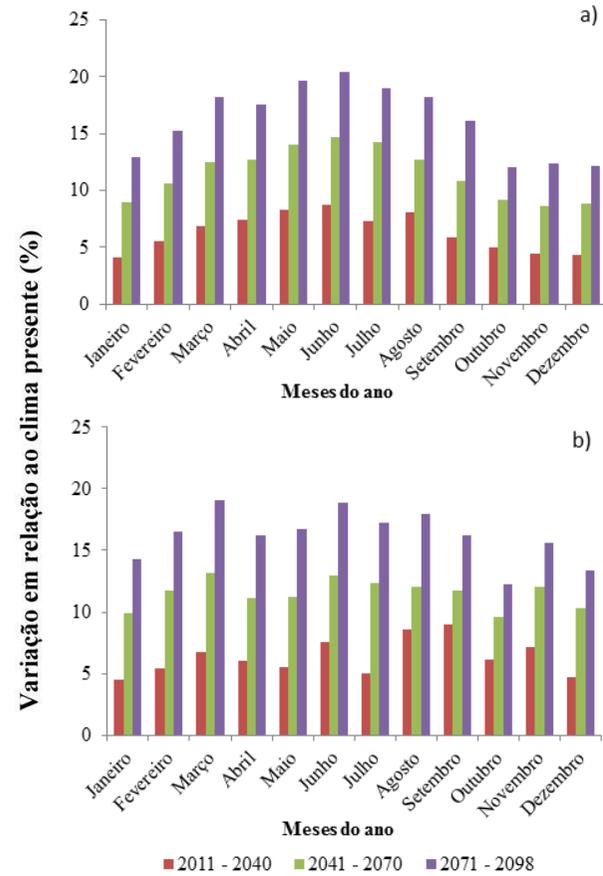
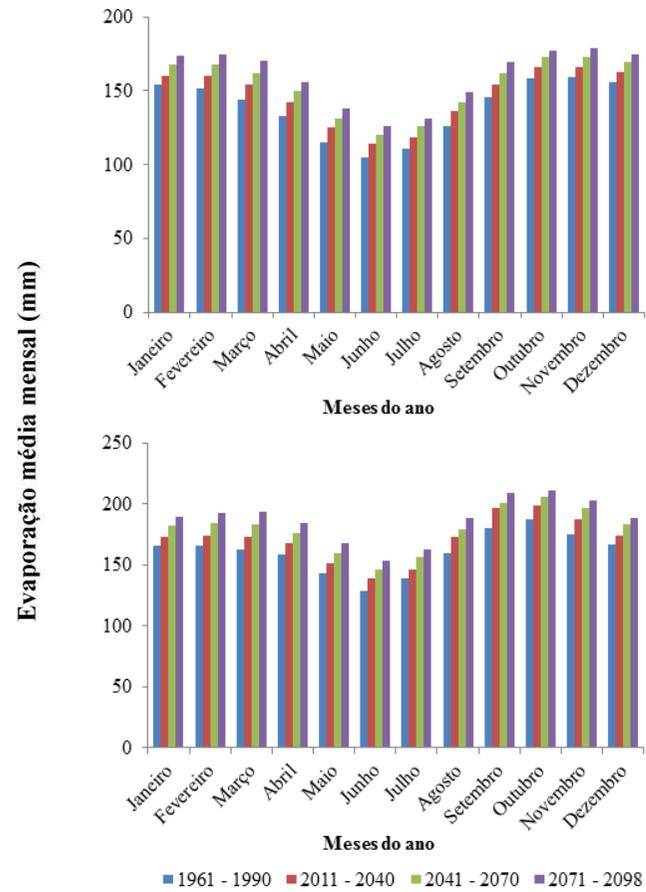


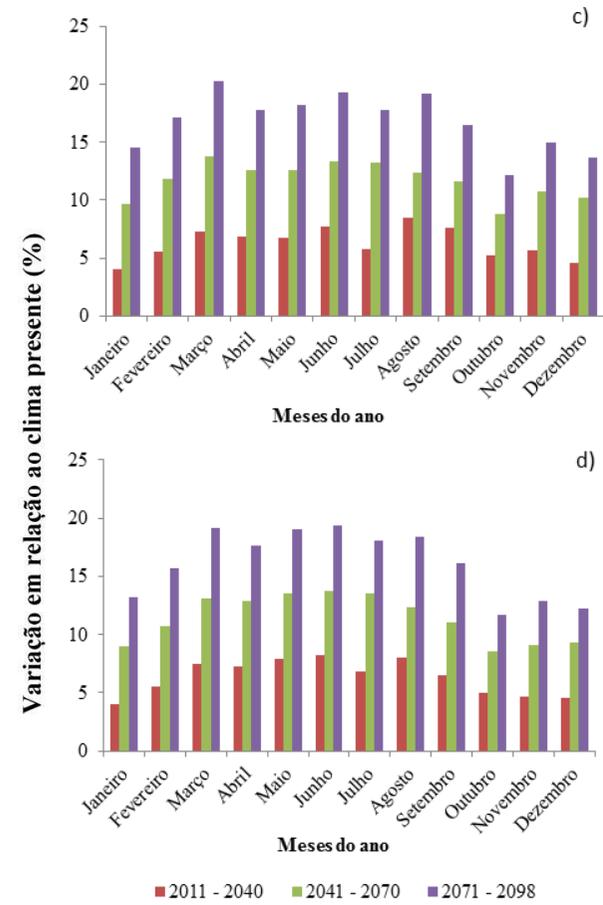
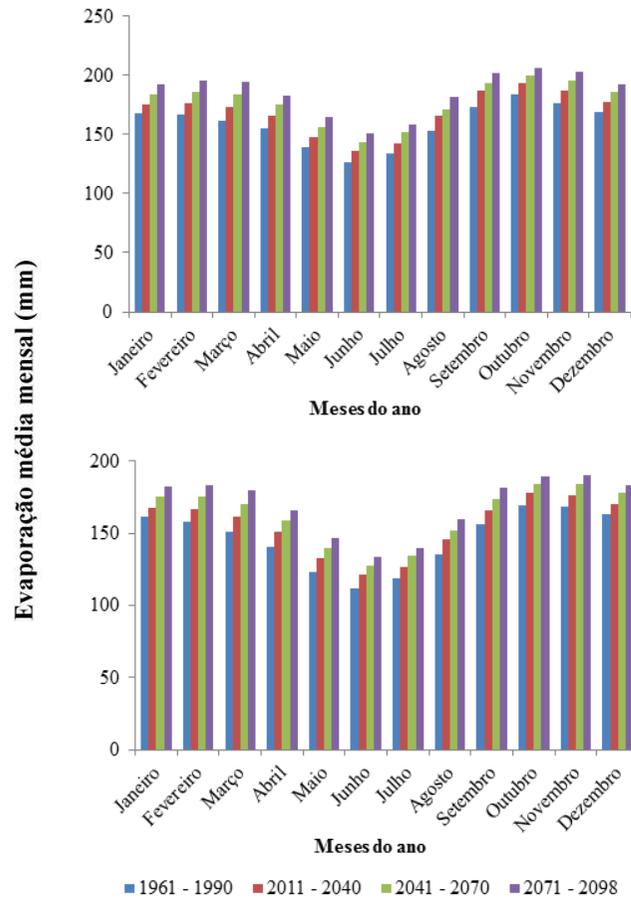
Figura 6 Variação da precipitação anual (%) em relação ao clima presente (a), e em relação ao período anterior (b), por regiões agroecológicas, na BRM, Peru

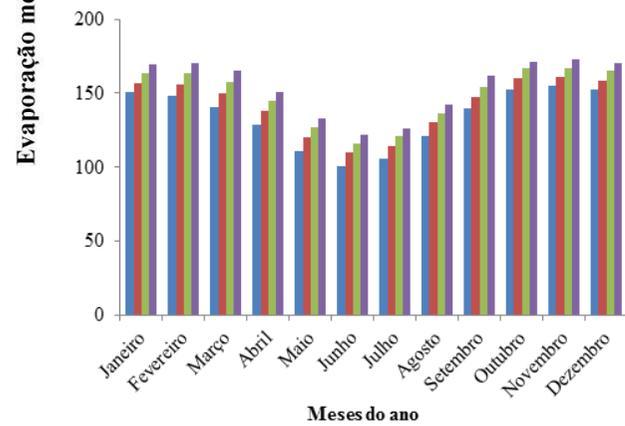
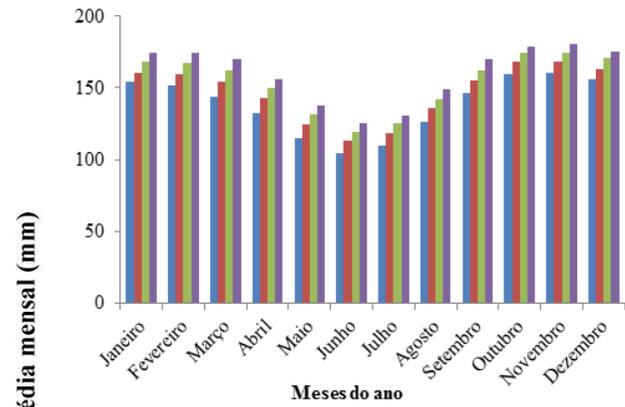
Observa-se na Figura 6b, que também, a variação da precipitação anual em relação ao período anterior, apresenta os maiores valores de redução nas regiões Quechua Suni e Yunga, em que o maior decréscimo apresenta-se no

período de 2011 – 2040 em relação ao clima presente, reduzindo seus valores em 19%, 16% e 15,8% respectivamente para cada região antes mencionada.

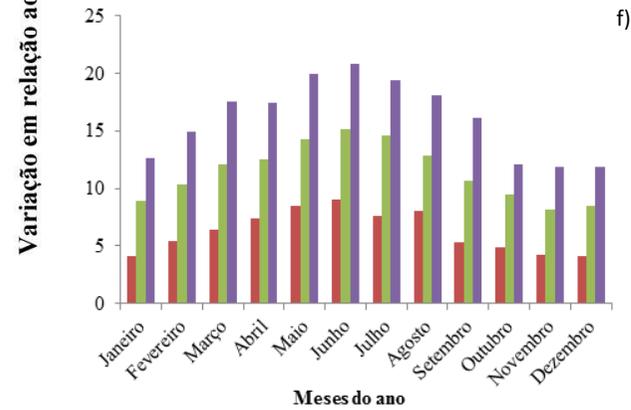
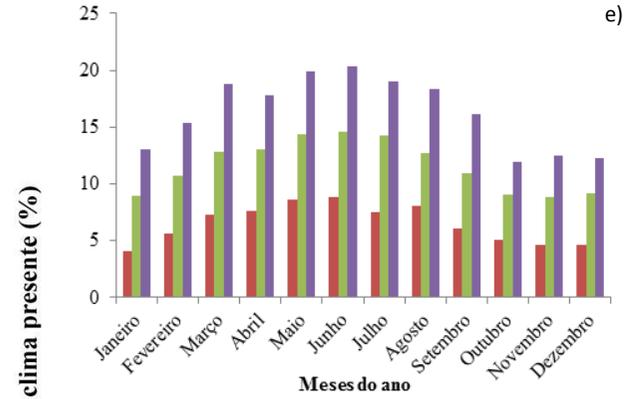
O comportamento da evaporação é semelhante entre todas as regiões, com aumento quase linear desta em relação ao clima presente, como fruto do aumento da temperatura global projetada pelo cenário A1B. Observa-se na Figura 7 o comportamento da evaporação média mensal na BRM, a qual apresenta variações positivas em relação ao clima presente. Até o final do cenário futuro, em relação ao clima presente, o aumento da evaporação varia de 12 a 20% entre os meses de junho a outubro, observando-se que, em geral, as maiores variações são para os meses menos chuvosos, que estão entre abril e setembro. Isto significa que há tendência importante de aumento do período seco na bacia.







■ 1961 - 1990 ■ 2011 - 2040 ■ 2041 - 2070 ■ 2071 - 2098



■ 2011 - 2040 ■ 2041 - 2070 ■ 2071 - 2098

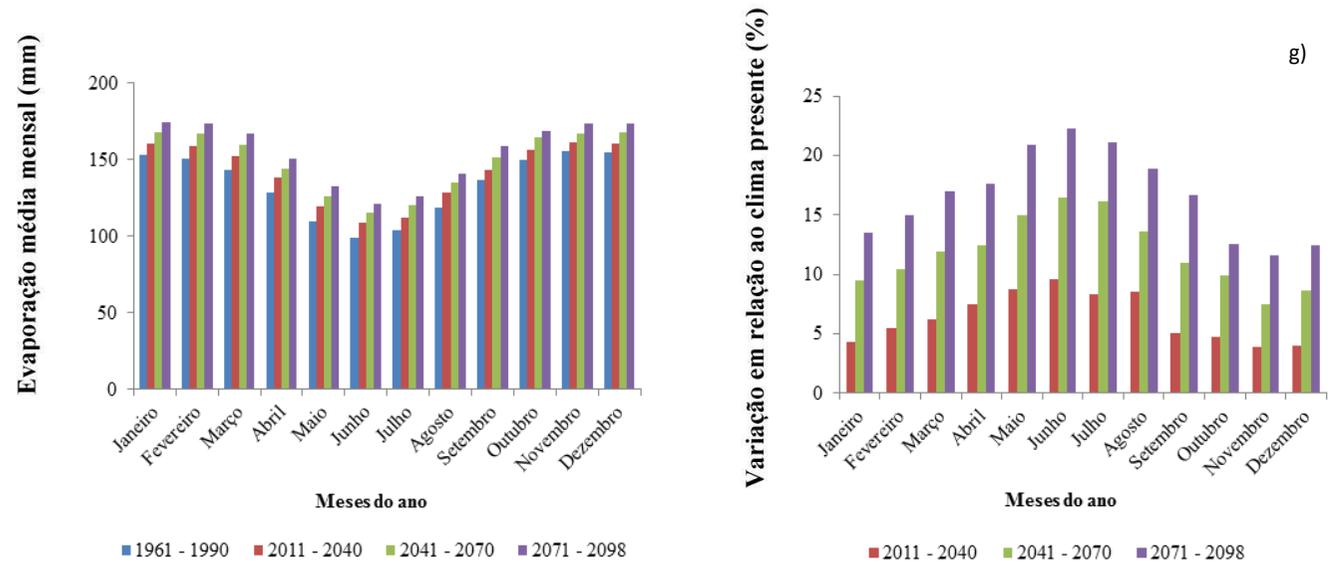


Figura 7 Evaporação média mensal (coluna esquerda) para o clima presente (1961-1990) e para os “time slices” futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098 e sua variação em relação ao clima presente (coluna direita) para o cenário de mudanças climáticas A1B (a. BRM; b. Selva Alta; c. Yunga fluvial; d. Quechua; e. Suni; f. Puna; g. Janca)

Observa-se, na Figura 8a, a variação da evaporação anual em relação ao clima presente para os “time slices” 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098, foi de 6, 11 e 16%, respectivamente. É de grande importância ressaltar que enquanto a precipitação média mensal apresenta uma diminuição progressiva, a evaporação apresenta uma tendência oposta de acréscimo.

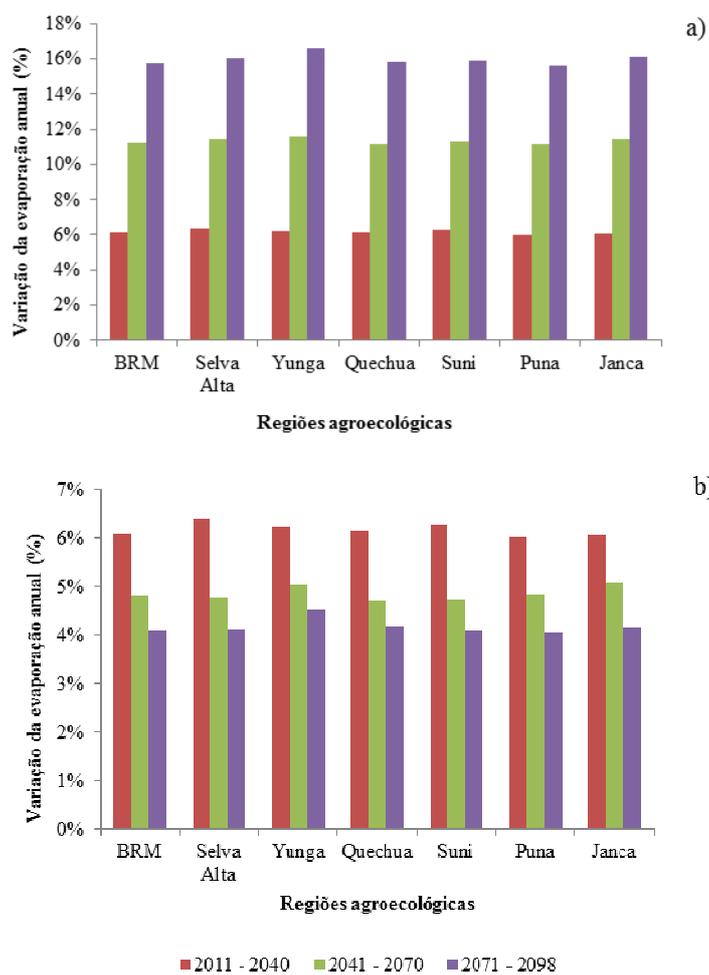
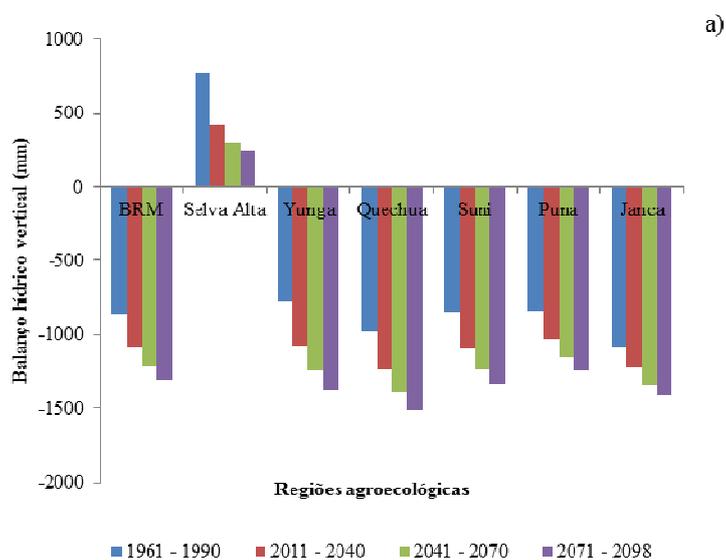


Figura 8 Variação da evaporação anual (%) em relação ao clima presente (a), e em relação ao período anterior (b), por regiões agroecológicas, na BRM, Peru

Assim, apresenta-se na Figura 8b, que a evaporação anual em relação ao período anterior exibe os maiores incrementos no primeiro *time slice* futuro (2011 – 2040), e valores semelhantes se comparamos as regiões agroecológicas.

Assim, considerando um balanço hídrico vertical (P-E) é possível deduzir que, segundo o cenário A1B, a BRM apresentará um déficit hídrico cada vez maior para todos os meses do ano ao longo do século XXI, o que afetará de forma significativa as atividades econômicas na bacia, em especial a agricultura, que é altamente dependente do comportamento da precipitação.

Observa-se na Figura 9a, o balanço hídrico vertical anual por regiões agroecológicas, assim nas Figuras 9b e 9c as variações em relação ao clima presente e ao período anterior, respectivamente.



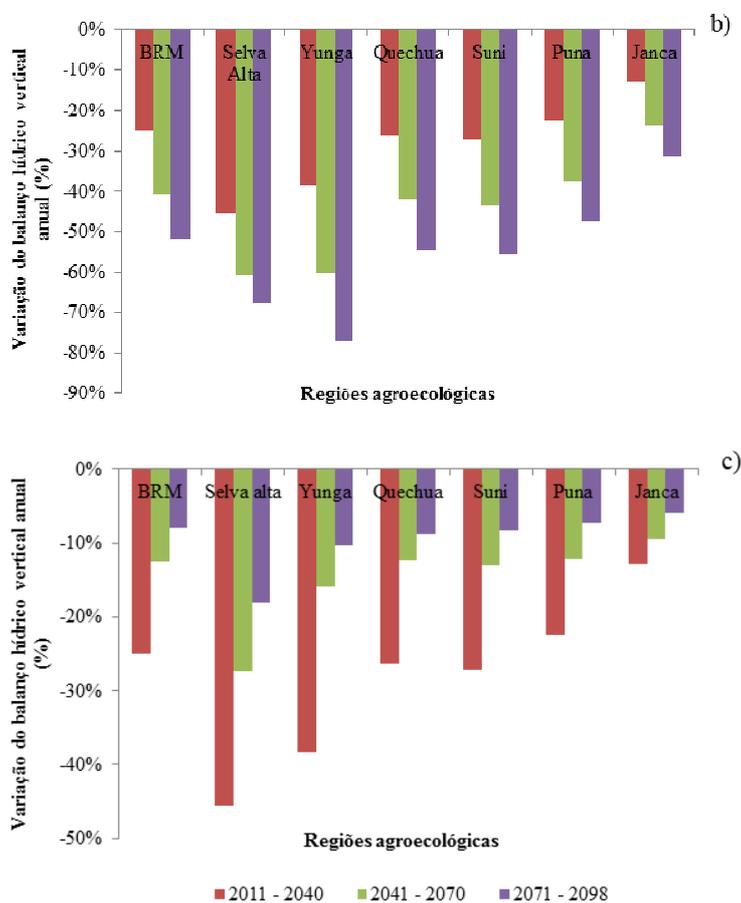


Figura 9 Balanço hídrico vertical anual (a), variação em relação ao clima presente (a), e em relação ao período anterior (b), por regiões agroecológicas, na BRM, Peru

As regiões agroecológicas que apresentam um maior aumento no déficit hídrico em relação ao clima presente serão as regiões Yunga, Selva Alta, Suni e Quechua, as que atingem um máximo de redução no balanço hídrico ao final do século XXI (2071 - 2098), com valores de redução de 77%, 68%, 56% e 54%, respectivamente. Em média, a BRM apresenta uma redução do balanço hídrico de 52% em relação ao clima presente.

Observam-se, na Figura 10, o mapa das regiões agroecológicas, representadas em escala de cores cinza segundo a variação do balanço hídrico vertical anual em relação ao clima presente, em que a região Yunga apresenta, em média, a maior redução em todos os “time slices” simulados, seguido das regiões Selva alta, Suni e Quechua. Em relação ao impacto que esta redução na disponibilidade do recurso hídrico terá nas atividades econômicas da população, resulta que estas regiões abrangem principalmente as partes baixas das sub-bacias Yacuy, Achamayo, Cunas, Shullcas, San Fernando, Pariahuanca, Ichu, Huanchuy e Huarpa, quase a totalidade das sub-bacias Paraiso e Viscatan.

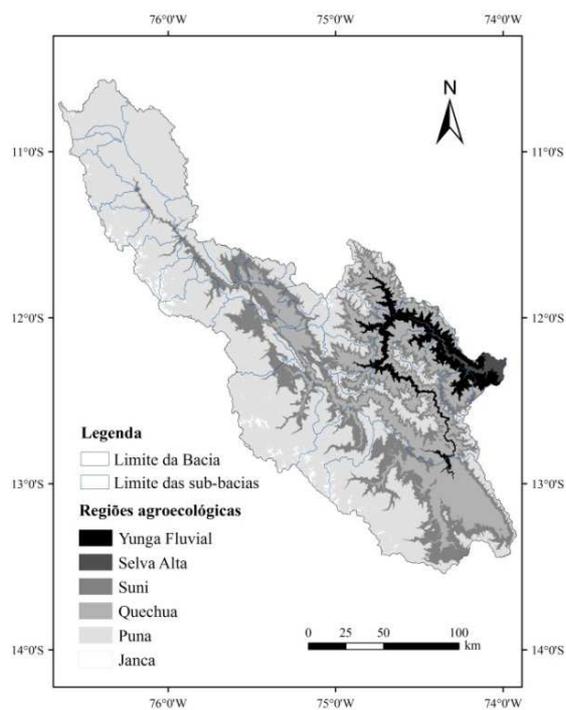


Figura 10 Mapa da variação do Balanço hídrico vertical anual em relação ao clima presente, na BRM, Peru

A região Yunga apresenta, em média, a maior redução na disponibilidade hídrica em todos os “time slices”, seguido também das regiões Suni e Quechua. Segundo o Ministério de Agricultura do Peru (PERU, 2010a), essas regiões destinam a maior parte dos recursos hídricos para o uso agrícola, cuja atividade está limitada em função da disponibilidade de água. Segundo o IGP (2005a), a maior quantidade de áreas agrícolas se localiza na parte central e Sul da BRM, abrangendo 82% do total de áreas agrícolas, nas zonas definidas como “Atividade Agropecuária” e “Atividade Agropecuária/Bosque secundário”, as quais se localizam nestas regiões.

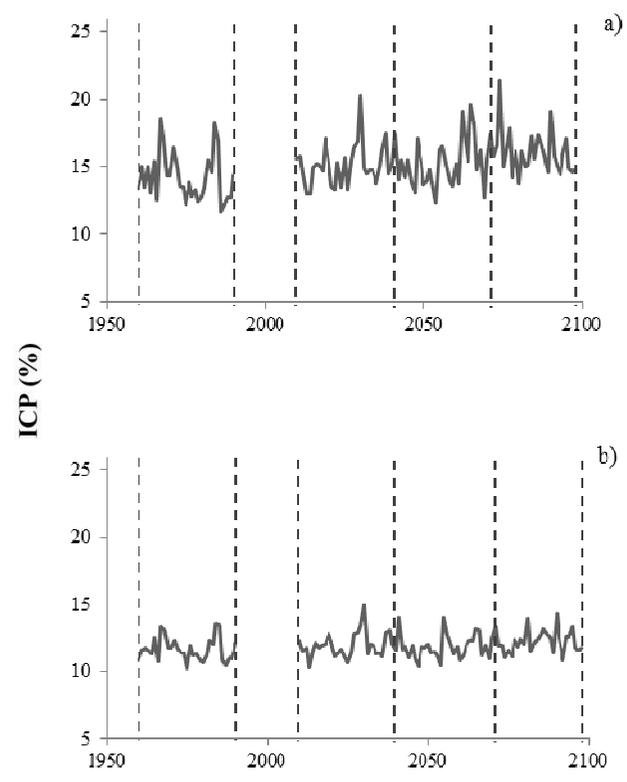
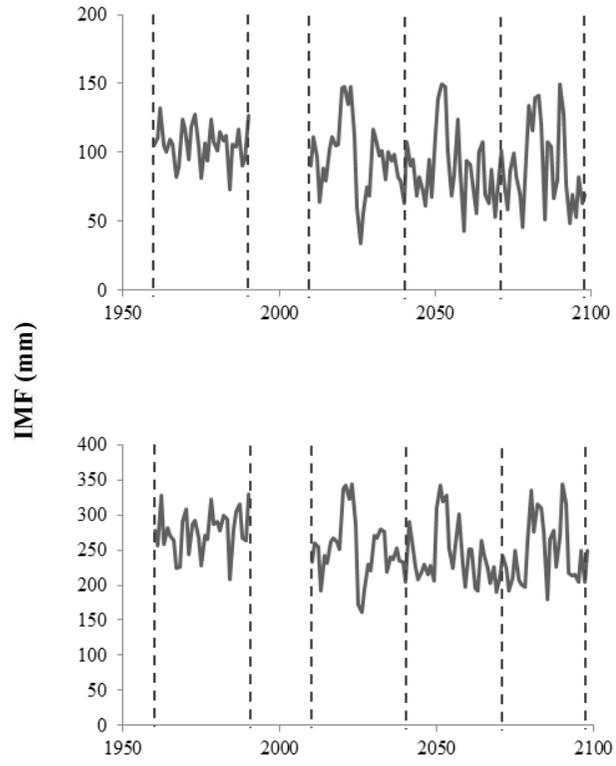
Contudo, os recursos hídricos também são fundamentais para a geração de energia elétrica na “Usina Hidrelétrica Ingenio”, além de uso significativo na piscicultura. Além disto, Peru (2010a) considera o rio Cunas como um dos mais importantes na BRM, devido ao grande uso de suas águas na agricultura e para geração de energia elétrica pela “Usina Hidrelétrica Huarisca”. Assim, também se encontra localizado o maior complexo hidroelétrico do Peru constituído pela “Usina Hidrelétrica Santiago Antunez de Mayolo” e a “Usina Hidrelétrica Restitución”.

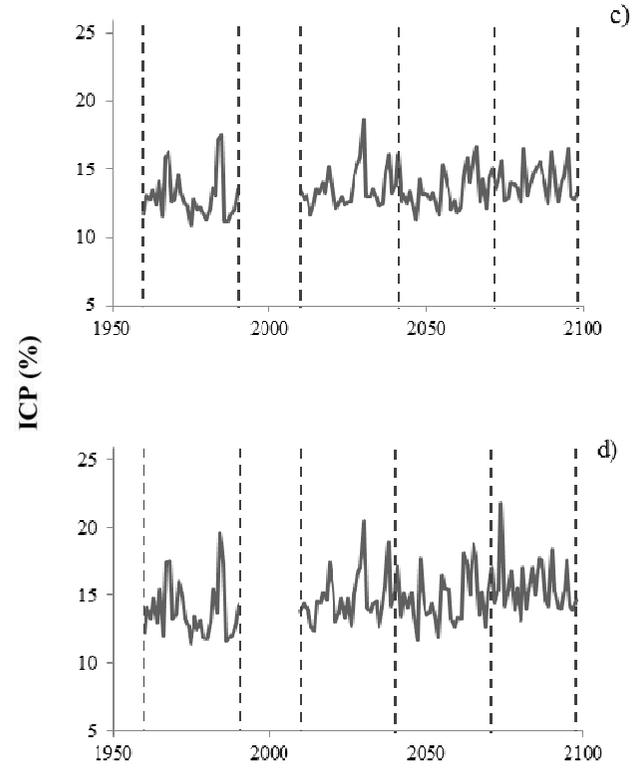
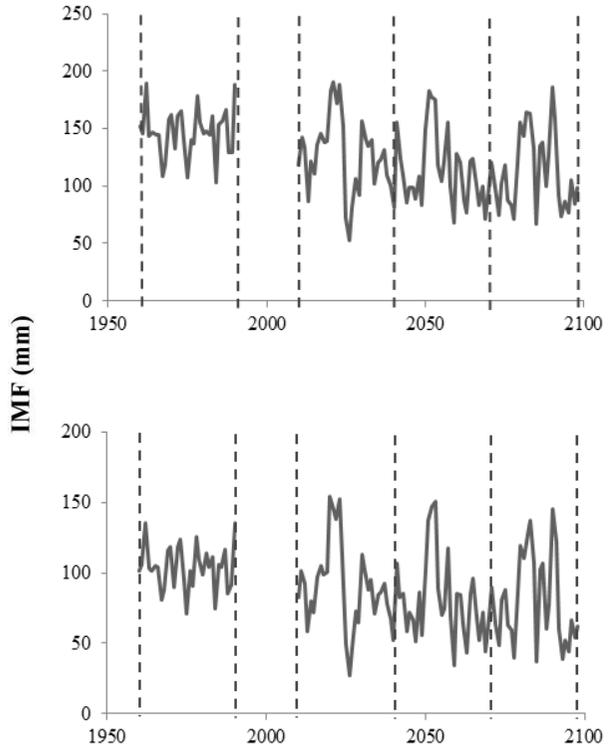
3.2 Comportamento dos índices IMF e ICP simulado para o cenário de mudanças climáticas A1B na BRM, Andes Peruanos

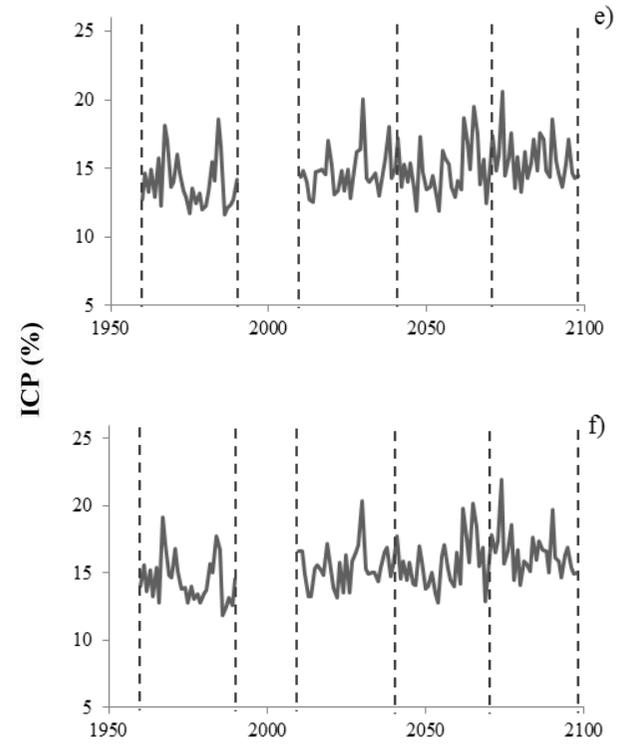
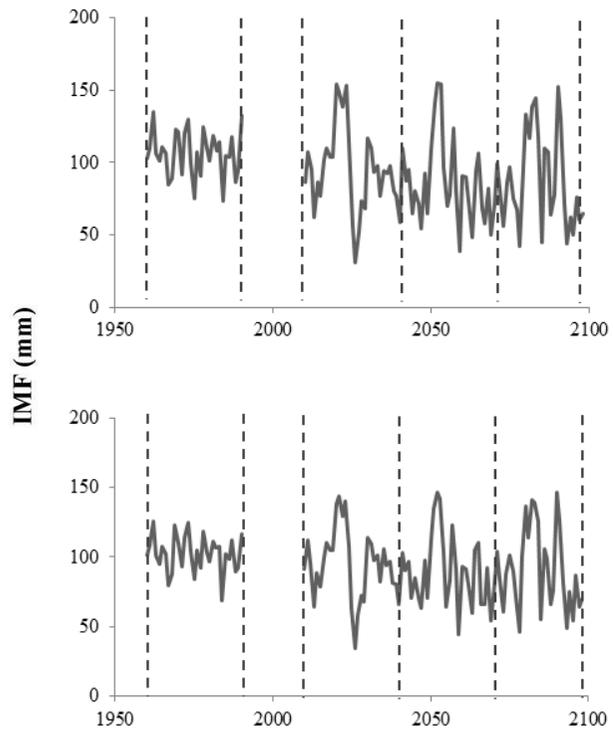
Na Figura 11, está apresentado o comportamento temporal médio dos índices IMF e ICP, ambos anuais, na BRM, além das seis regiões agroecológicas da mesma. Existe uma tendência de diminuição ao longo do tempo do IMF para todas as regiões da BRM, embora existam anos simulados em que o IMF anual supera aqueles observados no clima presente (1961-1990), atingindo, em média, valores acima de 140 mm no início da década dos anos 2020, 2050, 2080 e 2090, considerado como “alto” potencial erosivo. Destaca-se ainda que a região Selva

Alta apresenta os maiores valores de IMF anual, atingindo valores superiores a 340 mm na metade e no final do século XXI, considerado como potencial erosivo “muito alto” (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES - CEC, 1992). Contudo, com base no teste de Mann-Kendall, as séries de IMF anual, em todas as regiões, apresentam uma tendência estatística significativa de diminuição até o final do século XXI, e de forma geral, uma possível redução no potencial erosivo das chuvas na bacia.

Com respeito ao IMF médio, este apresenta valores, na média, de 94,6, 83,9, 77,4 e 76,9 mm para os “time slices” de 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098, respectivamente, e que segundo a classificação do CEC (1992) caracteriza-os como “baixo” a “moderado” potencial erosivo.







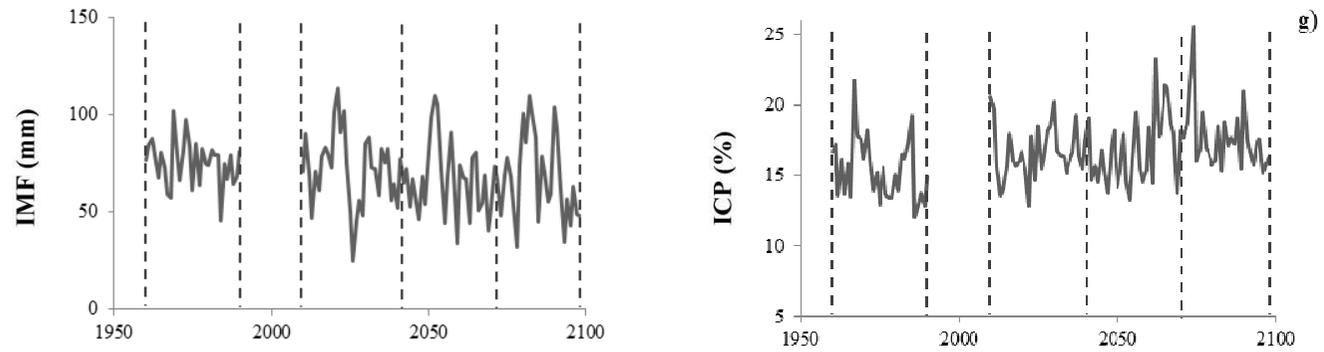


Figura 11 Comportamento temporal dos índices IMF anual e ICP anual para a BRM e as seis regiões agroecológicas (a. BRM; b. Selva Alta; c. Yunga fluvial; d. Quechua; e. Suni; f. Puna; g. Janca)

Em relação ao comportamento do ICP anual, foi detectada tendência estatística de aumento (positiva) pelo teste de Mann Kendall. Além disto, verificou-se grande oscilação nos valores na região Janca (Figura 11g), variando de 12% (distribuição moderadamente sazonal de chuvas) até valores maiores que 25% (distribuição irregular) no início da década do ano 2070. Isto é possível devido ao fato de que, geomorfologicamente, esta região é formada por montanhas íngremes localizadas acima de 4.800 m de altitude, com baixa umidade, e na qual as precipitações normalmente são na forma de neve ou granizo, as quais devido à alta influência da altitude tendem a apresentar eventos mais extremos, e portanto, mais sazonais. Estes resultados demonstram que apesar da redução nos totais precipitados mensais ao longo do século, e uma tendência significativa de redução do IMF, poderão ocorrer períodos críticos em termos do potencial erosivo da chuva ao longo do século, especialmente devido ao aumento da concentração da chuva, o que foi comprovado estatisticamente pelo teste de Mann-Kendall.

Com relação ao ICP médio, este apresenta valores de 11,97, 12,59, 12,52 e 12,84% para os “time slices” 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098, respectivamente, e que segundo a classificação do Michiels e Gabriels (1996), caracteriza-os dentro da faixa de “Precipitação Sazonal moderada”.

Finalmente, observa-se na Figura 11b que a região “Selva Alta” apresenta uma menor variação do ICP, com valores entre 10 e 15%, significando melhor distribuição de chuvas, o qual é possível explicar tendo como referência que sua altitude varia de 400 a 1.000 m, com características climáticas semelhantes da região amazônica, ou seja, quente e úmido durante todo o ano, com regime de chuvas mais regular durante o ano. Mello et al. (2013) também caracterizaram a região amazônica brasileira com um ICP anual em torno de 10%, significando boa distribuição de chuvas ao longo do ano, o que é peculiar em climas equatoriais, na qual há quantidade significativa de vapor d’água ao

longo do ano, que combinado com temperaturas mais altas, facilitam a formação de nuvens via convecção.

Com relação à distribuição espacial, observam-se nas Figuras 12 e 13, os resultados da validação dos modelos geostatísticos mediante os graus de dependência espacial e dos erros padrões da média na validação cruzada para os dados de IMFm e ICPm, respectivamente, nos quais se destaca o modelo exponencial como o mais adequado por apresentar maior grau de dependência espacial e menor erro padrão da média, em todos os “time slices”, exceto para o caso do ICPm no último “time slice” (2071-2098) cujo modelo que melhor se ajustou foi o Gaussiano.

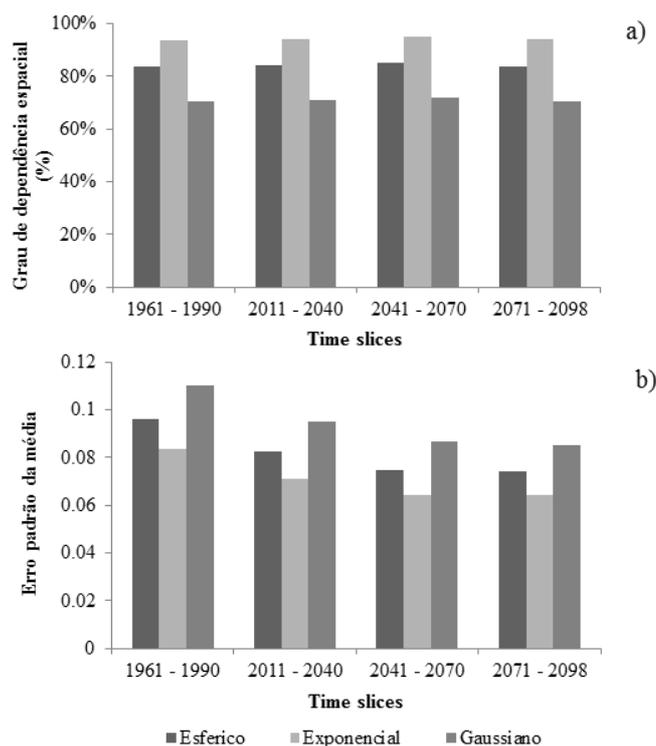


Figura 12 Valores do Grau de dependência espacial (a) e do erro padrão da média (b) na validação cruzada dos modelos geostatísticos da krigagem ordinária para dados de IMFm

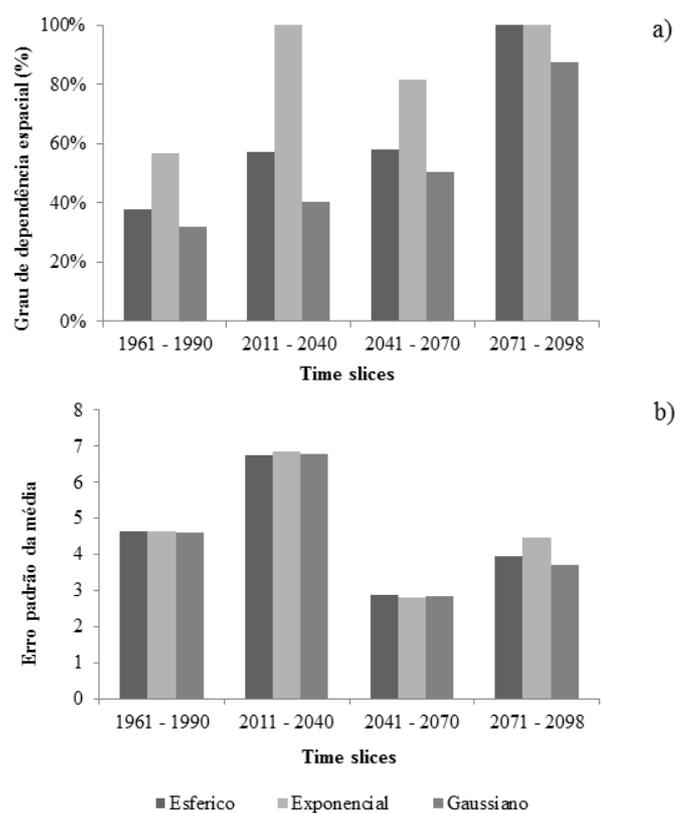
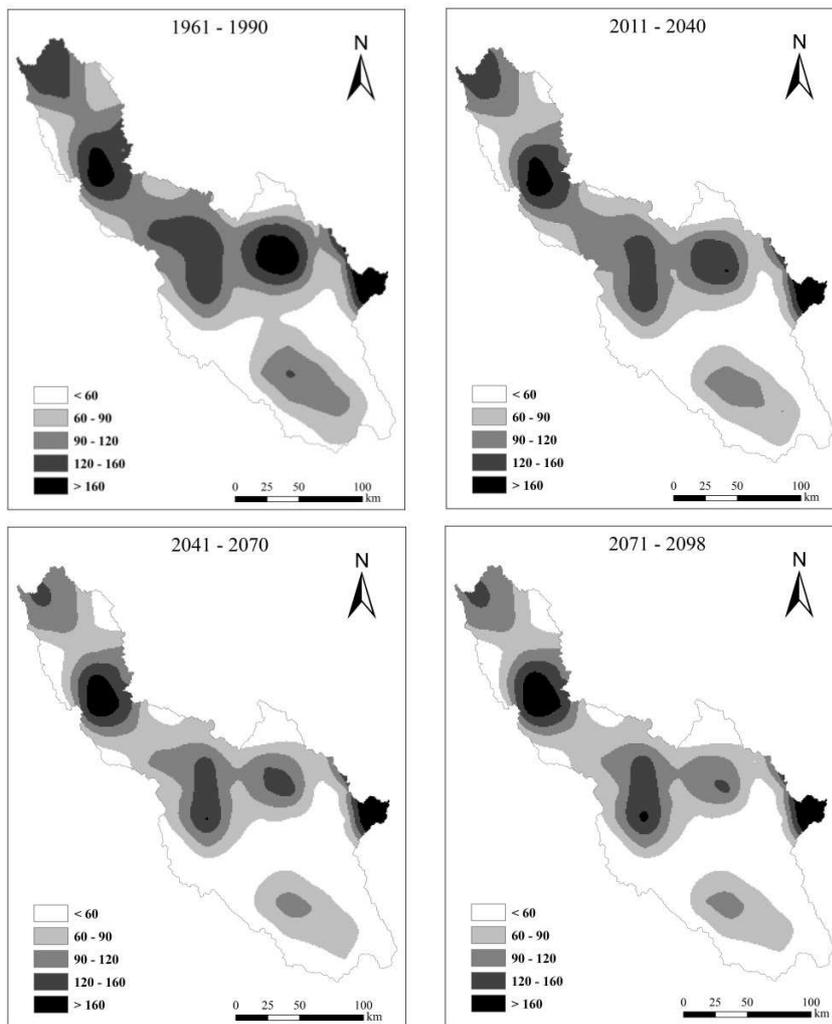


Figura 13 Valores do Grau de dependência espacial (a) e do erro padrão da média (b) na validação cruzada dos modelos geoestatísticos da krigagem ordinária para dados de ICPm

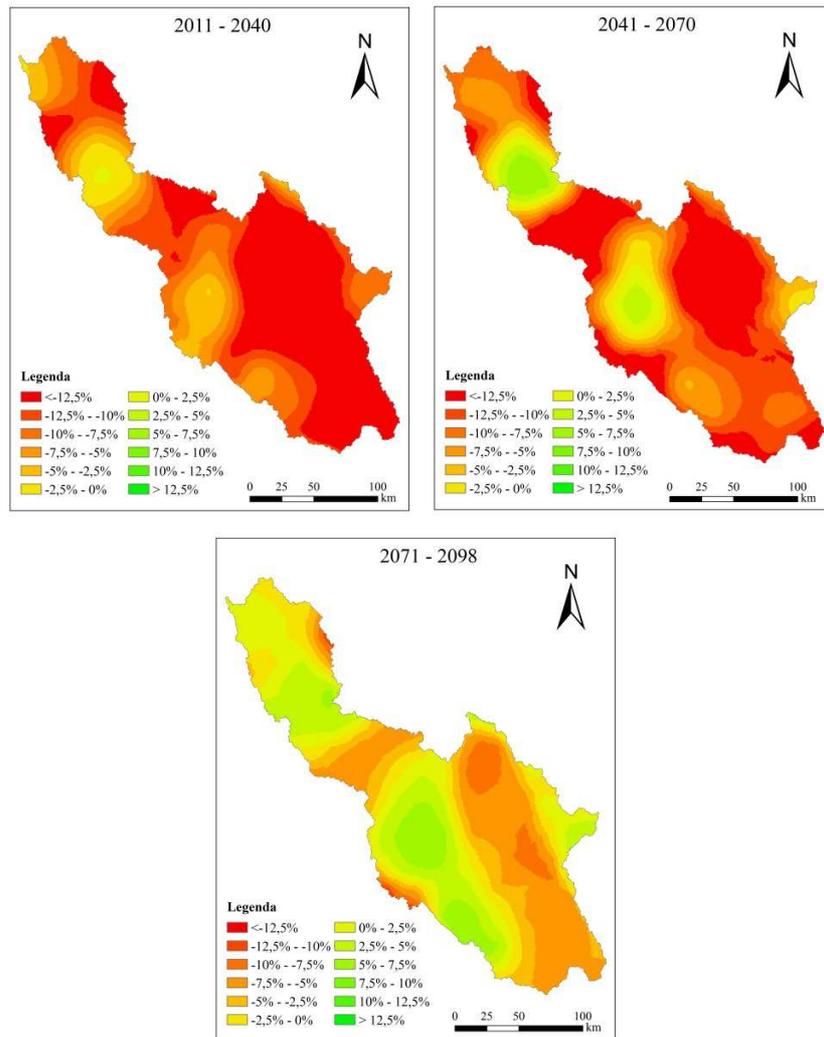
Na Figura 14, observam-se os mapas do índice IMF médio e IMF supra-sazonal, além dos mapas de redução percentual em relação ao período anterior para a BRM. Nas condições do clima presente (1961-1990) e para os períodos futuros, observou-se que grande parte da região Selva Alta apresenta valores de IMF > 160 mm considerado como potencial erosivo “muito alto”. Ao avaliar

especialmente o comportamento do IMF até o ano 2098, observa-se que há um gradiente positivo no sentido Centro-Leste, com um ligeiro aumento das áreas com IMF maiores a 160 mm na parte Noroeste da bacia, pertencente à parte Norte da região Puna, e também ao Sul do Lago Junín, este comportamento também é observado na parte Central da bacia (Figura 14b). Destaca-se que a parte Sul da BRM apresenta valores de IMF nas menores faixas (< 60 mm). Na parte Norte-Centro da BRM observaram-se valores menores do IMF anual e para os períodos supra-sazonais. Na Figura 14 (c e e), observam-se os mapas de IMF para os períodos úmido e seco, respectivamente. Da mesma forma que no IMF anual, ao longo do século XXI, também existe uma diminuição progressiva dos mesmos na BRM, embora as partes Noroeste e Central da bacia continuem mantendo um incremento até o final do século XXI, o qual é mais expressivo no período úmido. A maior parte da BRM apresenta, no período seco, valores do IMFm-ss < 60 mm, no clima presente e nos períodos futuros. Assim, sua variação em relação ao período anterior (Figura 14f) apresenta ainda uma diminuição, sobre tudo no primeiro período futuro (2011 – 2040).

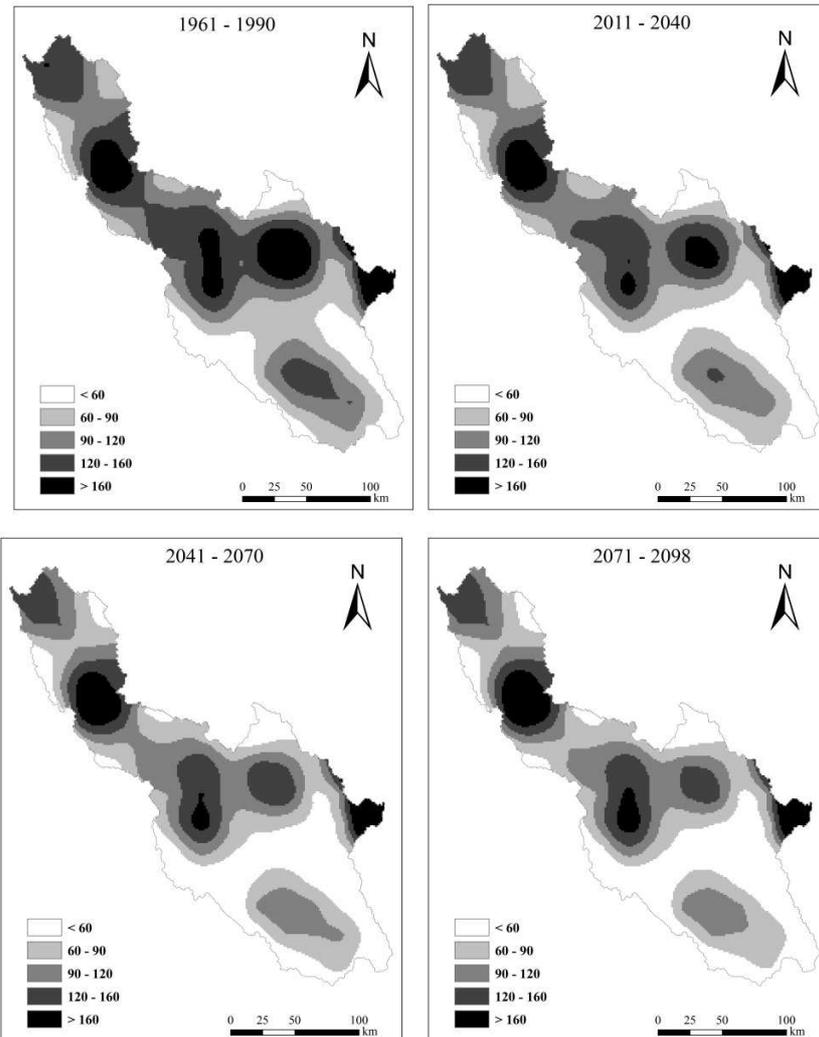
a)



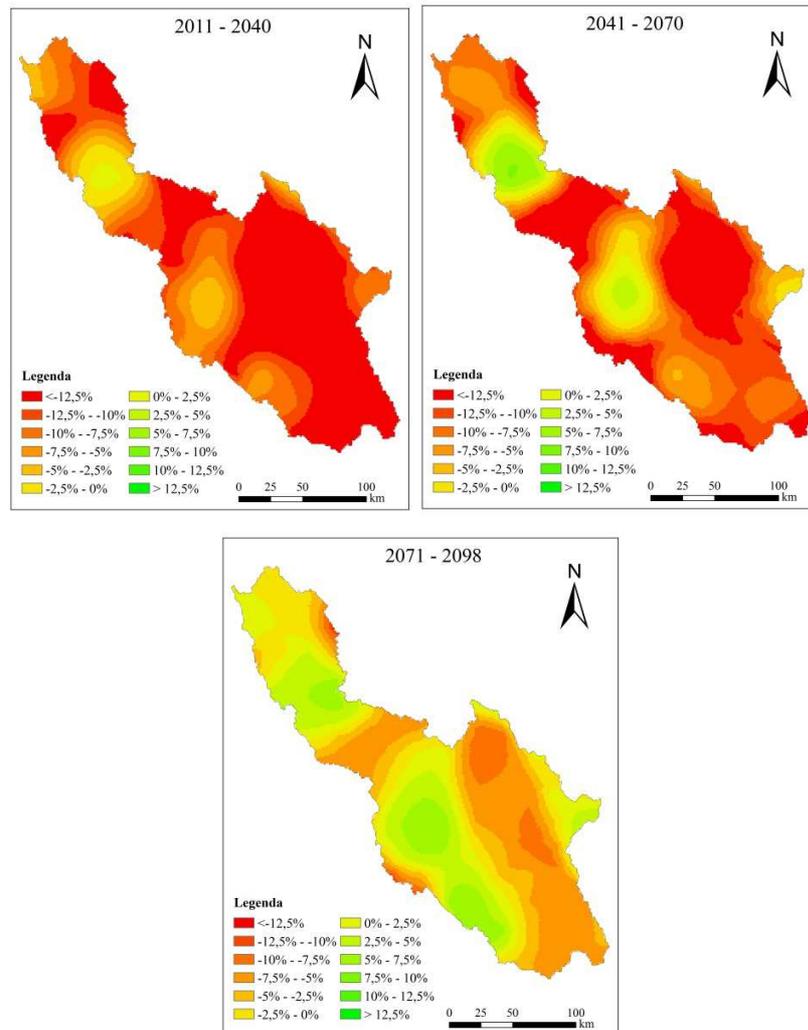
b)



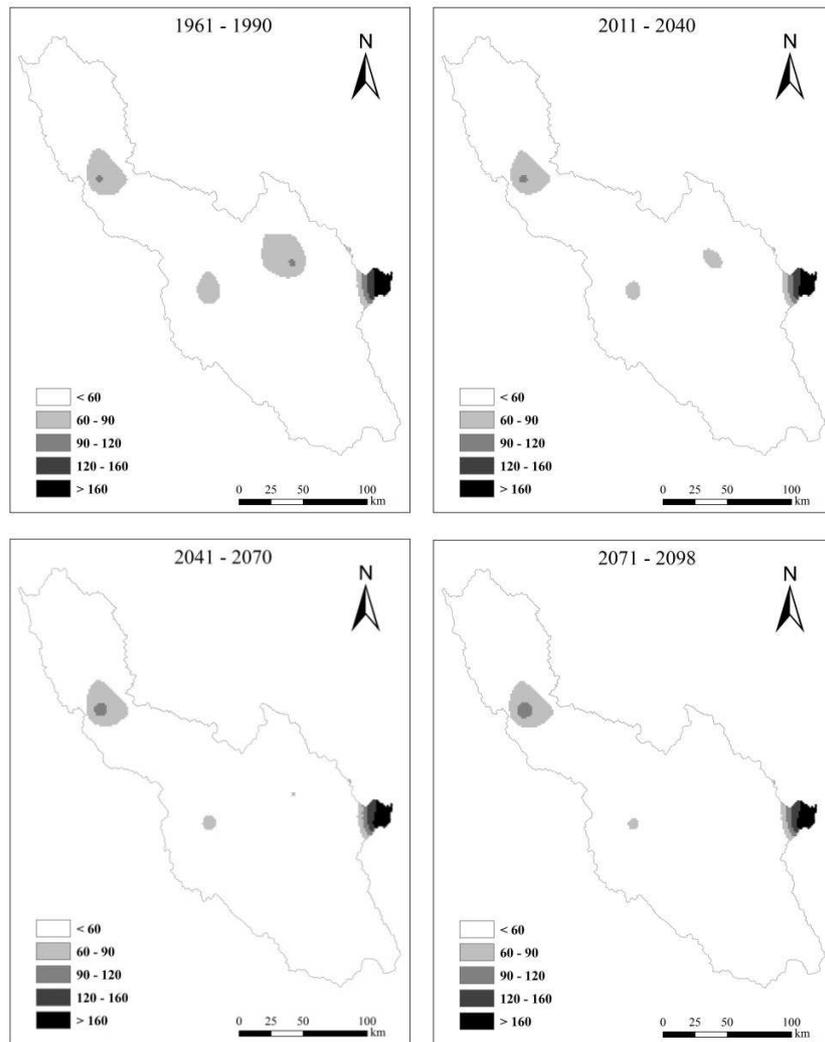
c)



d)



e)



f)

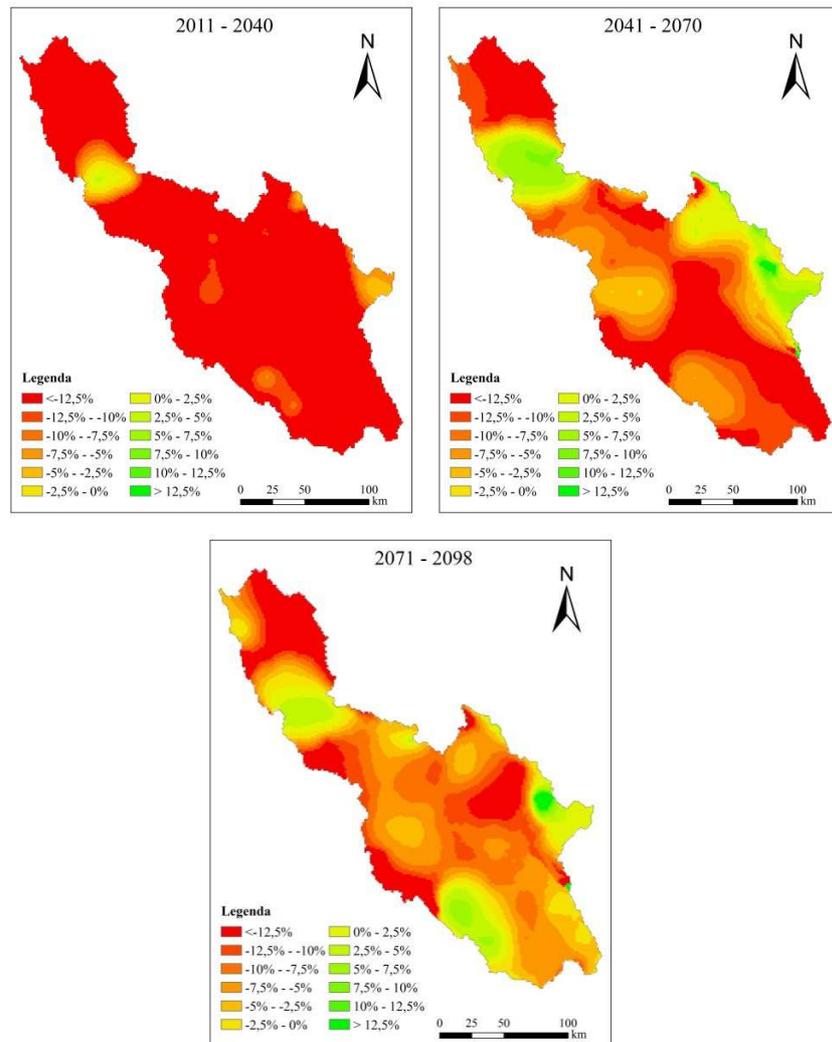
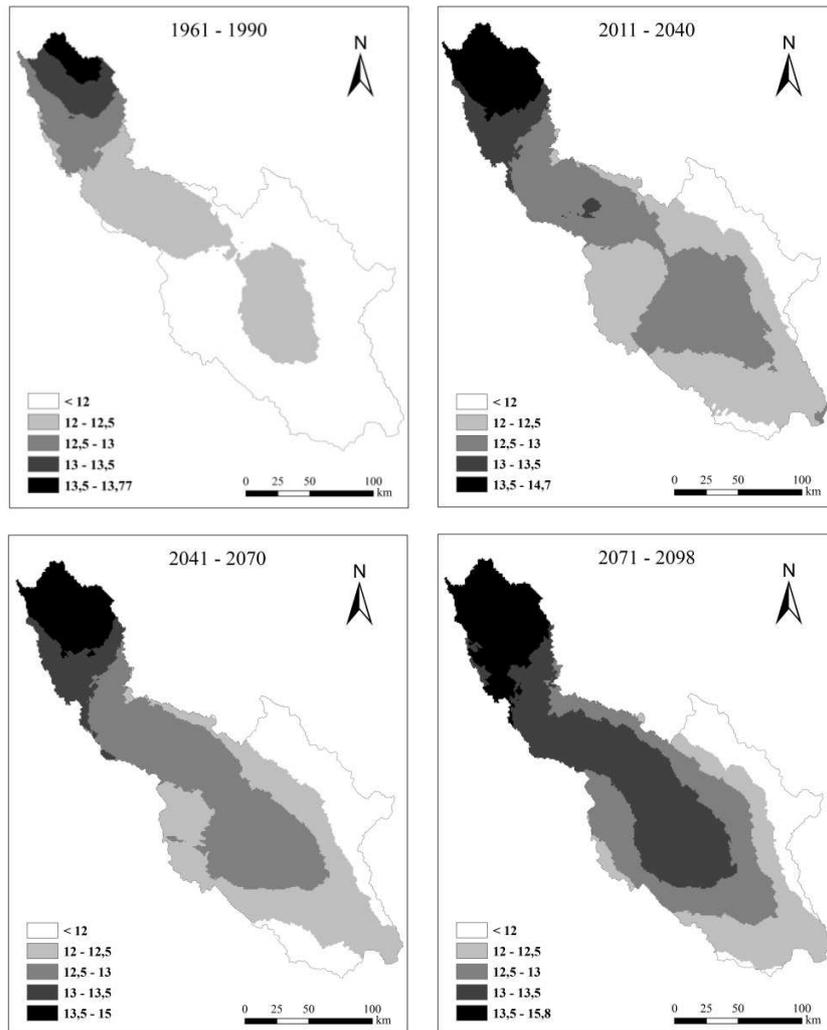


Figura 14 Mapas com os índices IMF anual (Figura a) e supra-sazonais (úmido - c e seco - e), e suas variações em relação ao período anterior (IMF anual - b, úmido - d e seco - f), para a BRM

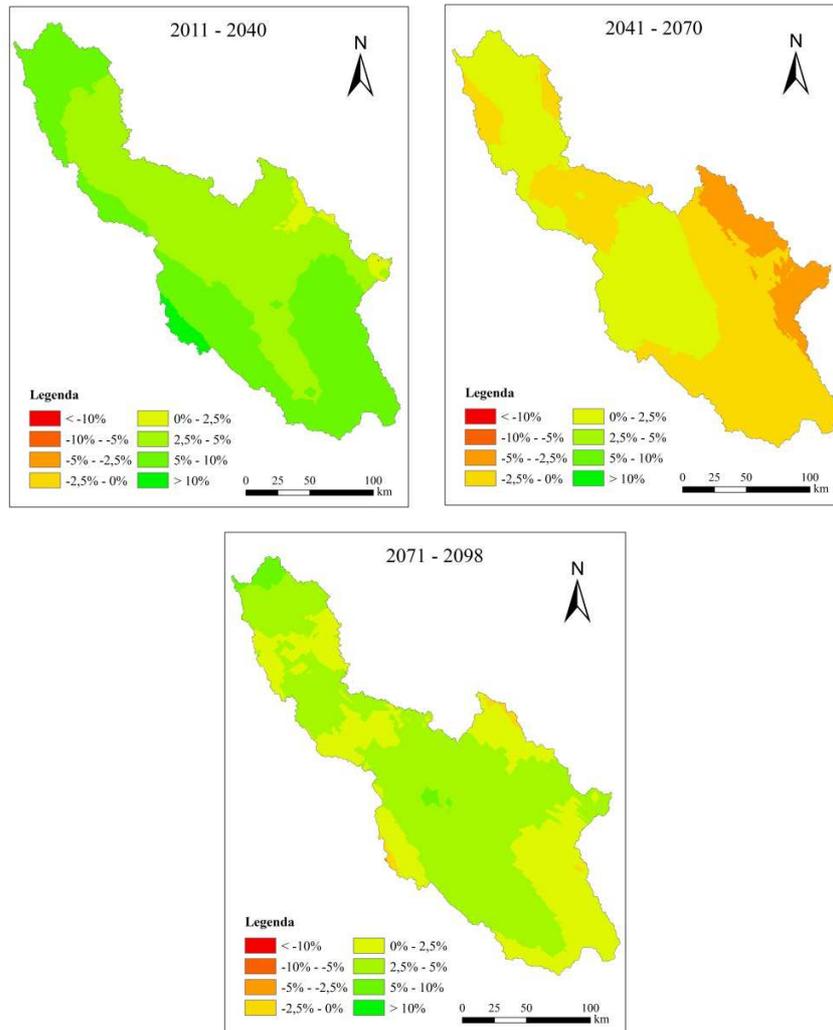
Com relação à distribuição espacial do ICP, observa-se na Figura 15, um aumento do ICP ao longo do século XXI, o que significa uma tendência de aumento das concentrações das chuvas em toda a BRM. Este índice comporta-se espacialmente de forma decrescente no sentido Noroeste – Sudeste em todos os “time slices”. É importante destacar que o ICP, nas condições do clima presente (1961-1990), predominante na BRM, tem valores menores que 12,5%, enquanto nos períodos correspondentes aos “time slices” 2011-2040 e 2041-2070, as áreas com ICP entre 12,5 e 13% praticamente triplicaram em relação ao período de controle (1961-1990). Com base neste indicador, as áreas mais vulneráveis são aquelas localizadas ao Norte da BRM, onde ao final do presente século, foram simulados valores médios superiores a 13,5%. Para o último *time slice*, foi simulado um grande aumento nos valores de ICP (13 a 13,5%) em relação aos períodos anteriores, estendendo-se na parte central da BRM. (Figura 15a).

Em relação ao comportamento do ICP supra-sazonal, nos períodos úmido e seco (Figura 15, b e c) observa-se que, de forma semelhante ao comportamento do ICP anual, é importante destacar o aumento dos valores de ICPm-ss ao longo do século, sobretudo no período úmido em que valores de ICP da última faixa (> 8,85%) abrangem praticamente toda a BRM, até o final do século XXI, tornando-se a precipitação mais irregular neste período. Assim, esta tendência de aumento das concentrações das chuvas observa-se mais detalhadamente nas Figuras 15b, d e f, num aumento progressivo do ICP anual e supra-sazonais, para a maior parte da BRM em todos os períodos futuros em relação ao período anterior.

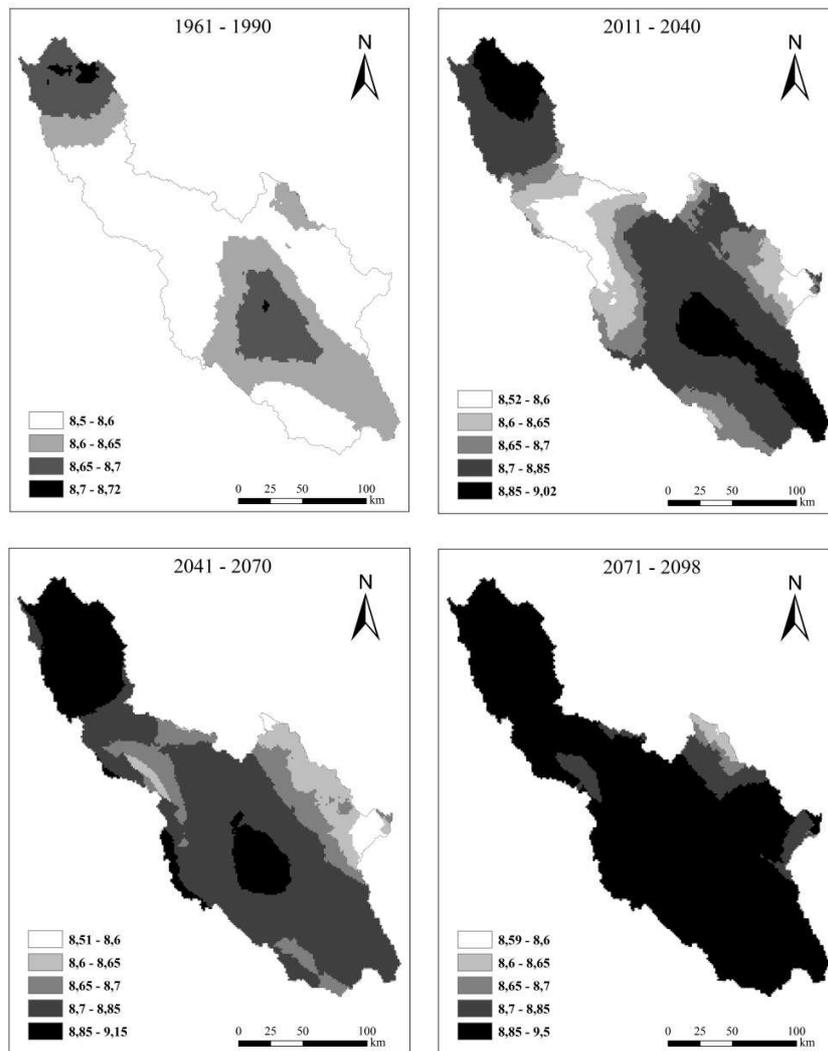
a)

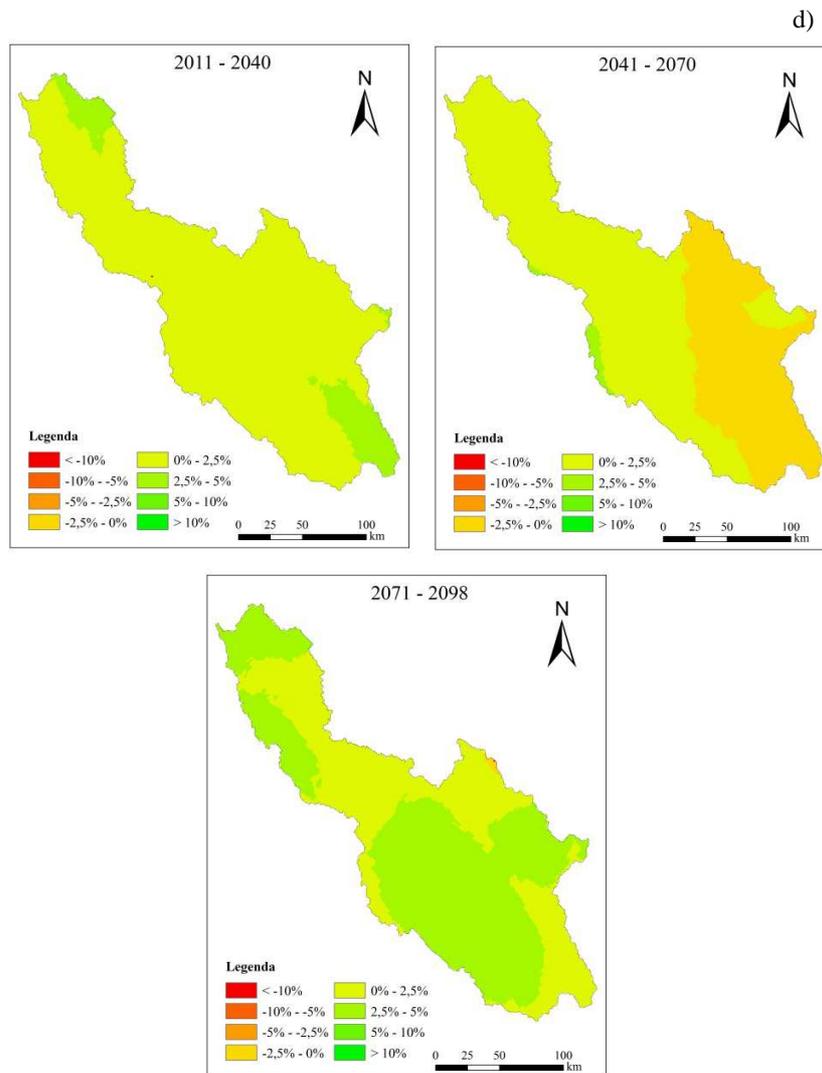


b)

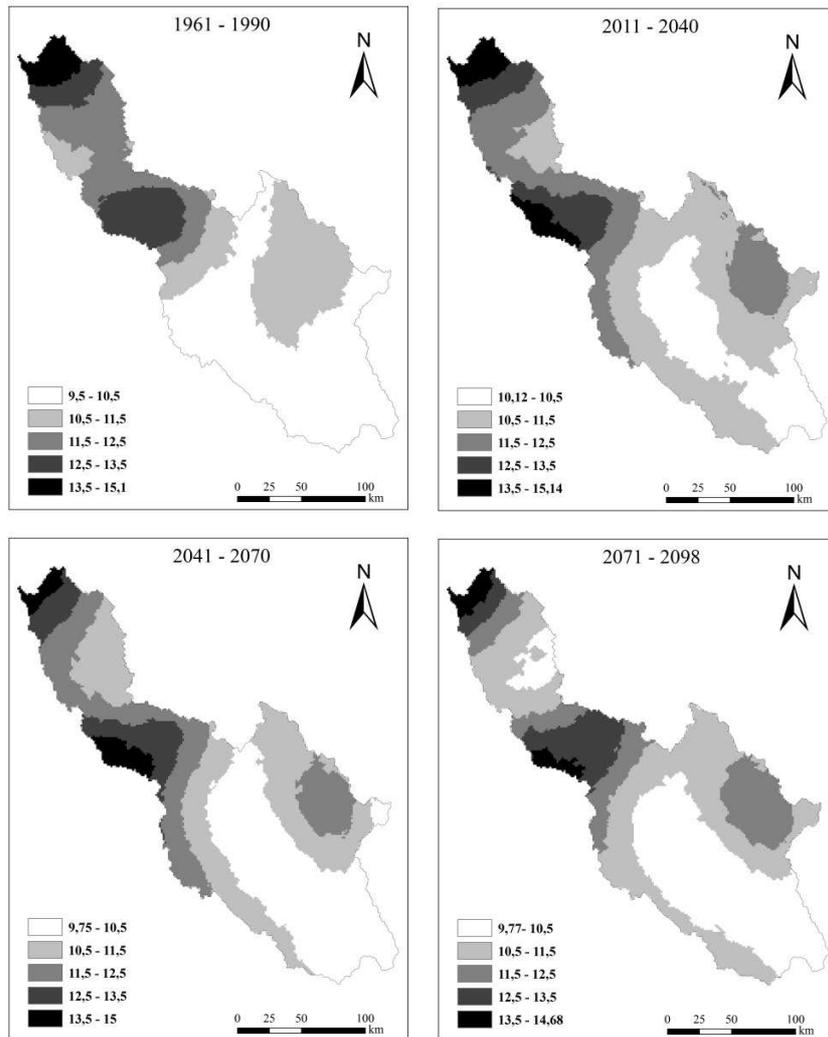


c)





e)



f)

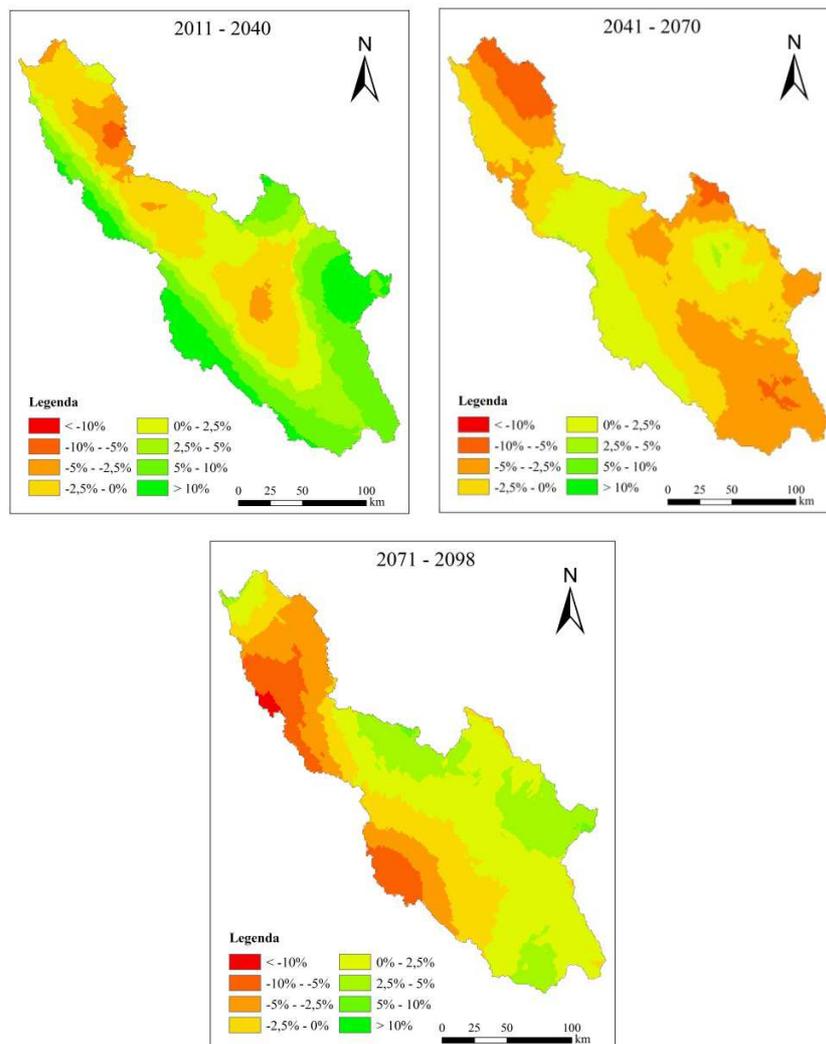


Figura 15 Mapas com os índices ICP anual (Figura a) e supra-sazonais (úmido - c e seco - e), e suas variações em relação ao período anterior (ICP anual - b, úmido - d e seco - f), para a BRM

Observam-se mapas com maior variabilidade do ICPm-ss entre os “time slices” para o período seco em relação ao úmido, sendo que para o último, há tendência de maior distribuição temporal da chuva ($ICP < 9\%$), o que está associado ao aumento de sua escassez nos meses mais chuvosos, levando um maior equilíbrio entre os totais precipitado mensais neste período. No entanto, para o período seco, observam-se, além de maior variabilidade, valores oscilando de aproximadamente 10 até 14%, ou seja, dentro da BRM, esperam-se diferentes significativas na distribuição das chuvas no período seco, sendo que na parte Sul da BRM há uma tendência de menor concentração, sendo o exposto verificado para a parte Norte.

4 CONCLUSÕES

Os resultados da precipitação anual simulada até o final do século XXI mostraram uma diminuição progressiva desta, atingindo valores até 23% menores em relação ao clima presente na BRM. O mesmo se verifica para as seis regiões agroecológicas pertencentes à bacia, ressaltando que para a época de chuvas e principalmente para o mês de março, haverá uma diminuição de 45%, o que indica uma situação crítica para o fornecimento de água na BRM. Os resultados da evaporação mensal indicam um aumento progressivo e relativamente constante desta até o final do século XXI, atingindo valores de 16% na BRM em relação ao clima presente, acentuando-se o déficit hídrico na bacia como um todo, expresso no balanço hídrico vertical (P-E) que indica um 52% de redução na disponibilidade hídrica em relação ao clima presente.

A análise do índice IMF anual, demonstrou uma tendência estatística de diminuição até o final do século XXI, indicando uma tendência de possível redução do potencial erosivo da chuva, embora tenha sido observado que existirão anos críticos em relação a este potencial erosivo, atingindo valores máximos no início da década dos anos 2020, 2050, 2080 e 2090. Especialmente, o índice IMF anual também indica uma diminuição, embora apresente incrementos na parte Central e Noroeste da BRM. Com relação ao índice ICP anual, este apresenta, ao contrário do índice IMF anual, tendência estatística de aumento, indicando incremento da irregularidade das chuvas até o final do século XXI, mesmo que as precipitações, na média, tenham apresentado diminuição. Especialmente, observou-se aumento do ICP no sentido Noroeste – Sudeste até o final do presente século.

REFERÊNCIAS

BRADLEY, R. M. et al. Threats to water supplies in the tropical Andes. **Science**, New York, v. 312, p. 17-55, June 2006.

BUJA, L.; CRAIG, T. **CCSM2 user's guide**. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2002. 95 p.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community**. Luxembourg, 1992. 97 p.

GIORGI, F. et al. Elevation dependency of the surface climate change signal: a model study. **Journal of Climate**, Boston, v. 10, n. 2, p. 288-296, Feb. 1997.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Diagnóstico de la cuenca del Mantaro, bajo la visión del cambio climático**. Lima, 2005a. 90 p.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro**. Lima, 2005b. 104 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA. **Perú: evolución de los indicadores de empleo e ingresos por departamentos, 2001-2010**. Lima, 2011. 300 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report: contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, 2007. 73 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2013: the physical science basis: IPCC Working Group I contribution to AR5**. Geneva, 2013. 1535 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC special report: emissions scenarios: a special report of IPCC Working Group III.** Geneva, 2000. 21 p.

KENDALL, M. G.; STUART, A. **The advanced theory of statistics.** 2nd ed. London: C. Griffin, 1967. v. 1, 449 p.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometrica**, Chicago, v. 13, n. 3, p. 245-259, July 1945.

MARCOTT, S. A. et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. **Science**, Corvallis, v. 339, n. 6124, p. 1198-1201, Mar. 2013.

MARENCO, J. et al. **Boletim do projeto uso de cenários de mudanças climáticas regionais em estudos de vulnerabilidade e adaptação no Brasil e na América do Sul (GOF-UK-CPTEC).** São José dos Campos: INPE, 2007. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas>. Acesso em: 10 jul. 2014.

MELLO, C. R. et al. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 73, p. 1-16, Jan. 2015.

MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202/203, p. 88-102, 2013.

MICHIELS, P.; GABRIELS, D. Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean region. In: RUBIO, J. L.; CALVA, A. (Ed.). **Soil degradation and desertification in Mediterranean environments.** Logroño: Geofoma, 1996. p. 49-70.

PERU. Ministerio de Agricultura. **Censo nacional agropecuario**. Lima, 2012. 62 p.

PERU. Ministerio de Agricultura. **Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Mantaro**: dirección de conservación y planeamiento de recursos hídricos área de aguas superficiales. Lima, 2010a. 137 p.

PERU. Ministerio de Ambiente. **El Perú y el cambio climático**: segunda comunicación nacional del Perú a la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático 2010. Lima, 2010b. 204 p.

PULGAR, V. J. **Geografía del Perú**: las ocho regiones naturales del Perú. 8. ed. Lima: Universo, 1981. 313 p.

RAMIREZ, E. et al. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16° S). **Journal of Glaciology**, Saint-Martin-d'Hères, v. 47, n. 157, p. 187-194, Mar. 2001.

REMIGIO, A. J. **Informe de síntesis sobre asuntos clave relacionados al sector de la agricultura (adaptación)**: programa de las naciones unidas para el desarrollo. Lima: PNUD, 2009. 27 p.

SEMINARIO PERMANENTE DE INVESTIGACION AGRARIA, 13., 2009, Cusco. **El problema agrario en debate**. Lima, 2010. 718 p.

THOMAS, D. et al. Adaptation to climate change and variability: farmer responses to intra-seasonal precipitation trends in South Africa. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 83, n. 3, p. 301-322, 2007.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Computer program for the kendall family of trend tests**: scientific investigations report 2005-5275. Virginia, 2005. 4 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Trends in streamflow characteristics at long-term Gaging Stations, Hawaii:** scientific investigations report 2004-5080. Virginia, 2004. 116 p.

VERGARA, W. **Adapting to climate change:** lessons learned, work in progress and proposed next steps for the World Bank in Latin America. Washington: World Bank Latin America Region, 2005. 56 p. (Sustainable Development Series, 25).

VUILLE, M. et al. Climate change and tropical andean glaciers: past, present and future. **Earth-Science Reviews**, New York, v. 89, n. 3/4, p. 79-96, Aug. 2008.

CAPÍTULO 3

Risco do solo à erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do rio Mantaro, Andes Peruanos, associado às mudanças climáticas

RESUMO

A degradação do solo pela erosão hídrica tem sido acelerada pelas atividades humanas. Este processo se agrava na Cordilheira dos Andes devido à alta declividade, escassa cobertura vegetal e chuvas esporádicas de alta intensidade, o que juntamente com a baixa profundidade dos solos, elevam o risco do solo à erosão. Objetivou-se neste estudo, analisar impactos na erosão hídrica do solo, associados às mudanças climáticas, ao longo do século XXI, através de mapas de risco à erosão, para a bacia do rio Mantaro, Andes Peruanos. A tendência temporal observada é de manutenção do risco atual à erosão ao longo do século XXI, porém, reduções na taxa de perda de solos foram observadas para todas as regiões agroecológicas e que as condições atuais já são classificadas como “muito severas” ou “extremamente severas”. Em áreas ao Centro e ao Norte foram observados aumentos progressivos da taxa de erosão até o final do cenário futuro, levando à alteração do padrão de risco à erosão. Contudo, em sub-bacias hidrográficas localizadas ao Norte da bacia, este risco tem-se apresentado como “moderado”, permanecendo assim até o final do século. Em termos médios anuais, observou-se tendência de redução do poder erosivo da chuva, contudo, o aumento da variabilidade e da concentração das chuvas observados com as mudanças climáticas, fazem com que eventos individuais de chuva tenham sua capacidade erosiva aumentada, com risco ao equilíbrio ambiental e à produção agrícola na bacia.

Palavras-chave: Equação Universal de Perda de Solos Revisada (EUPSR). Erosão hídrica. Cordilheira dos Andes. Mudanças climáticas.

ABSTRACT

Land degradation by water erosion has been accelerated by human activities. This process become more serious in the “Cordilheira dos Andes” due to its accentuated steepness, scarce land cover and irregular rainfall distribution, with high intensity events. These natural features combined to shallow and sandy soils, increase the risk of soil to erosion. The objective of this study was to analyze the impacts on soil erosion risk to Mantaro River basin (MRB), Peruvian Andes, associated to the climate change, which was evaluated only in terms of the rainfall erosivity impact. For that, the behavior of precipitation throughout XXI century was simulated by the Eta-CPTEC HadCM3 model in spatial and temporal scales of, respectively, 20 km and 3 hours, having as reference the climate change scenario SRES A1B. Soil erosion risk was assessed by RUSLE-3D model, which allowed the generation maps of soil erosion rate for each time slice in relation to the present climate. The temporal trend simulated for entire the basin is the maintenance of current level of soil erosion risk throughout the XXI century whose current risk is either “very severe” or “extremely severe”, although the reduction on the soil erosion rate for all agro-ecological regions had been simulated. However, in sub-basins located in the north and middle-south regions of MRB, it was observed progressive increases on soil erosion rates over the century, which increased the soil erosion risk classification in these areas. In addition, in sub-basins under more influence of the Andes, the risk has been classified as “moderate”, which was not change over the century, although the simulated increases on rainfall erosivity in these sub-basins. Evaluating the annual rainfall erosivity, it was observed trend to reduction, however, increase in variability and in the concentration of rainfall, given by the Precipitation Concentration Index (PCI) both as result from climate change simulation, can affect individual rainfall power erosion, representing a threaten to environmental balance and agricultural activities in the basin.

Keywords: Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Rainfall erosion. Andes mountains. Climate change.

1 INTRODUÇÃO

Segundo German Advisory Council on Global Change - WBGU (1994), em nível mundial, a erosão hídrica é a mais importante degradação do solo, englobando aproximadamente 1.093 milhões de hectares (56% das áreas agrícolas do mundo). A comunidade científica internacional reconhece que a erosão é um grave problema ambiental, entretanto, é muito difícil precisar qual sua magnitude e impactos econômicos e ambientais.

Segundo Food Agriculture and Organization of The United Nations - FAO (1993), a erosão hídrica representa em média, na Argentina, Bolívia, Brasil, Chile e Paraguai, 46% da extensão total de solos degradados pelos diferentes agentes de erosão. Segundo a Japan Agricultural Land Development Agency - JALDA (2003), a produtividade agrícola na América do Sul tem diminuído devido à erosão dos solos, a qual tem promovido acelerada degradação dos recursos naturais nesta região. A população da América do Sul não supera 10% da população mundial, embora segundo a FAO (1996), seja um dos mais ricos em termos de recursos naturais, possuindo, em nível mundial, 14% dos solos cultiváveis, 46% das florestas tropicais, 31% dos mananciais de água e 50% de flora e fauna.

A Oeste da América do Sul está localizada a Cordilheira dos Andes, composta por montanhas acidentadas e planaltos de relevo ondulado. Entre estas montanhas estão localizados os “vales inter-andinos”, locais em que se desenvolve principalmente a atividade agrícola. A erosão dos solos ocasionada pela ação da chuva nestes locais tem-se tornado um problema complexo causando, principalmente, diminuição da fertilidade da camada superficial do solo. O presente estudo foi conduzido na bacia do rio Mantaro (BRM) pois é

uma das zonas pertencentes aos vales “inter-andinos” mais produtivos do Peru. Segundo o Instituto Geofísico do Peru - IGP (2005a), o rio Mantaro é considerado um dos mais importantes dos Andes Peruanos, tanto pela sua capacidade de geração de energia elétrica quanto pela produção agrícola.

Segundo Amezquita et al. (1998), o Peru é um dos países andinos onde há diferentes estados do problema de erosão, e a primeira tentativa para avaliar as taxas com que esta ocorre foi feita por Morales et al. (1977). Desde então, até Romero (2005), têm sido escassas as pesquisas voltadas para avaliar o comportamento da erosão do solo no Peru.

Segundo o Instituto Nacional de Estadística e Informática do Peru - INEI (2011), a população dependente da atividade agrícola no Peru representa 31,6% da população total. Assim, os possíveis impactos das mudanças climáticas são preocupantes para a agricultura do Peru, em especial na BRM que, segundo o IGP (2005b), é altamente vulnerável aos eventos meteorológicos extremos. Segundo Baettig, Wild e Imboden (2007), o Peru está entre as regiões mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas no mundo, afetando as principais atividades econômicas e a qualidade de vida dos seus habitantes.

A Equação Universal de Perda de Solos (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), foi um modelo pioneiro na tentativa de simular a erosão hídrica visando sua predição, identificação do risco à erosão bem como o desenvolvimento de medidas necessárias para a prevenção da perda de solos (BESKOW et al., 2009). O modelo USLE foi desenvolvido originalmente para o uso somente nos Estados Unidos (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003) e válida para áreas menores de um hectare (SAAVEDRA, 2005). Contudo, apesar de ser um modelo empírico, baseado na combinação linear dos elementos que afetam a erosão, a USLE e suas versões revisadas RUSLE e RUSLE-3D têm sido mais aplicadas em regiões ou bacias que apresentam restrições em base de dados para calibração e validação de modelos baseados no processo (BESKOW

et al., 2009; DE KORT, 2013; DURÃES; MELLO, 2014; LI; FAN; MAO, 2014; OLIVEIRA et al., 2014; TANG et al., 2015), especialmente de solos e clima, como é o caso do presente estudo.

Os modelos RUSLE e RUSLE-3D consistem de uma versão revisada da USLE, apresentando significativas melhorias na estimativa dos fatores passivos associados à erosão, principalmente o fator topográfico. A RUSLE e RUSLE-3D são modelos empíricos, paramétricos, baseado na identificação de relações estatisticamente significativas entre as variáveis, as quais são adotadas a partir de uma razoável base de dados (RENARD et al., 2007), e que já tem sido testado e validado em diversas condições de solo, clima e manejo (AMORE et al., 2004; BESKOW et al., 2009; BONILLA; REYES; MAGRI, 2010; EFE; EKINCI; CUREBEL, 2008; LI; FAN; MAO, 2014; LU et al., 2004; MILLWARD; MERSEY, 1999; MITASOVA et al., 1996; OLIVEIRA et al., 2014; PARK et al., 2011; SEGURA et al., 2014; SHI et al., 2004; TANG et al., 2015; TERRANOVA et al., 2009; TIWARI; RISSE; NEARING, 2000). A maioria destes estudos tem demonstrado bons resultados na caracterização do risco do solo à erosão hídrica. Nesta pesquisa se estimou a perda de solo por erosão hídrica com auxílio do modelo RUSLE-3D, também uma modificação do modelo USLE, e que introduz novos conceitos na estimação do fator topográfico (fator LS) ao incorporar o impacto da convergência do fluxo, e o fator do comprimento do declive é substituído pela área de contribuição no montante, pelo que é possível aplicar o modelo em áreas maiores e mais complexas (DE KORT, 2013). Assim, o modelo é integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), possibilitando melhorias consistentes no seu desempenho. Neste sentido, é possível destacar uma evolução metodológica atual associada ao cálculo do fator topográfico e no uso da álgebra de mapas para superposição das camadas dos fatores da equação (BESKOW et al., 2009; KOULI; SOUPIOS;

VALLIANATOS, 2009; LU et al., 2004; SEGURA et al., 2014; TANG et al., 2015; ZHOU et al., 2008).

Entende-se que a capacidade da chuva de produzir erosão (erosividade) é o principal fator a ser afetado pelas mudanças climáticas cuja simulação apresenta um bom nível de aceitação (MELLO et al., 2013; NEARING, 2001; SEGURA et al., 2014). Assim, o objetivo deste estudo foi analisar o comportamento do risco dos solos à erosão na bacia hidrográfica do rio Mantaro (BRM), Andes Peruanos, associado às condições do clima presente bem como às mudanças climáticas ao longo do século XXI.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Equação Universal de Perda de Solos Revisada-3D (RUSLE-3D)

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) é um modelo empírico que prediz a perda média anual de solos pela erosão hídrica e é usada para avaliar as necessidades e práticas de conservação do solo. Segundo Farrish, Adams e Thompson (1993), a aplicação desta equação em locais de alta declividade apresenta limitações, mas é possível ser usada em nível exploratório e comparativo. Segundo Durães e Mello (2014), Mitsova et al. (1996) e Oliveira et al. (2014) os modelos revisados da USLE (RUSLE e RUSLE-3D) são mais indicados para bacias hidrográficas do que a USLE por apresentar atualizações fundamentais para caracterização do fator topográfico LS. Assim, a principal vantagem do modelo RUSLE em relação ao modelo USLE, consiste da possibilidade de ajustar o fator topográfico para declividades variáveis, considerando a contribuição do escoamento de montante nas áreas à jusante. Do

mesmo modo, o modelo RUSLE-3D introduz novos conceitos na estimação do fator topográfico (fator LS) ao incorporar o impacto da convergência do fluxo e o fator do comprimento do declive é substituído pela área de contribuição à montante.

O modelo “Revised Universal Soil Loss Equation” (RUSLE), está baseado na equação da USLE, mas reformulando a estimação dos parâmetros conforme Renard et al. (2007):

$$E = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Em que E é a perda média anual de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); R é o fator ativo associado à erosão (erosividade da chuva em $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); K é o fator erodibilidade do solo ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); L e S são os fatores associados à topografia (respectivamente, declividade e comprimento do declive, adimensional); C é o fator de cobertura vegetal; e P é o fator de práticas de conservação do solo, ambos adimensionais.

Neste estudo, o risco do solo à erosão foi realizado conforme os mesmos critérios adotados por Li, Fan e Mao (2014) e Tang et al. (2015), os quais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Classificação do risco à erosão associadas às perdas de solos (LI; FAN; MAO, 2014)

Perda de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	Risco
< 5	Muito Baixo
5 – 25	Baixo
25 – 50	Moderado
50 – 80	Severo
80 – 150	Muito Severo
> 150	Extremamente Severo

2.1.1 Comportamento da erosividade da chuva ao longo do século XXI na bacia do rio Mantaro, Andes Peruanos

Para o cálculo do fator R, foram aplicados dados de precipitação com resolução temporal de três horas, e também de precipitação média mensal, numa grade que abrange a BRM com resolução espacial de 20 quilômetros, totalizando 420 pontos no espaço da BRM e vizinhanças. Os dados foram simulados para o período observado (1961-1990), também conhecido como controle ou clima presente, quanto para os períodos futuros (“time slices”) de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2098, para o cenário de mudanças climáticas A1B, pelo GCM HadCM3, com “downscaling” pelo modelo regional Eta-CPTEC. Este cenário de mudanças climáticas, segundo Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2000), tem como referência um rápido crescimento econômico, com pequeno crescimento demográfico (considera que a população mundial diminuirá a partir de meados do presente século), bem como o desenvolvimento de tecnologias eficientes.

Inicialmente, o cálculo do fator R foi realizado com base no fator EI_{3h} , uma vez que a menor resolução temporal simulada foi de 3 horas. Para isto, foram analisadas as seguintes variáveis: duração do evento, precipitação acumulada no evento, intensidade média da precipitação por evento, energia da chuva por lâmina precipitada, energia total da chuva e intensidade máxima da chuva em 3 horas consecutivas. Assim, para o cálculo do EI_{3h} , foram aplicadas as seguintes equações (WISCHMEIER; SMITH, 1978):

$$E_c = 0,1191 + 0,0873 \cdot \text{Log}_{10} \cdot I_t \quad I_t < 76 \text{ mm h}^{-1} \quad (2)$$

$$E_c = 0,283 \quad I_t > 76 \text{ mm h}^{-1} \quad (3)$$

Em que E_c é a energia cinética da chuva por unidade de lâmina precipitada ($\text{MJ ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$) e I_t é a intensidade média da chuva, em mm h^{-1} . A energia cinética total da chuva no período da tormenta (E_t) em MJ ha^{-1} , é calculada usando a seguinte relação:

$$E_t = E_c \cdot \Delta P \quad (4)$$

Em que ΔP é a lamina total precipitada no evento, em mm.

O fator R, descrito por Renard e Freimund (1994), consiste da média da soma anual dos valores individuais de EI_{30} , sobre longos períodos de tempo (mínimo de 15 anos para uso da USLE ou RUSLE-3D). Para as condições deste estudo, conforme já comentado, o fator R foi considerado como a média da soma anual dos valores individuais de EI_{3h} , tal como aplicado por Vrieling, Sterk e De Jong (2010). Assim, tem-se:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m (E_{3h})_i \cdot (I_{3h})_i \right)_j}{n} \quad (5)$$

Em que R é expresso em $\text{MJ mm (ha h ano)}^{-1}$, m é o número de eventos individuais de precipitação num dado ano j, e n corresponde ao número de anos avaliados, que no caso deste estudo, corresponde a 30 anos (time slices).

Contudo, a intensidade máxima em 3 horas é menor que a intensidade em 30 minutos, ou seja, o valor do fator R ficará subestimado. Assim, é necessário aplicar uma metodologia complementar para estimação do fator R. Contudo, inexistem postos meteorológicos com séries históricas na BRM que permitam o estudo da erosividade da chuva conforme seu conceito original, ou

seja, com a aplicação da intensidade máxima em 30 minutos consecutivos. Neste contexto, foi aplicada uma relação existente entre o Índice de Fournier Modificado (IMF médio) e a erosividade média mensal (equação 6) que foi proposta por Sonder et al. (2002) para os Andes colombianos, e foi aplicada ao presente estudo por não haver um estudo próprio dentro da bacia, conforme descrito anteriormente, e também devido às condições geomorfológicas semelhantes entre ambas as regiões estudadas (Cordilheira dos Andes Tropicais).

$$R = 161,0 \cdot (MF \text{ Im})^{0,552} \quad (6)$$

Assim, para cada ponto de grade de simulação climática foi calculado o fator R com base na média entre os valores gerados pelas equações 5 e 6 para a BRM. Uma vez gerado o fator R para cada “times slice” e para cada um dos 420 pontos, a geoestatística foi aplicada para geração dos mapas com base na krigagem ordinária. Também foi desenvolvida a distribuição temporal do fator R para a BRM, assim como a avaliação da tendência temporal através do teste estatístico de Mann Kendall. O fator R

2.1.2 Mapa de Solos para determinação do fator K para a BRM, Andes Peruanos

Na BRM, predominam as associações Leptosolos, caracterizadas por apresentar solos muito pedregosos e pouco desenvolvidos, associadas à topografia montanhosa, portanto, altamente vulneráveis à erosão e com potencial agrícola limitado (IGP, 2005a).

Outra associação de solos existente são os Regossolos, os quais são profundos e com boa drenagem. Possuem potencial agrícola limitado, mas são eficientes para recarga de água subterrânea (IGP, 2005a).

A associação dos Cambissolos também se faz presente na BRM, localizada na parte leste da bacia. Nesta associação, os solos apresentam potencial agrícola mediano, mas também limitações pela sua pouca profundidade (IGP, 2005a).

Quando não se dispõe de análises físicas e químicas de solos necessárias para aplicação de equações para estimativa do fator K, uma alternativa é uso de uma metodologia simplificada proposta pela FAO (1990) na qual se usa a classificação de solos e a textura superficial, inferida com base nas associações de solos, como parâmetros. Assim, com base em tabelas publicadas pela FAO (1990), estimou-se o fator K para a grande maioria dos solos da BRM.

Contudo, além do estudo do IGP (2005a), um estudo edafológico com maior detalhamento de áreas com bom potencial e desenvolvimento agrícola na BRM, conhecida como Vale Agrícola do Rio Mantaro, foi desenvolvido pelo Ministério de Agricultura do Peru (PERU, 1978). Esta zona possui características edafoclimáticas apropriadas para a atividade agrícola, estando localizada na parte média da bacia, com área de 8.120 km² e uma área amostrada de 562 km², entre 3.200 e 3.800 metros de altitude, em topografia que varia desde plana a ondulada, com gradientes suaves e de média magnitude, e precipitação anual entre 670 a 895 mm. Este estudo detalhado classificou os solos do Vale Agrícola do rio Mantaro em seis grupos e diferentes subgrupos. Na Figura 1^a, apresenta-se o mapa de solos detalhado em grupos e subgrupos para o Vale Agrícola do rio Mantaro e na Figura 1b, o mapa de solos final para a BRM.

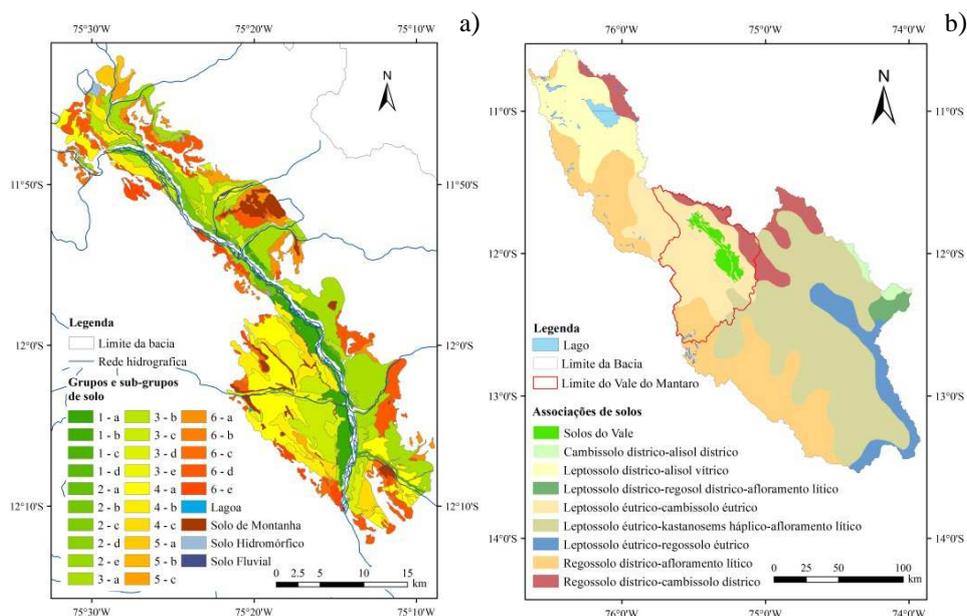


Figura 1 Mapa de solos detalhado em grupos e subgrupos do Vale Agrícola do rio Mantaro (a) e mapa de solos final para a BRM (b), Andes Peruanos

Fonte: Peru (1978)

Nas Tabelas 2, 3 e 4, apresentam-se, respectivamente, valores de textura e matéria orgânica dos solos do Vale Agrícola do Rio Mantaro para a camada mais superficial (profundidade de raízes), realizada pelo Peru (1978), códigos de permeabilidade do solo e códigos de estrutura do solo, permitindo estimar o fator K com base nas seguintes equações (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

$$K = \frac{[(2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - mo) + 3,25 \cdot (s - 2) + 2,5 \cdot (p - 3)]}{100} \cdot 0,1318 \quad (7)$$

Em que K é o fator de erodibilidade do solo [$t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$]; mo corresponde à concentração de matéria orgânica (%); s é o código da estrutura do solo e p é o código da permeabilidade do solo e M é o fator que representa a textura do solo, calculado como o produto das frações do tamanho das partículas do solo entre 0,002 e 0,1 mm, pela seguinte equação:

$$M = [100 - \% \text{ argila }] \cdot [\% \text{ silte } + \% \text{ areia muito fina }] \quad (8)$$

Tabela 2 Valores de % Textura e %MO no vale do rio Mantaro

SÉRIES	Grupo	Subgrupo	Areia (Ao %)	Argila (Ar %)	Silte (Lo %)	% MO	
Huancayo	Hn 1	III	a	51,8	15,2	33,0	2,0
Chamiseria	Cha2	VI	a	34,8	23,2	42,0	4,3
Azapampa	Aa 3	VI	d	24,8	30,2	45,0	3,0
Palian	Pl 4	VI	d	50,8	14,2	35,0	2,2
San Pedro	Pd 5	IV	a	66,8	10,2	23,0	1,9
Sapallanga	S p 6	III	a	50,8	17,2	32,0	1,7
Maravilca	Mi 7	I	c	58,8	8,2	33,0	1,1
Huayao	Ha 8	IV	a	40,8	18,2	41,0	3,4
Huayna Capac	Hc 9	VI	d	60,8	9,2	30,0	2,9
Apata	Ap 10	III	b	70,8	4,2	25,0	1,1
Huacho	He 11	VI	c	22,8	26,2	51,0	6,1
Huachac	Hua 12	IV	c	47,2	22,6	30,2	3,2
Pilcomayo	Py 15	I	a	26,6	46,4	27,0	2,3
Seco	Se 16	III	a	38,6	14,4	47,0	1,5
Yanamuclo	Ym 17	III	a	37,0	23,4	39,6	2,1
San Jerónimo	Je 18	III	a	52,6	17,8	29,6	2,1

Hualhuas	Hs 19	III	a	47,4	19,0	33,6	2,3
Huamancaca	Hu 20	I	a	30,2	39,4	30,4	1,1
Ahuac	Ah 21	V	b	26,6	37,8	35,6	1,2
Mantaro	Ma 22	II	b	60,8	9,2	30,0	3,6
Chicche	Chi 23	VI	a	40,6	13,2	46,2	6,4

Fonte: Peru (1978)

Tabela 2, conclusão

SÉRIES	Grupo	Subgrupo	Areia (Ao %)	Argila (Ar %)	Silte (Lo %)	% MO	
Orcotuna	Or 25	I	a	30,6	29,4	40,0	3,0
Chupaca	Chu 26	III	c	31,6	33,4	35,0	2,3
Pancan	Pn 27	III	a	24,8	30,2	45,0	1,9
Paucar	Pr 28	V	c	31,8	23,3	44,9	4,6
Jauja	Ja 29	IV	b	8,8	42,2	49,0	1,1
Yauli	Ya 30	III	b	46,8	19,2	34,0	1,6
Huertas	Hr 31	III	a	39,8	21,2	39,0	1,4
Mito	Mo 32	II	b	30,0	15,5	54,5	1,6
La Libertad	Ll 40	IV	b	31,7	25,2	43,1	4,6
Sicaya	Si 42	III	e	46,7	21,2	32,1	2,1
Concepción	Co 48	VI	a	42,8	19,2	38,0	2,9
Quispic	Qu 49	V	a	38,8	18,5	42,7	1,5
Jallanna	Jm 50	III	b	55,8	15,2	29,0	3,2
Lunahuaná	Lu 51	VI	a	58,8	17,2	24,0	5,9
Cunas	Cu 52	III	e	53,8	17,2	29,0	6,4
Palias	Pa 53	VI	e	66,8	7,2	26,0	4,0
San Luis	Ls 54	VI	e	52,8	9,2	38,0	5,6

Fonte: Peru (1978)

Tabela 3 Códigos de permeabilidade do solo

Código	Classificação	Textura	Condutividade hidráulica saturada (cm/h)
6	Muito lento	Argila limosa, argila.	< 0,125

5	Lento	Franco argila limosa, argila arenosa.	0,125 - 0,5
4	Moderadamente lento	Franco argila arenosa, franco argiloso.	0,5 - 2,0
3	Moderada	Franco, franco limoso.	2,0 - 6,0
2	Moderadamente rápida	Areia argiloso, franco arenoso.	6,0 - 12,5
1	Muito rápida	Areia	> 12,5

Tabela 4 Códigos de estrutura do solo

Código	Classe de estrutura	Comprimento (mm)
4	Laminar, prismática, colunar, massiva, blocos e granular muito grossa.	> 10
3	Granular média, irregular média e granular grossa.	2 - 10
2	Granular fina e irregular fina.	1 - 2
1	Granular muito fina e irregular muito fina.	< 1

2.1.3 Fator Topográfico LS para a BRM, Andes Peruanos

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é a referência básica para os estudos referentes a este fator. Para a BRM, o MDE, desenvolvido com base nas imagens do projeto “Shuttle Radar Topographic Mission” (SRTM), desenvolvido pela Agência Nacional Aeronáutica e Espacial (NASA) dos Estados Unidos, com resolução espacial de 90 m, está apresentado na Figura 2a. Em comparação com outros modelos topográficos disponíveis de melhor resolução como, por exemplo, o ASTER GDEM (30 m), o modelo SRTM DEM, apresenta uma maior precisão, porém uma melhor representação da realidade (ASTER GDEM VALIDATION TEAM, 2009; DATTA; SCHACK-KIRCHNER, 2010; FORKUOR; MAATHUIS, 2012; WANG; YANG; YAO, 2012).

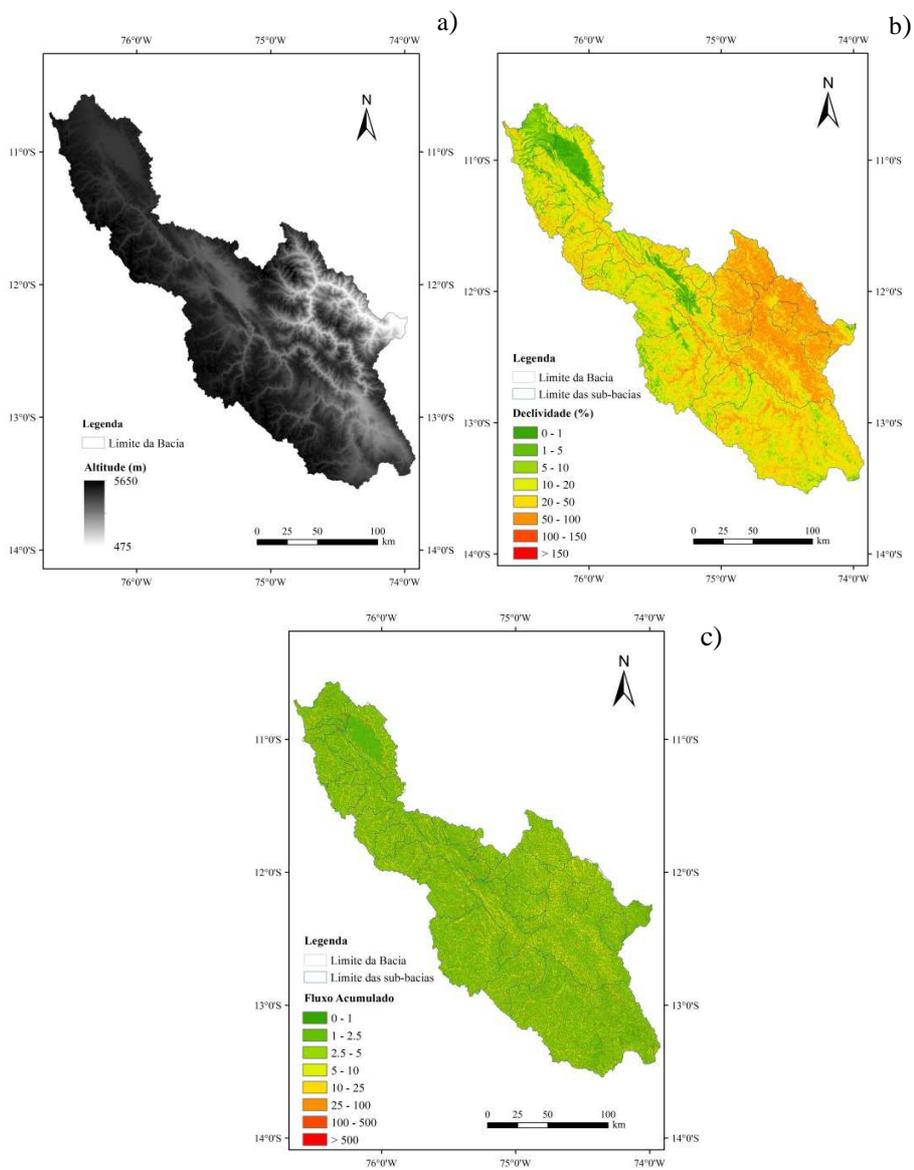


Figura 2 Modelo Digital de Elevação (MDE) (a) e mapas de declividade (%) (b) e de fluxo acumulado (c) para a BRM, Andes Peruanos

O fator LS corresponde ao efeito da topografia nas condições de vulnerabilidade à erosão. Está associado ao comprimento da declividade (L) e sua inclinação (S). Quando tem sido avaliada a erosão do solo em escala de bacias hidrográficas usando os modelos USLE ou RUSLE, o maior problema tem sido associado ao cálculo do fator LS, devido ao conceito original baseado em parcelas experimentais, no que surgem inconvenientes na estimação de L. Isso tem levado a estudos que assumem um valor de referência para L, fazendo com que o fator LS dependa somente da declividade do terreno, o que é claramente não representativo.

O modelo RUSLE-3D supõe uma mudança conceitual quanto à estimação do fator LS, assim, autores como Biesemans, Meirvenne e Gabriels (2000), Desmet e Govers (1996a, 1996b), Hickey, Smith e Jankowski (1994), Mitasova et al. (1996), Moore e Burch (1986), Moore e Wilson (1992) e Olmos e Jégat (2001), têm desenvolvido algoritmos de fluxo, baseados no MDE, para determinar o comprimento do fluxo acumulado superficial e, em consequência, o fator LS. Estas novas relações baseadas na teoria da potência do escoamento unitário incluem a influência da convergência e divergência do fluxo. Assim, o uso de algoritmos associados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para o cálculo do fator LS, é indispensável.

Mitasova et al. (1996) desenvolveram uma equação para a estimativa do fator LS com auxílio de um SIG e foi aplicada por Ashiagbor et al. (2013) e Pelton, Frazier e Pickilingis (2014), incorporando o impacto pela convergência do fluxo, substituindo o comprimento da declividade (L) pela área tributária a montante por unidade de largura da curva. O conceito de contribuição de área

requer a geração de um mapa de fluxo acumulado. Para cada pixel, calculam-se a declividade, a direção de fluxo e a quantidade de linhas de fluxo acumulado à montante daquele *pixel*. Segundo Ashiagbor et al. (2013), esta metodologia para o cálculo do fator LS tem sido adotada como a relação mais adequada para a integração ao SIG. Assim, a metodologia aplicada a este estudo para a obtenção do fator LS com base no MDE, é aquela desenvolvida por Pelton, Frazier e Pickilingis (2014), que com o suporte da álgebra de mapas, permitiu aplicar a equação desenvolvida por Mitasova et al. (1996):

$$LS = (m + 1) \left(\frac{[\text{Fluxo acumulado}] \cdot [\text{Grid}]}{22,13} \right)^m \left(\frac{[\sin(\text{Slope})]}{0,0896} \right)^n \quad (9)$$

Em que [Fluxo acumulado]•[Grid] corresponde à área tributária a montante por unidade largura da curva (m); (Slope) é a declividade em graus; m e n são coeficientes empíricos que dependem do tipo de fluxo, sendo sugerido os valores 0,6 e 1,3 respectivamente, os quais já foram usados nas condições dos Andes Bolivianos por De Kort (2013). Na Figura 2b, está apresentado o mapa de declividade e na Figura 2c, o de fluxo acumulado, baseados no MDE da BRM, os quais correspondem aos mapas base para obtenção do fator LS.

2.1.4 Determinação dos fatores C e P para a BRM, Andes Peruanos

O fator C refere-se ao efeito das coberturas vegetais na atenuação do processo erosivo do solo. O fator C, na equação da USLE, RUSLE e RUSLE-3D é considerado um fator atenuante e tem valores entre zero (0) e um (1), este último correspondendo a áreas sem cobertura vegetal. Enquanto aumenta a cobertura vegetal em densidade e frequência, o valor de C tende a diminuir.

A estimação dos valores do fator C médio anual foi realizada com base na descrição dos diferentes tipos de cobertura vegetal existentes na BRM, os quais estão apresentados na Figura 3. Na sequência, na Tabela 5, estão apresentados os usos, bem como os valores do fator C adotados para as condições da BRM.

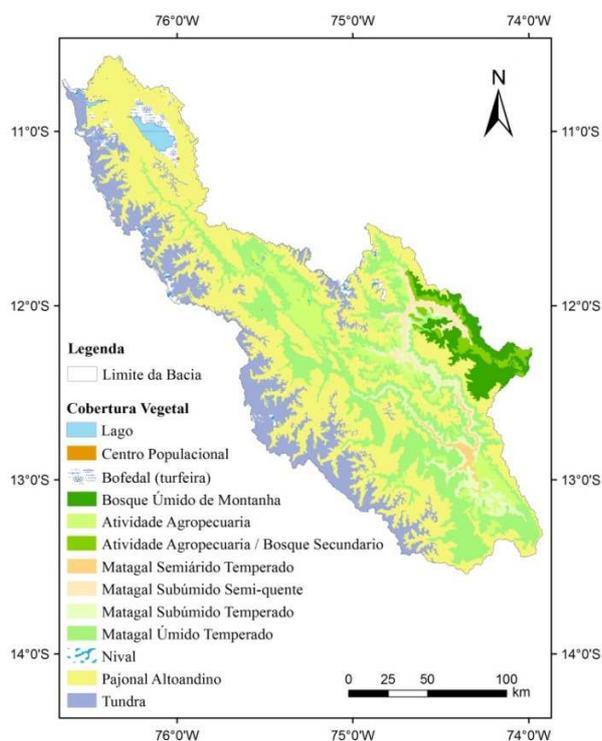


Figura 3 Mapa de uso do solo da BRM, Andes Peruanos
Fonte: IGP (2005a)

Tabela 5 Coberturas vegetais e as referências do cálculo do fator C

Tipo de uso do solo	Referência	Cobertura Vegetal	Coberta com solo	% Cobrimento	Tipo	Fator C
Atividade Agropecuária	Delgado e Vásquez (1997)					0,545
Atividade Agropecuária / Bosque secundário	Delgado e Vásquez (1997)					0,293
Bofedal (turfeira)	IGP (2005a)*	Plantas herbáceas	50	80	G	0,012
Bosque Úmido de Montanha	IGP (2005a)*	75-40, 90-70, NC				0,020
Matagal Úmido Temperado	IGP (2005a)*	Matagal	50	60	G	0,038
Matagal Semiarido Temperado	IGP (2005a)*	Matagal	25	40	G	0,090
Matagal Subúmido Semi-quente	IGP (2005a)*	Matagal	50	60	G	0,038
Matagal Subúmido Temperado	IGP (2005a)*	Matagal	25	20	W	0,220
Nival						1,000
Pajonal Altoandino	IGP (2005a)*	Plantas herbáceas	25	20	W	0,200
Tundra	IGP (2005a)*	Plantas herbáceas	25	40	W	0,130

*Inferido conforme proposição de Wischmeier e Smith (1978).

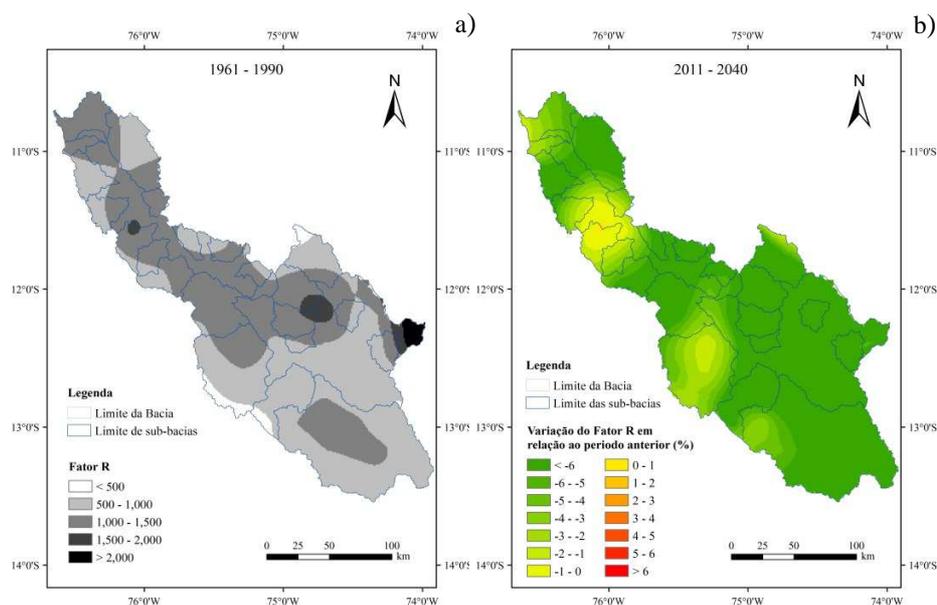
Segundo McCool et al. (1987), o fator P é o menos confiável, e representa principalmente como as condições de superfície influenciam no sistema hidráulico de fluxo e foi desenvolvido para refletir as práticas edáficas e mecânicas de conservação do solo. Na BRM, não se tem referência ou registro de que práticas de conservação tenham sido adotadas, além do fato de que na maior parte da bacia o pastoreio extensivo é predominante. Assim, foi considerado neste estudo, o valor mais crítico, igual a um (1), ou seja, sem práticas de conservação, mesmo para o Vale Agrícola do rio Mantaro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento espacial e temporal da erosividade média anual da chuva (fator R) na BRM, Andes Peruanos

Na Figura 4, estão apresentados mapas com a distribuição espacial do fator R para os diferentes “time slices”. Em geral, para todos os períodos, há tendência de maiores valores do fator R nas regiões central e leste da BRM, embora existam zonas com valores mais altos do centro para Norte, principalmente. Os valores do fator R para cada “time slice” foram subdivididos em faixas de intensidade, estimando-se, para todos os “time slices”, um valor médio do fator R entre 500 e 1.000 MJ mm (ha h ano)⁻¹, embora existam regiões com valores superiores a 2.000 MJ mm (ha h ano)⁻¹, notadamente para o clima presente e na região central da BRM. Há uma nítida redução nas áreas com valores do fator R superiores a este valor ao longo do século, demonstrando uma tendência de redução do poder erosivo na escala de tempo anual e na média do *time slice* ao final do século XXI.

Na parte serrana ou cordilheira da BRM, todos os “time-slice” apresentaram valores notadamente mais altos a Noroeste da BRM. Na região central, também foram observados valores mais elevados que no restante da BRM, contudo, com o mesmo comportamento descrito acima de redução dos valores, abrangendo as partes baixas das sub-bacias “Pariahuanca” e “Huanchuy” no Centro-Leste, e “Cunas”, “Achamayo” e “Shullcas” no Centro-Oeste. Esta tendência de redução gradativa do potencial erosivo ao longo do século é fruto da redução dos totais precipitados em toda a BRM, simulado com base no cenário A1B de mudanças climáticas pelo modelo Eta-CPTEC/HadCM3.



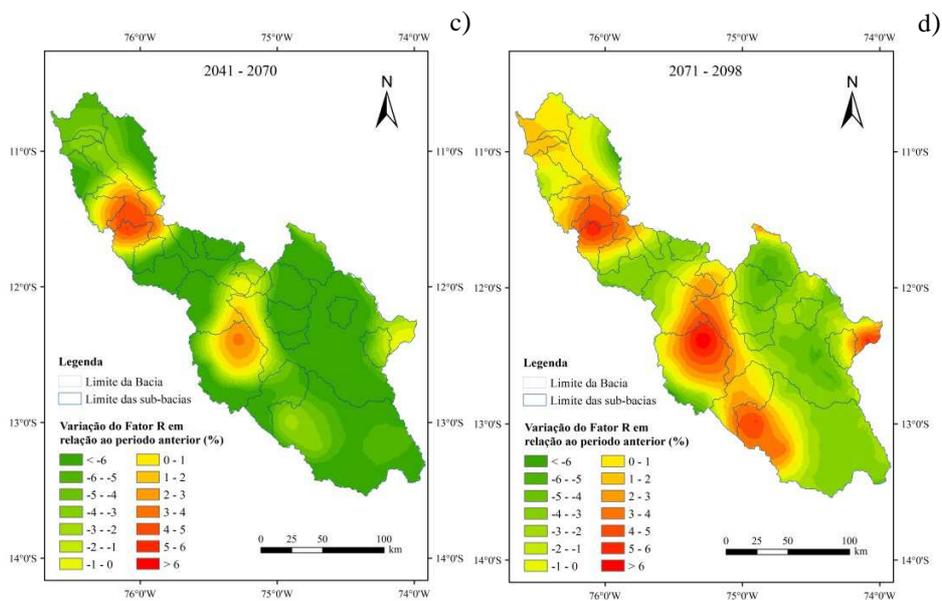


Figura 4 Distribuição espacial do fator R no clima presente (a) e os valores de variação em relação ao período anterior (b, c, d), ao longo do século XXI para a BRM, Andes

Em nível temporal, observa-se na Figura 5a, diminuição do potencial erosivo médio da chuva até o final do século XXI, para as regiões agroecológicas, bem como para a BRM como um todo. A região Selva Alta apresentou os valores mais elevados do fator R, seguida pela região Yunga, tanto para o clima presente quanto para os *times slices* futuros. Este comportamento do potencial erosivo da chuva para a região Serra Alta está vinculado ao fato de que esta região apresenta características climáticas muito próximas daquelas observadas na região da Floresta Amazônica, ou seja, um clima equatorial, com totais precipitados consideravelmente mais elevados.

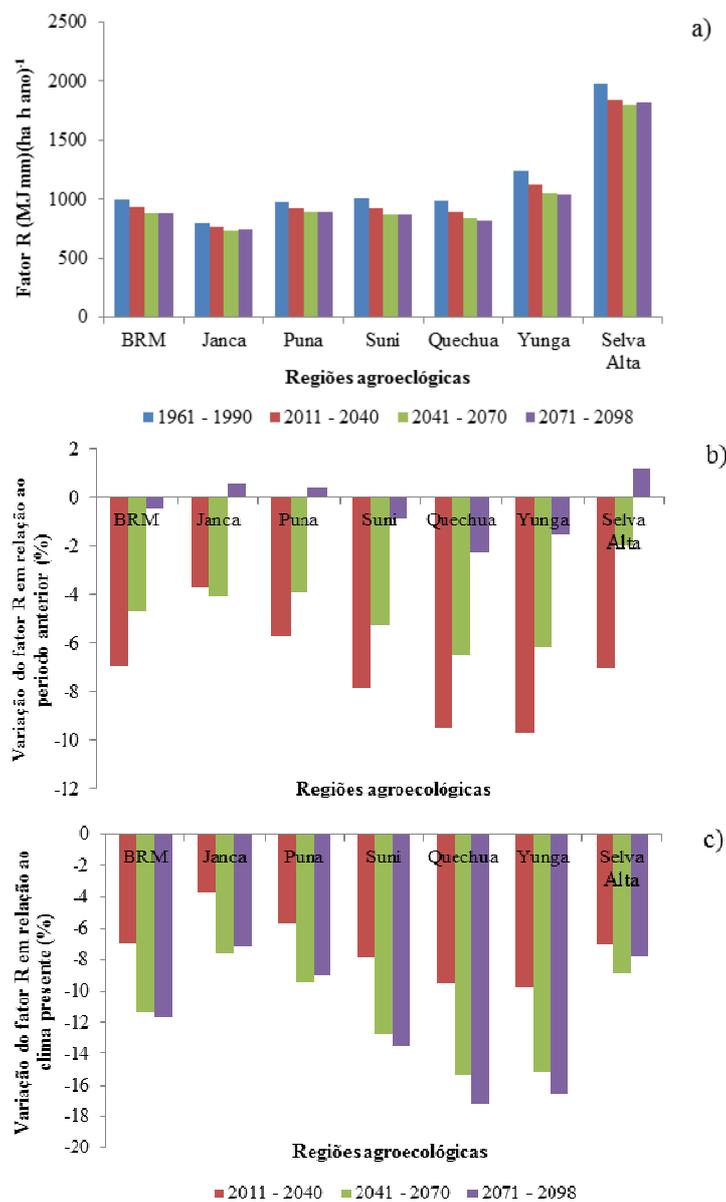


Figura 5 Distribuição do potencial erosivo da chuva (fator R) para as zonas agroecológicas da BRM, Andes Peruanos, ao longo do século XXI (a), variação deste em relação ao período anterior (b), e variação em relação ao clima presente (c)

Observa-se na Figura 5b que as maiores diminuições, entre períodos consecutivos, do potencial erosivo da chuva acontecem na transição do clima presente para o primeiro “time slice” (2011-2040), exceto para a região Janca. A região Yunga apresenta a maior redução, quase 10% menor em relação ao clima presente. Além disto, observa-se na Figura 5c, para a BRM como um todo e também para as regiões Suni, Quechua e Yunga verificam-se maiores decréscimos do fator R em relação ao clima presente até o final do século, embora numa taxa menor quando se analisa os dois últimos “time slices”. Contudo, nas regiões Janca, Puna e, de forma mais consistente, Selva Alta, existe uma inflexão do potencial erosivo da chuva no último “time slice” (2071-2098) em relação ao anterior, significando um ligeiro aumento do potencial erosivo, cujos valores foram de 0,56%, 0,38% e 1,15% que representam um aumento de $4 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $3 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e $21 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ respectivamente.

Observa-se na Figura 6a, em nível de sub-bacias, a que apresentou, em média, maior potencial erosivo da chuva é a sub-bacia Yauli. Assim, 13 das 24 sub-bacias apresentam, em média, um potencial erosivo da chuva maior do que a média da BRM.

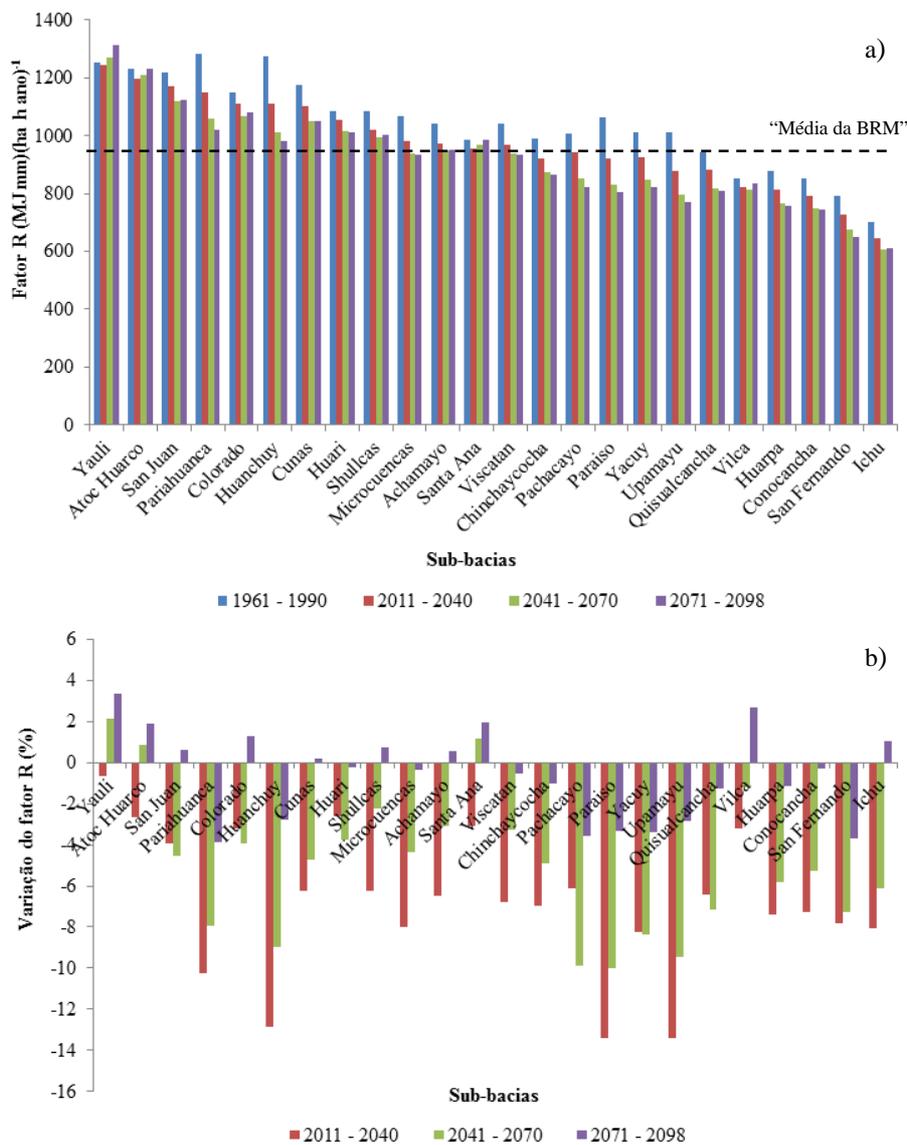


Figura 6 Distribuição do potencial erosivo da chuva (fator R) para as sub-bacias da BRM, Andes Peruanos, ao longo do século XXI (a), variação deste em relação ao período anterior (b)

Observa-se na Figura 6b, ainda que, em 10 sub-bacias houve variação positiva no último *time slice* (2071-2098) em relação ao anterior (2041-2070), destacando-se Yauli, Vilca, Santa Ana, Atoc Huacro, Colorado, Ichu, Shullcas, San Juan, Achamayo e Cunas. Para todas as demais sub-bacias, verificou-se redução consecutiva da perda de solo ao longo do cenário futuro.

Observa-se na Figura 7a, a tendência temporal do fator R anual para os valores médios da BRM, a qual apresenta uma tendência estatística negativa pelo teste de Mann Kendall com um nível de significância de 5% e um valor do Z_{M-K} de -3,68.

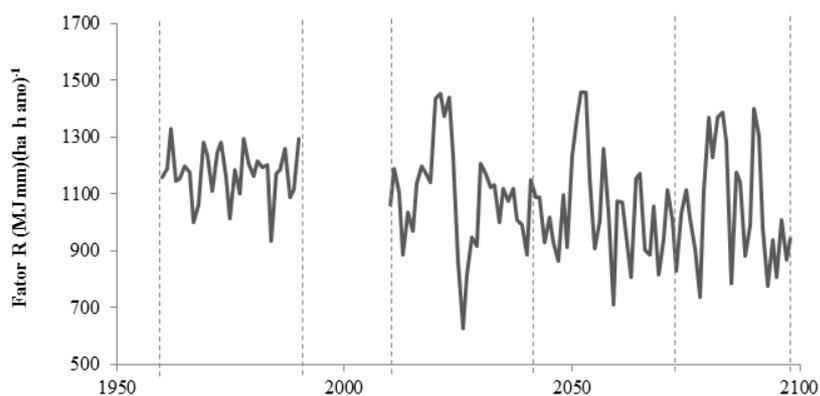
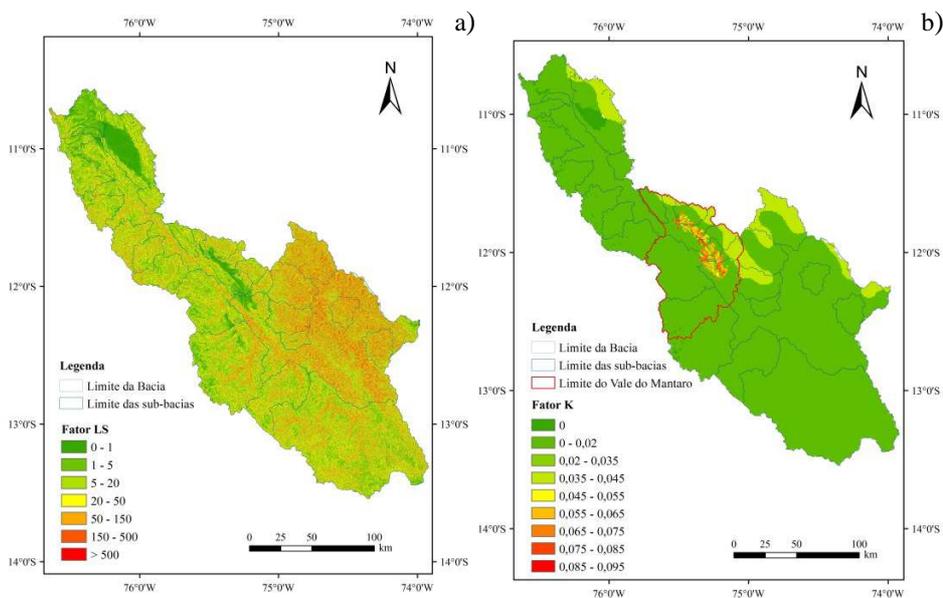


Figura 7 Distribuição temporal do potencial erosivo da chuva (fator R) para a BRM, Andes Peruanos, ao longo do século XXI

3.2 Distribuição espacial dos fatores passivos da RUSLE-3D para BRM, Andes Peruanos

Na Figura 8a está apresentado o mapa do fator LS para a BRM. A concentração dos maiores valores do fator topográfico está localizada na zona Centro-Leste da BRM, especificamente nas sub-bacias “San Fernando”, “Pariahuanca”, “Huanchuy”, Paraiso”, “Viscatan” e a parte Sul da sub-bacia “Microcuencas”. As percentagens das áreas para diferentes faixas do fator LS mostram uma maior concentração de valores entre 5 e 50, totalizando 45% da área da BRM. Os valores correspondentes à média e mediana são, respectivamente, iguais a 47,5 e 20,5. De forma geral, o comportamento do fator topográfico LS na BRM permite inferir que esta bacia, do ponto de vista da influência das condições topográficas, apresenta alta vulnerabilidade natural à erosão do solo uma vez que este fator caracteriza as condições de escoamento superficial especialmente na velocidade deste e na capacidade hidráulica de transporte dos sedimentos (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Para estas condições, cuidados com o uso do solo e proteção da superfície são fundamentais para redução do risco do solo à erosão, especialmente, nas vertentes.



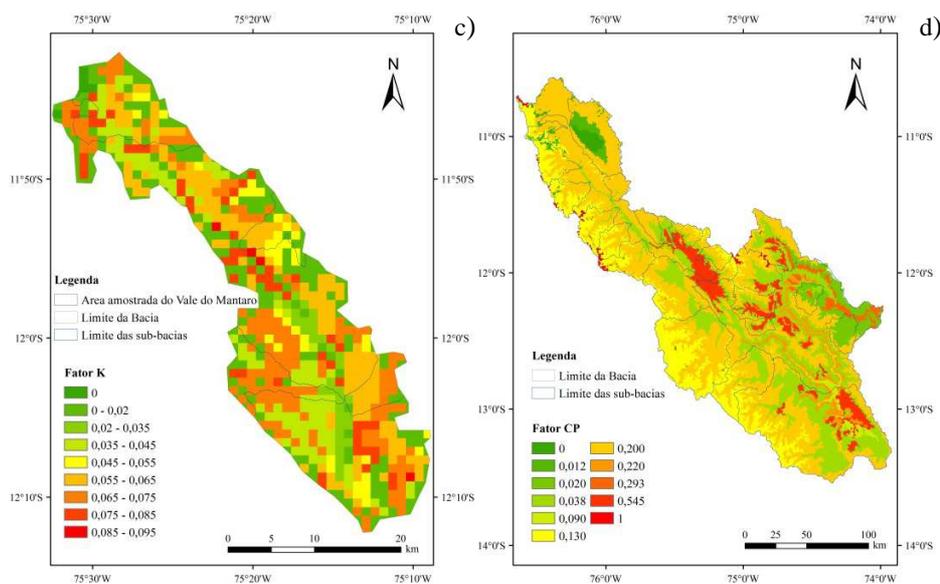


Figura 8 Mapas do fator LS (a), erodibilidade do solo (BRM - b e vale do Mantaro - c) e fator CP (cobertura vegetal e manejo do solo) (d) para a BRM, Andes Peruanos

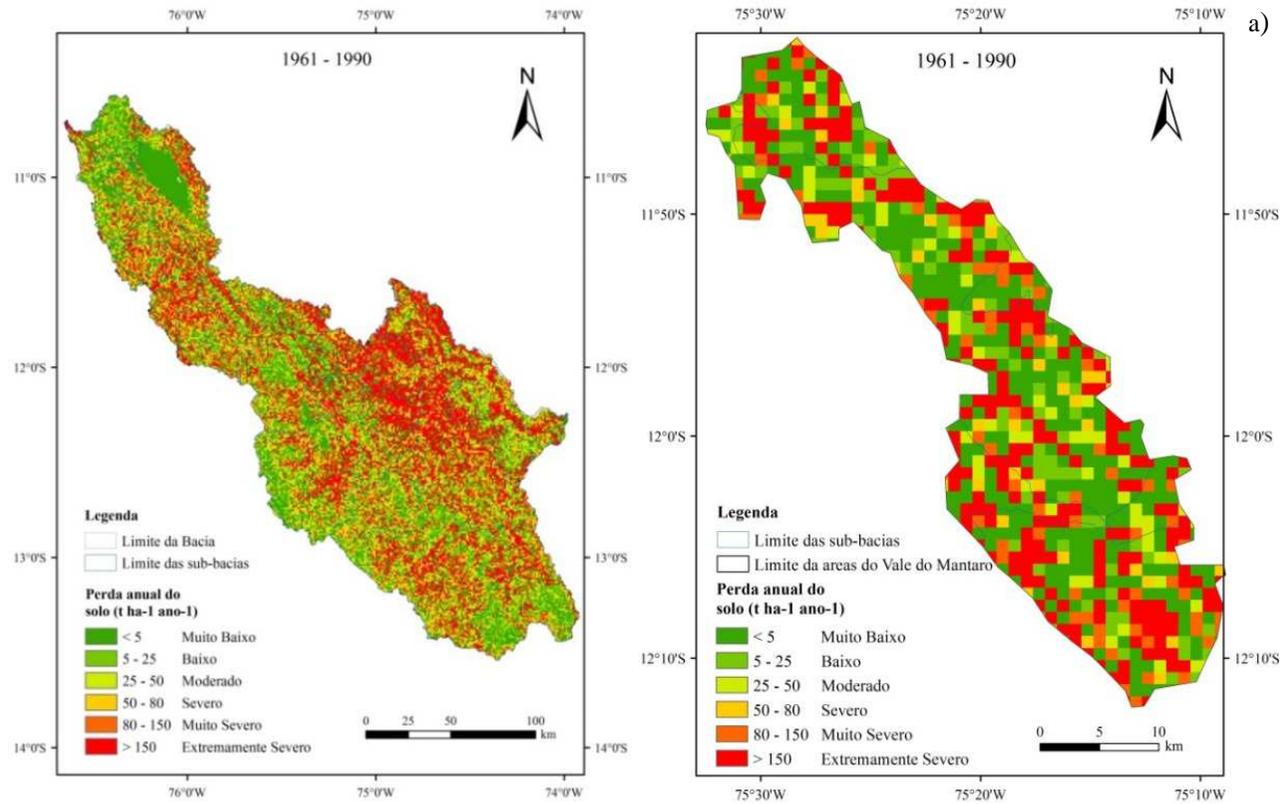
O mapa do fator K (erodibilidade do solo) está apresentado nas Figuras 8b e 8c, com valores que se iniciam em zero (corpos d'água) até 0,0954, este último calculado para alguns solos do vale agrícola do rio Mantaro. Nota-se que em grande parte da BRM os valores encontram-se entre 0 e 0,045, e foram estimados segundo as associações de solos recomendadas pela FAO (1990). Segundo Larios (2014), as propriedades do solo que influenciam na erodibilidade são as mesmas que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade, a capacidade de armazenamento de água e que oferecem resistência às formas de dispersão, salpico, abrasão, transporte e escoamento

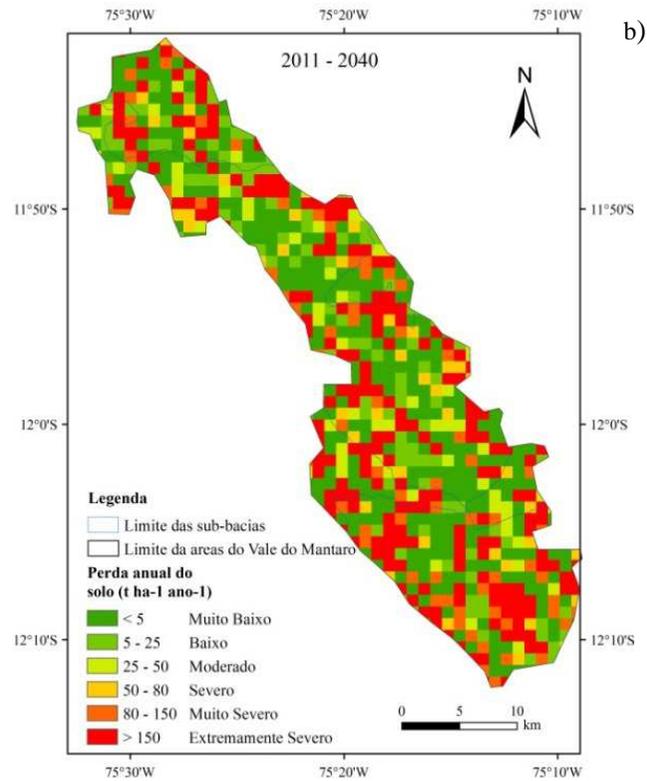
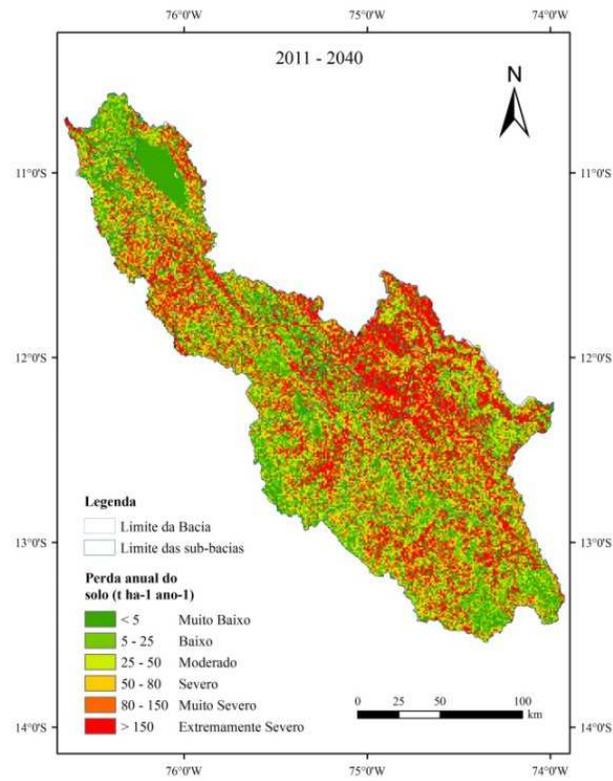
pelas chuvas. No entanto, as associações de solos para a BRM, descritas anteriormente, são constituídas para solos com textura variando de média a arenosa, rasos e com baixa fertilidade natural, o que caracteriza tais unidades pedológicas com elevado grau de susceptibilidade à erosão. É importante ressaltar as diferenças qualitativas entre as bases de dados disponíveis para os solos da BRM como um todo (sem análises físicas e, ou, químicas) em relação à base disponibilizada para o Vale Agrícola do rio Mantaro (baseada em análises laboratoriais da camada superficial). Esta última permitiu inferências mais embasadas sobre o comportamento da erodibilidade dos solos, haja vista a existência de dados de textura e matéria orgânica. Assim, é possível que haja uma subestimação do fator K para as associações de solos sugeridas pela FAO (1990), contudo, estas são as únicas informações pedológicas disponíveis para grande parte da BRM.

O fator CP para a BRM (P foi fixado igual a 1) e está apresentado na Figura 8d. Neste mapa, os valores começam em zero (0) para os corpos d'água em que não existe erosão hídrica, a um (1), para solos descobertos, como pode ser observado em áreas a Oeste da bacia. Observa-se que o Vale Agrícola do rio Mantaro possui valores relativamente altos, estimados com base na média ponderada das áreas de produção no vale, segundo os tipos de cultivo, que na maioria são tubérculos, hortaliças e cereais. Nas partes mais altas da BRM, têm-se valores relativos baixos (0,13 – 0,2) os quais caracterizam as coberturas “Tundra” e “Pajonal Altoandino” que apresentam plantas herbáceas e gramíneas cuja capacidade de atenuação dos impactos de gotas de chuvas é limitada. Observa-se ainda que nas partes mais altas a Oeste da bacia, tem-se valores altos do fator C, devido às temperaturas muito baixas que restringem o desenvolvimento da vegetação para a proteção contra os impactos da chuva.

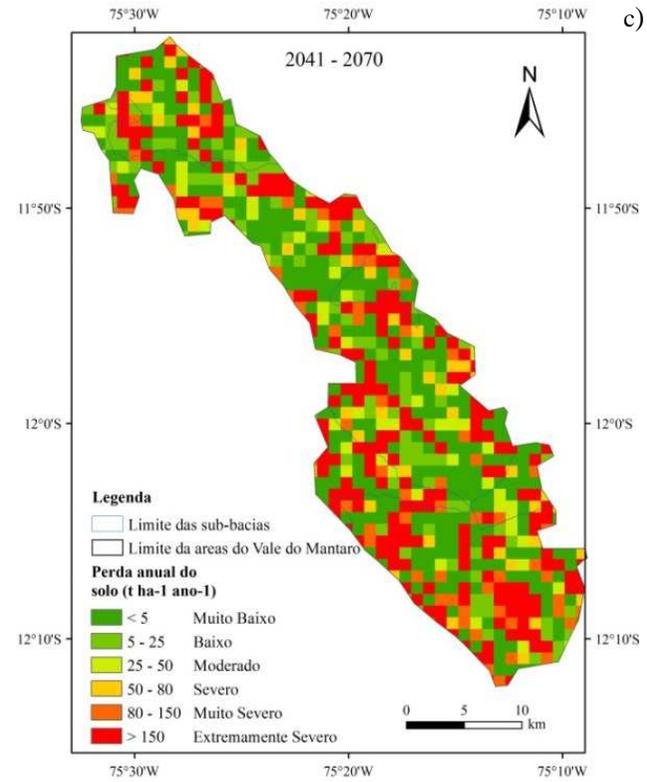
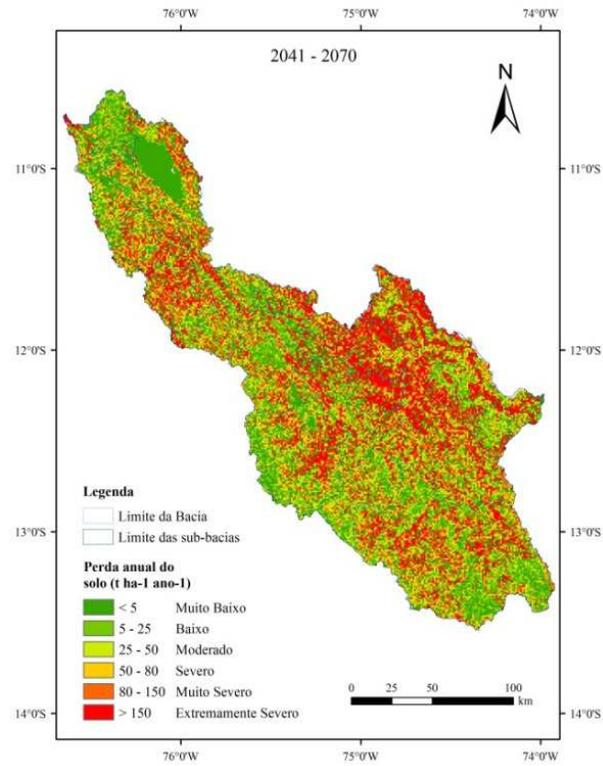
3.3 Análise espacial do risco dos solos à erosão hídrica na BRM, Andes Peruanos

Com auxílio de álgebra de mapas, a RUSLE-3D foi aplicada à BRM considerando-se o comportamento do fator R para o clima presente e para os três “time-slices” futuros (Figura 9). Uma média de 34,4% de áreas com risco à erosão classificado como “Muito Severo” e “Extremamente Severo”, pôde ser observada, demonstrando que a BRM é altamente vulnerável à erosão hídrica do solo para as condições do clima presente. As áreas com maior risco à erosão localizam-se na região Centro-Leste da bacia, a qual apresentou também os maiores valores para o fator R ao longo do século XXI (Figura 4), bem como do fator topográfico LS, além de áreas expressivas com solos descobertos (Figura 8d).





b)



c)

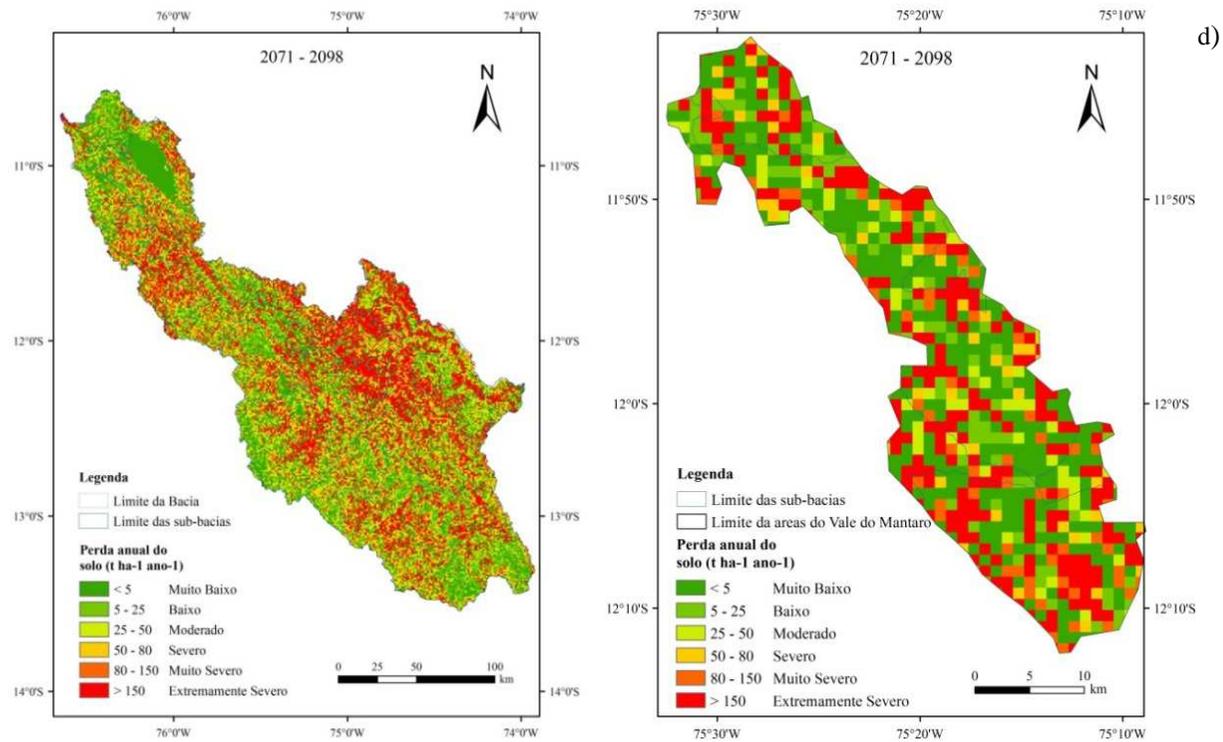
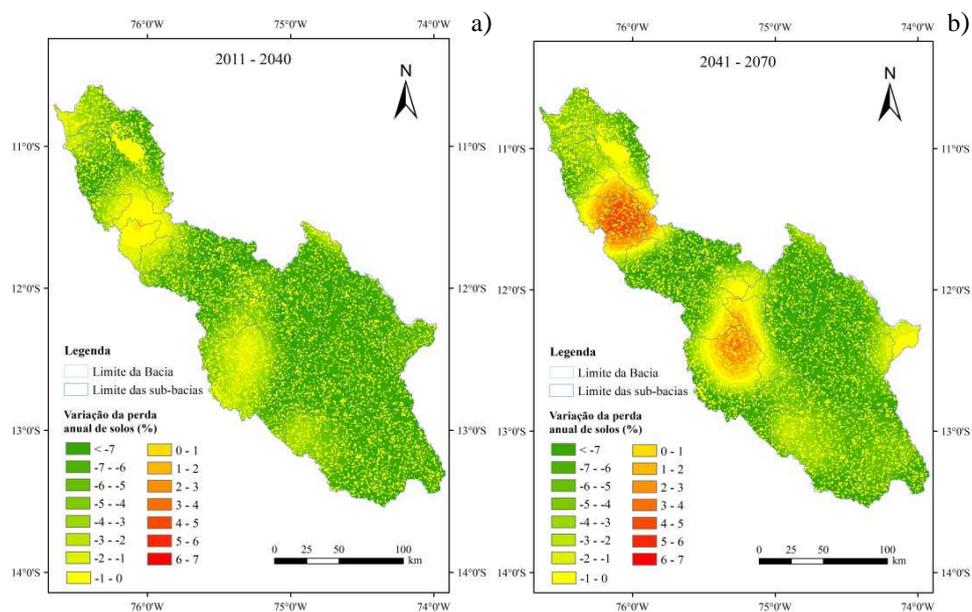


Figura 9 Mapas da distribuição espacial do risco à erosão do solo na BRM e o vale do Mantaro, para o clima presente (a) e para os “times slices” futuros (2011-2040 - b; 2041-2070 - c; 2071-2098 - d)

Observa-se na Figura 10, que foi estimada uma pequena percentagem de áreas que terão aumentado o risco atual à erosão do solo nos dois primeiros *time slices* futuros devido às possíveis mudanças climáticas simuladas para o cenário A1B, em função do período anterior, embora o último *time slice* apresente uma percentagem considerável, avaliando-se incrementos de 0,14%, 8,8% e 29,9% da área total da BRM para os “time slices” futuros de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098 respectivamente. As áreas que terão aumentado o risco atual à erosão estão associadas em grande parte às sub-bacias hidrográficas Vilca, Yauli, Ichu e Atoc Huarco, assim como as partes baixas das sub-bacias Santa Ana, Cunas, Huarpa, Achamayo e Shullcas.



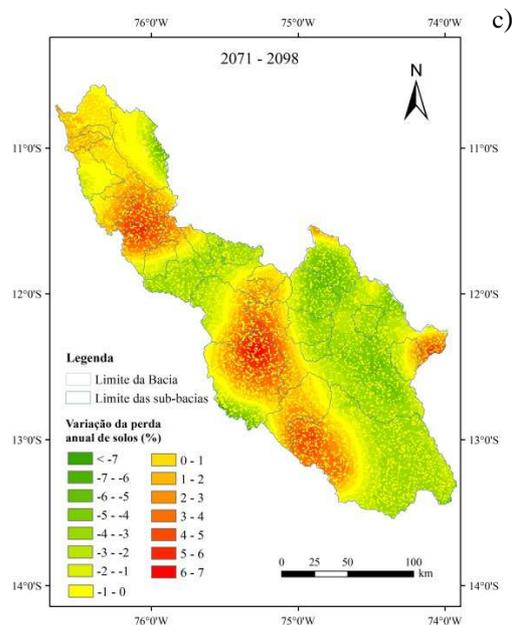
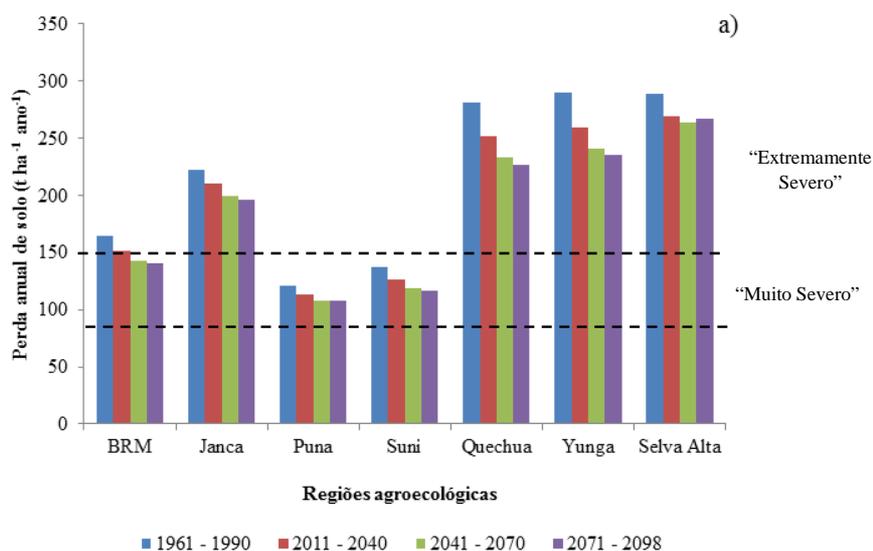
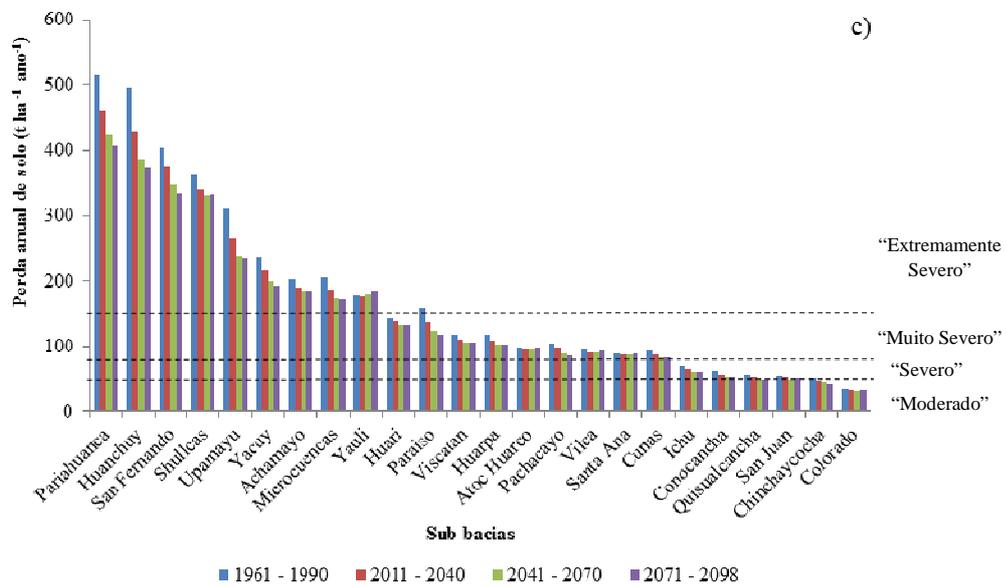
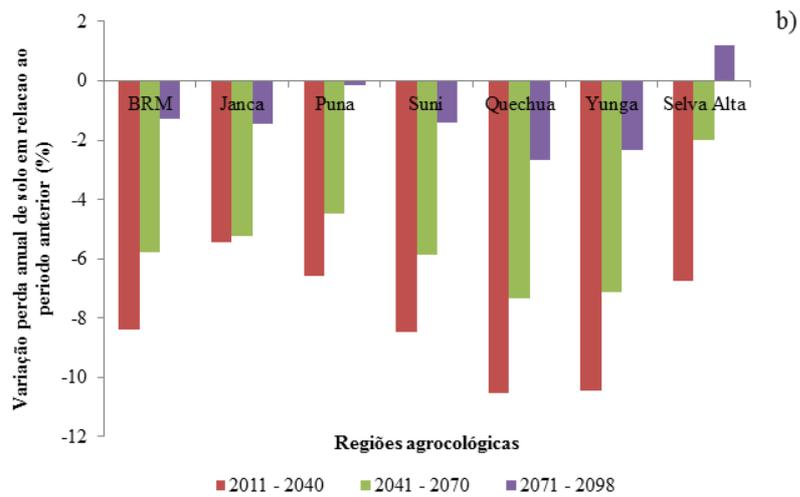


Figura 10 Mapas da distribuição espacial da variação do risco à erosão do solo na BRM em relação ao período anterior, para os “times slices” futuros (2011-2040 - a; 2041-2070 - b; 2071-2098 - c)

Na Figura 11, observa-se uma diminuição contínua da perda média anual de solos até o final do século XXI, em termos médios e em todas as regiões agroecológicas e sub-bacias hidrográficas, com exceção da região Selva Alta cujo último período teve um ligeiro aumento do potencial em relação ao período anterior (Figura 11a, b). Com base na perda média de solo, apresentada na Figura 11, é possível analisar o comportamento do risco do solo à erosão ao longo cenário simulado. A BRM como um todo, para o clima presente, apresenta-se com risco entre as faixas “muito severo” e “extremamente severo”. Contudo, especialmente, há diferenças de comportamento. No contexto de regiões agroecológicas, Janca, Quechua, Yunga e Selva Alta apresentam a classificação de risco “extremamente severo”, enquanto Puna e Suni, um risco

“muito severo”. Analisando em nível de sub-bacia, aquelas localizadas ao norte da BRM (Conocancha, Quisualcancha, e San Juan), e a sub-bacia Ichu na parte Sul, apresentam risco “severo”, sendo as sub-bacias “Colorado” e “Chinchaycocha”, com risco “moderado”. Estas sub-bacias são aquelas para as quais se detectou o menor risco à erosão, tanto atual quanto futuro. Para sub-bacias a Leste e Centro da BRM (Huanchuy, Pariahuanca, San Fernando, Shullcas, Upamayu, Yacuy, Achamayo e Microcuencas), o risco à erosão apresenta-se como “extremamente severo” tanto para o clima presente quanto ao longo do século XXI. Na sub-bacia “Paraíso”, o risco atual é “extremamente severo”, mas ao longo do século, é reduzido para “muito severo”, sendo um efeito da redução do potencial erosivo médio das chuvas na BRM.





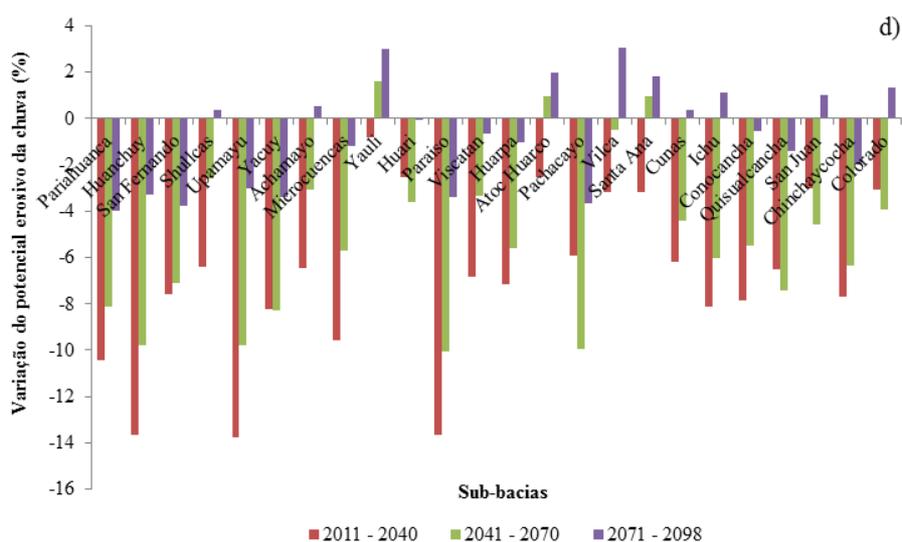


Figura 11 Distribuição da perda anual média de solo para as zonas agroecológicas (a) e sub-bacias (c), e respectivas variações em relação ao “time slice” anterior (b e d)

Observa-se nas Figuras 11b e 11d que, os maiores decréscimos da perda anual de solos em relação ao período anterior, ou seja, entre “time slices” consecutivos, estão vinculados entre o clima presente e o período de 2011-2040, tanto para zonas agroecológicas quanto sub-bacias hidrográficas. Contudo, na região agroecológica Selva Alta, observou-se, no final do cenário simulado, um ligeiro aumento de 1,2% em relação ao período anterior, no valor perda anual de solos que representam $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Observa-se ainda que, em 10 sub-bacias houve variação positiva no último *time slice* (2071-2098) em relação ao anterior (2041-2070), destacando-se Vilca, Yauli, Atoc Huarco, Santa Ana, Colorado, Ichu e San Juan. Para todas as demais sub-bacias, verificou-se redução

consecutiva da perda de solo ao longo do cenário simulado, contudo, sem afetar o risco à erosão.

Os resultados obtidos permitem ter uma visão espacial do comportamento, em escala regional e de sub-bacia hidrográfica, da dinâmica da perda de solos pela erosão hídrica na BRM até o final do século XXI, e seu impacto na classificação do risco do solo à erosão hídrica, baseadas no cenário de mudança climática A1B simuladas pelo GCM HadCM3 com “downscaling” com o modelo regional Eta-CPTEC. Contudo, é importante realçar que os impactos das mudanças climáticas foram analisados somente no contexto do fator ativo da erosão (clima) e que os demais fatores não foram alterados dada a dificuldade de se estruturar cenários realistas de uso do solo ao longo do século XXI, uma vez que inexistem planos diretores e, ou, zoneamentos ecológico-econômicos para a bacia ou mesmo o país. Além disto, a aptidão agrícola dos solos da bacia, em sua maioria, está associada ao pastoreio extensivo e é muito pouco provável que alguma alteração importante em termos espaciais venha a ocorrer na bacia, no contexto de uso do solo. Além deste aspecto, é salutar avaliar que a base de dados pedológica não é, em termos qualitativos, homogênea para toda a BRM, com o Vale Agrícola do rio Mantaro sendo a única região da bacia com alguma informação levantada em nível de campo. Desta forma, o fator K, associado à vulnerabilidade do solo à erosão, não apresenta o grau confiabilidade desejado, uma vez que o mesmo foi conduzido com base em associações de solos e inferidos via tabelas da FAO (1990). Além disto, na própria análise do fator R pode haver considerável erro de estimativa, embora a tendência geral tenha sido captada, ou seja de diminuição do poder erosivo das chuvas. Esta incerteza associada ao fator R está vinculada ao fato de que não há na bacia, base de dados de precipitação vinculada a pluviogramas, o

que permitiria estabelecer alguma relação mais confiável entre a erosividade média da chuva e o coeficiente IMF.

Outros fatores passivos (cobertura do solo e práticas culturais) também sofrerão impacto com as mudanças climáticas, contudo, a identificação e especialmente a mensuração no longo prazo destes fatores é repleta de incertezas. De acordo com Mello et al. (2015), destacam-se as seguintes indagações a respeito: quais os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico no comportamento fisiológico das plantas e seus impactos sobre a cobertura do solo? Quais cenários de uso do solo serão plausíveis para a bacia hidrográfica em estudo sem que haja planos diretos e zoneamentos ecológico-econômicos e, ou agroclimatológicos? Quais os impactos sobre a mineralização da matéria orgânica e biota do solo e seus efeitos sobre a susceptibilidade deste à erosão? Observa-se que a interação destes fatores torna um estudo da natureza deste proposto altamente complexo e incerto, contudo, factível deste que se disponha das informações necessárias.

Mesmo diante dos problemas mencionados, por este trabalho consistir de um esforço pioneiro para a bacia e também para a região dos Andes tropicais, entende-se que o mesmo traz uma contribuição inédita e significativa que pode ser aplicada para nortear o desenvolvimento econômico da BRM ao longo do século XXI.

4 CONCLUSÕES

Em relação ao fator R observou-se que para todos os “time slices”, existe uma tendência de aumento no sentido Leste, embora, na média, estimou-se uma diminuição do fator erosivo da chuva na bacia do rio Mantaro até o final do século XXI, com valores de até 12% menores em relação ao clima presente. Contudo também se apresentou aumentos do potencial erosivo da chuva cujos maiores valores se estimaram nas faixas de < 500 e $500-1.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, passando de 1,8% para 5,7% e de 47,8% para 65,3% da área, respectivamente, desde o clima presente até o final do cenário simulado. Além disto, existe um aumento das áreas com potencial erosivo, em relação ao período anterior, na faixa $1.500-2.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com valores de incremento de 70,8% e 44,7% nos *time slices* 2041-2070 e 2071-2098, respectivamente. Assim, também na faixa que é maior a $2.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, apresenta um ligeiro aumento das áreas desde no final cenário simulado (2071-2098), de 5,5% em relação ao período anterior (2041-2070).

Apresentou-se, na média, uma diminuição na estimacão da perda de solos até o final do século, atingindo valores de 15% em relação ao clima presente. Contudo, apresentaram-se áreas cujos valores de perda anual de solos aumentaram de maneira progressiva até o final do século XXI, na parte Central e Noroeste da bacia do rio Mantaro, calculando que a percentagem de áreas que terão incrementado seu valor de perda anual de solos em relação ao período anterior será de 0,14%, 8,8% e 29,9% para os “time slices” futuros de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098, respectivamente. As áreas com o aumento do potencial erosivo da chuva no final do século XXI abrangem grande parte das sub-bacias hidrográficas Vilca, Yauli, Ichu e Atoc Huarco, assim como as partes baixas das sub-bacias Santa Ana, Cunas, Huarpa, Achamayo e Shullcas.

Finalmente, apresentaram-se áreas com perdas médias anuais de solo consideradas “Muito Severo” e “Extremadamente Severo”, devendo ser consideradas como locais vulneráveis à erosão hídrica juntamente com aquelas que terão incrementado seu valor de perda anual de solo devido às possíveis mudanças climáticas simuladas no cenário A1B pelo modelo regional Eta-CPTEC/HadCM3. Estas áreas que terão incrementado o valor da perda anual de solos se estima que atingirão, na média, valores de $160 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ até o final do século XXI, e que é considerado como risco à perda anual de solos “Extremadamente Severo”.

REFERÊNCIAS

AMÉZQUITA, E. et al. CIAT's strategic research for sustainable land management on the steep hillsides of Latin America. In: DE VRIES, F. W. T. P.; AGUS, F.; KERR, J. (Ed.). **Soil erosion at multiple scales**. Wallingford: CAB International, 1998. p. 121-132.

AMORE, E. et al. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 293, n. 1/4, p. 100-114, 2004.

ASHIAGBOR, G. et al. Modeling soil erosion using RUSLE and GIS tools. **International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG)**, Basingstoke, v. 2, n. 4, p. 7-17, July 2013.

ASTER GDEM VALIDATION TEAM. **ASTER global DEM validation summary report**. Tokyo: METI/ERSDAC; NASA/LPDAAC; USGS, 2009. 28 p.

BAETTIG, M. B.; WILD, M.; IMBODEN, D. M. A climate change index: where climate change may be most prominent in the 21st century. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, n. 1, p. 1-6, Sept. 2007.

BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.

BIESEMANS, J.; MEIRVENNE, M. van; GABRIELS, D. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict longtime average off-site sediment accumulation. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 55, n. 1, p. 35-42, 2000.

BONILLA, C. A.; REYES, J. L.; MAGRI, A. Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS Framework, Central Chile. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Santiago de Chile, v. 70, n. 1, p. 159-169, 2010.

DATTA, P. S.; SCHACK-KIRCHNER, H. Erosion relevant topographical parameters derived from different DEMs: a comparative study from the Indian Lesser Himalayas. **Remote Sensing**, Florence, v. 2, n. 8, p. 1941-1961, 2010.

DE KORT, A. **Soil erosion assessment in the dryland areas of Bolivia using the RUSLE 3D model**. 2013. 61 p. Dissertation (Master in Soil Physics and Land Management) - Wageningen University, Wageningen, 2013.

DELGADO, F.; VÁSQUEZ, L. **Modelo índice de productividad aplicado a sistemas para la evaluación y clasificación de tierras agrícolas y prioridades de conservación de suelos en áreas montañosas tropicales: un enfoque metodológico**. Mérida: Cidiat, 1997. 16 p. (Serie Suelos y Clima, SC-73).

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their applications for predicting ephemeral gullies. **International Journal of Geographical Information System**, London, v. 10, n. 3, p. 311-331, 1996a.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996b.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Hydrosedimentologic disturbance index applied to watersheds of Minas Gerais state. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 1, p. 61-67, jan./fev. 2014.

EFE, R.; EKINCI, D.; CUREBEL, I. Erosion analysis of Findikl creek catchment (NW of Turkey) using GIS based on RUSLE (3d) method. **Journal of Applied Sciences**, Madison, v. 8, n. 1, p. 49-58, 2008.

FARRISH, K. W.; ADAMS, J. C.; THOMPSON, C. V. Soil conservation practices on clear-cut forestlands in Louisiana. **Journal of Soil and Water Conservation**, Washington, v. 48, n. 1/4, p. 136-139, 1993.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **La erosión potencial de los suelos en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay**. Santiago de Chile, 1993. 50 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **El estado mundial de la agricultura y la alimentación**. Rome, 1996. 330 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Guidelines for soil descriptions**. Rome, 1990. 69 p.

FORKUOR, G.; MAATHUIS, B. Comparison of SRTM and ASTER derived digital elevation models over two regions in Ghana: implications for hydrological and environmental modeling. In: _____. **Studies on environmental and applied geomorphology**. Rijeka: InTech, 2012. p. 219-240.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D.; ONSTAND, C. A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 20, n. 4, p. 683-687, 1977.

GERMAN ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL CHANGE. **World in transition: the threat to soils: annual report**. Bonn, 1994. 252 p.

HICKEY, R.; SMITH, A.; JANKOWSKI, P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. **Computers, Environmental and Urban Systems**, New York, v. 18, n. 5, p. 365-380, 1994.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro, bajo la visión del Cambio Climático**. Lima, 2005a. 90 p.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro**. Lima, 2005b. 104 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA. **Perú:** evolución de los indicadores de empleo e ingresos por departamentos, 2001-2010. Lima, 2011. 300 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC special report:** emissions scenarios: a special report of IPCC Working Group III. Geneva, 2000. 21 p.

JAPAN AGRICULTURAL LAND DEVELOPMENT AGENCY. **Estudio de validación de desarrollo rural participativo basado en la conservación de suelos y aguas.** Sucre, 2003. 46 p.

KOULI, M.; SOUPIO, P.; VALLIANATOS, F. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. **Environmental Geology**, Berlin, v. 57, n. 3, p. 483-497, 2009.

LARIOS, M. B. **Resumo histórico de modelagem da erosão.** Disponível em: <<http://www.drenagem.uf.br/06erosão-08-modelagemRest.htm>>. Acesso em: 4 set. 2014.

LI, W.; FAN, W.; MAO, X. Soil erosion research based on USLE in great Khingan. **Advance Journal of Food Science and Technology**, New York, v. 6, n. 3, p. 362-367, 2014.

LU, D. et al. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. **Land Degradation & Development**, New York, v. 15, n. 5, p. 499-512, 2004.

MCCOOL, D. K. et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of ASAE**, Saint Joseph, v. 30, n. 5, p. 1387-1396, 1987.

MELLO, C. R. et al. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB)

headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 73, p. 1-16, Jan. 2015.

MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202/203, p. 88-102, 2013.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, Oxfordshire, v. 18, n. 8/9, p. 761-799, 2003.

MILLWARD, A. A.; MERSEY, E. J. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. **Catena**, Amsterdam, v. 38, n. 2, p. 109-129, 1999.

MITASOVA, H. et al. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, London, v. 10, n. 5, p. 629-641, 1996.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 5, p. 1294-1298, 1986.

MOORE, I. D.; WILSON, J. P. Length slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 47, n. 5, p. 423-428, 1992.

MORALES, C. F. et al. Losses of water and soil under different cultivation systems in two Peruvian locations: Santa Ana (Central Highlands) and San Ramon (Central High Jungle). In: LAL, R.; GREENLAND, D. (Ed.). **Soil physical properties and crop production in the tropics**. Chichester: Wiley, 1977. p. 489-499.

NEARING, M. A. Potential changes in rainfall erosivity in the U.S. with climate change during the 21st century. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 56, n. 3, p. 229-232, 2001.

OLIVEIRA, V. A. et al. Soil erosion vulnerability in the Verde River basin, southern Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 3, p. 262-269, maio/jun. 2014.

OLMOS, A.; JÉGAT, H. Análisis de la erosión hídrica mediante un modelo distribuido (CALSITE) y un modelo agregado (SWRRB) aplicación a la Cuenca del Río Grande (Venezuela). **Ingeniería del Agua**, Caracas, v. 8, n. 1, p. 1-27, mar. 2001.

PARK, S. et al. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 399, n. 3/4, p. 263-273, 2011.

PELTON, J.; FRAZIER, E.; PICKILINGIS, E. **Calculating Slope Length factor (LS) in the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**.

Disponível em: <http://gis4geomorphology.com/wp-content/uploads/2014/05/LS-Factor-in-RUSLE-with-ArcGIS-10.x_Pelton_Frazier_Pickilingis_2014.docx>. Acesso em: 12 jul. 2014.

PERU. Ministerio de Agricultura. **Diagnóstico de los Valles Mantaro y Tarma**: proyecto especial programa nacional de pequeñas y medianas irrigaciones: plan MERIS 1ra etapa. Lima, 1978. 209 p.

RENARD, K. G. et al. **Predicting soil erosion by Water**: a guide to conservation planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: USDA, 2007. 384 p. (Agricultural Handbook, 703).

RENARD, K. G.; FREIMUND, J. R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the Revised USLE. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 157, n. 1/4, p. 287-306, May 1994.

ROMERO, C. C. L. **A multi-scale approach for erosion assessment in the Andes**. 2005. 146 p. Thesis (Ph.D. in Production Ecology) - Wageningen University, Wageningen, 2005.

SAAVEDRA, D. **Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques: a case study in Cochabamba, Bolivia.** 2005. 244 p. Thesis (Ph.D. in Water Resources) - Wageningen University, Wageningen, 2005.

SEGURA, C. et al. Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 69, n. 2, p. 171-181, 2014.

SHI, Z. H. et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China. **Catena**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 33-48, Jan. 2004.

SONDER, K. et al. Erosion control and prediction in cassava based cropping systems in the southern Andean region of Colombia. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANIZATION CONFERENCE, 12., 2002, Beijing. **Proceedings...** Beijing: ISCO, 2002. p. 1-7.

TANG, J. L. et al. Rainfall and tillage impacts on soil erosion of sloping cropland with subtropical monsoon climate: a case study in hilly purple soil area, China. **Journal of Mountain Science**, New York, v. 12, n. 1, p. 134-144, 2015.

TERRANOVA, O. et al. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). **Geomorphology**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 228-245, 2009.

TIWARI, A. K.; RISSE, L. M.; NEARING, M. A. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 43, n. 5, p. 1129-1135, Sept./Oct. 2000.

VRIELING, A.; STERK, G.; DE JONG, S. M. Satellite: based estimation of rainfall erosivity for Africa. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 395, n. 3/4, p. 235-241, 2010.

WANG, W.; YANG, X.; YAO, T. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 26, n. 2, p. 213-225, May 2012.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion--a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook, 537).

ZHOU, P. et al. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. **Catena**, Amsterdam, v. 75, n. 3, p. 319-325, Nov. 2008.